

Обратимые изменения коэффициента отражения волоконных брэгговских решеток разных типов

П.И.Гнусин, С.А.Васильев, О.И.Медведков, Е.М.Дианов

Исследовались обратимые изменения коэффициента отражения волоконных брэгговских решеток разных типов, вызываемые деформацией и изменением температуры. Полученные результаты показали, что деформационная чувствительность коэффициента отражения брэгговских решеток типов I и Ia обусловлена главным образом фотоиндуцированным уменьшением упругооптического коэффициента r_{12} стекла сердцевинки, а температурная чувствительность – увеличением термооптического коэффициента. УФ облучение световодов, содержащих молекулярный водород, не приводит к заметному изменению указанных материальных коэффициентов. Также представлены и проанализированы зависимости обратимых изменений от дозы УФ облучения и концентрации германия в сердцевине волоконного световода.

Ключевые слова: волоконная брэгговская решетка, коэффициент отражения, температурные и деформационные изменения.

1. Введение

Фотоиндуцированные волоконные брэгговские решетки (ВБР) показателя преломления (ПП) в настоящее время широко используются в различных приложениях волоконной оптики – это системы связи, волоконные лазеры, датчики физических величин и др. [1, 2]. Несмотря на растущее число применений ВБР, физические механизмы фотоиндуцированного изменения ПП, обуславливающие возможность создания таких решеток, остаются во многом неясными даже для наиболее распространенных волоконных световодов (ВС), легированных диоксидом германия.

В настоящее время известно несколько типов фотоиндуцированной германосиликатных ВС, отличающихся условиями формирования, динамиками записи и отжига, а также другими свойствами фотоиндуцированных ВБР (см. работу [3] и ссылки в ней). Тип ВБР определяется в соответствии с преобладающим в ней типом фотоиндуцированности. Фотоиндуцированность типа I характеризуется монотонным ростом ПП стекла сердцевинки при УФ облучении ВС. При записи ВБР в световодах с высокой концентрацией GeO_2 наблюдается немонотонное поведение амплитуды модуляции наведенного ПП, вызванное проявлением фотоиндуцированности типа Ia, дающей отрицательный вклад в наведенный ПП. При облучении ВС импульсами с высокой плотностью энергии (свыше 1 Дж/см²) происходит локальное плавление стекла сердцевинки, что является причиной формирования ВБР типа II. Для ВС, подвергнутых низкотемпературной водородной обработке, характерна фотоиндуцированность типа I(H₂), при которой наведенный ПП при-

мерно на порядок выше, чем в решетках типа I. Фотоиндуцированность типа Ia наблюдается в ВС, легированных одновременно германием и бором, после водородной обработки при больших дозах УФ облучения.

Основными спектральными характеристиками однородной ВБР (т. е. ВБР с постоянной по длине амплитудой и периодом модуляции ПП) являются резонансная длина волны λ_{Br} и коэффициент отражения R_{Br} на этой длине волны. Резонансная длина волны ВБР в первом порядке дифракции определяется выражением

$$\lambda_{\text{Br}} = 2n_{\text{eff}}L, \quad (1)$$

где n_{eff} – эффективный ПП основной моды ВС с учетом его изменения вследствие УФ облучения; L – период модуляции ПП. Коэффициент отражения однородной ВБР на резонансной длине волны является функцией геометрической длины ВБР L и коэффициента связи k :

$$R_{\text{Br}} = \tanh^2(kL). \quad (2)$$

Здесь $k = \pi\eta\Delta n_{\text{mod}}/\lambda_{\text{Br}}$ – коэффициент связи волн на единицу длины ВБР; Δn_{mod} – амплитуда модуляции ПП в первом порядке дифракции; η – доля мощности основной моды в сердцевине ВС (как правило, фотоиндуцированное изменение ПП происходит в стекле сердцевинки, имеющем значительный коэффициент поглощения на записываемой длине волны).

Величины λ_{Br} и R_{Br} чувствительны к внешним воздействиям (изменение температуры, деформация, УФ облучение и т. д.), изменяющим ПП стекла или период ВБР. Изменение λ_{Br} и R_{Br} может быть как обратимым (исходное значение восстанавливается при снятии воздействия), так и необратимым. Необратимое изменение параметров ВБР происходит, например, при нагреве решетки до высоких температур, приводящих к отжигу наведенного ПП [3], или при ее УФ облучении, которое изменяет ПП в сердцевине ВС. Последнее обстоятельство используется

П.И.Гнусин, С.А.Васильев, О.И.Медведков, Е.М.Дианов. Научный центр волоконной оптики РАН, Россия, 119333 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: sav@fo.gpi.ru

Поступила в редакцию 25 июня 2010 г.

непосредственно при записи решеток, а также для модификации их спектральных характеристик путем последующего УФ облучения.

При анализе обратимых изменений параметров ВБР обычно рассматривается изменение λ_{Br} , что находит применение при создании перестраиваемых спектральных фильтров [4] и датчиков физических величин [5].

Температурная чувствительность резонансной длины волны ВБР с точностью до членов порядка Δ (относительная разность ПП сердцевины и оболочки) имеет вид

$$K_T = \frac{1}{\lambda_{Br}} \frac{d\lambda_{Br}}{dT} = \frac{1}{n_{eff}} \frac{dn_{eff}}{dT} + \alpha, \quad (3)$$

где α – коэффициент теплового расширения (КТР) кварцевого стекла. В силу низкого КТР основной вклад ($\sim 95\%$) в изменение λ_{Br} вносит термооптический коэффициент кварцевого стекла dn/dT [5]. У ВБР с разными типами фоточувствительности [6] величина K_T варьируется в довольно широких пределах. Так, в работе [7] показано, что у ВС, легированного германием и бором, в диапазоне температур $0-80^\circ\text{C}$ наибольшая температурная чувствительность наблюдается для ВБР типа Па ($K_T \sim (6.4 - 6.9) \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$), а наименьшая – для ВБР типа Ia ($K_T \sim (4.5 - 5.1) \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$).

Чувствительность λ_{Br} к деформации ВБР выражается (как и (3) с точностью до членов порядка Δ) соотношением

$$K_\varepsilon = \frac{1}{\lambda_{Br}} \frac{d\lambda_{Br}}{d\varepsilon} = 1 - \frac{n_{eff}^2}{2} p, \quad (4)$$

где

$$p = [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})]; \quad (5)$$

p_{11} и p_{12} – коэффициенты Поккельса упругооптического тензора; ν – коэффициент Пуассона кварцевого стекла; ε – относительное удлинение. Основной вклад в K_ε вносит изменение периода ВБР, тогда как изменение ПП за счет упругооптического эффекта относительно невелико ($\sim 22\%$) [5]. Последнее обстоятельство, по-видимому, объясняет тот факт, что значения K_ε для ВБР разных типов совпадают с хорошей точностью ($\sim 1\%$) [7].

Обратимое изменение коэффициента отражения ВБР R_{Br} значительно меньше изучено. В работе [8] было показано, что при нагреве решетки типа I R_{Br} увеличивается, а при нагреве ВБР типа Па уменьшается. Примечательно, что для решеток типа I(H_2), записанных в ВС после низкотемпературной обработки молекулярным водородом, коэффициент отражения практически не зависит от температуры. Изменение R_{Br} в ВБР без водородной обработки было объяснено изменением КТР облученных областей стекла, который зависит от типа фоточувствительности. По мнению авторов [8], при УФ облучении КТР германосиликатного стекла сердцевины уменьшается для ВБР типа I и увеличивается для ВБР типа Па.

В работах [9, 10] исследовалось обратимое изменение коэффициента отражения ВБР при ее продольной деформации. Обнаруженное значительное (в 1.5 раза) увеличение амплитуды модуляции ПП при сжатии ВБР на 5% было объяснено фотоиндуцированным увеличением (примерно на 1%) упругооптического коэффициента материала сердцевины ВС.

В настоящей работе представлены новые данные об обратимом изменении амплитуды модуляции наведенного ПП при нагреве и деформации ВБР в решетках типов I, Па и I(H_2).

2. Экспериментальные образцы

ВБР для исследований записывались в одномодовых ВС, основные параметры которых приведены в табл.1. Все световоды, за исключением световода А (стандартный телекоммуникационный световод SMF-28), были изготовлены в НЦВО РАН из заготовок, полученных методом MCVD в Институте химии высокочистых веществ РАН. Световоды были легированы диоксидом германия различной концентрации и не содержали других примесей.

Решетки записывались непрерывным излучением второй гармоники Ar^+ -лазера ($\lambda_{UV} = 244 \text{ нм}$) в схеме, использующей интерферометр Ллойда [11]. При записи ВБР средняя плотность мощности УФ излучения составляла $\sim 40 \text{ Вт/см}^2$, причем контраст интерференционной картины был близок к единице. Резонансные длины волн ВБР, использовавшихся в экспериментах, находились в диапазоне $1550 \pm 10 \text{ нм}$. Длина решеток, записанных в ВС без водородной обработки, составляла 3–4 мкм, а длина ВБР, записанных после обработки ВС молекулярным водородом (100 атм, 20 ч, 100°C), лишь 1–2 мкм.

После завершения процесса записи ВБР выдерживались в печи при температуре 150°C в течение 10 ч для вывода оставшегося молекулярного водорода для ВБР типа I(H_2), а также с тем, чтобы исключить влияние нестабильной компоненты индуцированного изменения ПП при проведении температурных измерений.

3. Обратимое изменение коэффициента отражения ВБР при деформации

Продольная растягивающая деформация на участке ВС, содержащем ВБР, создавалась при помощи двух цилиндров диаметром 40 мм. На боковой поверхности каждого из них фиксировалось несколько витков исследуемого образца. Растягивающее усилие создавалось путем приложения вращающего момента к одному из цилиндров. Деформация ВБР вычислялась по измеренному сдвигу λ_{Br} с помощью (4), при этом полагалось, что $K_\varepsilon = 0.787$.

В экспериментах измерялись резонансная длина волны λ_{Br} и коэффициент пропускания T_{Br} на этой длине волны при различных деформациях ВБР. Спектры пропускания регистрировались оптическим спектроанализатором ANDO AQ-6317 при спектральном разрешении 0.02 нм. Для измерений использовалось деполаризованное излучение широкополосного эрбиевого волоконного

Табл.1. Характеристики волоконных световодов (λ_{cr} – длина волны отсечки первой высшей моды, Δ – относительная разность ПП сердцевины и оболочки).

Световод	Концентрация GeO_2 (мол.%)	Δ	λ_{cr} (нм)
A	3.5	0.0038	1250
B	5	0.0055	960
C	14.5	0.0124	1010
D	24	0.0234	980
E	33	0.0315	1200

источника. Погрешность определения значений λ_{Br} и T_{Br} по измеренным экспериментальным данным составила 0.01 нм и 0.5 % соответственно. Коэффициент отражения ВБР вычислялся в соответствии с соотношением $R_{Br} = 1 - T_{Br}$.

На рис.1 приведены спектры пропускания ВБР трех исследуемых типов, записанных в световоде E, измеренные при комнатной температуре без деформации, а также при растягивающей деформации 5000 $\mu\epsilon$ ($\mu\epsilon$ – относительное удлинение, равное 10^{-6}). При деформации ВБР типа I произошло увеличение коэффициента отражения с 46.5 % до 50.7 % (рис.1,а), в то время как для ВБР типа IIа при этой же деформации R_{Br} уменьшился с 51.3 % до 46.2 % (рис.1,б). Изменение коэффициента отражения ВБР, записанной в световоде после водородной обработки, при указанном воздействии было относительно невелико: примерно –0.5 % (рис.1,в).

Столь значительное изменение коэффициента отражения при деформации, а также разный знак этого изменения для ВБР типов I и IIа, насколько нам известно, наблюдаются впервые. Эти изменения следует принимать во внимание при практическом использовании ВБР указанных типов в тех случаях, когда значение коэффициента отражения является критичным параметром. Например, это может быть важным: при разработке перестраиваемых фильтров на основе ВБР; для волоконных лазеров, длина волны генерации которых изменяется пу-

тем деформации ВБР; при создании датчиков физических величин, регистрирующих интенсивность излучения, отраженного от ВБР, подвергающейся деформации.

При нелинейной зависимости фотоиндуцированного ПП от дозы облучения $\Delta n_{ind}(D)$, характерной для записи волоконных решеток в германосиликатных ВС, пространственное распределение $\Delta n_{ind}(z)$ вдоль оси ВС для однородной ВБР представляется в виде ряда Фурье:

$$\Delta n_{ind}(z) = \overline{\Delta n} + \sum_{m=1}^{\infty} A_m \cos\left(\frac{2\pi m}{\Lambda} z\right), \quad (6)$$

где $\overline{\Delta n}$ – среднее значение фотоиндуцированного ПП в сердцевине ВС; m – порядок дифракции. Здесь предполагается, что распределение интенсивности УФ излучения вдоль оси ВС имеет вид

$$I(z) = \frac{I_{max}}{2} \left[1 + \cos\left(\frac{2\pi}{\Lambda} z\right) \right], \quad (7)$$

где I_{max} – интенсивность УФ излучения в максимумах интерференционной картины.

В общем случае знакопеременный коэффициент ряда (6) при $m = 1$ (именно первый порядок дифракции используется в большинстве случаев, в том числе и в настоящей работе) связан с Δn_{mod} соотношением $|A_1| = \Delta n_{mod}$, причем для исследованных нами ВБР типов I и I(H₂) $A_1 > 0$, а для ВБР типа IIа $A_1 < 0$.

При изменении температуры и деформации изменяется длина ВБР, в то время как количество штрихов решетки N остается неизменным. В связи с этим, для анализа изменения коэффициента отражения ВБР разных типов при таких воздействиях удобно ввести безразмерный и знакопеременный параметр связи ВБР:

$$\Omega = \frac{\pi \eta A_1}{2 n_{eff}}, \quad (8)$$

модуль которого равен коэффициенту связи ВБР, отношению к одному штриху решетки. С использованием этого параметра коэффициент отражения решетки

$$R_{Br} = \tanh^2(|\Omega|N). \quad (9)$$

По нашему мнению, наблюдаемые при деформации изменения R_{Br} в решетках типов I и IIа (рис.1) имеют одну и ту же физическую природу, а разный знак этих изменений объясняется тем, что в ВБР типа I фотоиндуцированное изменение ПП положительно, в то время как в ВБР типа IIа оно отрицательно [12]. Именно общность исследуемого явления была отражена нами введением специального параметра Ω , обратимое изменение которого $\Delta\Omega$ имеет одинаковый (положительный) знак в решетках указанных типов.

На рис.2 представлены зависимости относительного изменения параметра Ω от деформации для ВБР, приведенных на рис.1 (Ω_0 – параметр связи при нулевой деформации и начальной температуре ВБР). Видно, что экспериментальные зависимости хорошо аппроксимируются прямыми линиями. Это свидетельствует о линейном характере обратимых изменений в исследованном диапазоне деформации для всех приведенных типов решеток. Так, для ВБР типа I значение $(1/\Omega_0)(d\Omega/d\epsilon)$ составило $(0.135 \pm 0.005) \times 10^{-4} \mu\epsilon^{-1}$ ($\Omega_0 = (1.13 \pm 0.02) \times 10^{-4}$), для ВБР типа IIа – $(-0.128 \pm 0.005) \times 10^{-4} \mu\epsilon^{-1}$

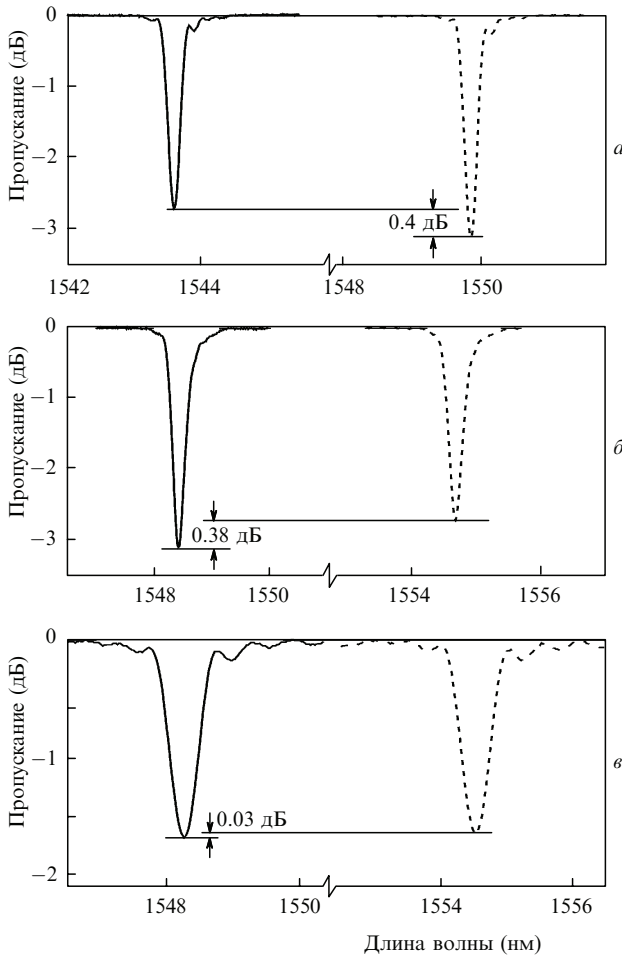


Рис.1. Спектры пропускания ВБР типов I (а), IIа (б) и I(H₂) (в) при деформации, равной нулю (сплошная линия) и 5000 $\mu\epsilon$ (штриховая линия).

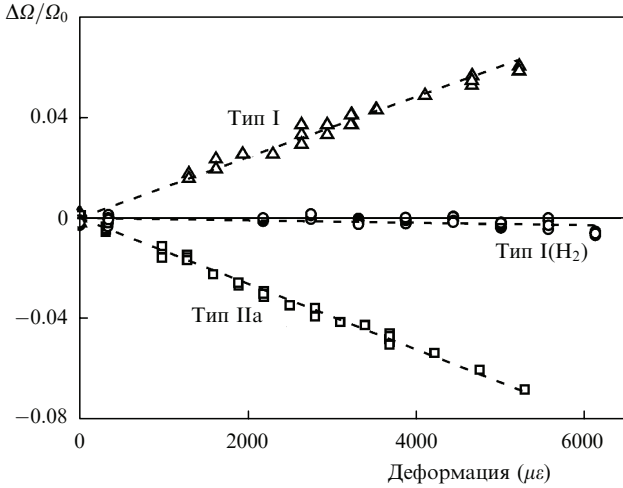


Рис.2. Относительное изменение параметра Ω при деформации ВБР разных типов.

($\Omega_0 = (-1.43 \pm 0.02) \times 10^{-4}$), тогда как для ВБР типа I(H₂) оно равнялось $(-0.016 \pm 0.005) \times 10^{-4} \mu\text{e}^{-1}$ ($\Omega_0 = (2.00 \pm 0.03) \times 10^{-4}$).

Представим деформационную чувствительность Ω в виде суммы вкладов разных физических механизмов:

$$\frac{d\Omega}{d\varepsilon} = \left(\frac{d\Omega}{d\varepsilon}\right)_W + \left(\frac{d\Omega}{d\varepsilon}\right)_S + \left(\frac{d\Omega}{d\varepsilon}\right)_{Ph} \quad (10)$$

Первый член в правой части уравнения (10) выражает изменение Ω при деформации ВБР, происходящее из-за модификации волноводных характеристик самого ВС при его деформации, и не связан с параметрами решетки. Второй член представляет собой вклад изменения амплитуды модуляции ПП Δn_{mod} в предположении, что упругие и упругооптические коэффициенты стекла одинаковы для облученных и необлученных участков ВБР. Наконец, третьим членом выражен вклад модификации Δn_{mod} , возникающей вследствие фотоиндуцированного изменения указанных материальных коэффициентов стекла сердцевины ВС.

Для оценки вклада разных членов выражения (10) представим ВБР в виде чередующихся (облученных и необлученных) участков равной длины $L/2$, полагая дозу облучения в пределах облученного участка постоянной. При рассмотрении относительной деформации области сердцевины в облученных и необлученных участках будем пренебрегать влиянием оболочки световода. Тогда при деформации ВБР выражение для первых двух членов (10) можно представить в виде

$$\frac{1}{\Omega_0} \left[\left(\frac{d\Omega}{d\varepsilon}\right)_W + \left(\frac{d\Omega}{d\varepsilon}\right)_S \right] \approx -\frac{2 + 2\nu + V^2 n_{eff}^2 p}{V^2 - 1}, \quad (11)$$

где V – нормированная частота на резонансной длине волны ВБР.

Для использованного нами световода E правая часть выражения (11) с учетом коэффициентов ν и p кварцевого стекла [13] численно равна $-0.016 \times 10^{-4} \mu\text{e}^{-1}$, что хорошо согласуется с деформационной чувствительностью параметра Ω для ВБР типа I(H₂) (рис.2). Таким образом, можно констатировать, что в ВБР типа I(H₂) изменение коэффициента отражения при деформации определяется первыми двумя членами выражения (10), то есть при

записи ВБР этого типа не происходит значительного изменения материальных коэффициентов стекла сердцевины. Для дополнительной проверки этого вывода были исследованы еще две ВБР, записанные в этом же световоде при больших дозах УФ облучения. Полученная зависимость производной $d\Omega/d\varepsilon$ от Ω для трех ВБР типа I(H₂) представлена на рис.3. Эта зависимость с хорошей точностью аппроксимируется прямой, проходящей через нуль, причем угол наклона прямой ($-0.0155 \times 10^{-4} \mu\text{e}^{-1}$) также хорошо совпадает с оценкой (11).

Напротив, в ВБР типов I и IIa значение деформационной чувствительности значительно отличается от приведенной оценки (рис.2), что свидетельствует об изменении материальных коэффициентов стекла сердцевины при УФ облучении. С учетом указанных выше допущений выражение для третьего члена в правой части уравнения (10) можно записать следующим образом:

$$\left(\frac{d\Omega}{d\varepsilon}\right)_{Ph} \approx \frac{\pi\eta}{2} p \left(\frac{\delta E}{E} - \frac{\delta p}{p}\right), \quad (12)$$

где δE и δp – фотоиндуцированные изменения модуля Юнга E и коэффициента p соответственно.

Уравнение (12) показывает, что наблюдаемое положительное изменение параметра Ω при деформации ВБР типов I и IIa может быть следствием фотоиндуцированного увеличения модуля Юнга либо уменьшения коэффициента p . Важно отметить, что указанное поведение E и p ($\delta E > 0, \delta p < 0$) должно быть неизменным при дозах, соответствующих ВБР обоих типов. Так, в работе [14] обнаружено, что при импульсном УФ облучении объемных образцов стекла с концентрацией GeO₂ ~ 10 мол. % происходит значительное изменение модуля Юнга, имеющее немонотонный характер (E увеличивается в начале облучения и уменьшается при дальнейшем увеличении дозы). Как видно, такое немонотонное поведение δE не позволяет объяснить наблюдаемые нами закономерности.

Мы предполагаем, что основной причиной изменения параметра Ω и, как следствие, R_{Br} при деформации ВБР является фотоиндуцированное уменьшение p . Отметим, что величина этого коэффициента в основном определяется поперечной компонентой упругооптического тензора p_{12} (5). Так, фотоиндуцированное уменьшение p_{12} на 1 % при неизменном E позволяет объяснить приведенные выше результаты для ВБР типов I и IIa. Как видно из

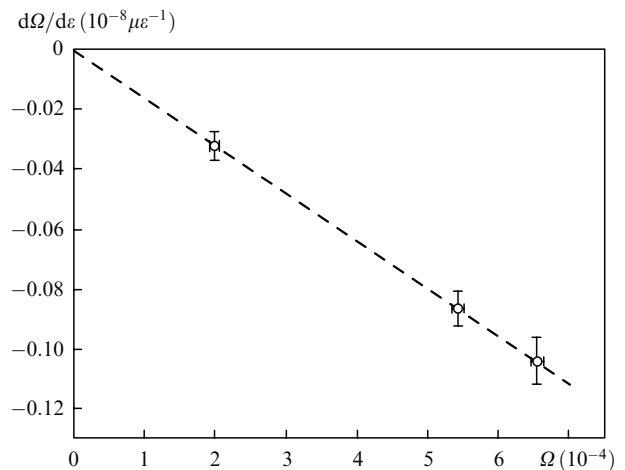


Рис.3. Зависимость $d\Omega/d\varepsilon$ от Ω для ВБР типа I(H₂).

соотношения (4), такое небольшое изменение упругооптического коэффициента не может привести к заметному изменению $d\lambda_{Br}/d\varepsilon$, что хорошо согласуется с экспериментальными результатами, например, работы [7].

4. Обратимое изменение коэффициента отражения ВБР при изменении температуры

Для исследования обратимого изменения коэффициента отражения ВБР от температуры использовалась автоматизированная установка [15]. Исследуемая ВБР в недеформированном состоянии помещалась в печь, температура которой возрастала с постоянной скоростью $0.1\text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$ от 25 до $145\text{ }^\circ\text{C}$. В процессе нагрева производилось измерение спектров пропускания ВБР. Время измерения каждого спектра составляло ~ 12 с.

На рис.4 представлены спектры пропускания ВБР типов I, Па и I(H₂), измеренные при комнатной и повышенной температурах. Примечательно, что термоиндуцированные изменения R_{Br} качественно согласуются с изменениями, вызванными растягивающей деформацией этих решеток (рис.1). Так, при указанном нагреве коэффициент отражения для ВБР типа I увеличился на 3.1 %, а для ВБР типа Па уменьшился на 3.0 %. Коэффициент отражения ВБР типа I(H₂) не изменился в пределах погрешности эксперимента.

На рис.5 показано относительное изменение параметра связи Ω для этих ВБР в исследованном диапазоне изменения температуры. Как и при деформации ВБР, из-

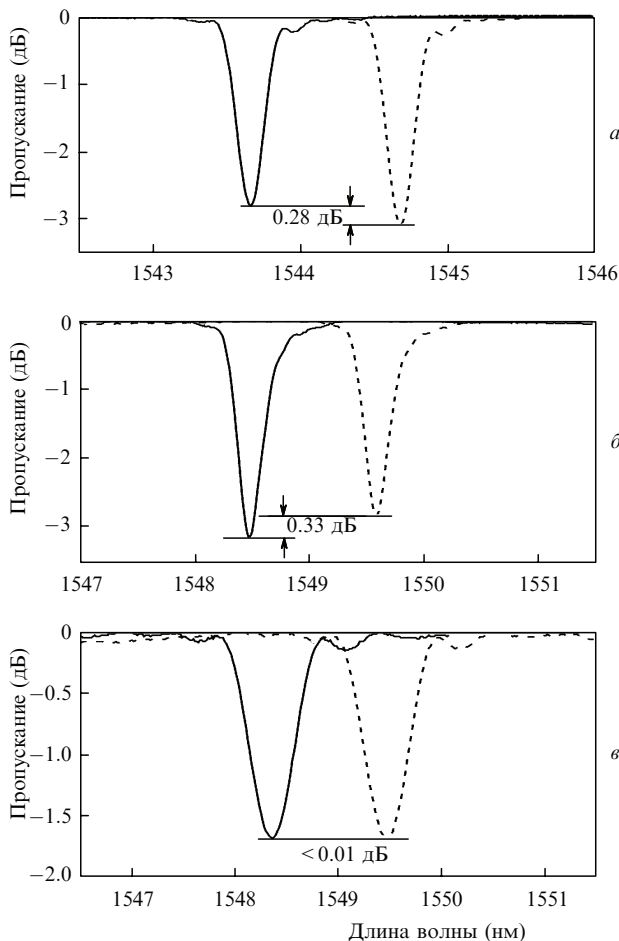


Рис.4. Спектры пропускания ВБР типов I (а), Па (б) и I(H₂) (в) при температурах $25\text{ }^\circ\text{C}$ (сплошная линия) и $125\text{ }^\circ\text{C}$ (штриховая линия).

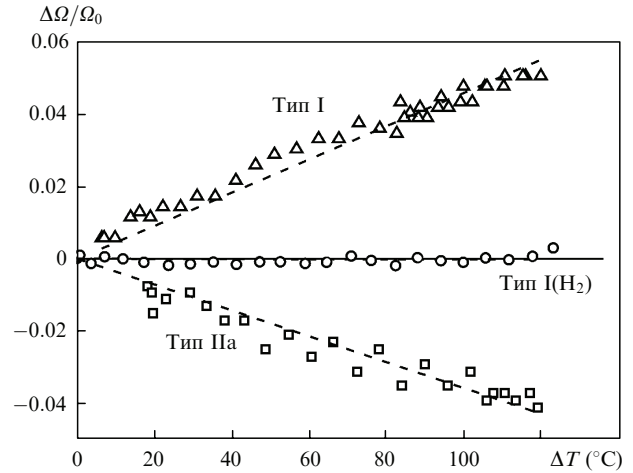


Рис.5. Относительное изменение параметра Ω при изменении температуры ВБР разных типов.

менение Ω , вызванное нагревом, линейно для решеток всех типов. Для ВБР типа I величина $(1/\Omega_0)(d\Omega/dT)$ составила $(6.6 \pm 0.2) \times 10^{-4}\text{ K}^{-1}$, для ВБР типа Па – $(6.1 \pm 0.2) \times 10^{-4}\text{ K}^{-1}$, а для ВБР типа I(H₂) оно меньше, чем 10^{-5} K^{-1} (погрешности измерений). Заметим, что полученные результаты хорошо согласуются с данными [8].

По аналогии с (10) представим $d\Omega/dT$ в виде суммы вкладов различных процессов, происходящих при изменении температуры ВБР:

$$\frac{d\Omega}{dT} = \left(\frac{d\Omega}{dT}\right)_W + \left(\frac{d\Omega}{dT}\right)_T + \left(\frac{d\Omega}{dT}\right)_{Ph}. \quad (13)$$

Здесь, как и в (12), символом W обозначен член, связанный с температурным изменением параметров самого световода. Второй член уравнения (13) определяет термоиндуцированное изменение Δn_{mod} в предположении, что материальные коэффициенты стекла не изменяются при УФ облучении. Этот член связан с изменением амплитуды модуляции ПП за счет термооптического эффекта, а также с тем, что при изменении температуры в сердцевине ВС возникают дополнительные напряжения, приводящие к различным изменениям ПП в облученных и необлученных областях сердцевины. Наконец, третий член уравнения (13) описывает изменение Δn_{mod} , вызванное фотоиндуцированным изменением коэффициентов материала сердцевины ВС, отвечающих за термоиндуцированное изменение свойств стекла.

С учетом допущений, использованных при выводе соотношения (11), сумма первых двух членов уравнения (13) имеет вид

$$\frac{1}{\Omega_0} \left[\left(\frac{d\Omega}{dT}\right)_W + \left(\frac{d\Omega}{dT}\right)_T \right] \approx -\frac{1}{n_{eff}} \frac{dn_{eff}}{dT} \frac{V^2}{V^2 - 1} + 3p(\alpha_{co} - \alpha_{cl}), \quad (14)$$

где α_{co} и α_{cl} – КТР сердцевины и оболочки соответственно.

С учетом зависимости КТР от концентрации GeO₂ [8], для ВБР, записанной в световоде E, оценка по формуле (14) дает $(1/\Omega_0)(d\Omega/dT) \approx -5.6 \times 10^{-6}\text{ K}^{-1}$, что находится в пределах погрешности наших экспериментов (10^{-5} K^{-1}). Это объясняет отсутствие изменения Ω для ВБР

типа I(H₂) и свидетельствует о неизменности материальных коэффициентов стекла при формировании решеток этого типа. Вместе с тем, значительно большие изменения $d\Omega/dT$, зарегистрированные для ВБР типа I и типа IIa (рис.5), говорят о том, что при облучении ВС без водородной обработки происходит модификация физических свойств стекла, сопровождающаяся изменением материальных коэффициентов.

Вклад фотоиндуцированного изменения материальных коэффициентов в $d\Omega/dT$ может быть представлен в виде

$$\left(\frac{d\Omega}{dT}\right)_{\text{ph}} \approx \frac{\pi\eta}{2} \left[\delta \left(\frac{1}{n_{\text{eff}}} \frac{dn_{\text{eff}}}{dT} \right) - \left(\alpha_{\text{co}} - \alpha_{\text{cl}} + \frac{\delta\alpha_{\text{co}}}{2} \right) \left(\frac{\delta E}{E} - \frac{\delta p}{p} \right) p \right]. \quad (15)$$

Здесь, как и ранее, знаком δ обозначены индуцированные УФ излучением изменения материальных коэффициентов.

В силу малости КТР кварцевого и германосиликатного стекол второй член в квадратных скобках мал по сравнению с первым. Поэтому мы полагаем, что величина $d\Omega/dT$ главным образом определяется фотоиндуцированным изменением термооптического коэффициента стекла сердцевинны, а не фотоиндуцированным изменением КТР, как это предполагалось в [8]. Для объяснения приведенных на рис.5 результатов для ВБР типов I и IIa следует предположить, что при записи этих ВБР произошло фотоиндуцированное увеличение термооптического коэффициента примерно на 1.2 %.

Отметим, что зависимость величины $\delta(n_{\text{eff}}^{-1}(dn_{\text{eff}}/dT))$ от типа фоточувствительности ВБР в соответствии с (3) должна приводить к упоминавшейся выше разнице значений $d\lambda_{\text{вр}}/dT$ для ВБР разных типов. Поскольку при записи ВБР типа I(H₂), в соответствии с нашими результатами, $\delta(n_{\text{eff}}^{-1}(dn_{\text{eff}}/dT)) \approx 0$, а для ВБР типов I и IIa $\delta(n_{\text{eff}}^{-1}(dn_{\text{eff}}/dT)) > 0$, чувствительность длины волны к температуре у решеток типа I(H₂) должна быть ниже, чем у ВБР, записанных без использования водорода, что и наблюдалось в работе [7]. Рассчитанные исходя из данных [7] термооптические коэффициенты для ВБР типов I(H₂) и IIa различаются примерно на 5 % – 10 %. Это несколько больше сделанной нами оценки $\delta(n_{\text{eff}}^{-1}(dn_{\text{eff}}/dT)) \sim 1.2\%$ для фотоиндуцированного изменения термооптического коэффициента, полученной при расчете $d\Omega/dT$. Причина такого расхождения требует дополнительных исследований, однако можно предположить, что она является следствием относительно быстрого насыщения величины $\delta(n_{\text{eff}}^{-1}(dn_{\text{eff}}/dT))$ с ростом дозы УФ облучения, что может сказываться при записи ВБР даже при относительно высоком контрасте интерференционной картины.

5. Зависимость обратимых изменений Ω от дозы УФ облучения и концентрации германия в сердцевине световода

Как было показано выше, обратимые изменения параметра связи Ω в германосиликатных световодах без водородной обработки обусловлены фотоиндуцированным изменением материальных коэффициентов стекла, которое должно зависеть от дозы облучения D .

Зависимость $\Omega(D)$, измеренная для световода E, представлена на рис.6. Для теоретического описания этой зависимости мы использовали модель трех состояний (уровней энергии) сетки стекла, предложенную в работах [12, 16]. В этой модели предполагается, что в исходном состоянии сетка стекла находится в состоянии 1, населенность которого N . При УФ облучении происходят фотоиндуцированные переходы сетки стекла из состояния 1 в состояние 2, а затем из состояния 2 в состояние 3. Переход в состояние 2 соответствует положительному изменению ПП (фоточувствительность типа I), а в состояние 3 – отрицательному изменению ПП (фоточувствительность типа IIa).

Модель дает следующие выражения для относительных населенностей указанных состояний n_1, n_2, n_3 в зависимости от времени облучения t :

$$\begin{aligned} n_1 &= \exp(-B_{12}It), \\ n_2 &= \frac{B_{12}}{(B_{12} - B_{23})} [\exp(-B_{23}It) - \exp(-B_{12}It)], \\ n_3 &= 1 - \frac{B_{12}}{(B_{12} - B_{23})} \exp(-B_{23}It) + \frac{B_{23}}{(B_{12} - B_{23})} \exp(-B_{12}It), \end{aligned} \quad (16)$$

где I – интенсивность УФ излучения в максимумах интерференционной картины; B_{12} и B_{23} – параметры, характеризующие скорости соответствующих переходов. Сумма относительных населенностей в процессе облучения остается постоянной и равна единице.

Фотоиндуцированное изменение ПП задается соотношением

$$\Delta n_{\text{ind}} = (n_2 S_2 + n_3 S_3) N, \quad (17)$$

где S_2 и S_3 характеризуют изменение ПП на единицу населенности уровней 2 и 3 соответственно.

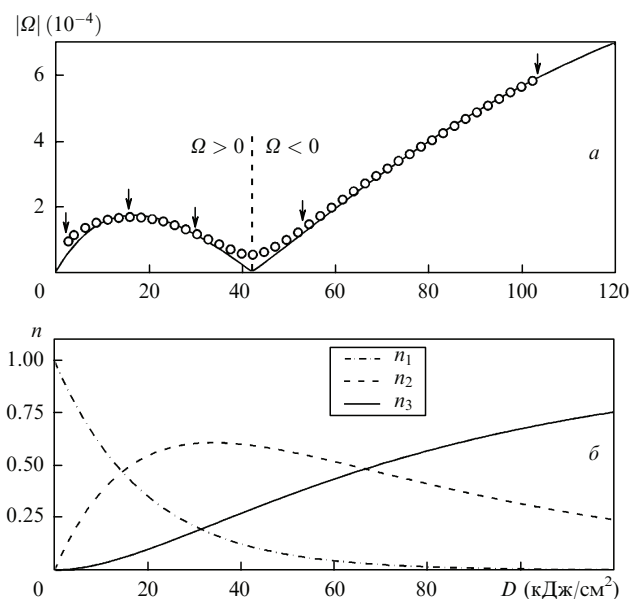


Рис.6. Экспериментальная (точки) и расчетная (сплошная линия) зависимости Ω от средней дозы облучения (а) и относительные населенности уровней при расчетах по модели [12] (б). Стрелками указаны дозы УФ облучения, использованные при записи пяти ВБР.

Наилучшая аппроксимация, полученная с помощью этой модели при значениях $S_2N = 1.28 \times 10^{-3}$, $S_3N = -2.3 \times 10^{-3}$, $(B_{12})^{-1} = 38.5$ кДж/см², $(B_{23})^{-1} = 138$ кДж/см² и $I_{\max} = 80$ Вт/см², показана на рис.6,а сплошной кривой. На рис.6,б приведены зависимости относительных населенностей уровней n_1 , n_2 и n_3 модели (16) от средней дозы УФ облучения.

Для исследования зависимостей $d\Omega/d\varepsilon$ и $d\Omega/dT$ от дозы облучения в световоде E без водородной обработки использовались пять ВБР, записанных при дозах 1.7, 15, 30, 55 и 105 кДж/см² (изображены стрелками на рис.6,а). На рис.7 показано изменение параметра Ω при нагреве и деформации этих ВБР. Как было отмечено выше, это изменение положительно и для ВБР типа I ($D < 42$ кДж/см²), и для ВБР типа IIa ($D > 42$ кДж/см²), что свидетельствует о росте ПП в облученных участках ВБР (как при растяжении, так и при нагреве) относительно ПП в необлученных участках, причем эти изменения не зависят от типа решетки.

Как видно из приведенного графика, величины $d\Omega/d\varepsilon$ и $d\Omega/dT$ монотонно возрастают с увеличением дозы облучения и практически совпадают друг с другом (с учетом коэффициента пропорциональности, равного 40, и использования приведенных на рис.7 размерностей). Это свидетельствует об общем характере физических механизмов, которые приводят к наблюдаемым обратимым изменениям Ω .

Величины $d\Omega/d\varepsilon$ и $d\Omega/dT$ отличны от нуля даже при малых дозах облучения (уровень отмечен штриховой линией). Для ВБР с наименьшей дозой облучения ($D = 1.7$ кДж/см²) величины $(d\Omega/d\varepsilon)^0$ и $(d\Omega/dT)^0$ составили $\sim 0.09 \times 10^{-8} \mu\epsilon^{-1}$ и $\sim 3.6 \times 10^{-8} \text{K}^{-1}$ соответственно. Это означает, что в самом начале облучения (при дозах не более 1 кДж/см²) происходит относительно быстрое изменение этих величин в облучаемых областях сердцевины ВС. Отметим, что при начальных дозах облучения как непрерывным, так и импульсным УФ излучением наблюдается быстрый рост наведенного ПП [17, 18]. Наиболее вероятной причиной быстрых изменений ПП и других материальных коэффициентов является фотоиндуцированная трансформация дефектных центров сетки германосиликатного стекла [19].

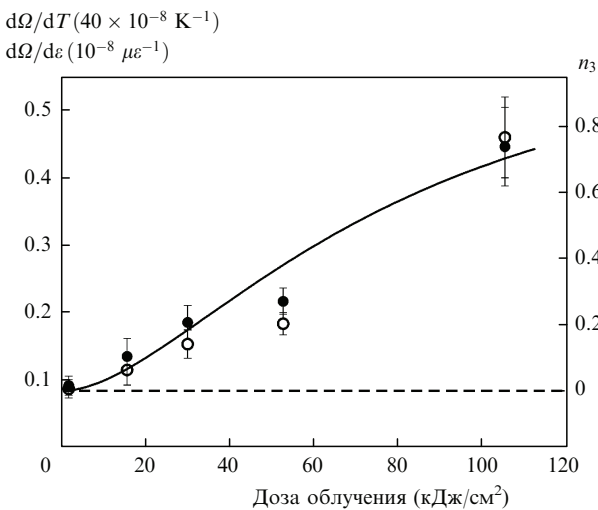


Рис.7. Зависимости от дозы облучения $d\Omega/d\varepsilon$ (○) и $d\Omega/dT$ (●) для ВБР типов I и IIa, записанных в световоде E, а также населенности уровня 3 (сплошная линия). Штриховая линия – значения $d\Omega/d\varepsilon$ и $d\Omega/dT$ при нулевой дозе облучения.

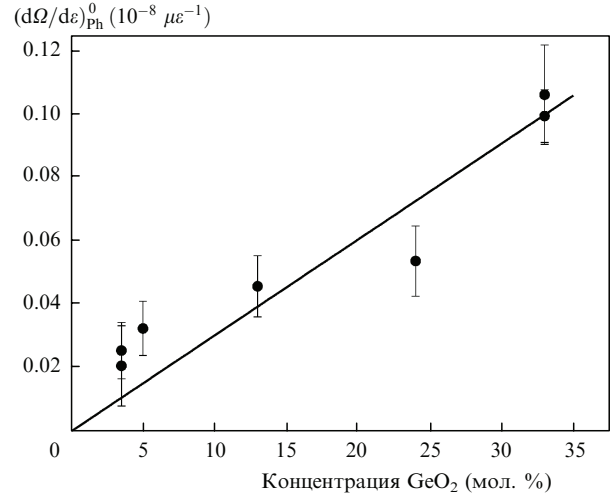


Рис.8. Зависимость $(d\Omega/d\varepsilon)^0$ для ВБР, записанных с малыми дозами облучения, от концентрации германия в сердцевине световода.

На рис.8 приведена зависимость $(d\Omega/d\varepsilon)^0_{\text{Ph}}$ для ВБР, записанных с малыми дозами облучения в различных световодах (см. табл.1), от концентрации германия в сердцевине (значения $(d\Omega/d\varepsilon)^0_{\text{Ph}}$ вычислялись на основании соотношений (10) и (11)). Линейность этой зависимости подтверждает сделанный вывод о роли дефектных центров сетки. В частности, концентрация GeE^+ , образующихся в германосиликатном стекле при малых дозах УФ облучения, пропорциональна концентрации германия [20, 21].

После быстрого изменения при начальных дозах облучения величины $d\Omega/d\varepsilon$ и $d\Omega/dT$ монотонно растут при дальнейшем облучении (рис.7), несмотря на то, что фотоиндуцированный ПП в этих ВБР более сложным образом зависит от дозы (17). Вторая фаза роста величин $d\Omega/d\varepsilon$ и $d\Omega/dT$ хорошо согласуется с дозой зависимостью населенности уровня 3, соответствующего фоточувствительности типа IIa (сплошная линия на рис.7). Это обстоятельство позволяет предположить, что как температурное, так и деформационное обратимое изменение Ω (и, следовательно, коэффициента отражения ВБР) в этой части зависимости определяется фоточувствительностью типа IIa.

6. Заключение

Проведенные в работе исследования обратимого изменения коэффициента отражения ВБР при деформации и изменении температуры позволили сделать ряд выводов, которые, на наш взгляд, дают дополнительную информацию, важную для понимания микроскопических механизмов фотоиндуцированного изменения ПП в световодах.

В частности, показано, что у ВБР, записанных в ВС, подвергнутых низкотемпературной водородной обработке, деформационное и температурное изменения коэффициента отражения относительно невелики и могут быть объяснены обратимым изменением волноводных характеристик ВС и параметров самой ВБР в предположении, что материальные коэффициенты германосиликатного стекла не изменяются в процессе УФ облучения.

Обратимые изменения коэффициента отражения для ВБР, записанных в ВС без водородной обработки, имеют существенно другой характер. В частности, для решеток

типов I и IIa величина этих изменений почти на порядок больше, чем для ВБР типа I(H₂), что может быть объяснено фотоиндуцированным изменением материальных коэффициентов стекла сердцевины ВС (p_{12} и dn/dT). Отметим, что разные знаки наблюдаемых обратимых изменений R_{Br} в ВБР типов I и IIa объясняются разными знаками фотоиндуцированного изменения ПП в решетках этих типов.

Анализ зависимости обратимых изменений R_{Br} от дозы УФ облучения показал, что эти изменения значительны даже при малой дозе облучения ($D < 1$ кДж/см²). Оказалось, что начальный рост величин $d\Omega/d\varepsilon$ и $d\Omega/dT$ для ВБР типов I и IIa пропорционален росту концентрации германия в сердцевине ВС. Полученные данные говорят о том, что обратимые изменения в области малых доз облучения связаны с фотоиндуцированной трансформацией дефектных центров сетки германосиликатного стекла.

При увеличении дозы облучения ($D > 1$ кДж/см²) наблюдается монотонный рост величин $d\Omega/d\varepsilon$ и $d\Omega/dT$ (при немонотонной зависимости $\Omega(D)$), который хорошо согласуется с возрастанием населенности состояния 3, рассчитанной с использованием модели, предложенной в [12]. Это свидетельствует о том, что физический механизм, обуславливающий фоточувствительность типа IIa (фотоиндуцированный разрыв связей сетки стекла [22]), приводит к изменению упругооптического и термооптического коэффициентов германосиликатного стекла. Вместе с тем, полученные результаты показывают, что фотоиндуцированное уплотнение сетки стекла (фоточувствительность типа I [23]) не приводит к заметному изменению этих коэффициентов.

Важно отметить, что полученные экспериментальные зависимости свидетельствуют об общей природе обратимых изменений коэффициента отражения ВБР, вызванных деформацией и изменением температуры.

1. Kashyap R. *Fiber Bragg Gratings* (San Diego, CA: Acad. Press, 1999).

2. Othonos A., Kalli K. *Fiber Bragg Gratings: Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing* (Norwood, Mass.: Artech House, 1999).
3. Erdogan T., Mizrahi V., Lemaire P.J., Monroe D. *J. Appl. Phys.*, **76**, 73 (1994).
4. Iocco A., Limberger H.G., Salathe R.P., Everall L.A., Chisholm K.E., Williams J.A.R., Bennion I. *IEEE J. Lightwave Technol.*, **17**, 1217 (1999).
5. Kersey A.D., Davis M.A., Patrick H.J., LeBlanc M., Koo K.P., Askins C.G., Putnam M.A., Friebel E.J. *IEEE J. Lightwave Technol.*, **15**, 1442 (1997).
6. Васильев С.А., Медведков О.И., Королев И.Г., Божков А.С., Курков А.С., Дианов Е.М. *Квантовая электроника*, **35**, 1085 (2005).
7. Shu D., Zhao X., Zhang L., Bennion I. *Appl. Opt.*, **43**, 2006 (2004).
8. Hidayat A., Wang Q., Niay P., Douay M., Poumellec B., Kherboushe F., Riant I. *Appl. Opt.*, **40**, 2632 (2001).
9. Akulov V.A., Afanasiev D.M., Babin S.A., Churkin D.V., Kablukov S.I., Rybakov M.A., Vlasov A.A. *Laser Phys.*, **17**, 124 (2007).
10. Власов А.А. *Канд. дисс.* (Новосибирск, ИАиЭ СОРАН, 2009).
11. Медведков О.И., Королев И.Г., Васильев С.А. *Препринт НЦВО при ИОФ РАН, №6* (2004).
12. Dong L., Liu W.F., Reekie L. *Opt. Lett.*, **21**, 2032 (1996).
13. Gianino P.D., Bendow B. *Appl. Opt.*, **20**, 430 (1981).
14. Aashira R., Madhav K.V., Ramamurty U., Asokan S. *Opt. Lett.*, **34**, 2414 (2009).
15. Божков А.С., Васильев С.А., Медведков О.И., Греков М.В., Королев И.Г. *ПТЭ*, **4**, 76 (2005).
16. Dong L., Liu W. F. *Appl. Opt.*, **36**, 8222 (1997).
17. Flockhart G.M.H., Cranch G.A., Kirkendall C.K. *Appl. Opt.*, **46**, 8237 (2007).
18. Williams G.M., Putnam M.A., Tsai T.E., Askins C.G., Friebel E.J. *Proc. Techn. Dig. BGPP* (Washington, 1995, p. SuA5/82).
19. Neustruev V.B. *J. Phys.: Condens. Matter.*, **6**, 6901 (1994).
20. Dong L., Archambault J.L., Reekie L., Russel P.S.J., Payne D.N. *Appl. Opt.*, **34**, 3436 (1995).
21. Dong L., Pinkstone J., Russell P.S.J., Payne D.N. *J. Opt. Soc. Am. B*, **11**, 2106 (1994).
22. Kukushkin S.A., Shlyagin M.G., Swart P.L., Chcherbakov A.A., Osipov A.V. *J. Appl. Phys.*, **102**, 053502 (2007).
23. Poumellec B., Guenot P., Riant I., Sansonetti P., Niay P., Bernage P., Bayon J.F. *Opt. Mater.*, **4**, 441 (1995).