

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ И ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ НА СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОЛОКОННЫХ ДЛИННОПЕРИОДНЫХ РЕШЕТОК С ПОЛИМЕРНЫМ ГОФРИРОВАННЫМ ПОКРЫТИЕМ

© 2010 г. А. И. Сидоров*, доктор физ.-мат. наук; А. А. Цирухин**

* Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург

** НПК “Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова”, Санкт-Петербург

E-mail: aisidorov@newmail.ru

Проведено экспериментальное исследование влияния внешних факторов – температуры и показателя преломления окружающей среды на спектры пропускания в области резонансов волоконных длиннопериодных решеток с полимерным гофрированным покрытием. Изучено влияние внешних воздействий на спектральный сдвиг и амплитуду резонансов для мод сердечника и оболочки длиннопериодных решеток.

Ключевые слова: волоконная длиннопериодная решетка, полимерное покрытие.

Коды OCIS: 060.2270, 060.2290, 060.2300

Поступила в редакцию 09.09.2009

Введение

Волоконные длиннопериодные решетки [1, 2] широко используются в качестве режекторных фильтров в волоконно-оптических устройствах, а также в качестве датчиков и сенсоров. Характерной особенностью длиннопериодных решеток (ДПР) и их основным отличием от брэгговских волоконных решеток является то, что период продольной модуляции показателя преломления у них много больше длины волн и, как правило, составляет 0,1–2 мм. ДПР обладают ярко выраженными резонансными свойствами, причем, малое изменение эффективного показателя преломления ДПР может приводить к существенному спектральному сдвигу резонансов и изменению их амплитуды. Высокая чувствительность эффективного показателя преломления ДПР к внешним воздействиям позволяет создавать на их основе датчики температуры, давления, механической нагрузки, показателя преломления окружающей среды и других физических величин [3–4]. Измеряемой величиной при этом является спектральный сдвиг одного из резонансов решетки, либо изменение его амплитуды.

ДПР, как правило, изготавливают из специальных фоточувствительных стекол путем

локального изменения показателя преломления волокна ультрафиолетом [3]. Одной из разновидностей ДПР является гофрированное волокно, в котором гофры изготовлены из материала с показателем преломления, отличным от показателя преломления материала сердечника [5]. Для создания гофров на поверхности оптических волокон может быть использован эффект самоорганизации микрокапель раствора полимера [6]. Данный эффект позволяет создавать на стеклянных и полимерных волокнах периодические гофры с периодом 0,1–2 мм. Использование ДПР с полимерными гофрами в качестве датчиков и сенсоров позволяет значительно повысить их чувствительность к внешним воздействиям, так как температурные и упругооптические коэффициенты показателя преломления полимеров могут в десятки раз превосходить аналогичные параметры стекол. Достоинством полимерных периодических покрытий является возможность существенного расширения номенклатуры материалов для сердечника волокна и для гофров. Это дает возможность подбирать показатели преломления и другие характеристики компонентов ДПР для решения каждой конкретной задачи.

Целью данной работы являлось экспериментальное исследование влияния температуры и

показателя преломления окружающей среды на спектральное положение и амплитуду резонансов ДПР с гофрированным полимерным покрытием.

Методика экспериментов

В экспериментах исследовались ДПР из кварцевого волокна ($n = 1,45$) диаметром 150 мкм с периодическим гофрированным покрытием из полиуретана ($n = 1,5$). Методика изготовления ДПР с полимерным покрытием описана в работе [6]. Фотография участка ДПР показана на рис. 1а. Использовались волокна длиной 145–200 мм, с длиной гофрированного покрытия $L = 50$ –150 мм и периодом $\Lambda = 0,5$ –1 мм. Гофры имели форму вытянутых эллипсоидов вращения. Толщина гофров в их центральной части составляла 20 мкм. Необходимо отметить, что из-за особенностей технологии изготовления полимерного покрытия, участки волокна между гофрами также покрыты тонким слоем полимера толщиной не более 0,5 мкм.

При измерении спектров пропускания ДПР использовался перестраиваемый волоконный лазер на эрбииевом стекле (*PriTel, Inc*) со спектральным диапазоном перестройки 1520–1560 нм. В качестве приемника излучения использовался измеритель мощности излучения с волоконным входом (FPM-3200, *ILX Light Wave*). Выходной сигнал измерителя мощности регистрировался с помощью осциллографа АСК-3106 (Актаком) и выводился на персональный компьютер. Температурные измерения проводились в интервале температур 20–60 °C, что существенно ниже температуры размягчения и плавления полиуретана ($t_{\text{пл}} = 184$ –193 °C [7]). Нагреву подвергалась вся гофрированная область волокна.

ДПР, использованные в экспериментах, имели следующие характерные особенности. Во-первых, для ДПР с периодом 1 мм основной резонанс лежит в спектральном интервале 1,8–2 мкм, а в спектральный интервал измерений попадают лишь вторичные резонансы. Амплитуда этих вторичных резонансов при комнатной температуре составляет 0,8–2,5 дБ, а спектральная ширина по полувысоте 1,5–2,5 нм в зависимости от длины гофрированной части решетки L . Во-вторых, при диаметре сердечника ДПР, равном 150 мкм, режим распространения электромагнитных волн является многомодовым. Это приводит к появлению ряда дополнительных резонансов, а также к возникновению межмодовой интерференции. В-третьих, так как толщина

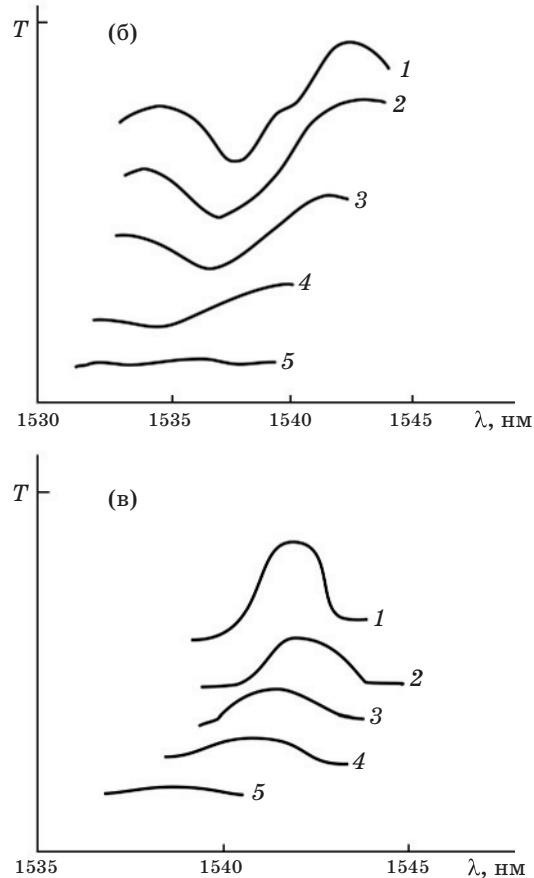
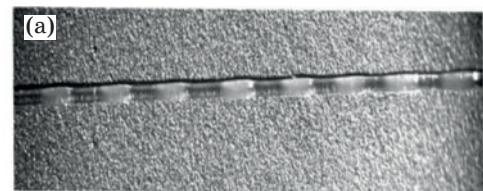


Рис. 1. Фотография участка ДПР с гофрами из полиуретана (а), изменение спектров пропускания ДПР в области “отрицательного” резонанса мод сердечника (б) и “положительного” резонанса мод оболочки (в). 1 – 20 °C, 2 – 30 °C, 3 – 40 °C, 4 – 50 °C, 5 – 60 °C. $L = 50$ мм, $\Lambda = 1$ мм.

гофров значительно превышает длину волны, на которой проводятся измерения, то в области гофров возникают моды оболочки. Результатом этого является появление резонансов, связанных с модами оболочки. В отличие от резонансов мод сердечника, формирующих минимумы на спектре пропускания ДПР, резонансы мод оболочки приводят к появлению на спектре максимумов пропускания [2]. Такой же результат дает и малое изменение периода решетки по ее длине (квазипериодичность) [8], связанное, в нашем случае, с несовершенством технологии изготовления ДПР. Наконец, наличие тонкого

слоя полимера с высоким показателем преломления на волокне между гофрами оказывает влияние на постоянные распространения волноводных мод высших порядков [9]. Все эти особенности приводят к значительному усложнению спектра пропускания решетки – появлению большого количества “отрицательных” и “положительных” резонансов. При этом возникает вероятность их спектрального наложения при изменении внешнего воздействия. Это затрудняет интерпретацию спектров и их изменения при внешних воздействиях. В то же время, появление “положительных” резонансов, связанных с модами оболочки, дает дополнительный параметр, по изменению которого также можно регистрировать характеристики внешнего воздействия [10]. Поэтому в процессе экспериментов измерения спектров пропускания ДПР проводились как в области “отрицательных” резонансов мод сердечника, так и в области “положительных” резонансов мод оболочки.

Обсуждение результатов

На рис. 1б, в показано изменение спектра пропускания ДПР в области “отрицательного” и “положительного” резонансов при изменении температуры окружающей среды в интервале 20–60 °С. Для наглядности спектры, соответствующие различным температурам, смешены по вертикали. Из рисунка видно, что при увеличении температуры происходит спектральный сдвиг резонансов в коротковолновую область спектра, уширение и уменьшение их амплитуды. Причиной этих эффектов является уменьшение показателя преломления полиуретана при увеличении температуры. Спектральное положение резонанса ДПР определяется ее эффективным периодом, который, в свою очередь, зависит от эффективных показателей преломления соседних участков ДПР [2]. В нашем случае полимерное покрытие имеется как в области гофров, так и в промежутках между ними. Однако влияние изменения показателя преломления полимера на эффективный показатель преломления в области гофров существенно больше, чем в промежуточных областях. Причем, с увеличением толщины гофра это влияние также увеличивается. Это иллюстрирует расчетная зависимость [11] изменения эффективного показателя преломления Δ_1 в области гофра от толщины гофра h при изменении его показателя преломления на $\Delta n = 10^{-3}$ (рис. 2, кривая 1). Расчет проводился для мод сердечника. Зависимость, приведенная на рисун-

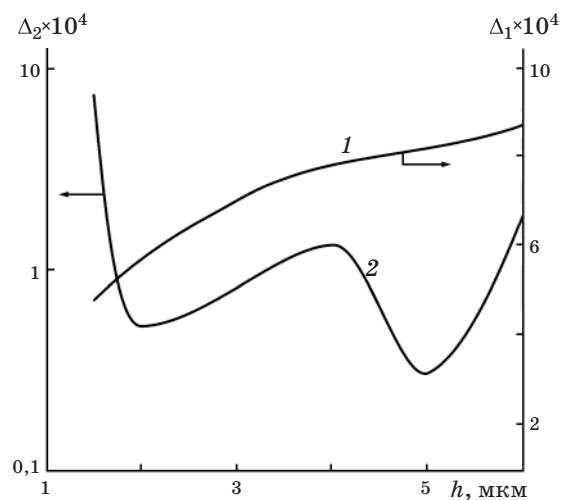


Рис. 2. Расчетные зависимости изменения эффективного показателя преломления в области гофра от толщины гофра. 1 – при изменении показателя преломления гофра на $\Delta n = 10^{-3}$, 2 – при изменении показателя преломления окружающей среды на $\Delta n = 10^{-3}$. Показатель преломления гофра больше, чем показатель преломления сердечника волокна.

ке, соответствует случаю, когда показатель преломления гофра больше, чем показатель преломления сердечника волокна. Отсюда следует, что нагрев и сопутствующее ему уменьшение эффективного показателя преломления ДПР в области гофров приводит к уменьшению эффективного периода решетки и коротковолновому сдвигу резонанса.

Амплитуда резонансов зависит от разницы эффективных показателей преломления соседних участков ДПР [2]. Поэтому уменьшение амплитуды резонанса при увеличении температуры вызвано той же причиной, что и в случае, рассмотренном выше – уменьшением эффективного показателя преломления ДПР в области гофра.

Температурные зависимости спектрального положения “отрицательного” и “положительного” резонансов ДПР показаны на рис. 3. Чувствительность спектрального сдвига резонансов увеличивается с ростом температуры. Для резонансов мод сердечника характерна более высокая чувствительность к температуре во всем температурном интервале измерений. Средняя чувствительность при этом составляет $\delta = 0,14$ нм/градус. Спектральный сдвиг резонансов мод оболочки в температурном интервале 20–50 °С незначителен. Ему соответствует

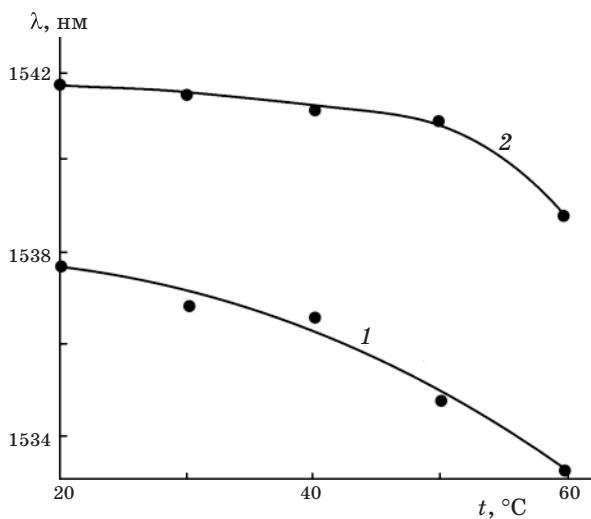


Рис. 3. Температурные зависимости спектрального положения резонансов ДПР. 1 – “отрицательный” резонанс мод сердечника, 2 – “положительный” резонанс мод оболочки. $L = 50$ мм, $\Lambda = 1$ мм.

$\delta = 0,02$ нм/градус. Однако при $t > 50$ °С наблюдается рост чувствительности и δ достигает значения 0,2 нм/градус. Подобное различие в чувствительности к температуре сдвига резонансов мод оболочки и сердечника наблюдается и в брэгговских волоконных решетках [12]. Малая чувствительность резонансов мод оболочки к температуре полезна при разработке волоконных датчиков других физических величин, например давления или показателя преломления окружающей среды. Это позволяет уменьшить температурную погрешность при измерении указанных величин и, в то же время, проводить измерение температуры с помощью той же ДПР, но в другом спектральном интервале, соответствующем резонансу мод сердечника.

Представляет интерес сравнение чувствительности к температуре ДПР с полимерными гофрами и классических ДПР, сформированных в фоточувствительных волокнах. Так, ДПР в многомодовых стеклянных волокнах имеют чувствительность 0,06–0,15 нм/градус [10]. Таким образом, чувствительность к температуре ДПР с полимерными гофрами сравнима и даже может превышать чувствительность классических многомодовых ДПР. Чувствительность ДПР на основе одномодовых стеклянных волокон достигает 0,4–0,5 нм/градус [13]. Можно предположить, что при оптимизации геометрических параметров ДПР с полимерными гофрами и соответствующем выборе полимерного материала

чувствительность таких ДПР может достичь таких же значений.

На рис. 4 показаны зависимости относительной амплитуды резонансов моды сердечника и моды оболочки от температуры. Из рисунка видно, что при увеличении температуры амплитуда резонансов уменьшается. Причем, для мод сердечника крутизна зависимости растет с ростом температуры, а для мод оболочки – уменьшается. Изменение амплитуды резонансов также может быть использовано в качестве измеряемого параметра при построении волоконного датчика. Однако, в том случае, если измерение температуры проводится по спектральному сдвигу резонанса, уменьшение амплитуды резонанса может привести к увеличению погрешности измерений. Для уменьшения этой погрешности для измерений могут быть использованы основной резонанс, либо ближайшие к нему, а также увеличение длины ДПР.

Влияние показателя преломления окружающей среды на спектр пропускания ДПР с полимерным гофром исследовалось для четырех сред: воздух ($n = 1$), вода ($n = 1,32$), смесь воды с глицерином ($n = 1,38$) и глицерин ($n = 1,46$). Измерения проводились при комнатной температуре. На рис. 5 показана эволюция участка спектра пропускания ДПР при увеличении показателя преломления окружающей среды. Как видно из рисунка, спектр претерпевает достаточно сложные изменения. Поэтому можно проследить влияние показателя преломления окружающей среды по одному из резонансов мод

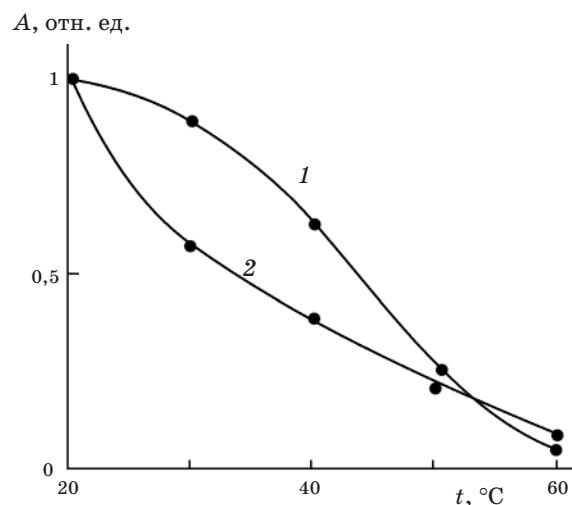


Рис. 4. Зависимость относительной амплитуды резонансов моды сердечника (1) и моды оболочки (2) от температуры. $L = 50$ мм, $\Lambda = 1$ мм.

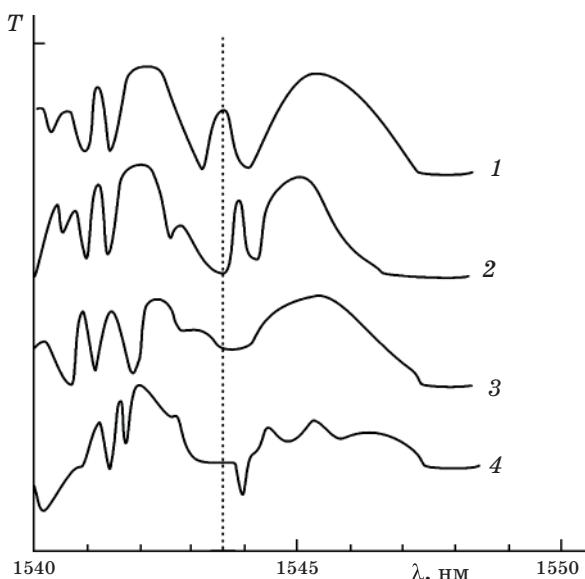


Рис. 5. Влияние показателя преломления окружающей среды на спектр пропускания ДПР. 1 – $n = 1$, 2 – 1,32, 3 – 1,38, 4 – 1,46. $L = 50$ мм, $\Lambda = 1$ мм.

оболочки вблизи $\lambda = 1543,6$ нм, отмеченному на рисунке пунктиром. Спектральная ширина резонанса по полувысоте при $n = 1$ составляет 0,5 нм. Увеличение показателя преломления до $n = 1,32$ приводит к длинноволновому спектральному сдвигу резонанса на $\Delta\lambda = 0,4$ нм и уменьшению его ширины до 0,2 нм. При этом его амплитуда незначительно возрастает. При дальнейшем увеличении показателя преломления до $n = 1,38$ резонанс исчезает. Возможно, при этом он сливаются с соседним, более широким резонансом, расположенным в спектральном интервале 1544–1547 нм. При увеличении n от 1,38 до 1,46 на месте “положительного” резонанса появляется “отрицательный” резонанс моды сердечника.

Качественное объяснение наблюдаемых изменений спектра пропускания, показанных на рис. 5, можно получить с помощью расчетной зависимости чувствительности ДПР к изменению показателя преломления окружающей среды Δ_2 от толщины гофра, приведенной на рис. 2 (кривая 2). Зависимость получена для мод сердечника. Из рисунка видно, что максимальная чувствительность имеет место при толщине гофра менее 1,5 мкм. Поэтому основной вклад в изменение спектра вносят участки ДПР между гофрами, покрытые слоем полимера толщиной менее 0,5 мкм. Увеличение показателя прелом-

ления окружающей среды приводит к увеличению эффективного показателя преломления этих участков и, в результате, к увеличению эффективного периода решетки. Это приводит к длинноволновому сдвигу резонансов. При значительном изменении показателя преломления окружающей среды на спектр пропускания начинает влиять и изменение эффективного показателя преломления ДПР в области гофров. Однако, как видно из рис. 2, зависимость $\Delta_2(h)$ носит немонотонный характер, поэтому оптический отклик ДПР на изменение внешнего показателя преломления будет различным при различной толщине гофров.

Представленные результаты показывают, что чувствительность ДПР с полимерными гофрами к изменению показателя преломления окружающей среды невысока по сравнению с ДПР, изготовленными по классической технологии. Для сравнения, спектральный сдвиг резонансов ДПР, изготовленных из различных стекол по классической технологии и имеющих период 130–320 мкм, составляет 22–62 нм при изменении показателя преломления окружающей среды от 1,404 до 1,452 [10]. Необходимо отметить, что высокая чувствительность ДПР реализуется при показателе преломления окружающей среды, близкой к эффективному показателю преломления ДПР. В работе [14] был получен спектральный сдвиг резонансов ДПР на 20 нм при изменении показателя преломления окружающей среды от 1 до 1,4. Для увеличения чувствительности ДПР с полимерными гофрами требуется проведение дальнейших исследований. В частности, как показано в работе [11], чувствительность гофрированных ДПР к изменению показателя преломления может быть существенно увеличена при использовании гофров с показателем преломления меньшим, чем показатель преломления сердечника и выборе оптимальной толщины гофров.

Выводы

Представленные результаты показывают, что чувствительность к изменению температуры ДПР с полимерным гофрированным покрытием не уступает чувствительности ДПР, изготовленных по классическим технологиям. ДПР с полимерным гофрированным покрытием могут быть использованы и для измерения показателя преломления жидких сред. Их достоинствами являются большое разнообразие выбора материала для гофра и сердечника волокна, про-

стота изготовления и низкая стоимость. В то же время, для обеспечения максимальной чувствительности ДПР с полимерным гофрированным покрытием к внешним воздействиям необходимо проведение дальнейших исследований, включающих в себя выбор оптимальных материалов и оптимизацию геометрии ДПР.

Работа проводилась при поддержке гранта правительства Санкт-Петербурга (№ 3,5/30-04/031) и “Гранта проектов аспирантов, докторантов и сотрудников СПбГЭТУ, молодых ученых по разделу III Темплана”.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Vengsarkar A.M., Lemaire P.J., Judkins J.B., Bhatia V., Erdogan T., Sipe J.E.* Long-period fiber gratings as band-rejection filters // *J. Lightwave Technol.* 1996. V. 14. № 1. P. 58–65.
2. *Erdogan T.* Fiber grating spectra // *J. Lightwave Technol.* 1997. V. 15. № 8. P. 1277–1294.
3. *James S.W., Tatam R.P.* Optical fiber long-period grating sensors: characteristics and application // *Measur. Sci. and Technol.* 2003. V. 14. P. R49–R61.
4. *Patric H.J., Kersey A.D., Bucholtz F.* Analysis of the response of long period fiber gratings to external index of refraction // *J. Lightwave Technol.* 1998. V. 16. № 9. P. 1606–1612.
5. *Lin C.-Y., Chern G.-W., Wang L.A.* Periodical corrugated structure for forming sample fiber Bragg grating and long-period fiber grating with tunable coupling strength // *J. Lightwave Technol.* 2001. V. 19. № 8. P. 1212–1220.
6. *Сидоров А.И., Цирухин А.А.* Формирование полимерных периодических структур на поверхности оптических волокон // *ЖТФ*. 2010. Т. 80. В. 1. С. 125–129.
7. *Рабинович В.А., Хавин З.Я.* Краткий химический справочник. Л.: Химия, 1978. 392 с.
8. *Chern G.W., Wang L.A.* Transfer-matrix method based on perturbation expansion for periodic and quasi-periodic binary long-period gratings // *JOSA A*. 1999. V. 16. № 11. P. 2675.
9. *Tsao C.Y.H., Payne D.N., Gambling W.A.* Modal characteristics of three-layered optical fiber waveguides: a modified approach // *JOSA A*. 1989. V. 6. № 4. P. 555–563.
10. *Bhatia V., Vengsarkar A.M.* Optical fiber long-period gratings sensors // *Opt. Lett.* 1996. V. 21. № 9. P. 692–694.
11. *Сидоров А.И., Цирухин А.А.* Влияние параметров гофров на модуляцию эффективного показателя преломления длиннопериодных волоконных решеток с полимерным покрытием // *Оптический журнал*. 2010. Т. 77. № 2. С. 53–58.
12. *Chehura E., James S.W., Tatam R.P.* Temperature and strain discrimination using a single tilted fiber Bragg grating // *Opt. Comm.* 2007. V. 275. P. 344–347.
13. *Sakata H., Ito H.* Optical fiber temperature sensor using a pair of nonidentical long-period fiber gratings for intensity-based sensing // *Opt. Comm.* 2007. V. 280. P. 87–90.
14. *Patrick H., Kersey A.D., Bucholtz F.* Analysis of the response of long period fiber gratings to external index of refraction // *J. Lightwave Technol.* 1998. V. 16. № 9. P. 1606–1612.