

ОПТИЧЕСКОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 681.7.068

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ГОФРОВ НА МОДУЛЯЦИЮ ЭФФЕКТИВНОГО ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ДЛИННОПЕРИОДНЫХ ВОЛОКОННЫХ РЕШЕТОК С ПОЛИМЕРНЫМ 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

Исследованное влияние геометрических характеристик и показателя преломления полимерных гофров на эффективный показатель преломления волоконных длиннопериодных решеток. Рассмотрено влияние данных параметров на амплитуду модуляции эффективного показателя преломления решетки при изменении показателя преломления окружающей среды или материала гоффа. Полученные результаты позволяют оптимизировать параметры периодического полимерного покрытия.

Ключевые слова: длиннопериодная решетка, эффективный показатель преломления.

Коды OCIS: 060.2270, 060.2290, 060.2300.

Поступила в редакцию 17.06.2009.

Введение

Волоконные длиннопериодные решетки (ДПР) представляют собой оптические волокна с продольной периодической модуляцией эффективного показателя преломления [1]. От брэгговских волоконных решеток [2] они отличаются тем, что период модуляции показателя преломления у них много больше длины волны и, как правило, составляет 0,1–2 мм. ДПР широко используются в качестве режекторных фильтров в волоконно-оптических устройствах, а также в качестве датчиков и сенсоров. 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].

ДПР изготавливают из специальных фоточувствительных стекол путем локального изменения показателя преломления УФ излучением

[3]. Разновидностью ДПР является гофрированная волоконная решетка, в которой гофры на поверхности волокна изготавливаются путем травления фоточувствительного стекла, предварительно обработанного УФ излучением [5]. Нами был разработан новый метод создания гофров на поверхности оптических волокон, позволяющий существенно упростить технологию изготовления ДПР. В основе метода лежит самоорганизация микрокапель раствора полимера на поверхности оптического волокна [6]. Обсуждение механизмов и особенностей процесса самоорганизации капель выходит за рамки данной статьи. Метод позволяет создавать на стеклянных и полимерных волокнах периодические гофры с периодом 0,1–2 мм (рис. 1а). При использовании раствора полимера с суспензией неорганических наночастиц могут быть сформированы нанопористые или сплошные гофры из неорганического материала (рис. 1б). В этом случае после формирования полимерного гоффа проводятся термическое разложение полимера

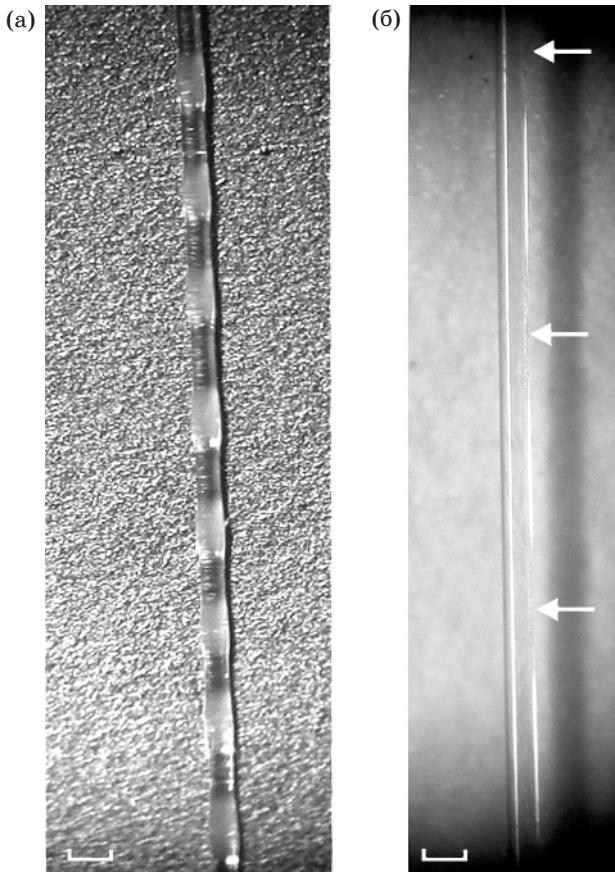


Рис. 1. Фотографии гофрированных ДПР с полимерным покрытием и сердечником из кварцевого стекла. Материал гофров: а – нитроцеллюлоза (масштаб – 150 мкм); б – нанопористый TiO_2 (масштаб – 130 мкм). Стрелками указано расположение гофров из TiO_2 .

и термообработка, приводящая к спеканию или сплавлению неорганических наночастиц.

Использование ДПР с полимерными гофрами в качестве датчиков позволяет значительно повысить их чувствительность к внешним воздействиям, так как температурные и упруго-оптические коэффициенты показателя преломления полимеров в десятки раз превосходят аналогичные параметры стекол. Достоинством предложенного метода формирования гофров является возможность существенного расширения номенклатуры материалов для сердечника волокна и для гофров. Это позволяет подбирать показатели преломления и другие характеристики компонентов ДПР для решения каждой конкретной задачи. При этом возникает вопрос: как влияют оптические и геометрические характеристики гофров на эффективный показатель преломления ДПР и на чувствительность датчика на основе ДПР. Поэтому целью данной

работы было изучение влияния показателя преломления и толщины гофров на эффективный показатель преломления ДПР и на ее чувствительность к внешним воздействиям.

Постановка задачи

Оптические характеристики ДПР определяются периодом и амплитудой модуляции ее эффективного показателя преломления в продольном направлении. Чувствительность ДПР зависит от изменения эффективного показателя преломления при внешнем воздействии. Эффективный показатель преломления $n_{\text{эфф}}$ оптического волновода для фиксированной волноводной моды задается выражением [7]

$$n_{\text{эфф}} = \frac{\beta}{k}, \quad (1)$$

где β – постоянная распространения волноводной моды, k – волновое число. Так как длина гофра ДПР много больше длины волны, то участок волокна с гофром приближенно может рассматриваться как отрезок волокна с оболочкой. В таком приближении задача сводится к определению постоянной распространения β путем решения соответствующих характеристических уравнений. На рис. 2 показано поперечное сечение круглого волокна с оболочкой. Сердечник волокна имеет показатель преломления n_1 и радиус r_1 , оболочка – показатель преломления n_2 и радиус r_2 , показатель преломления окружающей среды – n_3 .

Практический интерес представляют два случая: когда $n_2 > n_1$ и когда $n_2 < n_1$. В обоих случаях предполагается, что $n_3 < n_{1,2}$. В оптических волокнах круглого сечения наиболее часто используются гибридные моды EH_{11} . Поэтому

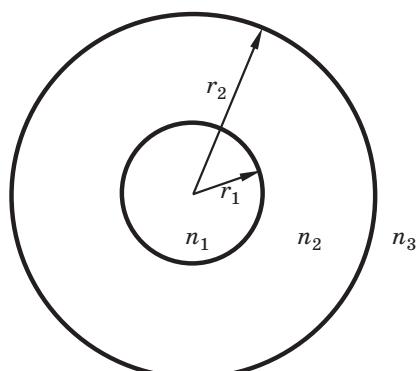


Рис. 2. Поперечное сечение ДПР в области гофра.

дальнейший анализ проводится для мод указанного типа. При толщине гофра, значительно превышающей длину волны, в ДПР могут возникать волноводные моды оболочки. В данной работе подобные моды не рассматриваются.

Для волокна с оболочкой при $n_2 > n_1$ и при условии, что $n_2 - n_1 \ll 1$, в характеристическое уравнение для моды ЕН₁₁ могут быть введены упрощения. В этом случае оно может быть представлено в виде [8]

$$\frac{J_1(P_2) \left[\frac{J_0(P_2)}{P_2 J_1(P_2)} - \frac{K_0(W_3)}{W_3 K_1(W_3)} \right]}{Y_1(P_2) \left[\frac{Y_0(P_2)}{P_2 Y_1(P_2)} - \frac{K_0(W_3)}{W_3 K_1(W_3)} \right]} = \frac{J_1(U_2) \left[\frac{J_0(U_2)}{U_2 J_1(U_2)} + \frac{I_0(P_3)}{P_3 I_1(P_3)} \right]}{Y_1(U_2) \left[\frac{Y_0(U_2)}{U_2 Y_1(U_2)} + \frac{I_0(P_3)}{P_3 I_1(P_3)} \right]}. \quad (2)$$

Здесь

$$U_2 = r_1 \sqrt{k^2 n_2^2 - \beta^2}, \quad P_2 = r_2 \sqrt{k^2 n_2^2 - \beta^2},$$

$$W_3 = r_2 \sqrt{\beta^2 - k^2 n_3^2}, \quad P_3 = r_1 \sqrt{\beta^2 - k^2 n_3^2},$$

$J_{0,1}$ и $Y_{0,1}$ – функции Бесселя первого рода и второго рода соответственно; $I_{0,1}$ и $K_{0,1}$ – модифицированные функции Бесселя первого и второго рода соответственно; k – волновое число.

Необходимо отметить, что в рассматрива-

емом случае имеет место нарушение полного внутреннего отражения на границе “сердечник–оболочка”. Поэтому компоненты поля электромагнитной волны в оболочке существуют не в виде затухающих волн, как в классическом случае ($n_2 < n_1$), а описываются выражениями, типичными для направляемых мод.

Для случая $n_2 < n_1$ характеристическое уравнение постоянной распространения ЕН₁₁-моды имеет вид [9]

$$\begin{aligned} p^2 + 2x_1 x_2 \frac{n_2^2}{n_1 n_3} \frac{4}{(\pi a U_2^2)^2} + x_1 x_2 \left[J \left(\frac{r}{a U_2} + Kp \right) - \left(\frac{Kq}{U_2} + \frac{s}{a U_2^2} \right) \right] \times \\ \times \left[J \left(\frac{s_{23} r}{a U_2} + Kp \right) - s_{21} \left(\frac{Kq}{U_2} + \frac{s_{23} s}{a U_2^2} \right) \right] = x_1^2 \left(Jp - \frac{s_{21} q}{U_2} \right) \left(Jp - \frac{q}{U_2} \right) + x_2^2 \left(Kp + \frac{s_{23} r}{a U_2} \right) \left(Kp + \frac{r}{a U_2} \right). \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь введены следующие обозначения:

$$p = J_1(a U_2) Y_1(U_2) - J_1(U_2) Y_1(a U_2),$$

$$q = J_1(a U_2) Y'_1(U_2) - J'_1(U_2) Y_1(a U_2),$$

$$r = J'_1(a U_2) Y_1(U_2) - J_1(U_2) Y'_1(a U_2),$$

$$s = J'_1(a U_2) Y'_1(U_2) - J'_1(U_2) Y'_1(a U_2),$$

$$U_1 = r_1 \sqrt{k^2 n_1^2 - \beta^2},$$

$$J = J'_1(U_1) / U_1 J_1(U_1), \quad K = K'_1(W_3) / W_3 K_1(W_3),$$

$$s_{21} = n_2^2 / n_1^2, \quad s_{23} = n_2^2 / n_3^2, \quad a = r_2 / r_1,$$

$$x_1 = k n_1 U_1^2 U_2^2 / \beta V_{12}^2, \quad x_2 = k n_3 a^2 U_2^2 W_3^2 / \beta V_{23}^2,$$

$$V_{12} = k r_1 \sqrt{n_1^2 - n_2^2}, \quad V_{23} = k r_2 \sqrt{n_2^2 - n_3^2}.$$

Штрих “'” означает производную по всему аргументу. Численное моделирование проводилось для $r_1 = 10$ мкм и $\lambda = 1,55$ мкм.

Обсуждение результатов

Случай $n_2 > n_1$. На рис. 3 показаны расчетные зависимости эффективного показателя преломления от толщины гофра для $n_2 = 1,46$ (кривая 1) и $n_2 = 1,47$ (кривая 2). Показатель преломления сердечника волокна $n_1 = 1,45$, показатель преломления окружающей среды $n_3 = 1$. Из рисунка видно, что существенное изменение $n_{\text{эф}}$ имеет место при толщине оболочки менее 5 мкм. При больших толщинах зависимость $n_{\text{эф}}(r_2 - r_1)$ выходит на насыщение и приближается к предельному значению, соответствующему бесконечной толщине оболочки.

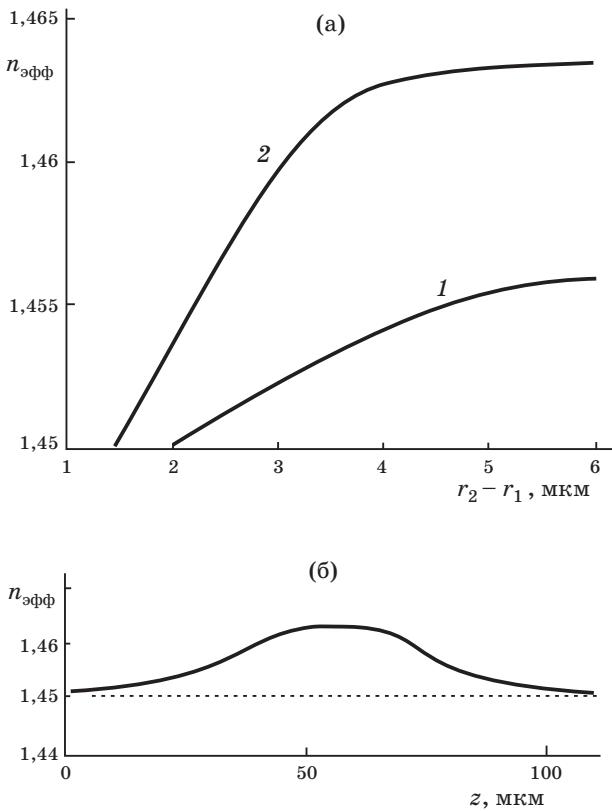


Рис. 3. а – расчетные зависимости эффективного показателя преломления от толщины гофра. 1 – $n_2 = 1,46$; 2 – $n_2 = 1,47$, $n_1 = 1,45$, $n_3 = 1,45$. б – расчетное распределение эффективного показателя преломления в продольном направлении для гофра длиной 100 мкм. $n_2 = 1,47$.

Таким образом, использование гофров с $n_2 > n_1$ позволяет изменять эффективный показатель преломления ДПР в широких пределах путем изменения толщины гофра. Увеличение n_2 дает возможность увеличить диапазон варьирования $n_{\text{эфф}}$. Так как форма гофра в продольном направлении приближенно может рассматриваться как вытянутый эллипсоид вращения, то вдоль оси волокна в пределах гофра эффективный показатель преломления изменяется. На рис. 3б показано расчетное распределение эффективного показателя преломления в продольном направлении для гофра длиной 100 мкм с $n_2 = 1,47$.

При анализе влияния толщины гофра на чувствительность волоконно-оптического датчика на основе ДПР следует рассмотреть два случая: во-первых, изменение эффективного показателя преломления Δ_1 при изменении показателя преломления окружающей среды δn_3 ; во-вторых, изменение эффективного показателя преломления Δ_2 при изменении показателя преломления

гофра δn_2 , например, в результате изменения температуры или давления. Максимальная чувствительность датчика реализуется, когда показатели преломления сердечника, оболочки и окружающей среды мало отличаются друг от друга. Поэтому при моделировании были выбраны следующие значения показателей преломления: $n_1 = 1,45$, $n_2 = 1,46$, $n_3 = 1,45$. На рис. 4а показаны расчетные зависимости Δ_1 и Δ_2 от толщины гофра для $\delta n_{2,3} = 10^{-3}$.

Из рис. 4а видно, что наибольшая чувствительность к изменению показателя преломления окружающей среды для гофрированной ДПР с $n_2 > n_1$ имеет место при толщине гофра менее 1,5 мкм (кривая 1). Зависимость $\Delta_1(r_2 - r_1)$ имеет ряд максимумов и носит периодический характер. Причину этого поясняет графическое

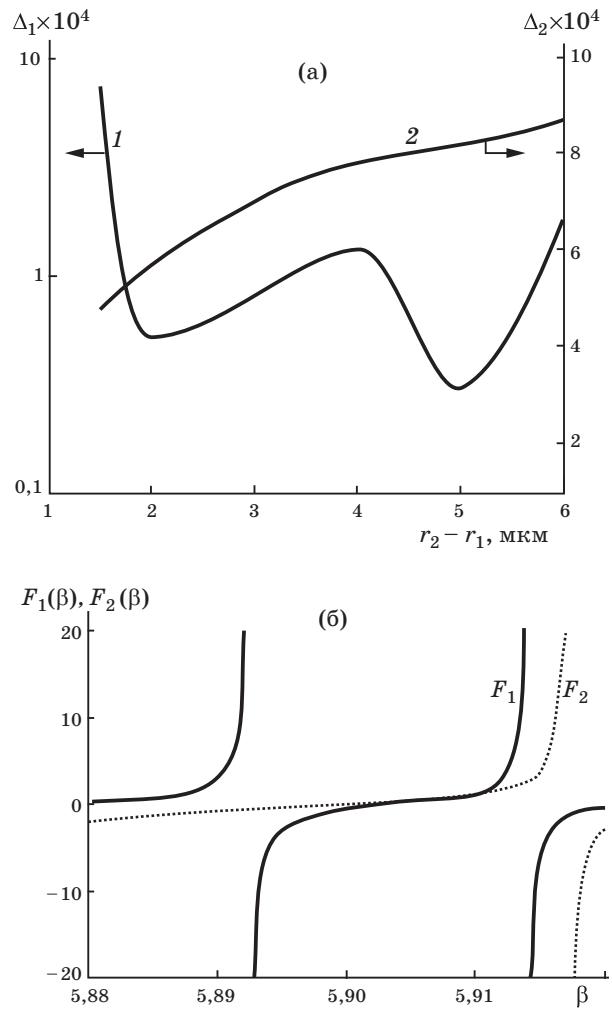


Рис.4. а – расчетные зависимости Δ_1 и Δ_2 от толщины гофра для $\delta n_2 = 10^{-3}$ (1) и $\delta n_3 = 10^{-3}$ (2). $n_1 = 1,45$, $n_2 = 1,46$, $n_3 = 1,45$. б – графическое решение характеристического уравнения (2).

решение характеристического уравнения (2), показанное на рис. 4б. Функции $F_1(\beta)$ и $F_2(\beta)$ представляют собой левую и правую части характеристического уравнения соответственно. Наиболее сильное влияние n_3 на β имеет место, когда решение (пересечение функций $F_1(\beta)$ и $F_2(\beta)$) приходится на их пологие части. Если функции $F_1(\beta)$ и $F_2(\beta)$ пересекаются в областях с высокой крутизной, чувствительность ДПР к n_3 снижается. Периодический характер функции $\Delta_1(r_2 - r_1)$ определяется периодическим характером функций $F_1(\beta)$ и $F_2(\beta)$. Влияние толщины гофра на чувствительность ДПР при изменении показателя преломления гофра иллюстрирует кривая 2 на рис. 4а. Увеличение толщины гофра в данном случае приводит к практически монотонному увеличению чувствительности ДПР. Таким образом, выбор толщины гофра позволяет избирательно увеличить чувствительность ДПР с $n_2 > n_1$ либо к изменению показателя преломления окружающей среды, либо к изменению показателя преломления гофра.

Случай $n_2 < n_1$. На рис. 5 показаны расчетные зависимости эффективного показателя преломления от толщины гофра для $n_2 = 1,44$ (кривая 1) и $n_2 = 1,45$ (кривая 2). Показатели преломления сердечника и окружающей среды $n_1 = 1,46$ и $n_3 = 1$ соответственно. Из рисунка видно, что при $n_2 < n_1$ толщина гофра оказывает слабое влияние на эффективный показатель преломления ДПР. Влияние $r_2 - r_1$ на $n_{\text{эфф}}$ проявляется в основном при толщине гофра менее 1 мкм. Причиной этого является то, что при $n_2 < n_1$ с оболочкой взаимодействует только затухающий компонент поля волноводной моды.

Чувствительность эффективного показателя преломления ДПР с $n_2 < n_1$ к изменению n_2 и n_3 при различной толщине гофров иллюстрирует рис. 6. Из рисунка видно, что Δ_1 и Δ_2 достигают максимальных значений при $r_2 - r_1 \approx 3$ мкм. Причина немонотонного характера зависимостей $\Delta_1, 2(r_2 - r_1)$ аналогична рассмотренной выше (см. рис. 4б). Как и в предыдущем случае, выбор толщины гофра позволяет избирательно увеличить чувствительность эффективного показателя ДПР либо к изменению показателя преломления окружающей среды, либо к изменению показателя преломления гофра. Так, при $r_2 - r_1 < 2,5$ мкм возрастает чувствительность к изменению n_3 , при $r_2 - r_1 > 3,5$ мкм возрастает чувствительность к изменению n_2 . Это дает возможность создавать датчики на основе ДПР с гофрированным покрытием, избирательно реагирующие только на один тип внешних воздействий.

Сравнение случаев $n_2 > n_1$ и $n_2 < n_1$ показывает, что в первом случае варьирование толщины гофра оказывает более сильное влияние на эффективный показатель преломления ДПР. При разработке датчиков и сенсоров на основе ДПР это дает возможность в широких пределах изменять оптические характеристики ДПР, в частности, амплитуду и спектральную ширину их резонансов. Чувствительность и избиратель-

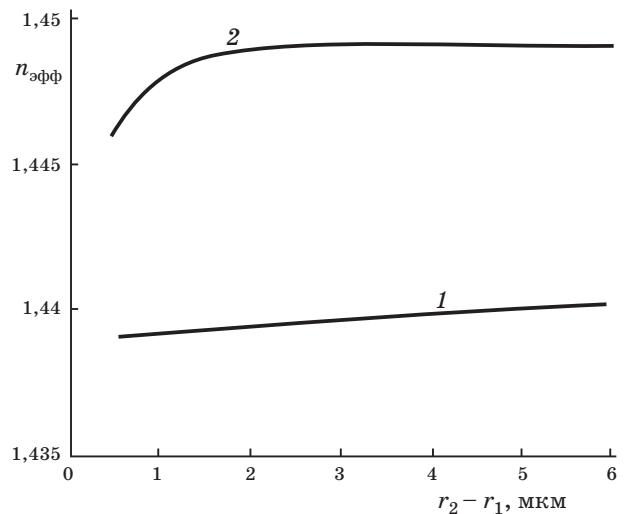


Рис. 5. Расчетные зависимости эффективного показателя преломления от толщины гофра.
1 – $n_2 = 1,44$; 2 – $n_2 = 1,45$. $n_1 = 1,46$, $n_3 = 1$.

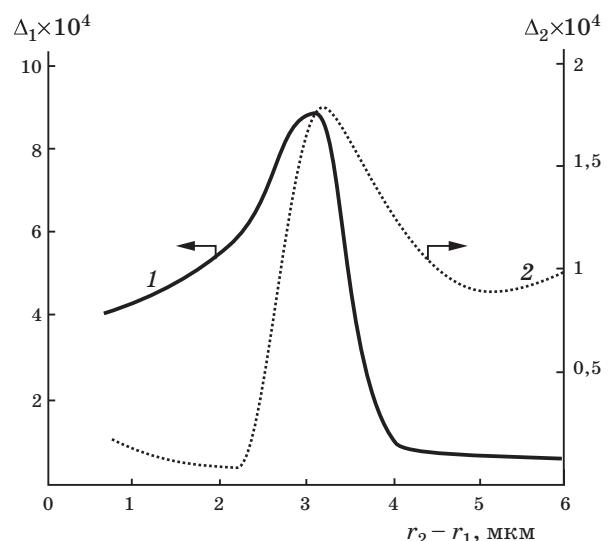


Рис. 6. Расчетные зависимости Δ_1 и Δ_2 от толщины гофра для $\delta n_2 = 10^{-3}$ (1) и $\delta n_3 = 10^{-3}$ (2).
 $n_1 = 1,46$, $n_2 = 1,44$, $n_3 = 1,43$.

ность обоих типов ДПР к внешним воздействиям оказывается примерно одинаковой.

Выводы

Численное моделирование показало, что в ДПР с полимерными гофрированными покрытиями появляется возможность изменять эффективный показатель преломления в широких пределах путем изменения показателя преломления и толщины гофра. Выбор определенной толщины гофра позволяет также обеспечить избирательную чувствительность ДПР к определенному типу внешнего воздействия.

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. of Lightwave Technol.* 1996. V. 14. № 1. P. 58–65.
2. Erdogan T. Fiber grating spectra // *J. of Lightwave Techn.* 1997. V. 15. № 8. P. 1277–1294.
3. James S.W., Tatam R.P. Optical fiber long-period grating sensors: characteristics and applicati-
- on // *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. of 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. of Lightwave Technol.* 2001. V. 19. № 8. P. 1212–1220.
6. Сидоров А.И., Цирукhin А.А. Формирование полимерных периодических структур на поверхности оптических волокон // *ЖТФ*. 2010. V. 80. B. 1. С. 125–129.
7. Adams M. Введение в теорию оптических волновод. М.: Мир, 1984. 512 с.
8. Бусурин В.И., Носов Ю.Р. Волоконно-оптические датчики: физические основы, вопросы расчета и применения. М.: Энергоатомиздат, 1990. 320 с.
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.