

ДИФРАКЦИОННЫЕ СТРУКТУРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ СРЕДЫ НА ОСНОВЕ ЭФФЕКТА ВОЗБУЖДЕНИЯ БЛОХОВСКИХ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН

Е.А. Кадомина, Е.А. Безус, Л.Л. Досколович

Институт систем обработки изображений РАН, Самара, Россия,
Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет) (СГАУ), Самара, Россия

Предложена новая планарная конфигурация оптического датчика показателя преломления среды на основе эффекта возбуждения блоховских поверхностных волн, состоящая из дифракционной решетки и одномерного фотонного кристалла. Результаты работы могут найти применение при создании новых датчиков параметров среды, интегрированных на чипе.

Ключевые слова: фотонный кристалл, блоховская поверхностная волна, дифракционная решётка, оптический датчик, ближнее поле, уравнения Максвелла, метод фурье-мод.

Введение

В настоящее время для мониторинга параметров среды и обнаружения различных микрообъектов широко применяют оптические датчики, основанные на резонансном эффекте при возбуждении различных поверхностных волн (плазмон-поляритонов – ППП и блоховских поверхностных волн – БПВ). Датчики, основанные на ППП [1-3], имеют существенный недостаток – относительно высокие потери на поглощение. Датчики, основанные на БПВ, лишены этого недостатка, поскольку БПВ могут распространяться в полностью диэлектрических структурах. Кроме того, БПВ могут быть как ТМ-, так и ТЕ-поляризованными. Предложенные в последнее время датчики на основе БПВ [4-9] обладают высокой чувствительностью (точность измерения показателя преломления менее 10^{-6}). В существующих работах возбуждение БПВ осуществляется в геометрии Кречмана, что приводит к относительно большому размеру датчиков. Перспективный подход к уменьшению размеров датчиков состоит в нанесении на поверхность фотонного кристалла дифракционной решётки, обеспечивающей возбуждение БПВ в резонансных условиях. Именно такая конфигурация датчика исследована в настоящей работе.

1. Схема и характеристики оптического датчика

На рис.1 приведена схема исследуемого датчика. Входящий в структуру фотонный кристалл (ФК) состоит из N пар чередующихся плоскопараллельных однородных слоев (N периодов). Рассмотрим следующий пример: толщины слоев ФК $h_1 = 96\text{нм}$ и $h_2 = 140\text{нм}$, диэлектрические проницаемости $\varepsilon_1 = 4,51 + 1,7 \cdot 10^{-3}i$ (соответствует TiO_2 при $\lambda_0 = 550\text{нм}$) и $\varepsilon_2 = 2,05 + 6 \cdot 10^{-4}i$ (SiO_2 при $\lambda_0 = 550\text{нм}$). На верхней поверхности ФК размещен дополнительный однородный слой с толщиной h' и диэлектрической проницаемостью ε' . Для простоты описания положим $\varepsilon' = \varepsilon_1$ и $h' = h_1 + h_c$, где величину $h_c \in [-h_1, 0]$ будем называть величиной обрезки. Примем параметр $h_c = -63,8\text{нм}$. Над ФК находится

однородный диэлектрик, показатель преломления n_{sub} которого требуется измерить. Отметим, что в рассматриваемом примере показатель преломления среды варьируется в диапазоне 1,33 – 1,34 (дистиллированная вода и слабые растворы $NaCl$). С противоположной стороны ФК помещена дифракционная решётка с периодом d_{gr} , высотой h_{gr} , шириной ступеньки l_{gr} и диэлектрической проницаемостью ε_{gr} (далее $\varepsilon_{gr} = \varepsilon_1$). Параметры d_{gr} , h_{gr} , l_{gr} выбираются таким образом, чтобы БПВ возбуждалась заданным порядком дифракции решётки.

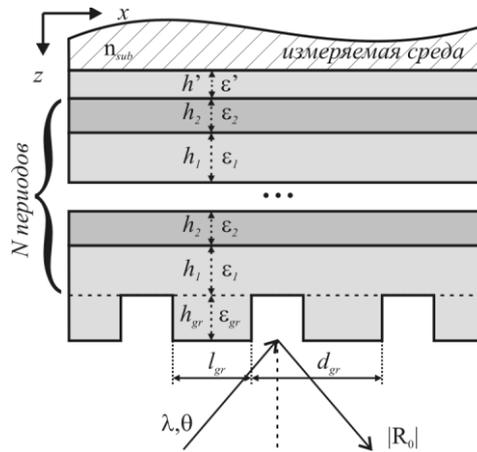


Рис.1. Схема исследуемого оптического датчика с дифракционной решёткой и фотонным кристаллом

Принцип работы датчика заключается в измерении коэффициента отражения при плавно изменяющемся угле падения или длине волны падающего излучения. В окрестности резонанса, возникающего при определённом сочетании параметров (например, угла падения и показателя преломления измеряемой среды), на границе ФК и измеряемой среды происходит возбуждение БПВ, и наблюдается резкое уменьшение коэффициента отражения (резонансный минимум), которое фиксируется регистрирующим устройством.

Для оценки работы датчика будем использовать следующий стандартный критерий эффективности [6,8]:

$$FoM = S_v \cdot D/W, \quad (1)$$

где S_v – чувствительность датчика, D – величина глубины минимума, W – ширина минимума на полувысоте. В зависимости от изменяющейся величины (угла падения θ или длины волны λ), чувствительность датчика вычисляется по формулам $S_v = \partial \theta_{min} / \partial n$ или $S_v = \partial \lambda_{min} / \partial n$, где θ_{min} и λ_{min} – угловое и спектральное положение минимума соответственно. Для сравнения характеристик был также рассчитан аналогичный датчик в схеме Кречмана, в котором на ФК помещена призма из оптического стекла ВК7.

Отметим, что представленные здесь и далее рассчитанные значения критерия (1) и результаты моделирования работы датчиков получены на основе строгого решения задач дифракции методом фурье-мод (англ. rigorous coupled-wave analysis или Fourier modal method) [10, 11]. Вывод дисперсионных уравнений моды ФК и БПВ, условия

возбуждения БПВ, а также возбуждение БПВ симметричными порядками дифракционной решётки детально описаны в предыдущих работах авторов [12,13].

2. Моделирование параметров оптического датчика при изменяющемся угле падения

Оценка характеристик датчика при изменяющемся угле падения была проведена для 4-х измеряемых сред: дистиллированная вода, раствор NaCl 1%, раствор NaCl 2%, раствор NaCl 3% с показателями преломления 1,3330, 1,3347, 1,3364, и 1,3381 соответственно.

Параметры дифракционной решётки $d_{gr} = 453,2\text{нм}$, $h_{gr} = 563,7\text{нм}$, $l_{gr} = 0,59d_{gr}$ определялись с помощью оптимизационной процедуры при условии, что БПВ возбуждается первым порядком дифракции при угле падения 10° для показателя преломления измеряемого вещества 1,335.

На рис.2 приведены графики зависимостей модуля комплексного коэффициента отражения от угла падения для четырёх измеряемых веществ. Из рис.2 следует, что для всех определяемых веществ наблюдается резкое изменение модуля комплексного коэффициента отражения. Отметим, что для датчика характерна однозначная и непрерывная зависимость положения минимума модуля комплексного коэффициента отражения от угла падения и показателя преломления измеряемой среды, что обеспечивает возможность применения датчиков такого типа для измерения непрерывно меняющегося показателя преломления среды. Из приведённых в табл.1 характеристик датчика на основе дифракционной решётки и аналогичного ему датчика в схеме Кречмана следует, что характеристики датчика с дифракционной решёткой, рассчитанные по критерию (1), лишь незначительно уступают таковым для датчика в схеме Кречмана и значительно превышают теоретический предел для ППП на основе золотой пленки ($FoM = 108\text{RIU}^{-1}$) [1].

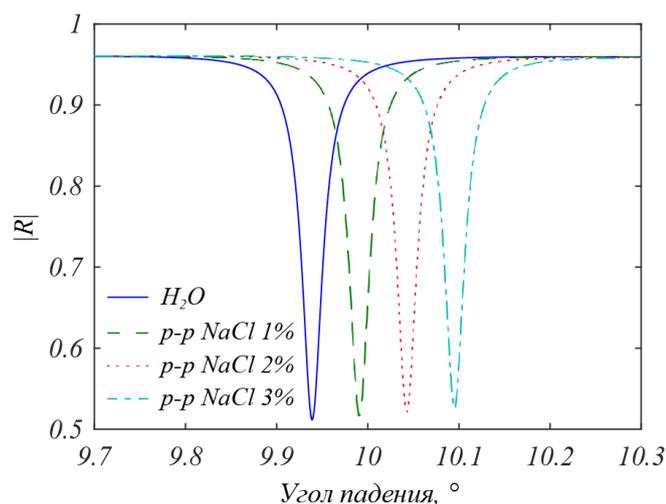


Рис.2. Зависимость модуля коэффициента отражения от угла падения для различных измеряемых сред

Табл.1. Сравнение характеристик двух конфигураций датчиков: на основе схемы Кречмана и с дифракционной решёткой при изменяющемся угле падения.

Характеристики	ddH_2O	<i>NaCl</i> 1%	<i>NaCl</i> 2%	<i>NaCl</i> 3%
Датчик на основе схемы Кречмана				
$S_v, ^\circ / RIU$	48,46	48,85	49,24	49,05
$W \times 10^{-2}, ^\circ$	3,82	3,81	3,80	3,79
D	0,519	0,518	0,516	0,514
FoM, RIU^{-1}	659	664	669	665
Датчик с дифракционной решёткой				
$S_v, ^\circ / RIU$	30,46	30,61	30,76	30,68
$W \times 10^{-3}, ^\circ$	2,71	2,69	2,67	2,65
D	0,449	0,444	0,440	0,435
FoM, RIU^{-1}	504	505	506	504

3. Моделирование параметров оптического датчика при изменяющейся длине волны

Рассмотрим теперь на тех же примерах измеряемых веществ оптический датчик при изменяющейся длине волны излучения.

Параметры решётки $d_{gr} = 396,8\text{нм}$, $h_{gr} = 805,5\text{нм}$, $l_{gr} = 0,72d_{gr}$ определялись в процессе оптимизации из условия возбуждения при нормальном падении волны ($\lambda_0 = 550\text{нм}$) ± 1 порядками дифракции двух БПВ противоположных направлений для показателя преломления измеряемого вещества, равного 1,335.

Приведенные на рис.3 графики зависимости модуля комплексного коэффициента отражения от длины волны для рассматриваемых веществ показывают однозначную зависимость положения минимума модуля комплексного коэффициента отражения от длины волны и показателя преломления измеряемой среды. Из данных, приведенные в табл.2, следует, что значения критерия (1) для датчика с дифракционной решеткой для 3 из 4 рассматриваемых веществ превосходят аналогичные значения для датчика в схеме Кречмана.

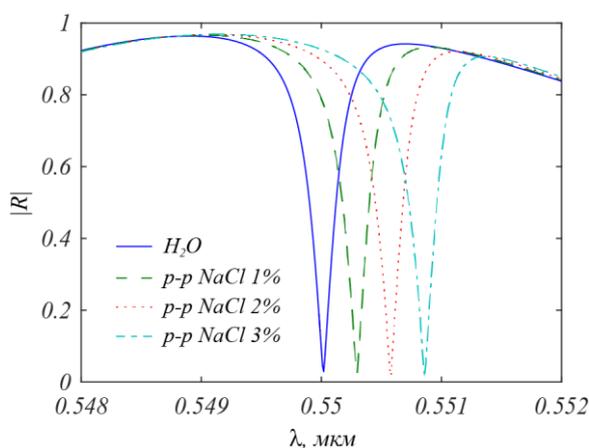


Рис.3. Зависимость модуля коэффициента отражения от длины волны для различных измеряемых сред

Табл.2. Сравнение характеристик двух модификаций датчика: по схеме Кречмана и с дифракционной решёткой с изменяющейся длиной волны.

Характеристики	ddH_2O	NaCl		
		1%	2%	3%
Датчик по схеме Кречмана				
$S_p, nm/RIU$	773,5	786,9	801,0	794,0
W, nm	0,610	0,610	0,612	0,613
D	0,502	0,513	0,526	0,540
$FoM \times 10^3, RIU^{-1}$	636	662	689	699
Датчик с дифракционной решёткой				
$S_p, nm/RIU$	163,9	165,2	166,5	165,8
W, nm	0,218	0,218	0,219	0,228
D	0,939	0,954	0,968	0,956
$FoM \times 10^3, RIU^{-1}$	707	722	735	695

Заключение

В работе предложен и численно исследован планарный вариант датчика показателя преломления среды на основе эффекта возбуждения БПВ с дифракционной решёткой при двух изменяющихся параметрах: угле падения и длине волны излучения. Проведено сравнение рабочих характеристик двух конфигураций датчиков (на основе схемы Кречмана и с дифракционной решёткой) для четырёх измеряемых веществ: воды, раствора NaCl 1%, раствора NaCl 2% и раствора NaCl 3%. Показано, что датчики обладают близкими рабочими характеристиками с аналогичными им датчиками в схеме Кречмана, которые значительно превышают теоретический предел для ППП на основе золотой пленки.

Результаты работы могут найти применение при создании новых планарных датчиков параметров среды, интегрированных на чипе.

Благодарности

Работа выполнена за счёт гранта Российского научного фонда – РНФ (№14-31-00014).

Литература

1. Piliarik, M. Surface plasmon resonance (SPR) sensors: approaching their limits? / M.Piliarik, J. Homola // J. Opt. Express. – 2009. – Vol.17, №19. – P.16505-16517.
2. Shankaran, D. R. Recent advancements in surface plasmon resonance immunosensors for detection of small molecules of biomedical, food and environmental interest / D. R. Shankaran, K. V. Gobi, N. Miura // Sens. Actuators B. – 2007. – Vol.121, №1. – P.158–177.
3. Homola, J. Present and future of surface plasmon resonance biosensors / J. Homola // Anal. Bioanal. Chem. – 2003. – Vol.377. – P. 528–539.
4. Sinibaldi, A. Direct comparison of the performance of Bloch surface wave and surface plasmon polariton sensors / A. Sinibaldi, N. Danz, E. Descrovi, P. Munzert, U. Schulz, F. Sonntag, L. Dominici, F. Michelotti // Sensors and Actuators B. – 2012. – Vol.174. – P.292–298.
5. Li, Y. Phase-sensitive Bloch surface wave sensor based on variable angle spectroscopic ellipsometry / Y. Li, T. Yang, Z. Pang, Z. Pang, G. Du, S. Song, S. Han // Opt. Express. – 2014. – Vol.22, №18. – P. 21403–21410.

6. Sinibaldi, A. Combining label-free and fluorescence operation of Bloch surface wave optical sensors / A. Sinibaldi, A. Fieramosca, R. Rizzo, A. Anopchenko, N. Danz, P. Munzert, C. Magistris, C. Barolo, F. Michelotti // *Opt. Lett.* – 2014. – Vol.39. – P.2947–2950.
7. Rizzo, R. Optimization of angularly resolved Bloch surface wave biosensors / R. Rizzo, N. Danz, F. Michelotti, E. Maillart, A. Anopchenko, C. Wachter // *Opt. Express.* – 2014. – Vol.22, №19. – P.23202–23214
8. Sinibaldi, A. Label-Free Detection of Tumor Angiogenesis Biomarker Angiopoietin 2 Using Bloch Surface Waves on One Dimensional Photonic Crystals / A. Sinibaldi, N. Danz, A. Anopchenko, P. Munzert, S. Schmieder, R. Chandrawati, R. Rizzo, S. Rana, F. Sonntag, A. Occhicone, L. Napione, S. De Panfilis, M. M. Stevens, F. Michelotti // *J. Lightwave Technology.* – 2015. – Vol.33, №16. – P.3385–3393.
9. Sinibaldi, A. A full ellipsometric approach to optical sensing with Bloch surface waves on photonic crystals / A. Sinibaldi, R. Rizzo, G. Figliozzi, E. Descrovi, N. Danz, P. Munzert, A. Anopchenko, F. Michelotti // *Opt. Express.* – 2013. – Vol. 21, № 20. – P. 23331–23344.
10. Moharam, M. G. Formulation for stable and efficient implementation of the rigorous coupled-wave analysis of binary gratings / M. G. Moharam, T. K. Gaylord, E. B. Grann, D. A. Pommet // *Journal of the Optical Society of America A.* – 1995. – Vol. 12. – P. 1068 – 1076.
11. Moharam, M. G. Stable implementation of the rigorous coupled-wave analysis for surface-relief gratings: enhanced transmittance matrix approach / M. G. Moharam, T. K. Gaylord, D. A. Pommet, E. B. Grann // *Journal of the Optical Society of America A.* – 1995. – Vol. 12. – P. 1077 – 1086.
12. Безус, Е.А. Фазовая модуляция поверхностных элек-тромагнитных волн с помощью дифракционного мик-рорельефа на границе одномерного фотонного кристал-ла / Е.А. Безус, Л.Л. Досколович, Д.А. Быков, В.А. Сойфер // *Письма в Журнал экспериментальной и теоре-тической физики.* – 2014. – Т. 99, № 2. – С. 67 – 71.
13. Кадомина, Е.А. Спектрально-селективное усиление ближнего поля в фотоннокристаллической структуре с дифракционной решёткой / Е.А. Кадомина, Е.А. Безус, Л.Л. Досколович // *Компьютерная оптика.* – 2015. – Т. 39, № 4. – С. 462-468.