

РЕЗОНАНСНЫЕ ФОТОННО-КРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ СТРУКТУРЫ С ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЁТКОЙ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ СРЕДЫ

Е.А. Кадомина^{1,2}, Е.А. Безус^{1,2}, Л.Л. Досколович^{1,2}

¹ Институт систем обработки изображений РАН, Самара, Россия,

² Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва
(национальный исследовательский университет) (СГАУ), Самара, Россия

Аннотация

Предложена и численно исследована новая планарная конфигурация оптического датчика показателя преломления среды на основе эффекта возбуждения блоховских поверхностных волн, включающая дифракционную решётку и фотонный кристалл. Проведено сравнение исследуемой структуры с датчиком на основе схемы Кречмана при двух изменяемых параметрах: угле падения и длине падающей волны. Результаты работы могут найти применение при создании новых датчиков параметров среды, интегрированных на чипе, а также спектральных фильтров.

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

Цитирование: Кадомина, Е.А. Резонансные фотонно-кристаллические структуры с дифракционной решёткой для измерения показателя преломления среды / Е.А. Кадомина, Е.А. Безус, Л.Л. Досколович // Компьютерная оптика. – 2016. – Т. 40, № 2. – С. 164-172. – DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-2-164-172.

Введение

Оптические датчики, основанные на эффекте плазмонного резонанса, в настоящее время широко используются для мониторинга параметров среды (показателя преломления) и обнаружения биологических микробъектов различной природы [1–3]. В простейшем случае в указанных датчиках используется резонансный эффект возбуждения поверхностного плазмон-поляритона (ППП) в конфигурации Кречмана. Существенным недостатком плазмонных датчиков являются относительно высокие потери, связанные с поглощением ППП в металле. Эти потери уменьшают добротность плазмонного резонанса и, соответственно, чувствительность датчика. В качестве альтернативы ППП рассматриваются так называемые блоховские поверхностные волны (БПВ) — электромагнитные волны, представляющие собой собственные моды границы раздела между фотонным кристаллом (ФК) и однородной средой. В отличие от плазмонных мод, такие моды могут существовать в полностью диэлектрических структурах, что позволяет практически полностью устранить потери энергии на поглощение. В этом случае добротность формируемых резонансов ограничена лишь технологическими погрешностями изготовления, поэтому в структурах на основе БПВ достижимо гигантское усиление полей, на несколько порядков превышающее аналогичные эффекты в структурах с плазмонным резонансом. Следует также отметить, что, в отличие от плазмонных мод, БПВ могут быть как ТМ-, так и ТЕ-поляризованными. Еще одним потенциальным преимуществом таких волн является наличие дополнительных параметров (геометрия периода и вид последней (неполной) элементарной ячейки ФК), позволяющих управлять их свойствами.

Предложенные в последнее время датчики на основе БПВ [4–9] обладают высокой чувствительностью. Оценка достижимой точности измерения пока-

зателя преломления в таких датчиках составляет менее 10^{-6} [6]. В то же время возбуждение БПВ в существующих работах осуществляется в геометрии Кречмана, что приводит к относительно большому размеру датчиков.

При создании новых датчиков на основе БПВ, интегрированных на чипе, представляет большой интерес разработка планарных структур нанофотоники для резонансного возбуждения БПВ или, в общем случае, набора БПВ. Перспективный подход к решению такой задачи состоит в использовании на поверхности фотонного кристалла слоя метаматериала (метаповерхности), соответствующего наноструктурированной периодической или квазипериодической структуре. В настоящей работе рассмотрены две конфигурации оптического датчика, в которых возбуждается БПВ. Первая конфигурация, основанная на схеме Кречмана, достаточно хорошо исследована и рассматривается для сравнения [6]. Основным предметом работы является теоретическое исследование второй конфигурации, предложенной авторами и содержащей вместо призмы, входящей в схему Кречмана, дифракционную решётку, возбуждающую определёнными порядками дифракции БПВ на границе фотонного кристалла.

1. Постановка задачи.

Схема и характеристики оптического датчика

На рис. 1 схематично показаны обе исследуемые конфигурации датчиков. Фотонный кристалл в обоих случаях содержит N периодов (N пар чередующихся плоскопараллельных однородных слоев с толщинами h_1 и h_2 и диэлектрическими проницаемостями ϵ_1 и ϵ_2). На верхней поверхности ФК размещен дополнительный однородный слой с толщиной h' и диэлектрической проницаемостью ϵ' . Для простоты описания положим $\epsilon' = \epsilon_2$ и $h'_2 = h_2 + h_c$, где величину $h_c \in [-h_2, 0]$ бу-

дем называть величиной обрезки. Над ФК помещен однородный слой диэлектрика, показатель преломления n_{sub} которого требуется измерить. С противоположной стороны ФК помещена призма с показателем преломления n_{pr} (рис. 1а) или дифракционная решётка с периодом d_{gr} , высотой h_{gr} , шириной ступеньки l_{gr} и диэлектрической проницаемостью ϵ_{gr} (рис. 1б). Параметры дифракционной решётки выбираются таким образом, чтобы БПВ возбуждалась заданным порядком решётки.

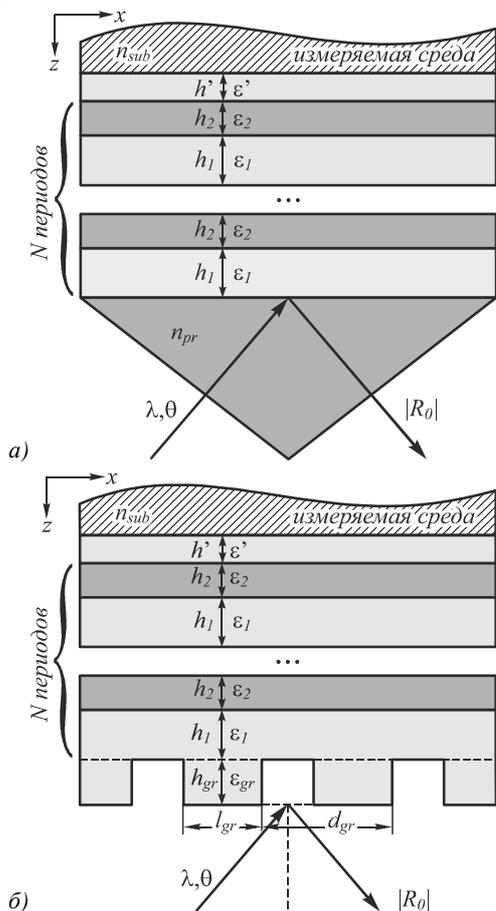


Рис. 1. Схема двух рассматриваемых конфигураций оптического датчика: на основе схемы Кречмана (а) и с дифракционной решёткой (б)

Отметим, что настоящая работа носит теоретический характер и направлена на демонстрацию принципиальной работоспособности исследуемой конфигурации датчика. В связи с этим при моделировании подложка, являющаяся механической основой структуры, не учитывалась. При этом возможны два варианта экспериментальной реализации структуры такого типа: создание так называемой «подвешенной» структуры и изготовление дифракционной решётки не на границе раздела воздух/ФК, а на оптически прозрачной подложке, через которую будет освещаться структура. «Подвешенная» структура изготавливается следующим образом: на тонкую подложку («sacrificial layer») наносится необходимый набор слоев, в верхнем из которых изготавливается дифракционная решетка. Затем в подложке создается сквозное «окно» до первого слоя

фотонного кристалла, в которое и будет помещаться измеряемое вещество [10–11].

В качестве примера датчика, работающего в геометрии Кречмана, был рассмотрен датчик из работы [6]. Представленные в [6] экспериментальные результаты оценки работы датчика зависят от качества изготовления структуры и от спектральной характеристики падающего излучения. В [6] приведены исходные теоретические параметры датчика, однако недостаточно данных для определения параметров созданного образца с учетом ошибок изготовления. В связи с этим сравнение оценок работы датчиков двух различных конфигураций (рис.1) проводилось для исходных теоретических параметров из [6] без учета спектральных характеристик падающего излучения. В [6] рассматривается ФК с толщинами слоев $h_1=495$ нм, $h_2=170$ нм и следующими показателями преломления материалов: $n_1=1,454+6 \cdot 10^{-6}i$ (SiO_2) и $n_2=2,060+2 \cdot 10^{-5}i$ (Ta_2O_5) для длины волны $\lambda_0=804$ нм [6]. Как и в работе [6], все рассмотренные ниже примеры рассчитаны для случая ТЕ-поляризации падающей волны. Отметим, что для совпадения условий моделирования с примером из работы [6] необходимо принять параметр $h_c=-h_2$. В [6] полагается, что показатель преломления измеряемой среды n_{sub} варьируется от $n_{дH_2O}=1,328$ до $n_{EtOH}=1,357$ (дистиллированная вода и этанол соответственно), показатель преломления призмы $n_{pr}=1,526$ (полимер TOPAS). Для структуры с дифракционной решёткой выберем показатель преломления решётки равным показателю преломления первого слоя ФК (SiO_2).

Отметим также, что вывод дисперсионных уравнений моды ФК и БПВ, условия возбуждения БПВ, а также возбуждение БПВ симметричными порядками дифракционной решётки описаны в предыдущих работах авторов [12,13]. В [12] приведен характерный график зависимости нормированной константы распространения БПВ (эффективного показателя преломления БПВ) от толщины последнего слоя ФК. Наличие и вид такой зависимости позволяют адаптировать ФК для определения показателей преломления более плотных сред, чем рассматриваемых в данной работе.

Принцип работы датчика заключается в измерении коэффициента отражения при плавно изменяющейся величине угла падения (или длине волны излучения). В окрестности резонанса, возникающего при определённом сочетании параметров (например, угла падения и показателя преломления измеряемой среды), наблюдается резкое уменьшение коэффициента отражения (резонансный минимум), которое фиксируется регистрирующим устройством.

В датчиках, основанных на возбуждении БПВ, при отклонении показателей преломления материалов структуры от теоретических значений смещаются положения минимумов коэффициента отражения по углу (по длине волны) для различных показателей преломления измеряемых сред. Значения показателей преломления, используемые при моделировании в настоящей работе, совпадают со значениями из рабо-

ты [6], полученными путём измерения в процессе изготовления структуры.

Для оценки и сравнения работы датчиков двух рассматриваемых конфигураций 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.

2. Исследование характеристик датчика в зависимости от числа периодов ФК

Согласно (1), рабочие характеристики исследуемых датчиков существенно зависят от ширины W и глубины D резонансного минимума. В структурах, содержащих диэлектрический ФК, можно управлять добротностью резонанса за счет изменения количества периодов ФК. Добротность резонанса тем выше, чем большее число периодов содержит ФК. С ростом добротности уменьшается ширина резонансного минимума по длине волны и, как правило, по углу падения. Для работы датчика необходимо, чтобы слои ФК и/или измеряемая среда имели небольшое поглощение. Данное условие всегда выполняется для реальных материалов (показатели преломления материалов ФК в пункте 1 имеют мнимые части). Наличие поглощения в слоях ФК приводит к задаче оптимального выбора количества периодов N . С одной стороны, при малом N (низкая добротность резонанса) значение критерия (1) может быть низким из-за больших значений ширины минимума W . С другой стороны, при увеличении числа периодов N в ФК возрастает поглощение, что может снизить величину критерия (1) за счет уменьшения глубины пика D . Так как при изменении числа периодов N положение резонанса практически не меняется, то чувствительность датчика S_v , определяемую положением резонанса, будем считать не зависящей от N . Для краткости изложения приведем результаты для датчика в конфигурации Кречмана с изменяющимся углом падения. В случае изменяющейся длины волны можно получить аналогичные результаты. В табл. 1 приведены зависимости глубины минимума D , ширины минимума на полувысоте W , а также их отношения от числа периодов при монохроматическом излучении ($\lambda_0 = 804$ нм) для двух измеряемых показателей преломления (дистиллированной воды и этанола). 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) [14, 15]. Из табл. 1 следует, что с увеличением числа периодов ширина минимума W уменьшается, достигая значений менее 10^{-3} . С другой стороны, глубина минимума D с увеличением числа периодов сначала увеличивается, а

затем начинает уменьшаться. Из табл. 1 можно сделать вывод, что оптимальное число периодов ФК по критерию (1) для рассматриваемого примера равно 6. Однако для совпадения условий моделирования с примером из работы [6] примем число периодов равным 5.

Табл. 1. Характеристики датчика (величины D , W , D/W (1)) для двух измеряемых показателей преломления (дистиллированной воды и этанола) при изменении количества периодов ФК

Число периодов ФК, N	Изменяемое вещество – вода		
	D	W^o	D/W
3	0,0126	0,1440	0,08
4	0,0621	0,0289	2,15
5	0,2607	0,0065	40,11
6	0,8135	0,0016	508,43
7	0,4863	0,0010	486,3
8	0,1326	0,0001	1326
N	Изменяемое вещество – этанол		
3	0,0185	0,0827	0,22
4	0,1140	0,0131	8,7
5	0,5471	0,0023	237,82
6	0,6018	0,0009	668,67
7	0,1308	0,0008	163,5
8	0,0226	0,0008	28,25

Другим фактором, определяющим выбор количества периодов N , является величина коэффициента поглощения материалов слоев ФК. Так как поле БПВ локализовано в основном в оптически более плотном слое ФК, то изменение коэффициента поглощения оптически более плотного слоя ФК оказывает на рабочие характеристики датчика (D , W , D/W) существенно более сильное влияние, чем изменение коэффициента поглощения оптически менее плотного слоя [9]. Поэтому при исследовании влияния числа периодов N ФК на рабочие характеристики датчика при различном поглощении будем учитывать только изменение коэффициента поглощения оптически более плотного слоя ФК (для рассматриваемого примера – слой Ta_2O_5). В табл. 2 приведены зависимости величин D , W , D/W от числа периодов при монохроматическом излучении для одного измеряемого показателя преломления (дистиллированной воды) при значениях мнимой части показателя преломления Ta_2O_5 , равных $2 \cdot 10^{-6}$ и $2 \cdot 10^{-4}$.

Табл. 2. Характеристики датчика (D , W , D/W) при различных значениях величины мнимой части показателя преломления Ta_2O_5 (изменяемое вещество – дистиллированная вода)

Число периодов ФК, N	$n_2 = 2,060 + 2 \cdot 10^{-6}i$		
	D	W^o	D/W
6	0,1283	0,0013	98,69
7	0,4749	0,0003	1583
8	0,8296	0,0001	8296
9	0,2706	0,00017	1592
N	$n_2 = 2,060 + 2 \cdot 10^{-4}i$		
3	0,119	0,1481	0,80
4	0,4847	0,032	15,15
5	0,8011	0,011	72,83
6	0,2563	0,0097	26,42

В табл. 1 характеристики для дистиллированной воды получены при значении мнимой части показателя

преломления Ta_2O_5 , равной $2 \cdot 10^{-5}$. Из табл. 1, 2 следует, что при уменьшении мнимой части показателя преломления для сохранения характеристик датчика требуется увеличивать количество периодов ФК. При этом ширина минимума W при идентичных глубинах минимума D может отличаться на 1–2 порядка для различных значений мнимой части показателя преломления Ta_2O_5 .

Ещё одним фактором, способным оказать влияние на выбор оптимального числа периодов ФК, является некохроматичность источника излучения. В качестве примера рассмотрим некохроматический источник излучения $\lambda \pm \Delta\lambda$ ($\Delta\lambda = 1,2$ нм) с Гауссовым спектром. Результаты, приведенные в табл. 3, показывают, что при некохроматическом излучении характеристики датчика значительно ухудшаются относительно монохроматического излучения. В частности, уменьшается глубина пика и увеличивается его ширина. При этом порядок величины W приближается к полученному экспериментально значению, приведённому в [6], а оптимальное количество периодов ФК равняется 5. Важно также отметить, что в случае монохроматического излучения величина полуширины минимума может достигать очень малых значений (менее $0,001^\circ$), что превышает точность по углу большинства современных поворотных столиков. Однако при некохроматическом излучении даже с небольшой шириной спектра ширина минимума значительно увеличивается.

Табл. 3. Характеристики датчика (D , W , D/W) для двух измеряемых показателей преломления (дистиллированной воды и этанола) при изменении количества периодов ФК в случае некохроматического излучения

Число периодов ФК, N	Измеряемое вещество – вода		
	D	W°	D/W
4	0,053	0,041	1,293
5	0,101	0,023	4,391
6	0,099	0,020	4,95
N	Измеряемое вещество – этанол		
4	0,079	0,024	3,292
5	0,115	0,016	7,186
6	0,055	0,017	3,235

Таким образом, определение оптимального количества периодов ФК является существенным этапом при выборе параметров оптического датчика.

3. Моделирование параметров оптического датчика при монохроматическом излучении при изменяющемся угле падения

Оценку характеристик датчиков двух конфигураций (Кречмана и с дифракционной решёткой) будем проводить на примере четырёх контрольных измеряемых веществ: дистиллированной воды ($n_{ддH_2O} = 1,328$), раствора глюкозы 5% ($n_{GLU5\%} = 1,336$), раствора глюкозы 10% ($n_{GLU10\%} = 1,343$) и этанола ($n_{EtOH} = 1,357$).

Для датчика в конфигурации Кречмана интервал по углу падения, при котором наблюдается резонанс для заданного интервала показателей преломления измеряемого вещества, составил $[63; 65]^\circ$. Для датчика с ди-

фракционной решёткой параметры решётки определялись с помощью оптимизационной процедуры при условии, что БПВ возбуждается первым порядком дифракции при угле падения 10° для некоторого среднего показателя преломления измеряемого вещества ($n_{mid} = 1,3425$). Была найдена решётка со следующими параметрами: период $d_{gr} = 670,8$ нм, высота $h_{gr} = 625,9$ нм, ширина ступеньки $l_{gr} = 0,59d_{gr}$. Остальные параметры совпадают с параметрами, описанными в пункте 1. Интервал по углу падения для датчика с дифракционной решёткой составил $[9,7; 10,3]^\circ$.

На рис. 2 приведены рассчитанные методом Фурье-мод графики зависимостей модуля комплексного коэффициента отражения от угла падения для четырёх контрольных измеряемых веществ для датчика в конфигурации Кречмана (рис. 2а) и для датчика с дифракционной решёткой (рис. 2б).

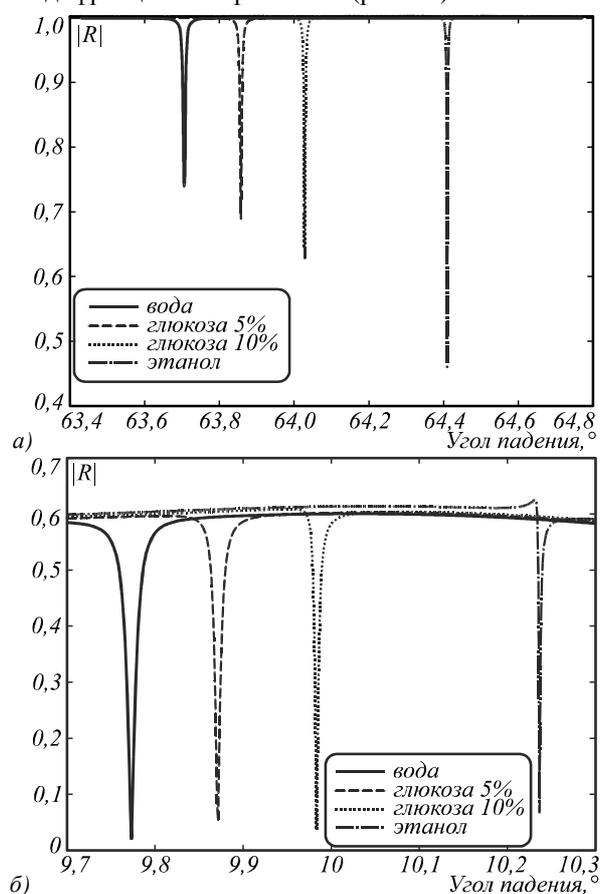


Рис. 2. Зависимости модуля коэффициента отражения от угла падения для различных измеряемых сред для датчика в конфигурации Кречмана (а) и для датчика с дифракционной решёткой (б)

Из рис. 2 следует, что для всех 4 контрольных определяемых веществ наблюдается резкое изменение модуля комплексного коэффициента отражения для обеих конфигураций датчиков. Из приведенных в табл. 4 характеристик датчиков следует, что рассчитанные характеристики двух исследуемых конфигураций датчиков практически идентичны, что свидетельствует о возможности применения датчика с дифракционной решёткой вместо датчика на основе схемы Кречмана.

Табл. 4. Сравнение характеристик двух конфигураций датчиков: на основе схемы Кречмана и с дифракционной решёткой при изменяющемся угле падения

Характеристики	ddH ₂ O	GLU 5 %	GLU 10 %	EtOH
Датчик на основе схемы Кречмана				
$S_v, \text{ }^\circ\text{RIU}$	20,25	22,76	27,23	25,67
$W \times 10^{-3}, \text{ }^\circ$	6,5	5,2	4,0	2,3
D	0,261	0,311	0,375	0,547
$FoM \times 10^3, \text{ RIU}^{-1}$	0,82	1,37	2,54	6,42
Датчик с дифракционной решёткой				
$S_v, \text{ }^\circ\text{RIU}$	13,08	14,97	18,08	16,99
$W \times 10^{-3}, \text{ }^\circ$	10	6,5	4,1	1,9
D	0,582	0,591	0,597	0,577
$FoM \times 10^3, \text{ RIU}^{-1}$	0,76	1,35	2,62	5,11

Стоит отметить, что в прикладных задачах показатель преломления измеряемого вещества часто изменяется непрерывно (например, в химических или биологических процессах), что требует наличия однозначной и непрерывной зависимости положения минимума модуля комплексного коэффициента отражения от угла падения и показателя преломления измеряемой среды. Такая зависимость для датчиков обеих конфигураций приведена на рис. 3а, б и свидетельствует о возможности применения данных датчиков для измерения непрерывно меняющегося показателя преломления среды.

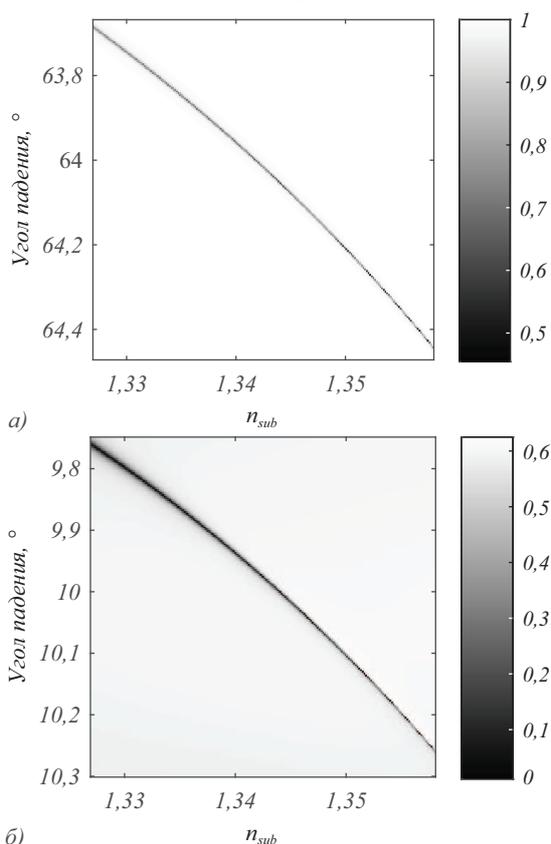


Рис. 3. Зависимости модуля коэффициента отражения от угла падения и показателя преломления измеряемой среды в датчике на основе схемы Кречмана (а) и с дифракционной решёткой (б)

Следует отметить, что рабочие характеристики резонансных структур могут существенно изменяться

даже при небольших отклонениях их геометрических параметров от расчетных значений. Однако при использовании современных технологических процессов погрешность изготовления параметров дифракционных решёток не превышает 5% при профиле решётки, очень близком к прямоугольному [16]. При этом погрешности изготовления периода решётки пренебрежимо малы (не превышают единиц нм), поэтому оценим изменение эффективности датчика при отклонении от расчётных значений двух параметров: высоты решётки и ширины ступеньки. При отклонении ширины ступеньки на $\pm 5\%$ интервал по критерию эффективности FoM при измерении показателя преломления воды составил $[0,25; 0,95] \times 10^3 \text{ RIU}^{-1}$. Такие колебания значений в основном вызваны изменениями величины W . При отклонении высоты дифракционной решётки на $\pm 5\%$ от расчётного значения интервал по критерию эффективности FoM составил $[0,45; 1,5] \times 10^3 \text{ RIU}^{-1}$, что также объясняется изменением W . Разброс значений критерия FoM в обоих случаях достаточно велик, однако датчики с такими значениями FoM вполне работоспособны. Можно также отметить, что критерием оптимизации при поиске параметров дифракционной решётки служила величина глубины минимума D , однако при экспериментальной реализации датчика критерий оптимизационной процедуры может быть усложнен для поиска параметров решётки с рабочими характеристиками, устойчивыми к отклонениям геометрических параметров структуры от расчётных значений в некотором диапазоне.

4. Моделирование параметров оптического датчика при монохроматическом излучении при изменяющейся длине волны

Рассмотрим теперь обе конфигурации датчиков, но при изменяющейся длине волны излучения. Оценку характеристик будем проводить на примерах контрольных веществ, описанных выше.

Для датчика в конфигурации Кречмана интервал по длинам волн, соответствующий диапазону измеряемых показателей преломления, составил $[780; 840]$ нм. Для датчика с дифракционной решёткой параметры решётки определялись в процессе оптимизации из условия возбуждения при нормальном падении волны ($\lambda_0 = 804$ нм) ± 1 порядками дифракции двух БПВ противоположных направлений для некоторого среднего показателя преломления измеряемого вещества ($n_{mid} = 1,3425$). В результате была найдена решётка со следующими параметрами: период $d_{gr} = 586$ нм, высота $h_{gr} = 727,8$ нм, ширина ступеньки $l_{gr} = 0,51d_{gr}$. Остальные параметры совпадают с параметрами предыдущего примера. Для конфигурации датчика с дифракционной решёткой интервал по длинам волн составил $[801,5; 807,5]$ нм.

На рис. 4 приведены графики зависимостей модуля комплексного коэффициента отражения от длины волны для датчика в конфигурации Кречмана (рис. 4а) и для датчика с дифракционной решёткой (рис. 4б).

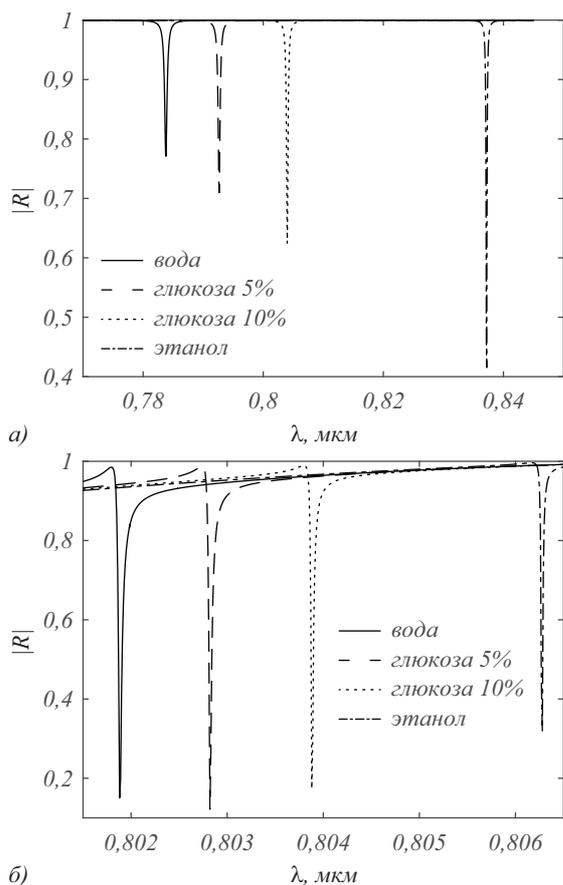


Рис. 4. Зависимости модуля коэффициента отражения от длины волны для различных измеряемых сред в датчике по схеме Кречмана (а) и в датчике с дифракционной решёткой (б)

В табл. 5 приведены характеристики рассматриваемых датчиков.

Из рис. 4 и табл. 5 следует, что критерий (1) для датчика с дифракционной решеткой в 1,2–5,1 раз превышает таковой для датчика по схеме Кречмана.

Табл. 5. Сравнение характеристик двух модификаций датчика: по схеме Кречмана и с дифракционной решёткой с изменяющейся длиной волны

Характеристики	ddH_2O	GLU 5 %	GLU 10 %	EtOH
Датчик по схеме Кречмана				
$S_v, nm/RIU$	1182	1512	2370	2070
W, nm	0,475	0,374	0,287	0,159
D	0,230	0,291	0,375	0,626
$FoM \times 10^3, RIU^{-1}$	0,57	1,18	3,09	8,11
Датчик с дифракционной решёткой				
$S_v, nm/RIU$	125	141	171	161
W, nm	0,039	0,031	0,024	0,016
D	0,924	0,947	0,976	0,937
$FoM \times 10^3, RIU^{-1}$	2,91	4,33	7,08	9,72

При этом рабочий диапазон длин волн для структуры с дифракционной решеткой в несколько раз меньше диапазона для схемы Кречмана. При экспериментальной реализации это может привести к необходимости использования высокоточных дорогостоящих спектрометров. Рабочий диапазон длин волн для структуры с решеткой может быть увеличен за

счет «настройки» дисперсии, возбуждаемой БПВ (за счет выбора параметров ФК), а также за счет перехода к наклонному падению.

Как и в предыдущем случае, для обеих конфигураций датчика наблюдается однозначная и непрерывная зависимость положения минимума модуля комплексного коэффициента отражения от длины волны и показателя преломления измеряемой среды. На рис. 5 приведено поле в структуре для различных измеряемых веществ (дистиллированная вода, раствор глюкозы 10 %, этанол) в случае датчиков двух конфигураций: по схеме Кречмана (рис. 5а) и с дифракционной решёткой (рис. 5б). Поле в структуре, приведенное на рис. 5, характерно для возбуждения БПВ (рис. 5а) и для возбуждения 2 распространяющихся в противоположных направлениях БПВ и их интерференции (рис. 5б). Также можно отметить значительное усиление поля, происходящее в структурах при возбуждении БПВ.

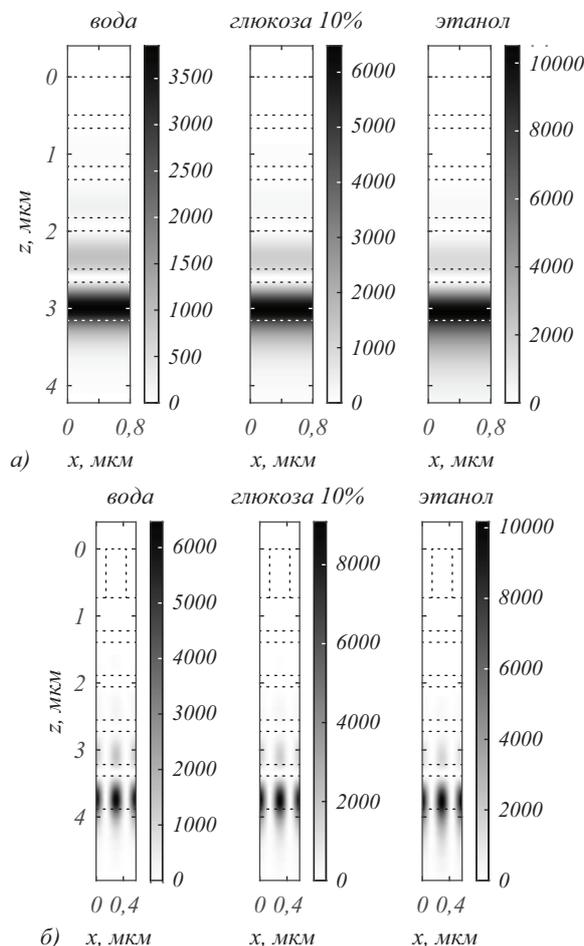


Рис. 5. Поле, иллюстрирующее возбуждение БПВ в структуре для воды, глюкозы 10% и этанола, в датчике на основе схемы Кречмана (а) и с дифракционной решёткой (б)

Заключение

В работе предложен и численно исследован планарный вариант датчика показателя преломления среды на основе 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 глюкозы 5 %, раствора глюкозы 10 % и этанола. Показано, что для изменяющегося угла падения датчики обеих конфигураций обладают близкими рабочими характеристиками. Для изменяющейся длины волны датчик с дифракционной решёткой обладает лучшими характеристиками (критерий эффективности (1) в 1,2–5,1 раз превышает значение критерия для датчика по схеме Кречмана).

Результаты работы могут найти применение при разработке и создании новых планарных датчиков параметров среды, интегрированных на чипе. Дифракционные структуры такого типа могут быть также применены в качестве спектральных фильтров, работающих в отражении, и в качестве ближнепольных спектральных фильтров. Последнее применение связано со значительным увеличением интенсивности ближнего поля при возбуждении блоховских поверхностных волн.

Предметом дальнейших исследований будут являться исследование рабочих характеристик датчиков на основе дифракционных решеток с фотонным кристаллом при освещении монохроматическим излучением с небольшим спектральным диапазоном, расчет структур, устойчивых к погрешностям изготовления, а также изучение возможности увеличения рабочего диапазона длин волн при измерении показателя преломления при фиксированном угле падения.

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 // *Optics Express*. – 2009. – Vol. 17, Issue 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 // *Sensors and Actuators B: Chemical*. – 2007. – Vol. 121, Issue 1. – P. 158-177.
3. **Homola, J.** Present and future of surface plasmon resonance biosensors / J. Homola // *Analytical and Bioanalytical Chemistry*. – 2003. – Vol. 377, Issue 3. – 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 // *Optics Express*. – 2014. – Vol. 22, Issue 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 // *Optics Letters*. – 2014. – Vol. 39, Issue 10. – 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 // *Optics Express*. – 2014. – Vol. 22, Issue 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 // *Journal of Lightwave Technology*. – 2015. – Vol. 33, Issue 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 // *Optics Express*. – 2013. – Vol. 21, Issue 20. – P. 23331-23344.
10. **Chang-Hasnain, C.J.** High-contrast gratings for integrated optoelectronics / C.J. Chang-Hasnain, W. Yang // *Advances in Optics Photonics*. – 2012. – Vol. 4, Issue 3. – P.379-440.
11. **Chang-Hasnain, C.J.** High-contrast gratings as a new platform for integrated optoelectronics / C.J. Chang-Hasnain // *Semiconductor Science and Technology*. – 2011. – Vol. 26(1). – 014043.
12. **Безус, Е.А.** Фазовая модуляция поверхностных электромагнитных волн с помощью дифракционного микрорельефа на границе одномерного фотонного кристалла / Е.А. Безус, Л.Л. Досколович, Д.А. Быков, В.А. Сойфер // *Письма в ЖЭТФ*. – 2014. – Т. 99, Вып. 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.
14. **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.
15. **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.
16. **Niraula, M.** Single-layer optical bandpass filter technology / M. Niraula, J.W. Yoon, R. Magnusson // *Optics Letters*. – 2015. – Vol. 40, № 21. – P. 5062-5065.

Сведения об авторах

Кадомина Елена Андреевна в 2006 году с отличием окончила Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (СГАУ) по специальности «Прикладная математика и физика». Аспирант кафедры технической кибернетики СГАУ, стажер-исследователь лаборатории дифракционной

оптики Института систем обработки изображений РАН (ИСОИ РАН). Области научных интересов: нанофотоника, плазмоника, электромагнитная теория дифракции. E-mail: kadomina_elen@mail.ru.

Безус Евгений Анатольевич в 2009 году с отличием окончил Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (СГАУ) по специальности «Прикладная математика и информатика». Кандидат физико-математических наук (2012 г.), научный сотрудник лаборатории дифракционной оптики Института систем обработки изображений РАН (ИСОИ РАН), доцент кафедры технической кибернетики СГАУ. Области научных интересов: нанофотоника, плазмоника, электромагнитная теория дифракции. E-mail: evgeni.bezus@gmail.com.

Досколович Леонид Леонидович в 1989 году с отличием окончил Куйбышевский авиационный институт (КуАИ, ныне — Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва, СГАУ) по специальности «Прикладная математика». Доктор физико-математических наук (2001 год), профессор РАН, работает заведующим лабораторией дифракционной оптики Института систем обработки изображений РАН (ИСОИ РАН), профессором кафедры технической кибернетики СГАУ. Специалист в области дифракционной оптики, лазерных информационных технологий, нанофотоники. E-mail: leonid@smr.ru.

Поступила в редакцию 16 марта 2016 г. Окончательный вариант – 4 апреля 2016 г.

RESONANT PHOTONIC-CRYSTAL STRUCTURES WITH A DIFFRACTION GRATING FOR REFRACTIVE INDEX SENSING

E.A. Kadomina^{1,2}, E.A. Bezus^{1,2}, L.L. Doskolovich^{1,2}

¹ *Image Processing Systems Institute, Russian Academy of Sciences, Samara, Russia,*

² *Samara State Aerospace University, Samara, Russia*

Abstract

A new planar configuration of an optical refractive index sensor based on the excitation of Bloch surface waves and containing a diffraction grating and a photonic crystal is proposed and numerically investigated. The structure under analysis is compared with the conventional sensor based on the Kretschmann configuration for two varying parameters: the angle and wavelength of incident light. The results of the study may find application in the design of novel on-chip refractive index sensors and spectral filters.

Keywords: photonic crystal, diffraction grating, resonance domain, Bloch surface wave, optical sensor, Maxwell's equations, Fourier modal method.

Citation: Kadomina EA, Bezus EA, Doskolovich LL. Resonant photonic-crystal structures with a diffraction grating for refractive index sensing. *Computer Optics* 2016; 40(2): 164-72. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-2-164-172

Acknowledgements: The work was funded by the Russian Science Foundation – RSF (No. 14-31-00014).

Authors' information

Elena Andreevna Kadomina graduated with honors (2006) from Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (SSAU), majoring in Applied Mathematics and Physics. Postgraduate student at Technical Cybernetics department of SSAU, trainee-researcher in Diffractive Optics laboratory of Image Processing Systems Institute of the RAS (IPSI RAS). Her current research interests include nanophotonics, plasmonics and electromagnetic diffraction theory. E-mail: kadomina_elen@mail.ru.

Evgeni Anatolievich Bezus graduated with honors (2009) from Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (SSAU), majoring in Applied Mathematics and Computer Science. Candidate in Physics and Mathematics (2012). Currently he is a researcher at the Diffractive Optics laboratory of Image Processing Systems Institute of the RAS (IPSI RAS) and an associate professor at Technical Cybernetics department of SSAU. His current research interests include nanophotonics, plasmonics and electromagnetic diffraction theory.

E-mail: evgeni.bezus@gmail.com.

Leonid Leonidovich Doskolovich graduated with honors (1989) from S.P. Korolyov Kuibyshev Aviation Institute (presently, Samara State Aerospace University, SSAU), majoring in Applied Mathematics. He received his Doctor in Physics & Maths (2001) degree from Samara State Aerospace University. Head of Diffractive Optics laboratory at the Image Processing Systems Institute of the RAS, professor at Technical Cybernetics department of SSAU. Current research interests include diffractive optics, laser information technologies, and nanophotonics. E-mail: leonid@smr.ru.

References

- [1] Piliarik M, Homola J. Surface plasmon resonance (SPR) sensors: approaching their limits? *J Opt Express* 2009; 17(19): 16505-16517.
- [2] Shankaran DR, Gobi KV, Miura N. Recent advancements in surface plasmon resonance immunosensors for detection of small molecules of biomedical, food and environmental interest. *Sens Actuators B* 2007; 121(1): 158-177.
- [3] Homola J. Present and future of surface plasmon resonance biosensors. *Anal Bioanal Chem* 2003; 377(3): 528-539.
- [4] Sinibaldi A, Danz N, Descrovi E, Munzert P, Schulz U, Sonntag F, Dominici L, Michelotti F. Direct comparison of the performance of Bloch surface wave and surface plasmon polariton sensors. *Sensors and Actuators B* 2012; 174: 292-298.
- [5] Li Y, Yang T, Pang Z, Pang Z, Du G, Song S, Han S. Phase-sensitive Bloch surface wave sensor based on variable angle spectroscopic ellipsometry. *Opt Express* 2014; 22(18): 21403-21410.
- [6] Sinibaldi A, Fieramosca A, Rizzo R, Anopchenko A, Danz N, Munzert P, Magistris C, Barolo C, Michelotti F. Combining label-free and fluorescence operation of Bloch surface wave optical sensors. *Opt Lett* 2014; 39(10): 2947-2950.
- [7] Rizzo R, Danz N, Michelotti F, Maillart E, Anopchenko A, Wachter C. Optimization of angularly resolved Bloch surface wave biosensors. *Opt Express* 2014; 22(19): 23202-23214.
- [8] Sinibaldi A, Danz N, Anopchenko A, Munzert P, Schmieder S, Chandrawati R, Rizzo R, Rana S, Sonntag F, Occhicone A, Napione L, Panfilis SD, Stevens MM, Michelotti F. Label-Free Detection of Tumor Angiogenesis Biomarker Angiopoietin 2 Using Bloch Surface Waves on One Dimensional Photonic Crystals. *J Lightwave Technology* 2015; 33(16): 3385-3393.
- [9] Sinibaldi A, Rizzo R, Figliozzi G, Descrovi E, Danz N, Munzert P, Anopchenko A, Michelotti F. A full ellipsometric approach to optical sensing with Bloch surface waves on photonic crystals. *Opt Express* 2013; 21(20): 23331-23344.
- [10] Chang-Hasnain CJ, Yang W. High-contrast gratings for integrated optoelectronics. *Adv Opt Photon* 2012; 4(3): 379-440.
- [11] Chang-Hasnain CJ. High-contrast gratings as a new platform for integrated optoelectronics. *Semicond Sci Technol* 2011; 26: 014043.
- [12] Bezus EA, Doskolovich LL, Bykov DA, Soifer VA. Phase modulation of Bloch surface waves with the use of a diffraction microrelief at the boundary of a one-dimensional photonic crystal. *JETP Letters* 2014; 99(2): 63-66.
- [13] Kadomina EA, Bezus EA, Doskolovich LL. Spectrally selective near-field enhancement in a photonic crystal structure with a diffraction grating. *Computer Optics* 2015; 39(4): 462-468.
- [14] Moharam MG, Gaylord TK, Grann EB, Pommet DA. Formulation for stable and efficient implementation of the rigorous coupled-wave analysis of binary gratings. *Journal of the Optical Society of America A* 1995; 12: 1068-1076.
- [15] Moharam MG, Gaylord TK, Pommet DA, Grann EB. Stable implementation of the rigorous coupled-wave analysis for surface-relief gratings: enhanced transmittance matrix approach. *Journal of the Optical Society of America A* 1995; 12: 1077-1086.
- [16] Niraula M, Yoon JW, Magnusson R. Single-layer optical bandpass filter technology. *Opt Lett* 2015; 40(21): 5062-5065.

Received March 16, 2016. The final version – April 4, 2016.
