

# SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> 光子晶体缺陷腔的折射率传感特性

陈 颖<sup>1,2</sup> 卢 波<sup>1</sup> 范卉青<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 燕山大学电气工程学院自动化仪表系, 河北 秦皇岛 066004  
<sup>2</sup> 燕山大学测试计量技术及仪器河北省重点实验室, 河北 秦皇岛 066004)

**摘要** 为了提高光子晶体折射率传感器的灵敏度和品质因数, 提出了一种基于表面波谐振原理的缺陷态光子晶体-棱镜耦合传感结构。通过分层传输矩阵法对该结构建立传感理论模型, 得出古斯汉欣位移与谐振波长的变化关系, 从而建立谐振波长与待测样本折射率的关系模型。以 SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> 作为缺陷腔来代替传统表面等离子体共振 (SPR) 传感器中的金膜, 构成折射率敏感层; 采用 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 作为吸收层, 从而在反射光谱中得到谐振缺陷峰, 通过缺陷峰值的漂移实现待测样本折射率的动态监测; 以乙二醇溶液为待测样本, 对该折射率传感结构的 Q 值及灵敏度进行了分析。结果表明, 其灵敏度约为 3596 nm · RIU<sup>-1</sup> (RIU 为相对折射率单位), Q 值约为 1087.7, 证明了结构设计的有效性, 并可为高灵敏度和高 Q 值折射率传感器的设计提供一定的理论指导。

**关键词** 传感器; 缺陷态光子晶体; 表面波谐振; 折射率传感; 分层传输矩阵法

**中图分类号** O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0605003

## Refractive Index Sensing Property of SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> Photonic Crystal Defect Cavity

Chen Ying<sup>1,2</sup> Lu Bo<sup>1</sup> Fan Huiqing<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Department of Automation Equipment, College of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China  
<sup>2</sup> Hebei Province Key Laboratory of Test/Masurement Technology and Instrument, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China)

**Abstract** To improve the sensitivity and the Q value of the photonic crystal refractive index sensor, a coupling structure combining the defect photonic crystal and the prism based on surface wave resonance theory is proposed. The sensing theoretical model is established by the layered transfer matrix method and the relationship between the Goos-Hänchen shift and the resonant wavelength is obtained, which can deduce the relationship model between the resonant wavelength and the refractive index of the sample detected. The SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> structure is regarded as the defect cavity, which is replaced by the gold film in conventional surface plasmon resonance (SPR) sensor. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> is adopted as the absorbed layer, and then the resonant defect peak wavelength can be obtained and the dynamic detection of the refractive index of sample can be achieved from the shift of the resonant defect peak wavelength. The ethylene glycol is adopted as the sample detected and the Q value and the sensitivity of the refractive index sensing structure are discussed. The simulation results show that the sensitivity can attain to 3596 nm · RIU<sup>-1</sup> (RIU is refractive index unit) and the Q value is 1087.7 approximately, which demonstrates the effectiveness of the sensing structure. The design scheme can provide certain theoretical guidance for high sensitivity and high Q value sensor design.

**Key words** sensor; defect photonic crystal; surface wave resonance; refractive index sensing; layered transmission matrix method

**OCIS codes** 280.4788; 280.1415; 160.5298; 230.3990; 240.6690

**收稿日期**: 2013-12-16; **收到修改稿日期**: 2014-01-02

**基金项目**: 国家自然科学基金(61201112, 61172044)、河北省自然科学基金(F2013203250, F2012203169)、中国博士后科学基金(2012M510765)

**作者简介**: 陈颖(1980—), 女, 博士, 副教授, 主要从事光子晶体应用技术方面的研究。E-mail: chenying@ysu.edu.cn

# 1 引 言

光学折射率传感器是电磁学、光学和微电子学等多学科交叉结合的产物,因其灵敏度高、响应速度快和抗干扰能力强等特点,已被广泛应用到生命科学、生物分子检测、环境污染监测和医药开发等领域,研究学者们已经通过测量待测样品的折射率来实现包括浓度、组分和生物分子相互作用及动态变化过程等多种信息的检测。目前,光学折射率传感器中,技术比较成熟、应用较为广泛的是表面等离子体共振(SPR)传感器<sup>[1-2]</sup>。表面等离子体波对表面介质具有高度敏感性,具有实时和快速检测等特点。但是,由于SPR传感器一些固有的缺陷限制了其进一步的优化和应用。SPR传感器入射光只能是TM偏振光;SPR传感器的表面金属层通常使用金和银等贵金属,容易氧化,可重复性差;同时,金属较大的光吸收系数导致其实验测得的反射谱半峰全宽达20 nm以上,Q值较低,灵敏度一般也只有 $137 \text{ nm} \cdot \text{RIU}^{-1}$ (RIU为折射率单位)<sup>[3]</sup>。

光子晶体是一种由不同折射率介质周期性排列而成的光学结构,因其高精度和高灵敏度的传感特性及其独特的禁带特性,引起了研究学者们的广泛关注<sup>[4-5]</sup>。如果在周期性结构中引入缺陷,就会形成光子晶体谐振腔,其谐振模就是缺陷态光子晶体的缺陷模<sup>[6-7]</sup>。缺陷态光子晶体应用到折射率传感器中,具有灵敏度高、电绝缘性好和抗电磁干扰能力强等特点,特别适宜在低浓度、小分子和恶劣危险的环境下进行测量<sup>[8-10]</sup>。Johnson等<sup>[11]</sup>提出了一种硅基光子晶体生物传感器的结构,通过探测空气孔表面或空气孔的电磁场变化来检测生物分子的影响。Namdar等<sup>[12]</sup>利用光子晶体负折射率特性,即在普通光子晶体间嵌入负折射光子晶体,制备了无标记光纤纳米生物传感器,可用于多层纳米谐振腔分子的检测。以上分析表明,在低浓度生物分子检测中,对光子晶体结构进行优化设计可提高传感器的灵敏度。

在此分析的基础上,将表面波谐振原理与光子晶体的光学特性相结合,提出了一种基于缺陷态光子晶体结构的折射率传感器设计方案。在周期结构光子晶体表面引入缺陷层,电磁波会以表面波的形式存在于光子晶体表面层,从而避免了SPR传感器中激发表面等离子体时的金属吸收损耗的影响,可以获得更高的传感器灵敏度和谱线分辨率。本文用分层传输矩阵法研究一维光子晶体的传输特性,构造了以 $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ 做表面缺陷的一维光子晶体传感结构,对其传感机理进行了分析,以乙二醇溶液为待测

样本,进行数值模拟,得出其灵敏度和Q值。

# 2 传感器结构与理论分析

## 2.1 结构设计

提出了一种在一维光子晶体表面构造缺陷结构的折射率传感器,用Kretschmann棱镜结构与光子晶体耦合,其结构如图1所示。光子晶体由 $\text{TiO}_2$ 和 $\text{SiO}_2$ 周期排列组成。在缺陷层内引入具有吸收系数的复折射介质 $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,缺陷层由 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 和 $\text{SiO}_2$ 三层介质组成,光子晶体分层结构图如图2所示。

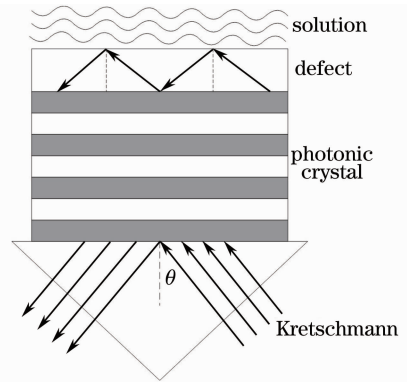


图1 传感器结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of the sensor structure

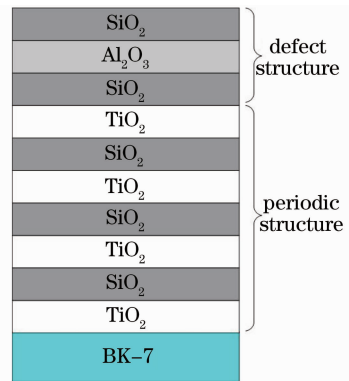


图2 缺陷态光子晶体结构

Fig.2 Defect photonic crystal structure

当电磁波通过光子晶体周期结构入射到缺陷层后,在其中发生多次反射形成光子晶体谐振腔,即为光子晶体表面缺陷态。表面波沿着光子晶体与周围介质的界面传播,其振幅在垂直于光子晶体表面的方向上呈指数衰减。当光波以一定角度入射到光子晶体后,在缺陷腔内发生多次反射,从而提高了灵敏度。通过调节缺陷层的厚度和折射率可以调节谐振波长,然而该谐振波长对应的光在发生多次全反射后最终会回到入射的介质当中,在反射谱中观测不到这个共振波长。在缺陷层结构中引入吸收介质,每次全反射都会有一部分光被其吸收,从而在反射谱线中出现缺

陷尖峰。若选择吸收系数较大的材料(如金、银等金属膜)作为吸收介质,谐振波长在缺陷层内经过几次全反射就会被吸收介质全部吸收,这样就不能使其与溶液层充分接触,表面波与溶液的作用不充分。因此,采用 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 作为吸收介质,在 0~2 μm 波长范围内吸收系数为 0.07 左右,在缺陷层内可实现多次全反射。下面应用分层传输矩阵建立理论模型,并对该传感结构的灵敏度及 Q 值特性进行分析。

$$\begin{bmatrix} E_i^+ \\ E_i^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ n_i \cos \theta_i & -n_i \cos \theta_i \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ n_j \cos \theta_j & -n_j \cos \theta_j \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} E_j^+ \\ E_j^- \end{bmatrix} = m_{ij} \begin{bmatrix} E_j^+ \\ E_j^- \end{bmatrix}. \quad (3)$$

可知,  $m_{ij}$  即为 TE 波从介质  $i$  传到介质  $j$  其界面处的传输矩阵,可以表达为

$$m_{ij} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 + \frac{n_j \cos \theta_j}{n_i \cos \theta_i} & 1 - \frac{n_j \cos \theta_j}{n_i \cos \theta_i} \\ 1 - \frac{n_j \cos \theta_j}{n_i \cos \theta_i} & 1 + \frac{n_j \cos \theta_j}{n_i \cos \theta_i} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

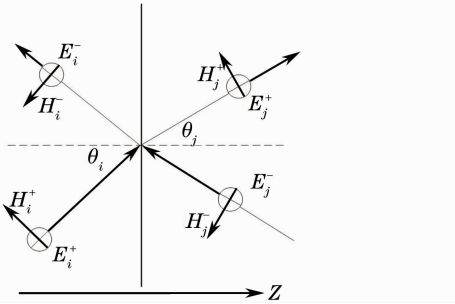


图 3 第  $i, j$  层介质交界处的电磁波(TE)

Fig. 3 Electromagnetic waves(TE) at the  $i, j$  layer medium junction

在同一介质层中传播时,相位差为  $\varphi$ ,如图 4 所示,电场从左界面传输到右界面可以用矩阵相连接:

$$\begin{bmatrix} E_i^+ \\ E_i^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \exp(-i\varphi) & 0 \\ 0 & \exp(i\varphi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_i'^+ \\ E_i'^- \end{bmatrix} = m_i \begin{bmatrix} E_i'^+ \\ E_i'^- \end{bmatrix}, \quad (5)$$

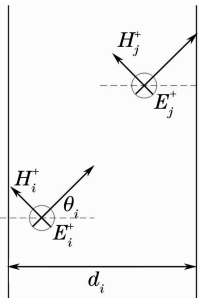


图 4 第  $i$  层介质内部的电磁波(TE)

Fig. 4 Electromagnetic wave(TE) at the  $i$  layer medium inside

## 2.2 理论模型

如图 3 所示,基于传输矩阵法,由电磁波在边界上的连续性条件可知:

$$E_i^+ + E_i^- = E_j^+ + E_j^-, \quad (1)$$

$$H_i^+ \cos \theta_i - H_i^- \cos \theta_i = H_j^+ \cos \theta_j - H_j^- \cos \theta_j, \quad (2)$$

式中  $H = \sqrt{\epsilon_0/\mu_0} nE$ , 转化矩阵形式得到

式中  $m_i$  为第  $i$  层介质的传输矩阵,相位差  $\varphi = k_i d_i \cos \theta_i$ ,其中波数  $k = 2\pi n_i/\lambda$ ,  $\theta_i$  为电场波矢在第  $i$  层传播的夹角,由折射定律可得  $\theta_i = \arcsin(n_i \sin \theta_i/n_0)$ ,  $d_i$  为该层介质的厚度。

由以上分析可知,特征矩阵由边界特征矩阵和内部特征矩阵构成。当光以一定角度通过传感器光子晶体结构时,整个的传输矩阵  $M$  可以写为

$$M = m_{0a} (m_a m_{ab} m_b m_{ba})^3 m_a m_{a1} m_1 m_{12} m_2 m_{23} m_3 m_{3n}, \quad (6)$$

式中,下标 0 代表棱镜玻璃层, a 和 b 代表光子晶体周期 TiO<sub>2</sub> 和 SiO<sub>2</sub> 层, 1, 2, 3 代表缺陷层, n 代表溶液层。则光子晶体的入射电场和出射电场之间关系可写为

$$\begin{bmatrix} E_1^+ \\ E_1^- \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} E_N^+ \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_N^+ \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

由(7)式可得,电磁波通过该分层介质系统的反射系数  $r$  与反射率  $R$  可表示为

$$r = \frac{E_1^-}{E_1^+} = \frac{M_{21}}{M_{11}}, R = |r|^2. \quad (8)$$

## 2.3 传感机理分析

入射光以一定角度  $\theta$  入射,透过周期性光子晶体,在缺陷层与待测溶液界面处发生全反射,产生古斯汉欣位移  $\Delta$ ,如图 5 所示。

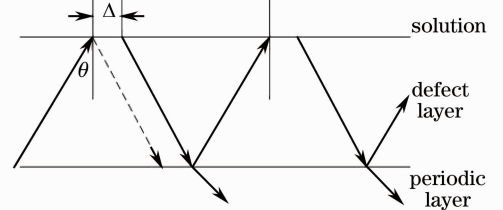


图 5 缺陷层内产生古斯汉欣位移和相干干涉

Fig. 5 Goos-Hänchen displacement and coherent interference produced in the defect layer

光子晶体的表面缺陷层相当于一个法布里-珀罗(F-P)谐振腔,反射回来的光在缺陷层中多次反射而透射出的光会形成多束光干涉,满足如下干涉条件将产生谐振:

$$2 \cdot \frac{2\pi}{\lambda_d} n_c d_c \cos \theta_c + \Delta\varphi = (2k + 1)\pi, \quad k = 0, 1, 2, \dots, \quad (9)$$

式中  $\lambda_d$  为谐振波长,即缺陷峰的波长,  $n_c, d_c, \theta_c$  分别为缺陷层的折射率、厚度和光入射角度,  $\Delta\varphi$  为古斯汉欣位移  $\Delta$  对应的相位差。当入射光电矢量的偏振方向垂直于入射面即 TE 波时,古斯汉欣位移<sup>[11]</sup>为

$$\Delta = \frac{\lambda \tan \theta_c}{\pi (\sin^2 \theta_c - \sin^2 \theta_1)^{1/2}}, \quad (10)$$

式中  $\lambda$  为光波波长,  $\theta_1$  为在缺陷层与溶液界面全反射的临界角,  $\theta_1 = \arcsin(n/n_c)$ ,  $n$  表示周围介质即待测溶液的折射率。由折射定律可知:

$$\frac{n_g}{n_c} = \frac{\sin \theta_c}{\sin \theta_0}, \quad (11)$$

式中  $n_g$  为入射介质的折射率,即棱镜折射率,  $\theta_0$  为入射角。由(10)式和(11)式可以得到古斯汉欣位移对应相位差为

$$\Delta\varphi = \frac{\Delta \cdot 2\pi}{\lambda} = \frac{2n_c \tan[\arcsin(n_g \sin \theta_0 / n_c)]}{(n_g^2 \sin^2 \theta_0 - n^2)^{1/2}}. \quad (12)$$

由(9)式和(12)式分析可知,当溶液折射率  $n$  增

大时,古斯汉欣位移对应的  $\Delta\varphi$  增大,对应的缺陷峰波长  $\lambda_d$  也增大,因此,可通过探测谐振峰波长的变化来达到测量待测溶液折射率变化的目的。

### 3 结果与分析

#### 3.1 传感器 $Q$ 值及灵敏度

光子晶体的周期性结构部分由  $\text{TiO}_2$  和  $\text{SiO}_2$  交替排列组成,其折射率分别为  $n_1 = 2.6$  和  $n_2 = 1.45$ , 中心波长  $\lambda_0$  选为 1550 nm。由布拉格反射镜原理可知:当周期层光学厚度满足  $\lambda_0/4$  条件时,其光谱特性最好,所以周期层厚度分别选为 150 nm 和 267 nm。在缺陷层内引入具有吸收系数的复折射介质  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 其折射率  $n_c = 1.76 + i \cdot 0.07$ , 缺陷层由  $\text{SiO}_2, \text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{SiO}_2$  三层介质组成,其厚度分别为  $d_1, d_2$  和  $d_3$ 。为能在光谱图中观测到谐振波长,其波长必须保证在禁带范围内,而得到的禁带光谱在 1550 nm 左右范围,基于(9)式,代入参数可以得到缺陷层总的光学厚度须在 200 nm 左右范围内选择。如图 6 所示,当  $\text{Al}_2\text{O}_3$  吸收层为 30 nm,  $\text{SiO}_2$  层的总厚度为 100 nm 时,选取 4 组参数进行比较,分析得到缺陷层  $\text{SiO}_2, \text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{SiO}_2$  三层介质厚度分别为  $d_1 = 60$  nm,  $d_2 = 30$  nm 和  $d_3 = 40$  nm 时,谐振波长对应的反射率最小,效果最好。

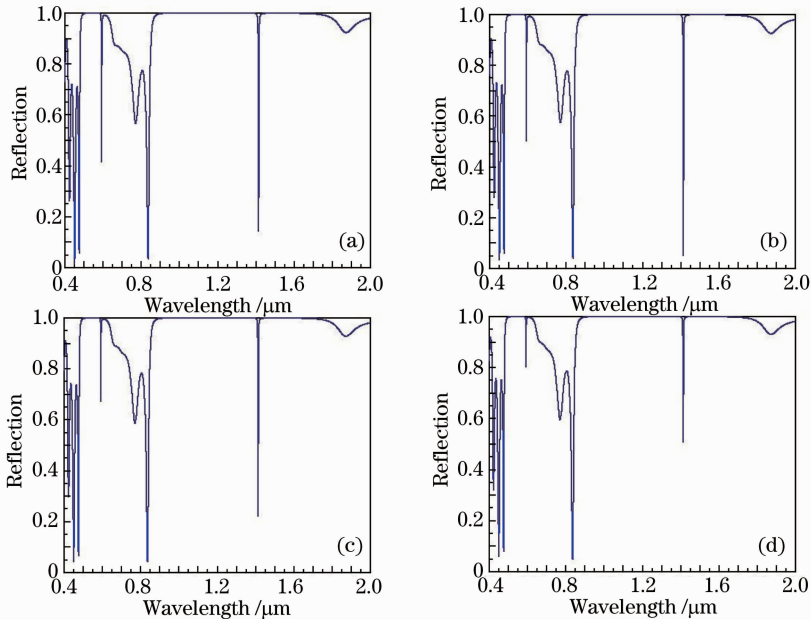


图 6 缺陷层三层介质不同厚度对应的光谱图。  $d_1, d_2, d_3$  分别为(a) 65, 30, 35 nm; (b) 60, 30, 40 nm; (c) 55, 30, 45 nm; (d) 50, 30, 50 nm

Fig. 6 Spectra of the defect layer at different thicknesses.  $d_1, d_2, d_3$  are (a) 65, 30, 35 nm; (b) 60, 30, 40 nm; (c) 55, 30, 45 nm; (d) 50, 30, 50 nm

当溶液的折射率分别为 1.390, 1.395, 1.400 和 1.405 时, 经过仿真得到如图 7 所示的反射谱, 对应的缺陷峰波长分别为 1376.9, 1395.7, 1414.0,

1431.8 nm。随着溶液折射率的增大, 缺陷峰波长产生明显红移, 与公式推导正好吻合。

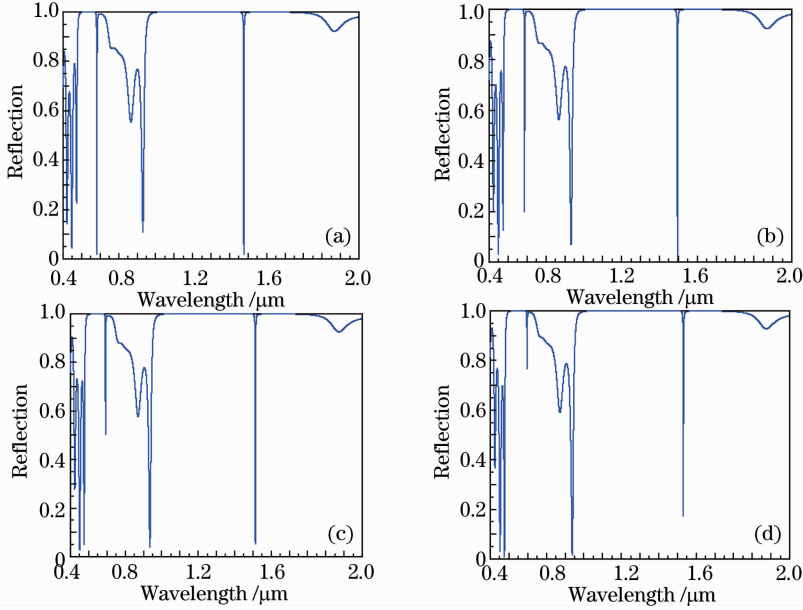


图 7 不同溶液折射率对应的光谱图缺陷峰。(a)  $n=1.390$ ; (b)  $n=1.395$ ; (c)  $n=1.400$ ; (d)  $n=1.405$

Fig. 7 Defect peak spectra of different solution refractive indexes. (a)  $n=1.390$ ; (b)  $n=1.395$ ; (c)  $n=1.400$ ; (d)  $n=1.405$

下面对该传感器的品质因数进行讨论。当溶液折射率为 1.400 时, 如图 8 所示, 缺陷峰波长  $\lambda_d = 1414.02$  nm, 半峰全宽波长为  $\Delta\lambda = 1.3$  nm。则品质因数为

$$Q = \frac{\lambda_d}{\Delta\lambda} = \frac{1414.02}{1.3} = 1087.7. \quad (13)$$

可以看出, 该结构的折射率传感器具有高 Q 值。影响品质因数的主要因素是光子晶体的周期数 N, 当周期数越大时, 缺陷峰越尖锐, 半峰全宽波长  $\Delta\lambda$  越小, 相应的品质因数 Q 越大。但是随着周期数越大, 层数越多, 缺陷峰就会变小, 不利于测量, 因此, 选择了周期数为 3 的光子晶体结构。这种传感器具有高 Q 值主要是因为光子晶体的表面缺陷态

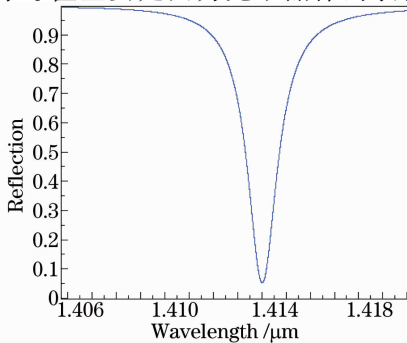


图 8 溶液折射率为 1.400 时的反射谱

Fig. 8 Reflection spectrum of solution refractive index of 1.400

结构形成的表面波, 谐振波在缺陷层与溶液表面处发生多次全反射, 产生的古斯汉欣位移与溶液的折射率有关。电磁波能够与待测溶液充分接触, 从而得到高 Q 值。

如图 9 所示, 仿真得到当待测溶液折射率 n 分别为 1.401111, 1.401113, 1.401115, 1.401117 和 1.401119 时的反射谱, 即使在折射率变化很小的情况下, 缺陷峰波长也会相应的产生漂移, 传感器具有很高的分辨率。通过计算得到折射率 n 从 1.401 到 1.402 变化时, 其波长对应的从 1417.624 nm 漂移到 1421.210 nm, 其灵敏度为

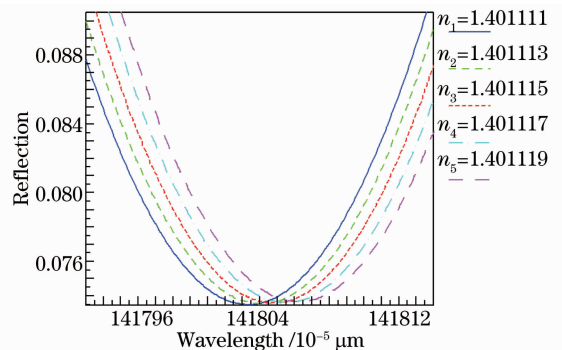


图 9 不同折射率溶液对应的反射率

Fig. 9 Different reflectivities of different refractive index solutions

$$S = \frac{\Delta\lambda_d}{\Delta n} = \frac{1421.210 - 1417.624}{0.001} = 3596 \text{ nm} \cdot \text{RIU}^{-1}. \quad (14)$$

因而该传感器结构可实现高灵敏度的折射率检测,可为高精度样本折射率的检测提供一种行之有效的方案。

### 3.2 乙二醇溶液浓度变化的光谱响应特性分析

如图 10 所示,该光子晶体传感系统主要包括光源(TSL-210V 光源激光器,可调波长范围为 1260~1630 nm),光子晶体传感芯片,光谱采集系统及计算机软件分析系统。实验过程是将样本溶液注入到流体池内,溶液流过光子晶体表面,激光源发出的信号光通过起偏器、电光调制器和扩束器之后以一定角度透过棱镜入射到光子晶体芯片内。在另一侧,采用具有 2048 pixel 面阵 CCD 探测器的 USB2000+型微型光纤光谱仪来探测反射光,然后通过高速 USB2.0 端口连接到计算机的 I/O 口,再经过 Spectra Suite 光谱分析软件对采集的数据进行分析。

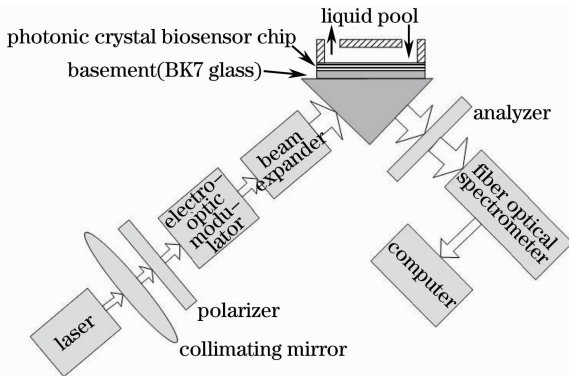


图 10 传感系统结构框图

Fig.10 Sensing system structure

利用上述的一维光子晶体结构传感器测量乙二醇溶液浓度,根据等效折射率“Lichtennecher”方法,不同含水量乙二醇的折射率符合:

$$\ln n = g \times \ln n_{\text{glycol}} + (1 - g) \times \ln n_{\text{water}}, \quad (15)$$

式中  $g$  为乙二醇的含量(质量分数),  $n_{\text{glycol}}$ 、 $n_{\text{water}}$  分别为乙二醇和纯水的折射率,  $n_{\text{glycol}} = 1.4318$ ,  $n_{\text{water}} = 1.3330$ 。所以有

$$\ln n = (\ln 1.4318 - \ln 1.3330) \times g + \ln 1.3330. \quad (16)$$

由(16)式可知,乙二醇含量的变化影响着溶液折射率的变化,再结合(9)式,当乙二醇浓度增大时折射率变大,对应的缺陷峰波长也会变大。通过计算得到更多数据,为了准确发现乙二醇浓度与缺陷峰波

长之间的关系,将这些数据在 Matlab 当中进行线性拟合,如图 11 所示。

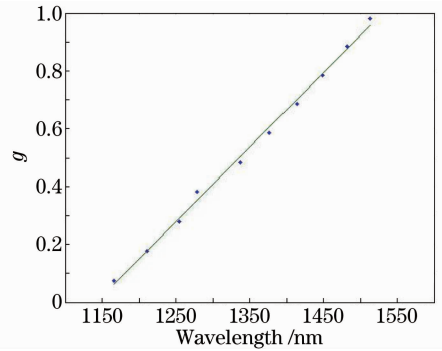


图 11 缺陷峰波长与溶液浓度的线性拟合关系

Fig.11 Linear fitting relationship between the defect peak wavelength and the solution concentration

由图 11 可以得出谐振波长与乙二醇含量的关系为  $g = 0.0026 \cdot \lambda_d - 2.9430$ , 相关系数  $R^2 = 0.9983$ 。传感器测量乙二醇浓度的灵敏度为

$$U = \frac{\Delta\lambda}{\Delta g} = 3.846 \text{ nm}/1\%. \quad (17)$$

结果表明,该传感器具有很好的光谱响应特性,可实现高灵敏度,进而传感器的测量精度也会大大提高。

## 4 结 论

提出了一种折射率调制型的缺陷态光子晶体传感器结构,用缺陷腔代替了传统 SPR 传感器中的金膜,通过腔内多次全反射,形成谐振选频,其  $Q$  值为 1087.7,满足了高分辨率的要求。通过分层传输矩阵法对该结构建立传感理论模型,并得出古斯汉欣位移与谐振波长的变化关系,从而建立谐振波长与待测样本折射率的关系模型。在光子晶体缺陷层内加入  $\text{Al}_2\text{O}_3$  吸收介质,从而使谐振波长对应的信号光在多次振荡的过程中被吸收,从而在反射谱中得到谐振缺陷峰,并通过谐振峰值波长的漂移实现待测样本折射率的动态监测。当溶液折射率增大时,对应的缺陷峰波长产生红移,其灵敏度  $S = 3596 \text{ nm} \cdot \text{RIU}^{-1}$ 。以乙二醇溶液为样本,对其浓度动态测量过程进行数值分析,得出浓度与缺陷波长的相关系数为  $R^2 = 0.9983$ 。该折射率传感器结构具有高  $Q$  值和高灵敏度,在低浓度和小分子样本的动态监测中具有重要的指导意义。

### 参 考 文 献

1 Yingcai Wu, Zhengtian Gu. Research on the thermo-characteristics of surface plasmon resonance spectrum[J]. Chin Opt Lett, 2012, 10(8): 081301.

- 2 Wu Pinghui, Gu Juguan, Liu Bin, *et al.*. Experimental research on wavelength modulation surface plasmon resonance sensor[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(2): 022501.  
吴平辉, 顾菊观, 刘彬, 等. 波长检测型表面等离子体共振传感器的实验研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(2): 022501.
- 3 V Paeder, V Musi, L Hvozدارa, *et al.*. Detection of protein aggregation with a Bloch surface wave based sensor[J]. *Sensors and Actuators B*, 2011, 157(1): 260–264.
- 4 Feng Chen, Feng Guoying, Zhou Hao, *et al.*. Characteristic analysis on photonic crystal laser cavity with one-dimensional photonic bandgap[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(8): 0802009.  
冯琛, 冯国英, 周昊, 等. 一维光子带隙光子晶体激光腔的特性分析[J]. *中国激光*, 2012, 39(8): 0802009.
- 5 Chen Yuanhao, Liu Guiqiang, Gong Lixia, *et al.*. Optical properties and fluorescence modification of the sandwich structure composed of ultra-thin gold films light-emitting layers and photonic crystals [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(10): 1016001.  
陈元浩, 刘桂强, 龚丽霞, 等. 超薄金膜-发光层-光子晶体三明治结构的光学特性及荧光调制[J]. *光学学报*, 2012, 32(20): 1016001.
- 6 Dong Haixia, Dong Lijuan, Yang Chengquan, *et al.*. Optical properties of one dimensional photonic crystal containing a single defect layer with negative refractive index[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(10): 1006002.  
董海霞, 董丽娟, 杨成全, 等. 含单层负折射率缺陷的光子晶体的光学特性[J]. *中国激光*, 2011, 38(10): 1006002.
- 7 V N Konopsky, E V Alieva. A biosensor based on photonic crystal surface wave with an independent [J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2010, 25(5): 1212–1216.
- 8 T Srivastava, R Das, R Jha. Highly accurate and sensitive surface plasmon resonance sensor based on channel photonic crystal waveguides [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2011, 157(1): 246–252.
- 9 W Su, G Zheng, X Li. A resonance wavelength easy tunable photonic crystal biosensor using surface plasmon resonance effect[J]. *Optik*, 2013, 124(21): 5161–5163.
- 10 P Rivolo, F Michelotti, F Frascella, *et al.*. Real time secondary antibody detection by means of silicon-based multilayers sustaining Bloch surface waves[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2012, 161(1): 1046–1052.
- 11 A L Johnson, A G Sega, A Sharief, *et al.*. Real-time 1D hyperspectral imaging of porous silicon-based photonic crystals with one-dimensional chemical composition gradients undergoing pore-filling-induced spectral shifts[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2013, 203: 154–159.
- 12 A Namdar, R Talebzadeh, K J Ghaleh. Surface wave-induced enhancement of the Goos-Hänchen shift in single negative one-dimensional photonic crystal[J]. *Optics & Laser Technology*, 2013, 49: 183–187.

栏目编辑: 王晓琪