

# 含吸收介质的光子晶体法布里-珀罗异质结构的 传感特性研究

陈 颖, 曹会莹, 韩帅涛, 邸远见, 赵志勇, 罗 佩, 田亚宁, 刘晓飞

燕山大学电气工程学院河北省测试计量技术及仪器重点实验室, 河北 秦皇岛 066004

**摘要** 结合光子晶体的缺陷模式和表面模式特性, 提出了一种含吸收介质的光子晶体法布里-珀罗异质结构。该结构由周期性光子晶体、待测样本和外部空气层共同组成, 将待测样本直接作为表面缺陷腔。基于光学谐振原理和表面波理论, 分析了所提结构的折射率传感机理。讨论了不同吸收介质对所提结构光谱特性的影响。将石墨烯作为吸收介质时, 传感结构的品质因子( $Q$  值)明显高于将硫化锌、氧化铝和金属银作为吸收介质的情况; 将样本层作为表面缺陷腔, 通过光学 Tamm 态谐振, 可实现多次全反射衰荡, 使谐振光信号和待测样本充分作用, 从而提高了该结构的传感灵敏度。所提结构的  $Q$  值为 2097.18, 灵敏度为 1017.98 nm/RIU。研究结果对实现待测物的高  $Q$  值和高灵敏度检测具有一定的理论参考价值。

**关键词** 光学器件; 传感器; 光子晶体; 法布里-珀罗异质结构; 光学 Tamm 态; 石墨烯

**中图分类号** O436 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201737.0223003

## Sensing Property of Photonic Crystal Fabry-Pérot Heterogeneous Structure with Absorption Medium

Chen Ying, Cao Huiying, Han Shuaitao, Di Yuanjian, Zhao Zhiyong,  
Luo Pei, Tian Yaning, Liu Xiaofei

*Hebei Province Key Laboratory of Measurement Technology and Instrument, School of Electrical Engineering,  
Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China*

**Abstract** Combining with the defect mode and the surface mode property of photonic crystal, a photonic crystal Fabry-Pérot heterogeneous structure containing absorption medium is proposed. The proposed structure consists of a periodical photonic crystal, a test sample and an external air layer, and the test sample is directly used as the surface defect cavity. The refractive index sensing mechanism of the proposed structure is analyzed based on the optical resonance theory and the surface wave theory. The effects of different absorption media on spectrum properties of the proposed structure are discussed. We find that the  $Q$  value of the sensing structure using the graphene as the absorption medium is significantly higher than that of structures using ZnS,  $Al_2O_3$  and silver as the absorption medium. When the sample layer is used as the surface defect cavity, multiple total reflection ring-down can be achieved owing to the optical Tamm state resonance, the full interaction is achieved between the resonant optical signal and the test sample, and the sensitivity of the proposed structure is improved. The  $Q$  value of the proposed structure is 2097.18 and the sensitivity is 1017.98 nm/RIU. The results can provide certain theoretical reference value for high  $Q$  value and high sensitivity detection.

**Key words** optical devices; sensors; photonic crystals; Fabry-Pérot heterogeneous structure; optical Tamm state; graphene

**OCIS codes** 230.5298; 050.2230; 240.6690

**收稿日期:** 2016-06-20; **收到修改稿日期:** 2016-10-26

**基金项目:** 国家自然科学基金(61201112, 61475133)、河北省自然科学基金(F2016203188, F2013203250)、河北省高等学校青年拔尖人才计划(BJ2014056)

**作者简介:** 陈 颖(1980—), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 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

光学传感器在生物医学、医疗诊断、食品安全、能源环保和国防科技等领域有着广泛应用。近年来,光纤传感器<sup>[1]</sup>、表面等离子体传感器<sup>[2]</sup>、光子晶体折射率传感器<sup>[3]</sup>等方面的研究备受瞩目。光纤传感器体积小、抗干扰能力强,但灵敏度低、信号传输损耗大。表面等离子体传感器利用金属膜激发表面波,技术相对成熟,应用较为广泛,但是传感器中的金属膜容易被氧化,吸收系数大,品质因子(Q)难以优化,且这种传感器只能由横磁模偏振光激发,局限性大。光子晶体折射率传感器利用光子晶体局域特性结合光学谐振原理,可实现对待测样本某些参数的动态监测,具有传输速度快、频带宽、抗干扰能力强、灵敏度高、兼容性好等特点,因此,对光子晶体折射率传感器的研究具有重要意义。

目前,有关光子晶体折射率传感器的研究已卓有成效。Rodriguez 等<sup>[4]</sup>应用多孔硅材料,通过在一维光子晶体表面设计适当的折射率梯度或改变介质层的厚度,可产生布洛赫表面波和亚表面波,从而实现对大分子和小分子的选择性检测。该传感器结构复杂,多孔硅介质不均匀,可控性差。Ghouila-Houri 等<sup>[5]</sup>提出了一种将高弹性体夹在由 6 个双层组成的布拉格反射镜之间,通过施加压力、机械应力或热应力来调整谐振频率的光子晶体谐振腔,为压力、应变和温度传感器的设计提供了参考。Sreekanth 等<sup>[6]</sup>提出了一种由石墨烯和聚甲基丙烯酸甲酯交替排列构成的一维光子晶体生物传感器,石墨烯材料的引入增强了对生物分子的吸收,提高了结构的灵敏度。Lin 等<sup>[7]</sup>设计了一种新型光子晶体空气开槽纳米梁腔传感结构,通过在一维光子晶体中引入空气槽纳米束腔,可实现气体传感,该结构具有较高的 Q 值,但结构较为复杂且灵敏度只有 506.9 nm/RIU。

基于上述分析,提出了带有吸收介质的光子晶体法布里-珀罗(F-P)异质结构,该结构将待测样本直接作为缺陷腔,使入射光信号与待测样本可充分作用,提高了灵敏度和 Q 值。应用表面波原理和光学谐振原理,分析光子晶体 Tamm 态的形成条件以及传感结构的传感机理,建立了谐振波长和样本折射率之间的关系模型。讨论了不同吸收介质对传感结构光谱特性的影响,并以葡萄糖水溶液为待测样本,分析了其传感特性。

## 2 结构模型与机理分析

### 2.1 结构模型的建立

改变光子晶体某层的结构参数或光学参数,会将其周期性打破,光谱禁带中某些波长的光信号会透过光子晶体并出现光子允带,即光子晶体缺陷模式。当入射光信号到达半无限光子晶体截止面时,将激发表面波,又称光子晶体 Tamm 态,光子晶体表面波沿着界面传输,能量逐渐损失,电场强度的振幅呈指数衰减。基于此,提出了光子晶体 F-P 异质结构,结构示意图如图 1 所示。

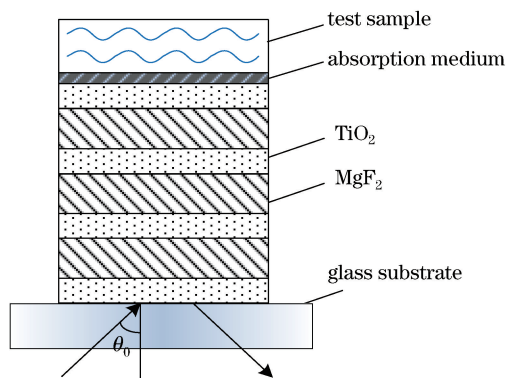


图 1 光子晶体 F-P 异质结构示意图

Fig. 1 Diagram of photonic crystal F-P heterogeneous structure

结构中的光子晶体由二氧化钛( $\text{TiO}_2$ )和氟化镁( $\text{MgF}_2$ )介质层交替排列而成。 $\text{TiO}_2$  的折射率  $n_{\text{TiO}_2} = 2.8$ ,厚度  $d_{\text{TiO}_2} = 160.49 \text{ nm}$ ;  $\text{MgF}_2$  的折射率  $n_{\text{MgF}_2} = 1.38$ ,厚度  $d_{\text{MgF}_2} = 79.66 \text{ nm}$ 。在半无限光子晶体表面引入吸收介质,在吸收介质上涂覆待测样本,则待测样本可视为在光子晶体表面引入的缺陷腔,周期性排列的

光子晶体和吸收介质所构成的等效层作为缺陷腔的一个腔表面,待测样本上方的外部空气作为另一个腔表面,因此由待测样本构成的缺陷腔可视为一个 F-P 腔结构。入射光经玻璃基底传播至光子晶体截止面(光子晶体与吸收介质交界面)时,将产生光子晶体 Tamm 态;当满足一定的角度时,光子晶体 Tamm 态耦合进入缺陷腔,在缺陷腔与空气界面发生全反射后形成光学谐振,产生电磁场局域增强,光子晶体 Tamm 态经多次衰荡反射后回到入射层,并被吸收介质吸收。

## 2.2 理论分析

在结构中,将  $\text{TiO}_2$  层定义为 A 层,  $\text{MgF}_2$  层定义为 B 层,吸收介质定义为 C 层,缺陷层定义为 D 层。将该光子晶体结构置于  $x$ - $z$  平面,则电磁波在平行于  $x$ - $z$  平面的界面传播,电场方向垂直于光波沿  $y$  轴方向。在任意介质层内部,电场都是入射平面波和反射平面波的叠加,可表示为

$$E(x, z) = E_0^+ \exp[i(k_x x + k_z z)] + E_0^- \exp[i(k_x x - k_z z)] = E^+ + E^-, \quad (1)$$

式中  $k_x$  为  $x$  方向的波矢分量,  $k_z$  为  $z$  方向的波矢分量,  $E^+ = E_0^+ \exp[i(k_x x + k_z z)]$  为入射波,  $E^- = E_0^- \exp[i(k_x x - k_z z)]$  为反射波,  $E_0^+$ 、 $E_0^-$  分别为初始入射界面处的入射波和反射波。

由电磁场的连续条件和分层传输矩阵理论<sup>[8]</sup>可得,在一个周期内前后两个界面的电磁场满足

$$\begin{bmatrix} E_{N+1}^+ \\ E_{N+1}^- \end{bmatrix} = \mathbf{T}_A^- \mathbf{T}_B \mathbf{P}_B \mathbf{T}_B^- \mathbf{T}_A \mathbf{P}_A \begin{bmatrix} E_N^+ \\ E_N^- \end{bmatrix} = \mathbf{M} \begin{bmatrix} E_N^+ \\ E_N^- \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中  $\mathbf{T}_A = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ k_{A_z} & -k_{A_z} \end{bmatrix}$ ,  $\mathbf{T}_B = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ k_{B_z} & -k_{B_z} \end{bmatrix}$ ,  $k_{A_z}$  和  $k_{B_z}$  分别为 A 层和 B 层波矢的  $z$  分量;  $\mathbf{T}_A^-$ 、 $\mathbf{T}_B^-$  为  $\mathbf{T}_A$ 、 $\mathbf{T}_B$  的逆矩阵,  $\mathbf{T}_A^- \mathbf{T}_B$  为 A 和 B 介质面之间的传输矩阵,  $\mathbf{T}_B^- \mathbf{T}_A$  为 B 和 A 介质面之间的传输矩阵;  $\mathbf{P}_j = \begin{bmatrix} \exp(ik_{j_z} d_j) & 0 \\ 0 & \exp(-ik_{j_z} d_j) \end{bmatrix}$ ,  $j$  代表 A 层或 B 层,  $d_j$  为介质层厚度;  $E_N^+$  ( $E_{N+1}^+$ ) 和  $E_N^-$  ( $E_{N+1}^-$ ) 为第  $N$  ( $N+1$ ) 层处的入射波和反射波电场;  $\mathbf{M} = \mathbf{T}_A^- \mathbf{T}_B \mathbf{P}_B \mathbf{T}_B^- \mathbf{T}_A \mathbf{P}_A$  为总的传输矩阵。

对于周期性结构,由布洛赫原理可得

$$\begin{bmatrix} E_{N+1}^+ \\ E_{N+1}^- \end{bmatrix} = \exp(iKd) \begin{bmatrix} E_N^+ \\ E_N^- \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中  $K$  为布洛赫波矢。由(2)、(3)式可得,矩阵的特征方程为

$$\mathbf{M} \begin{bmatrix} E_N^+ \\ E_N^- \end{bmatrix} = \exp(iKd) \begin{bmatrix} E_N^+ \\ E_N^- \end{bmatrix}. \quad (4)$$

由(4)式可得,  $|\mathbf{M}| = 1$ , 特征值分别为  $\exp(iKd)$  和  $\exp(-iKd)$ , 因此有

$$\cos(Kd) = [M(1,1) + M(2,2)]/2, \quad (5)$$

式中  $M(1,1)$  和  $M(2,2)$  为矩阵  $\mathbf{M}$  的分量。

当  $K$  为复数且虚部大于零时,  $\exp(iKd)$  和  $\exp(-iKd)$  分别为消逝布洛赫波沿  $z$  轴正负方向的特征值。当特征值为  $\exp(iKd)$  时,特征向量  $\mathbf{I} = \mathbf{T}_A \begin{bmatrix} E_N^+ \\ E_N^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ \frac{\exp(iKd) - M(1,1)}{M(1,2)} \end{bmatrix}$ , 电磁场在任意界面的本征值均满足该条件。

对于文中结构,表面缺陷处利用周期结构的本征值条件,有

$$\begin{bmatrix} E_C^+ \\ E_C^- \end{bmatrix} = \mathbf{T}_C^- \mathbf{T}_A \begin{bmatrix} E_N^+ \\ E_N^- \end{bmatrix}, \quad (6)$$

式中  $\mathbf{T}_C^- \mathbf{T}_A$  为吸收介质层与光子晶体截止层之间的传输矩阵,  $E_C^+$  和  $E_C^-$  分别为吸收介质层内的入射波和反射波电场。缺陷和空气界面的电磁场满足

$$\begin{bmatrix} E_0^+ \\ E_0^- \end{bmatrix} = \mathbf{T}_0^- \mathbf{T}_D \mathbf{P}_D \mathbf{T}_D^- \mathbf{T}_C \mathbf{P}_C \begin{bmatrix} E_C^+ \\ E_C^- \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中  $\mathbf{T}_0^- \mathbf{T}_D$  为缺陷层与空气层之间的传输矩阵;  $\mathbf{T}_0 = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ k_{0z} & -k_{0z} \end{bmatrix}$  为使进入空气的电磁波反射回光子晶体

中的消逝矩阵,其中  $k_{0z} = i\sqrt{k_x^2 - k_0^2}$ ,  $k_0 < k_x$ , 且  $E(x, z) = E_z^- \exp(ik_x x - ik_{0z} z) e_y$  ( $z < 0$ ), 因此  $E_0^+ = 0$ 。联立(6)、(7)式,并代入特征向量  $\mathbf{I}$ , 便可得到光子晶体缺陷 Tamm 态形成的条件。

### 2.3 电场特性分析

在周期性光子晶体截面处激发 Tamm 态, 满足谐振条件的光子晶体 Tamm 态耦合进入缺陷腔, 使得电磁场产生局域增强。光子晶体 Tamm 态经多次衰减振荡后反射至入射介质, 由于吸收介质的存在, 每次反射光波的一部分会被吸收介质吸收。

为了准确描述异质 F-P 结构的电场特性, 对光子晶体 Tamm 态进行模拟, 当入射光角度为  $43^\circ$  时, 波长 713 nm 对应的电场强度曲线和电场场强分布如图 2(a) 所示。可以看出, 缺陷处的局域场强最高可达到入射场强的 81 倍, 反射谱中出现尖锐的谐振峰, 如图 2(b) 所示。

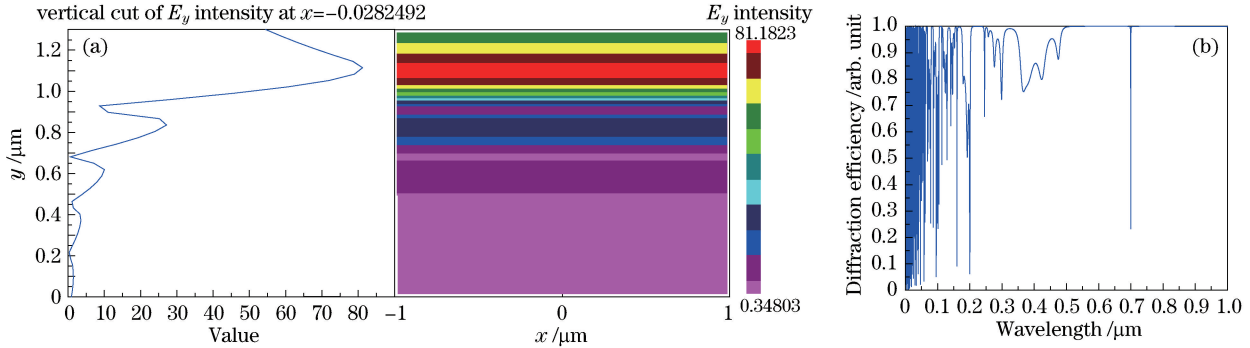


图 2 (a) 光子晶体 Tamm 态的电场强度曲线及电场分布; (b) 反射光谱

Fig. 2 (a) Electric field intensity curve and electric field distribution of photonic crystal Tamm state; (b) reflection spectrum

### 2.4 传感机理分析

$\theta_0$  满足一定的角度时, 耦合进入缺陷腔的光子晶体 Tamm 态会在缺陷层与空气界面发生全反射, 根据光子晶体谐振原理和消逝波原理<sup>[9]</sup>, 可得

$$2nd \frac{2\pi}{\lambda_0} \cos\theta + \Delta\phi = (2k + 1)\pi, \quad k = 0, 1, 2, \dots, \quad (8)$$

式中  $\Delta\phi$  为古斯汉欣相位移产生的相位差,  $\lambda_0$  为谐振波长,  $n$  为缺陷层折射率,  $d$  为缺陷层厚度,  $\theta$  为光线入射到缺陷层的角度。  $\Delta\phi$  可表示为

$$\Delta\phi = \frac{2n \tan \left[ \arcsin \left( \frac{n_g \sin\theta_0}{n} \right) \right]}{(n_g^2 \sin^2\theta_0 - n^2)^{\frac{1}{2}}}, \quad (9)$$

式中  $n_g$  为玻璃基底的折射率,  $n_0 = 1$  为空气折射率,  $\theta_0$  为入射光的初始角度。

将(8)式代入(9)式, 可建立待测样本与谐振波长之间的关系, 通过观测波长的变化来求得待测样本的折射率。

## 3 数值模拟和分析

### 3.1 吸收介质的选择

缺陷 Tamm 态对应的光在待测样本中多次反射后, 最终返回至入射层中。加入吸收介质后, 光信号在多次全反射过程中被吸收介质吸收, 因此可在反射光谱中获得缺陷峰。吸收介质的复折射率<sup>[10]</sup>可表示为

$$\mathbf{n} = n + ikn, \quad (10)$$

式中  $n$  为实折射率,  $k$  为介质的消光系数, 其大小决定了介质对光吸收的强弱。如果  $k$  较小, 则介质对光的吸收比较弱; 如果  $k$  较大, 则介质对光的吸收比较强, 因此选择合适的吸收介质十分重要。

分别选取硫化锌(ZnS)、氧化铝( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )、石墨烯和金属银(Ag)作为吸收介质。在可见光波段: ZnS 的

折射率<sup>[11]</sup>  $n_{\text{ZnS}} = 2.38 + 0.02i$ ;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的折射率<sup>[12]</sup>  $n_{\text{Al}_2\text{O}_3} = 1.76 + 0.238i$ ; 石墨烯的折射率<sup>[13]</sup>  $n_{\text{G}} = n + ik_1\lambda/3$  ( $\lambda$  为入射波长,  $k_1 = 5.446 \times 10^{-3}$ ,  $n = 3.0$ ); 金属银 (Ag) 的折射率<sup>[14]</sup> 可由复介电常数表示, 即  $n_{\text{Ag}} = \sqrt{\epsilon}$ , 其中复介电常数  $\epsilon = \epsilon_r + i\epsilon_i$  可采用德鲁德模型求取,  $\epsilon_r(\omega) = \epsilon_\infty - \omega_p^2/(\omega^2 + \gamma^2)$ ,  $\epsilon_i(\omega) = \omega_p^2\gamma/[\omega(\omega^2 + \gamma^2)]$  ( $\epsilon_\infty$  为背景介电常数,  $\omega_p = 1.37 \times 10^{16}$  rad/s 为等离子振荡频率,  $\gamma = 0.27 \times 2\pi \times 10^{14}$  rad/s 为碰撞频率)。模拟得到的反射光谱如图 3 所示。

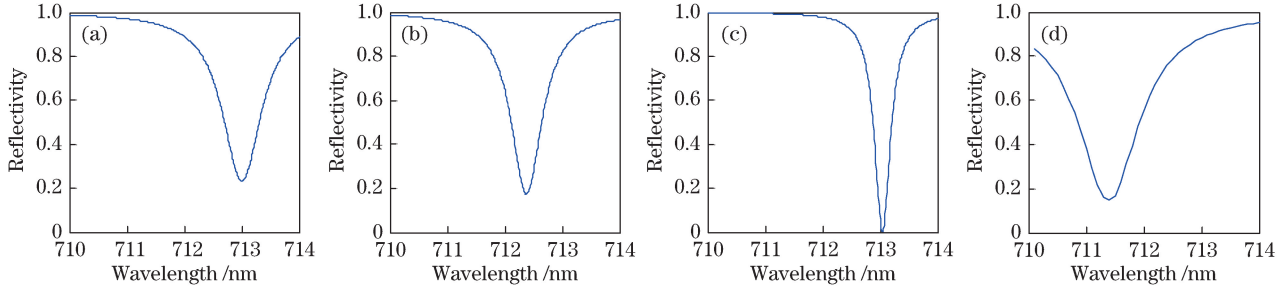


图 3 含不同吸收介质时的反射谱。(a) ZnS; (b)  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; (c) 石墨烯; (d) Ag

Fig. 3 Reflection spectra including different absorption media. (a) ZnS; (b)  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; (c) graphene; (d) Ag

对应反射峰的半峰全宽 (FWHM) 分别为 0.80, 0.65, 0.34, 1.23 nm; 反射率为 77%、83%、100%、86%。通过对比分析可得, ZnS 和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的消光系数小, 反射峰的 FWHM 大, 品质因子小, 反射率低; Ag 的消光系数大, 对光的吸收作用强, 光波与待测样本作用小, 且金属易于氧化, 造价高, 直接作为吸收介质效果不理想。石墨烯作为吸收介质时, 传感器 Q 值最高, 反射率最理想, 因此传感器结构中选择石墨烯作为吸收介质。

### 3.2 光子晶体周期数对传感特性的影响

图 4 为光子晶体周期数分别为 2, 3, 4, 5 时对应的反射光谱。可以看出, 光子晶体周期数对缺陷峰的位置影响较小, 对反射光谱的 Q 值及反射率的影响很大, 随着周期数的增加, Q 值增加而反射率减小, 最终选择光子晶体周期数为 3。

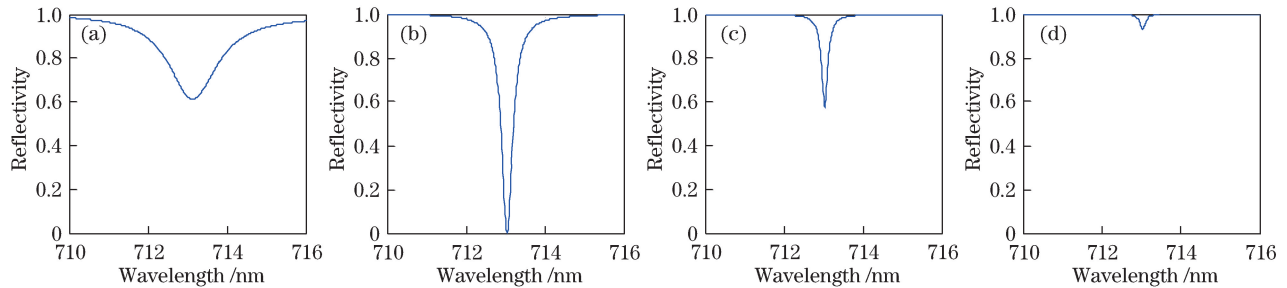


图 4 不同光子晶体周期数对应的反射谱。(a)  $N=2$ ; (b)  $N=3$ ; (c)  $N=4$ ; (d)  $N=5$

Fig. 4 Reflection spectra of photonic crystals with different periods. (a)  $N=2$ ; (b)  $N=3$ ; (c)  $N=4$ ; (d)  $N=5$

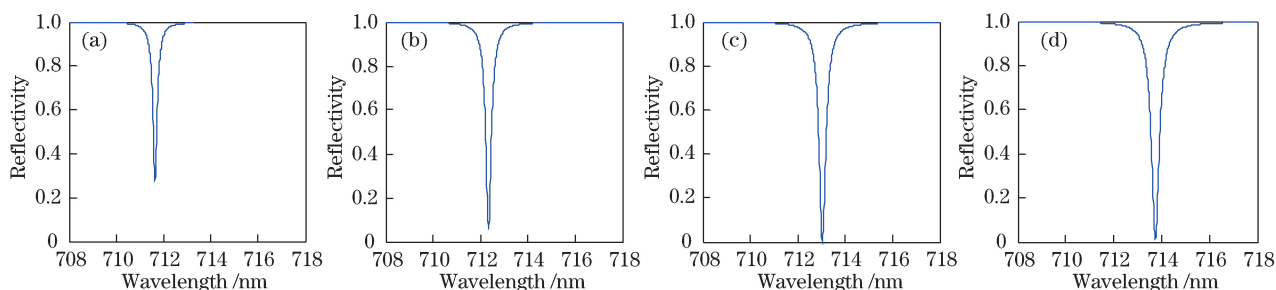
### 3.3 石墨烯层数对传感特性的影响

单层石墨烯的厚度约为 0.334 nm, 则多层石墨烯的厚度  $d_{\text{G}} = 0.334N$  nm,  $N$  为石墨烯层数。随着层数的增加, 石墨烯的吸收作用会增强, 从而对传感结构的反射率和 FWHM 产生影响。图 5 为石墨烯层数  $N$  从 1 增加至 4 的反射谱线。

由图 5 可知, 石墨烯作为吸收介质, 对应反射谱线的 FWHM 都很小, 表明传感器的分辨率较高。通过对比分析可得, 随着层数的增加, 缺陷峰的反射率逐渐增大; 但是, 随着层数的增加, 吸收增强, 当吸收过强时, 入射光与待测样本的相互作用减小, FWHM 增大, 反射率减小。当  $N=3$  时, 反射率约为 100%。此时,

谐振波长  $\lambda = 713.04$  nm,  $\Delta\lambda = 0.34$  nm,  $Q = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = 2097.18$ , 因此结构中设定石墨烯的层数  $N$  为 3, 厚度  $d_{\text{G}} = 1.002$  nm。



图 5 不同石墨烯层数对应的反射谱。(a)  $N=1$ ; (b)  $N=2$ ; (c)  $N=3$ ; (d)  $N=4$ Fig. 5 Reflection spectra of graphenes with different layers. (a)  $N=1$ ; (b)  $N=2$ ; (c)  $N=3$ ; (d)  $N=4$ 

#### 4 传感特性分析

以葡萄糖溶液为样本,分析该结构的光谱特性。根据 Lichtennecher 等效折射率法<sup>[15]</sup>,有

$$\ln n = p \ln \frac{n_{\text{rong}}}{n_{\text{ye}}} + \ln n_{\text{ye}}, \quad (11)$$

式中  $n$  为所求溶液样本的折射率,  $p$  为溶质的体积分数,  $n_{\text{rong}}$  为溶质折射率,  $n_{\text{ye}}$  为溶剂折射率。

选取体积分数  $p$  分别为 22%、24%、26%、28%、30% 的葡萄糖水溶液,葡萄糖和水的折射率分别为  $n_p = 1.4466$ 、 $n_s = 1.3330$ ,由(11)式可得,溶液的折射率分别为 1.3572, 1.3594, 1.3616, 1.3639, 1.3661。待测样本浓度变化时的谐振波长的变化如图 6 所示。

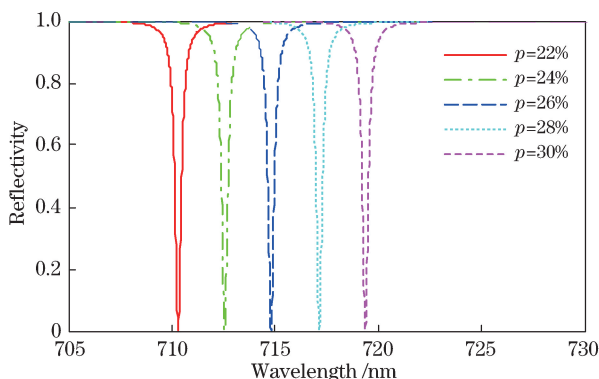


图 6 待测样本浓度变化时谐振波长的变化

Fig. 6 Variation in resonant wavelength with concentration of test sample

葡萄糖溶液浓度的变化引起等效折射率的变化,从而引起谐振波长的变化。上述不同浓度的葡萄糖溶液对应的谐振波长分别为 710.31, 712.56, 714.81, 717.14, 719.37 nm。结构灵敏度  $S = \frac{\Delta\lambda}{\Delta n} = \frac{9.06 \text{ nm}}{0.0089} = 1017.98 \text{ nm/RIU}$ 。

#### 5 结 论

利用分层传输矩阵法构建了结构的理论模型,结合光子晶体谐振原理和光子晶体 Tamm 态分析了结构的传感机理。建立了样本折射率和缺陷 Tamm 态谐振波长的关系模型,得出了结构的  $Q$  值。以葡萄糖溶液为待测样本,分析了结构的灵敏度。结果表明,所提传感结构具有较高的  $Q$  值和灵敏度,从而为高  $Q$  值、高灵敏度检测提供一定的理论参考。

#### 参 考 文 献

- [1] Sun H, Yang S, Zhang J, *et al.* Temperature and refractive index sensing characteristics of an MZI-based multimode fiber-dispersion compensation fiber-multimode fiberstructure[J]. Optical Fiber Technology, 2012, 18(6): 425-429.

- [2] Chen Qianghua, Luo Huifu, Wang Sumei, *et al.* Measurement of air refractive index based on surface plasmon resonance an phase detection by dual-frequency laser interferometry[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(1): 0108001.  
陈强华, 罗会甫, 王素梅, 等. 基于表面等离子体共振和双频激光干涉相位测量的空气折射率测量[J]. 中国激光, 2013, 40(1): 0108001.
- [3] Gondek E, Karasiński P. One-dimensional photonic crystals as selective back reflectors[J]. Optics & Laser Technology, 2013, 48: 438-446.
- [4] Rodriguez G A, Ryckman J D, Jiao Y, *et al.* A size selective porous silicon grating-coupled Bloch surface and sub-surface wave biosensor[J]. Biosensors and Bioelectronics, 2014, 53: 486-493.
- [5] Ghouila-Houri C, Gerbedoen J C, Viard R, *et al.* Design and elaboration of 1D photonic crystal cavity based on highly flexible elastomer thin layer for sensors applications[J]. Procedia Engineering, 2015, 120: 744-747.
- [6] Sreekanth K V, Zeng S, Yong K T, *et al.* Sensitivity enhanced biosensor using graphene-based one-dimensional photonic crystal[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2013, 182: 424-428.
- [7] Lin T, Zou Y, Chau F S, *et al.* Novel one-dimensional photonic crystal air-slotted nanobeam cavity for gas sensing[C]. IEEE International Conference on Optical MEMS and Nanophotonics, 2015: 07288846.
- [8] Liu Qineng. A new method that study electromagnetic waves transfer in stratified medium[J]. Laser Journal, 2009, 30(3): 14-15.  
刘启能. 一种研究电磁波在分层介质中传输的新方法[J]. 激光杂志, 2009, 30(3): 14-15.
- [9] Moskalenko V V, Soboleva I V, Fedyanin A A. Surface wave-induced enhancement of the Goos-Hänchen effect in one-dimensional photonic crystals[J]. JETP Letters, 2010, 91(8): 382-386.
- [10] Liu Qineng. Effect of impurity absorption on one-dimensional photonic crystal defect mode[J]. Chinese J Lasers, 2007, 34(6): 777-780.  
刘启能. 杂质吸收对一维光子晶体缺陷模的影响[J]. 中国激光, 2007, 34(6): 777-780.
- [11] Chen Ying, Fan Huiqing, Wang Wenyue, *et al.* Sensing model and performance of the surface defect photonic crystal with porous silicon[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(5): 0523001.  
陈颖, 范卉青, 王文跃, 等. 多孔硅表面缺陷光子晶体的传感模型及特性[J]. 光学学报, 2015, 35(5): 0523001.
- [12] Hu B, Yao M, Xiao R, *et al.* Optical properties of amorphous  $\text{Al}_2\text{O}_3$  thin films prepared by a sol-gel process[J]. Ceramics International, 2014, 40(9): 14133-14139.
- [13] Miloua R, Kebbab Z, Chiker F, *et al.* Peak, multi-peak and broadband absorption in graphene-based one-dimensional photonic crystal[J]. Optics Communications, 2014, 330: 135-139.
- [14] Zhou Renlong, Chen Xiaoshuang, Zeng Yong, *et al.* Enhanced transmission through meta-film hole arrays and the surface plasmon resonance[J]. Acta Physica Sinica, 2008, 57(6): 3506-3508.  
周仁龙, 陈效双, 曾勇, 等. 金属光子晶体平板的超强透射及其表面等离子体共振[J]. 物理学报, 2008, 57(6): 3506-3508.
- [15] Li L, Liu G Q, Huang K, *et al.* The water content sensor in heavy oil based on one-dimensional photonic crystals[J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2013, 124(16): 2519-2521.