

基于光学塔姆态耦合分析的含金属插层光子晶体 传感机理研究

陈颖¹ 董晶¹ 刘腾¹ 石佳¹ 朱奇光² 毕卫红²

¹燕山大学电气工程学院自动化仪表系河北省测试计量技术及仪器重点实验室, 河北 秦皇岛 066004

²燕山大学信息科学与工程学院河北省特种光纤与光纤传感重点实验室, 河北 秦皇岛 066004

摘要 基于光子晶体光学塔姆态的耦合分析,提出了一种含金属插层的折射率传感结构。对该光子晶体结构中光学塔姆态的形成机理进行了分析,并调整金属插层的厚度来实现两个光学塔姆态的耦合。建立缺陷峰波长与待测溶液折射率的关系模型,并分析其折射率传感特性。通过对光子晶体周期数和入射角度的讨论,可以得到,增加光子晶体周期数(或入射光的入射角度)可减小缺陷峰的半峰全宽(FWHM),从而提高传感器的灵敏度和折射率的分辨率。以乙二醇为待测样本,可得该传感器的灵敏度为445.45 nm/RIU(折射率单元),品质因数(Q值)可达1259.45。该传感器结构具有制备工艺简单和结构紧凑等优点,可为高Q值和高灵敏度折射率传感器的设计提供一定的理论参考。

关键词 传感器;光子晶体;金属插层;光学塔姆态

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.1114001

Study on the Sensing Mechanism of Photonic Crystal Containing Metal Layer Based on the Coupling Analysis of Optical Tamm State

Chen Ying¹ Dong Jing¹ Liu Teng¹ Shi Jia¹ Zhu Qiguang² Bi Weihong²

¹ Hebei Province Key Laboratory of Test/Measurement Technology and Instrument, Department of Automation Equipment, School of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China

² Hebei Province Key Laboratory of Special Fiber and Fiber Sensing, School of Information Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China

Abstract Based on the coupling analysis of the optical Tamm states in the photonic crystal, a refractive index sensing structure containing metal inset layer is proposed. The formation mechanism of optical Tamm state is analyzed and the suitable thickness of the metal is chosen to realize the coupling of two optical Tamm states. The relationship model between the reflection peak wavelength and the refractive index of the sample solution is established, and its refractive index sensing characteristics are discussed. Through the discussion of the periodicity and the incident angle of the photonic crystal, it shows that the full width at half maximum (FWHM) can be reduced by increasing the periodicity (or the incident angle), which can improve the sensitivity of the sensor and the resolution of the refractive index obviously. The ethylene glycol is adopted as the sample detected, the sensitivity of the refractive index sensing structure is about 445.45 nm/RIU, and the quality factor (Q value) can attain to 1259.45. The sensor structure has several advantages such as simple preparation and compact structure, which can provide some theoretical references for the design of high Q value and high sensitivity refractive index sensors.

Key words sensors; photonic crystal; metal inset layer; optical Tamm state

OCIS codes 280.4788; 230.5298; 160.3900; 240.6690

收稿日期: 2015-05-07; 收到修改稿日期: 2015-06-19

基金项目: 国家自然科学基金(61201112, 61172044, 61475133)、河北省自然科学基金(F2013203250)、河北省普通高校毕业生青年拔尖人才计划(BJ2014056)、燕山大学青年教师自主研究计划(14LG013)

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等方面的研究。E-mail: chenying@ysu.edu.cn

1 引 言

光学生物传感技术是以光信号作为被测对象的一门新兴传感测量技术,已广泛应用于生物制药、医疗诊断、国防科研、食品安全和环境监测等诸多方面。目前,表面等离子体共振(SPR)传感器是发展比较成熟的光学生物传感器^[1],其具有实时性好、无需荧光标记和应用范围广等特点,然而该传感器也存在一些不足之处,例如只能利用横磁(TM)光进行激发并且其特征谱线的半峰全宽(FWHM)一般在20 nm以上等^[2-3]。Zhao等^[4]设计了一种测量液体浓度的光纤SPR传感器,由其反射谱可以看出,反射率最低为0.6,反射峰的FWHM较宽,品质因数(Q值)只有几十,从而导致此类传感器的分辨率较低。所以,对高分辨率光学折射率传感器的研究十分必要。

光子晶体是一种折射率周期性调制的人工光学结构,通过在其完整结构中引入缺陷,可以在禁带中得到光子带隙,从而调控光子的传播行为^[5-6]。目前,关于光子晶体的研究越来越多。刘艳红等^[7]设计了一种基于各向异性光子晶体带隙的窄带角度滤波器。Namdar等^[8]在普通光子晶体中嵌入负折射特性的光子晶体,制备出了无标记光纤纳米生物传感器。以上研究为光子晶体在滤波器和生物传感等领域的应用提供了一定的理论基础。

1933年,前苏联物理学家塔姆提出了塔姆态的概念,实质上,它是晶体的周期性势场在表面发生中断而引起的一种附加能级。光学塔姆态是一种形成于两个不同材料的分界面处的新型界面模式,在该界面处场强达到最大,远离该界面后,强度呈逐渐衰减趋势。与传统的金属表面等离子体不同,光学塔姆态可同时被电磁(TE)或TM波激发,且不需要特定的人射角或色散调节组件^[9]。以上特点为光学塔姆态在微光子结构中的应用提供了新的思路。Rostami等^[10]研究了由左手材料和右手材料构成的多分子层在高波段塔姆态的光学特性。蒋瑶等^[11]基于分布式布拉格反射镜(DBR)-金属-DBR结构,通过金属两侧光学DBR中心频率的失配引入不对称机制,设计和控制可见光区域光学塔姆态的产生;通过分析反射谱及电场特性揭示了金属两侧光学塔姆态的相互作用。陈林坤等^[12]基于一维光子晶体的塔姆态耦合实现了可调双频滤波器的设计。

基于以上分析,本文结合光子晶体光子带隙特性与光学塔姆态原理,提出了基于光子晶体光学塔姆态耦合分析的含金属插层折射率传感结构,利用传输矩阵法进行数值模拟,通过调整光子晶体周期数和入射光的入射角度,有效地减小反射峰的FWHM,从而提高折射率传感器的分辨率,通过观测反射峰的漂移量来实现对待测溶液折射率的监测。

2 模型建立和理论分析

2.1 传感模型建立

基于光学塔姆态耦合理论,提出了含金属插层的一维光子晶体折射率传感结构,如图1所示。其中,金属插层选用Ag[如图1(a)所示],其折射率 $\hat{n} = \sqrt{\hat{\epsilon}}$ 。已知金属的复介电常数 $\hat{\epsilon} = \epsilon_r + i\epsilon_i$ 与波长有一定的变化关系,采用德鲁德(Drude)模型来拟金属的复介电常数^[13],其中 $\epsilon_r(\omega) = \epsilon_\infty - \omega_p^2/(\omega^2 + \gamma^2)$, $\epsilon_i(\omega) = \omega_p^2\gamma/[\omega(\omega^2 + \gamma^2)]$, ϵ_∞ 为背景介电常数,等离子振荡频率 $\omega_p = 1.37 \times 10^{16}$ rad/s,碰撞频率 $\gamma = 0.27 \times 2\pi \times 10^{14}$ rad/s。

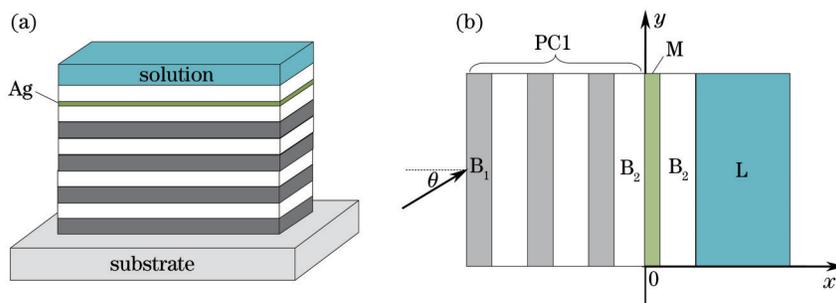


图1 含金属插层的一维光子晶体折射率传感器示意图。(a) 折射率传感器结构模型; (b) 折射率传感器平面图
Fig.1 Schematic diagram of one-dimensional photonic crystals refractive index sensor containing metal insert layer.
(a) Structure model of the refractive sensor; (b) plane structure composition of the refractive index sensor

图 1(b)为相对应的传感器平面结构组成,其中, M(金属 Ag)左侧部分是周期性排列的光子晶体结构(PC1),由介质层 SiO₂(定义为 B₁,其折射率 n₁=1.37)、TiO₂(定义为 B₂,其折射率 n₂=2.45)周期排列而成,其光学厚度满足 n₁d₁=n₂d₂=λ/4,周期长度 d=d₁+d₂,中心波长为 615 nm; M 右侧为一层 TiO₂(B₂)和待测溶液 L,因此,整个光子晶体结构可表示为 PC1-M-B₂-L。

2.2 理论分析

2.2.1 含金属插层光子晶体中塔姆态的形成条件

设定 PC1-M 的界面位于 x=0 处,以 TE 波为例,电场沿 z 方向,磁场方向在 xy 平面。假设电磁场沿 xy 平面传播, x、y 方向上波矢分量分别为 k_x、k_y,其中 k_y 在分层结构中保持不变。基于传输矩阵法,由 TE 波在边界上的连续条件可得

$$\begin{aligned} E_i^+ + E_i^- &= E_j^+ + E_j^-, \\ H_i^+ \cos \theta_i - H_i^- \cos \theta_i &= H_j^+ \cos \theta_j - H_j^- \cos \theta_j, \end{aligned} \quad (1)$$

其中 $H = \sqrt{\epsilon_0/\mu_0} nE$, $E(x,y) = E_j^+ \exp[i(X+Y)] + E_j^- \exp[i(-X+Y)]$, $X = k_x x$, $Y = k_y y$ 。则在图 1(b)中任一周期前后界面处电磁场满足以下关系

$$T_{B_1} \begin{pmatrix} E_{g+1}^+ \\ E_{g+1}^- \end{pmatrix} = T_{B_1} T_{21} Q_{B_2} T_{12} Q_{B_1} \begin{pmatrix} E_g^+ \\ E_g^- \end{pmatrix} = J T_{B_1} \begin{pmatrix} E_g^+ \\ E_g^- \end{pmatrix}, \quad (2)$$

其中 $T_{\mu} = T_{B_i}^{-1} T_{B_j}$, $Q = \begin{bmatrix} \exp(ik_{yx}d_\gamma) & 0 \\ 0 & \exp(-ik_{yx}d_\gamma) \end{bmatrix}$, $T_{\gamma x} = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ k_{\gamma x} & -k_{\gamma x} \end{pmatrix}$, γ 代表各个介质层, $k_{\gamma x}$ 为介质在 x 方向的波矢分量。

根据布洛赫定理,对于光子晶体周期结构, $\begin{pmatrix} E_{g+1}^+ \\ E_{g+1}^- \end{pmatrix} = \exp(iKd) \begin{pmatrix} E_g^+ \\ E_g^- \end{pmatrix}$,其中, K 为布洛赫波矢大小。设 $P = T_{B_1} \begin{pmatrix} E_g^+ \\ E_g^- \end{pmatrix}$,将布洛赫定理与(2)式联立,可得其特征方程

$$[J - \exp(\pm iKd)]P = 0, \quad (3)$$

可得其特征值为 $\lambda_{1,2} = \exp(\pm iKd)$ 。 K 为复数,当其虚部大于 0 时, $\exp(iKd)$ 和 $\exp(-iKd)$ 分别代表沿 z 轴正方向和负方向布洛赫波的特征值。假设 $J = \begin{pmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{pmatrix}$,特征值 $\exp(iKd)$ 对应的特征向量为

$$\begin{pmatrix} P_1 \\ P_2 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ \frac{\exp(iKd) - J_{11}}{J_{12}} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

对于如图 1(b)所示的光子晶体折射率传感器结构,介质的界面处都可以利用电磁场本征值满足的条件,金属与相邻介质之间的界面有

$$T_{B_2} \begin{pmatrix} E_{B_2}^+ \\ E_{B_2}^- \end{pmatrix} = T_M \begin{pmatrix} E_M^+ \\ E_M^- \end{pmatrix} = P, \quad (5)$$

于是,

$$\begin{pmatrix} E_{-x}^+ \\ E_{-x}^- \end{pmatrix} = T_{-x}^{-1} T_{B_1} Q_{B_1} \begin{pmatrix} E_{B_1}^+ \\ E_{B_1}^- \end{pmatrix} P = T_{-x}^{-1} (T_{B_1} Q_{B_1} T_{B_1}^{-1} T_{B_2} Q_{B_2} T_{B_2}^{-1})^N T_M Q_M T_M^{-1} (T_{B_2} Q_{B_2} T_{B_2}^{-1} T_L Q_L T_L^{-1}) P. \quad (6)$$

由此可知,激发的光学塔姆态的场强是向两侧逐渐衰减的,即电磁场是向两侧的消逝波,故(6)式中的 $E_{-x}^+ = 0$ 。求解方程就可以得到一个色散关系,即为形成塔姆态所需满足的条件。

2.2.2 光学塔姆态耦合分析

为了便于对比分析,图 2(a)给出了传统 SPR 结构的光谱图,SPR 结构由棱镜基底-电介质层 SiO₂-金属银-待测溶液构成。偏振光以一定的角度入射到 SPR 结构中,经电介质层调制后其传播路径发生改变,将电介质层与金属膜作为全反射面,则在该界面处形成消逝波。当消逝波与金属-空气界面形成的等离子体波在沿着

介质横向方向的波矢分量匹配时,将会激发SPR效应。从图2(a)中可以看出,此光谱图中缺陷峰的反射率高且FWHM较大,导致分辨率不高。用光子晶体替代SPR中的电介质层并在金属与待测溶液之间加一层电介质则构成图1所提出的结构,其反射谱如图2(b)所示,可以看出,在布拉格带隙范围内存在两个缺陷峰塔姆-1和塔姆-2,且塔姆-1比较尖锐。已知金属与相邻各向同性介质可以形成光学塔姆态,金属相邻两侧的介质均是 B_2 且参数相同,则该结构中可以形成两个光学塔姆态。但实质上,塔姆-1和塔姆-2并不是两个独立的塔姆态激发的,而是由金属薄膜两端两本征能量相同的塔姆态的反对称耦合和对称耦合造成的。

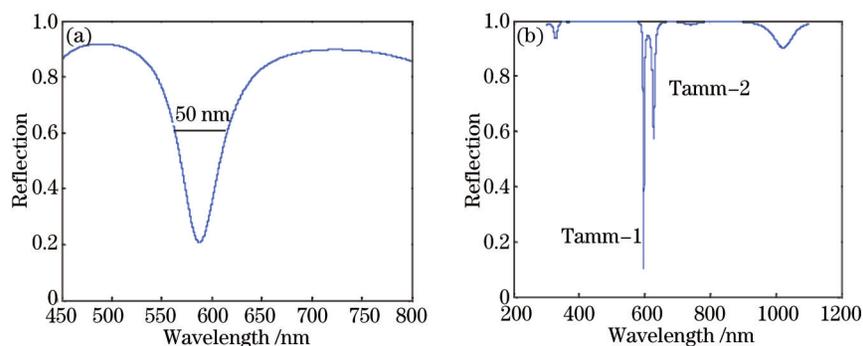


图2 反射谱对比图。(a) SPR的反射谱;(b)图1所提结构的反射谱
Fig.2 Contrast figures of reflection spectrum. (a) Reflection spectrum of SPR;
(b) reflection spectrum of the structure mentioned in Fig.1

图3为 B_2 -M- B_2 区域的场强分布图,不难发现,图3(a)中的红色区域处场强最强,并呈现向两侧逐渐衰减的趋势。最高场强本应位于金属与相邻介质界面处,但是当两个光学塔姆态发生耦合时,无论是对称耦合还是反对称耦合都会产生一定的排斥力,使得增强的光场强偏离金属与金属相邻的介质界面。如图3(b)所示,高场强分别局域于金属左侧的 B_2 层与其左侧相邻介质界面附近,以及金属右侧的 B_2 层与待测溶液层L交界面附近。

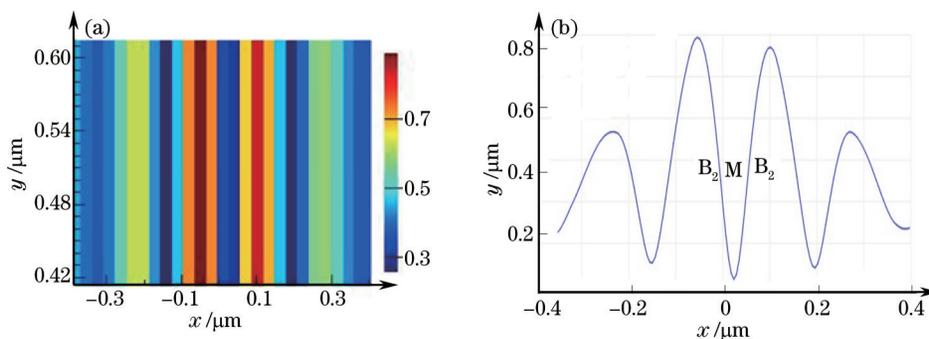


图3 光子晶体场强分布图。(a)在2维平面上的电场分布;(b)对应的电场线分布曲线
Fig.3 Field intensity distribution map of the photonic crystal. (a) 2D electric field distribution;
(b) corresponding electric filed distribution curve

两个塔姆态之间的相互作用是通过中间的金属插层联系起来的,因此金属薄膜的厚度对光学塔姆态耦合有显著的影响。由于金属的吸收损耗和散射损耗等特性,随着金属厚度的增大,由其引入的损耗也将变大。如图4所示,当金属层厚度为40,50,70,80 nm时,对应的 Q 值分别为1191.4,1452.9,1267.4,1385.3。而当金属厚度为80 nm时,光谱中将仅出现一个反射缺陷峰,此时对应的场强分布图如图5所示。由图5(a)可以看出,场强截止于金属处不再向右侧传输,此时结构相当于PC1-M,因此不能实现光学塔姆态的耦合。由图5(b)可知,独立光学塔姆态最强场强严格局域于金属与相邻的介质层界面,且向两侧呈现逐渐衰减的趋势。与此同时,由光学塔姆态激发的缺陷峰对金属薄膜厚度具有一定的限制^[14],金属薄膜不能太薄。因此为了兼顾传感器的 Q 值和塔姆态激发对金属厚度的限制,文中选择金属厚度为50 nm。

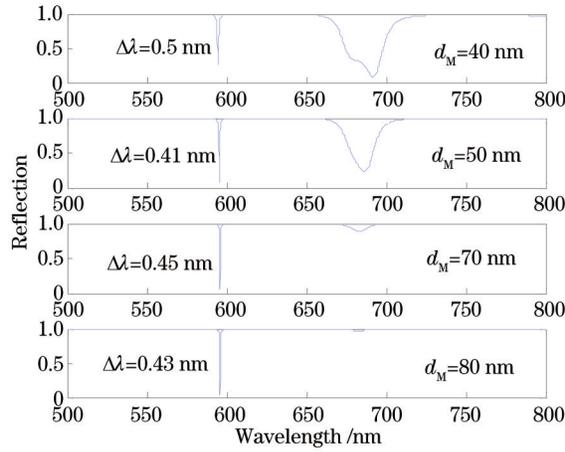


图4 金属不同厚度对应的光谱图

Fig.4 Spectra of the metal at different thicknesses

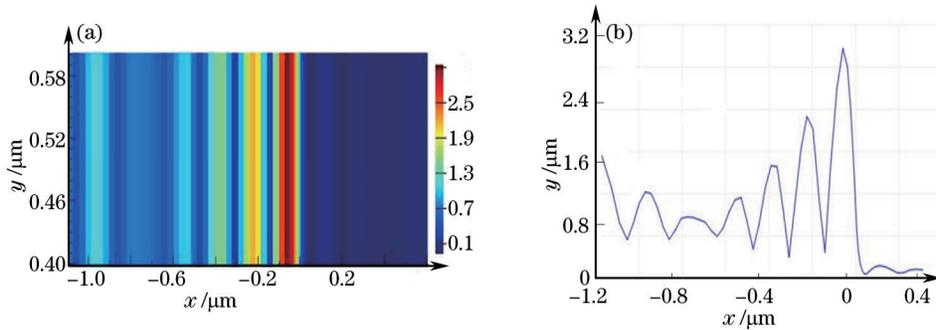


图5 金属厚度 80 nm 场强分布图。(a) 在 2 维平面上的电场分布; (b) 对应的电场线分布曲线

Fig.5 Field intensity distribution map when the metal thickness is 80 nm. (a) electric field distribution on 2D plane;

(b) corresponding electric filed distribution curve

2.2.3 折射率传感机理分析

由上述的光学塔姆态耦合分析可知,高场强局域于液体表面,因此渗入液体的传播深度较深。从广义上看,折射率传感器结构 PC1-M-B₂-L 可以看作是以金属左右相邻介质 B₂ 为腔的两个谐振腔。光束在金属 M 中的穿透深度为 d_{M1} (强度衰减为 1/e 处交界面的距离), 光束穿过 B₂ 射入右侧的穿透深度 d_L 为

$$d_L = \frac{\lambda_{B_2}}{4n_{B_2}} \frac{n_L n_{B_2}}{n_{B_2} - n_L}, \quad (7)$$

则光子晶体结构的有效腔长要满足的条件为

$$l = n_{B_2} (d_{pc1} + d_{M1} + 2d_{B_2} + d_L) = m(\lambda/2), (m = 1, 2, 3 \dots). \quad (8)$$

由(8)式可知,通过观测谐振波长的变化情况即可实现监测有机物折射率变化的目的。以塔姆-1 作为检测峰,电磁波以消逝波的形式入射到待测溶液中,到达渗透深度后将反射回光子晶体中(渗透深度约为 300 nm)。因此,在实际应用中,待测溶液的厚度只需大于消逝波的渗透深度即可,正由于这一特点,该传感结构对于微量样本的折射率监测是十分有效的。

3 数值模拟与分析

3.1 Q 值分析及优化

3.1.1 周期数对光谱的影响

影响 Q 值的主要因素之一是光子晶体周期数,下面以缺陷峰塔姆-1 为例进行讨论。由图 6 可以看出,随着 PC1 周期层数 N 的增加,塔姆-1 的 FWHM 减小,从而传感结构的分辨率提高,但是当周期数继续增大时反射率反而变大。综合考虑 Q 值和反射率等因素,在传感器的设计结构中,将其周期数确定为 6。

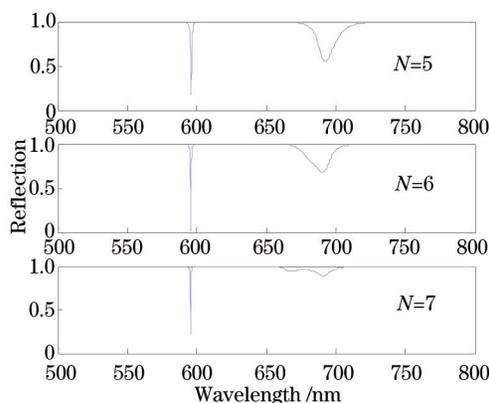


图6 不同周期数对应的光谱图

Fig.6 Reflective spectra with different period numbers

3.1.2 角度对反射谱的影响

除了光子晶体的周期数,入射角度对反射谱的 Q 值也有一定的影响。如图6所示,当入射角度为 25° 、 35° 、 41° 时,对应缺陷峰的FWHM分别为1.83、1.07、0.47 nm,则可以得出随着角度的增大,缺陷峰的FWHM越来越窄。由于考虑到仪器设备分辨能力等实际情况,选择入射角度为 41° ,此时,对应的 Q 值为

$$Q = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} \approx 1259.45, \quad (9)$$

其中 λ 为塔姆-1对应的波长。可以看出,该结构的 Q 值高,这是由于两个光学塔姆态的耦合使入射光与溶液充分接触,从而 Q 值得到提高。

以 B_1B_2 为一个基本传输单元,其传输矩阵为

$$J_B = \begin{bmatrix} J_{11}^* & J_{12}^* \\ J_{21}^* & J_{22}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \delta_{12} & -\frac{1}{\eta_i} \sin \delta_{12} \\ -i\eta_i \sin \delta_{12} & \cos \delta_{12} \end{bmatrix}, \quad (10)$$

则第二类切比雪夫多项的综量为

$$x = \frac{J_{11}^* + J_{22}^*}{2} = \cos \delta_{B_1} \cos \delta_{B_2} - \frac{\eta_{B_1}^2 + \eta_{B_2}^2}{2\eta_{B_1}\eta_{B_2}} \sin \delta_{B_1} \sin \delta_{B_2}, \quad (11)$$

其中 $\delta_i = 2\pi n_i d_i \cos \theta_i / \lambda$ (i 代表各个介质), η 代表介质导纳。当 $x=1$ 时,单元矩阵 J_B 是单位矩阵,满足 $n_i d_i \cos \theta_i = m\lambda$,则当入射角度增大时,波长变小。通过图7可以看出随着角度的增大波长发生蓝移,与公式推导正好吻合。

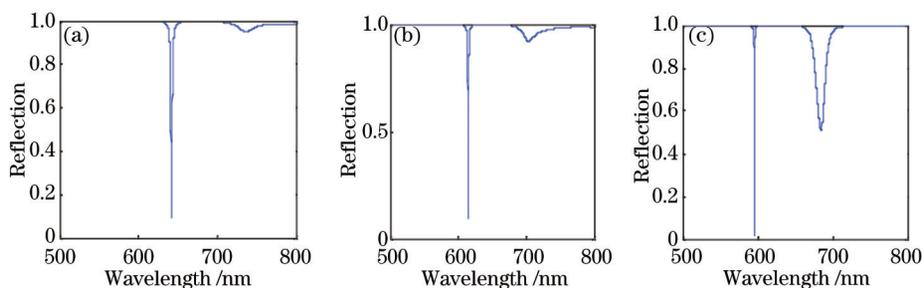


图7 不同入射角度对应的反射谱。(a) 25° ; (b) 35° ; (c) 41°

Fig.7 Reflective spectra at different incident angles. (a) 25° ; (b) 35° ; (c) 41°

3.2 折射率传感特性分析

利用图1所提的光子晶体折射率传感器结构测量乙二醇溶液浓度,1维光子晶体结构传感器是根据溶液折射率的变化来实现传感特性的。已知在等效折射率“Lichteneccher”方法中,浓度与折射率的关系式为

$$\ln n = \rho \times \ln n_1 + (1 - \rho) \times \ln n_2, \quad (12)$$

式中 ρ 为乙二醇的含量, $n_1 = 1.4318$ 为乙二醇的折射率, $n_2 = 1.333$ 为水的折射率。将乙二醇和水的折射率代入(12)式可得

$$\ln n = \rho \times (\ln 1.4138 - \ln 1.333) + \ln 1.333 . \quad (13)$$

通过计算当乙二醇含量为 $\rho = 63.6\%$ 和 $\rho = 74\%$ 时,其对应的折射率分别为 1.395 和 1.406,图 8 为溶液折射率变化对反射谱的影响。

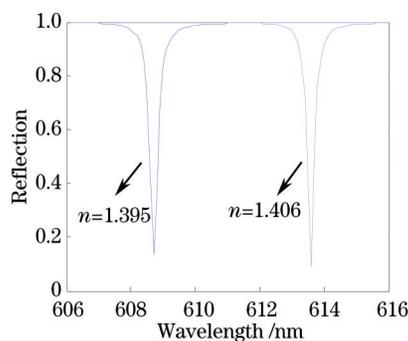


图 8 溶液折射率变化对反射谱的影响

Fig.8 Reflective spectrum with different solution refractive indices

从图 8 可以看出,折射率为 1.395 和 1.406 对应的波长为 608.7 nm 和 613.6 nm,其灵敏度为

$$S = \frac{\delta\lambda}{\delta n} = \frac{613.6 - 608.7}{1.406 - 1.395} = 445.45 \text{ nm/RIU} . \quad (14)$$

式中 RIU 表示折射率单元。因此,该结构灵敏度较高,可以实现高精度溶液折射率的测量。

4 结 论

提出了一种基于光学塔姆态耦合分析的含金属插层的光子晶体折射率传感器结构。结构中金属与相邻各向同性介质之间激发塔姆态,当两个塔姆态发生耦合,场强最大值出现在金属相邻介质与周围介质界面附近。利用塔姆态的耦合使得场强最大值位于液体表面,增大了入射光的渗透深度。通过对结构参数的调整,可以发现,随着光子晶体周期数(或入射角度)的增大,缺陷峰的 FWHM 将收窄。以乙二醇为样本,通过观测反射峰的漂移量来检测折射率的变化,结果表明,此生物传感结构 Q 值为 1259.45,灵敏度为 445.45 nm/RIU。该折射率传感器结构具有高 Q 值和高灵敏度等优点,对生物传感器等领域具有一定的理论和实际应用价值。

参 考 文 献

- 1 Wu Y Gu Z. Research on the thermo-characteristics of surface plasmon resonance spectrum[J]. Chin Opt Lett, 2012, 10(8): 081301.
- 2 Sinibaldi A, Danz N, Descrovi E, *et al.*. Direct comparison of the performance of Bloch surface wave and surface plasmon polariton sensors[J]. Sens Actuat B: Chemica, 2012, 174: 292-298.
- 3 Zhang Zhe, Liu Jie, Lu Danfeng, *et al.*. Wavelength-interrogated surface plasmon resonance sensor based on Au-Ag alloy film[J]. Acta Physico-Chimica Sinica, 2014, 30(9): 1771-1777.
张 喆, 刘 杰, 逯丹凤, 等. 基于金银合金薄膜的波长检测型表面等离子体共振传感器[J]. 物理化学学报, 2014, 30(9): 1771-1777.
- 4 Zhao Yong, Deng Ze-qun, Wang Qi. Fiber optical SPR for liquid concentration measurement[J]. Sens Actuat B: Chemical, 2014, 192: 229-333.
- 5 Chen Ying, Wang Wenyue, Bi Weihong. Sensitivity property analysis of biosensors based on particle swarm optimization[J]. Chinese J. Lasers, 2014, 41(6): 0614002.
陈 颖, 王文跃, 毕卫红. 基于粒子群优化的生物传感器灵敏度特性分析[J]. 中国激光, 2014, 41(6): 0614002.
- 6 Chen Ying, Lu Bo, Fan Huiqing. Refractive index sensing property of SiO₂-Al₂O₃-SiO₂ photonic crystal defect cavity[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(6): 0605003.
陈 颖, 卢 波, 范卉青. SiO₂-Al₂O₃-SiO₂光子晶体缺陷腔的折射率传感特性[J]. 中国激光, 2014, 41(6): 0605003.
- 7 Liu Yanhong, Dong Lijuan, Liu Lixiang, *et al.*. Narrow bandpass angular filter based on anisotropic photonic band gap[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(8): 0823001.

- 刘艳红,董丽娟,刘丽想,等.基于各向异性光子晶体带隙的窄带带通角度滤波器[J].光学学报,2013,33(8):0823001.
- 8 Namdar A, Talebzadeh R, Ghaleh K J. Surface wave-induced enhancement of the Goos - Hänchen shift in single negative one-dimensional photonic crystal[J]. Optics and Laser Technology. 2013, 49: 183-187.
- 9 Lu Gehao, Da Jian, Mo Qi, *et al.*. Manipulating optical tamm state in one dimensional magneto photonic crystal by anisotropic materials[J]. Physica B: Condensed Material, 2011, 406(21): 4159-4162.
- 10 Rostami A, Khezri M, Golmohammadi S. Investigation of optical properties of Tamm states in higher bands of multilayer stacks including right and left handed materials[J]. Optik, 2012, 123: 847-852.
- 11 Jiang Yao, Zhang Weili, Zhu Yeyu. Optical Tamm state theory study on asymmetric DBR-metal-DBR structure[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(16): 167303.
蒋 瑶, 张伟利, 朱叶鱼. 非对称 DBR-金属-DBR 结构的光学 Tamm 态理论研究[J]. 物理学报, 2013, 62(16): 167303.
- 12 Chen Linkun, Fang Yuntuan, Zhu Na, *et al.*. Implementation of tunable dual-band filter based on coupling of Tamm state of the 1-D photonic crystal[J]. Journal of Synthetic Crystals, 2013, 42(11): 2406-2411.
陈林坤, 方云团, 朱 娜, 等. 基于一维光子晶体的 Tamm 态耦合实现可调双频滤波器[J]. 人工晶体学报, 2013, 42(11): 2406-2411.
- 13 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): 3506-3513.
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): 3506-3513.
- 14 Zhou Haichun. The Properties and Applications of Optical Tamm States in Metal-Distributed Bragg Reflectors[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012: 28-29.
周海春. 金属-分布式布拉格反射镜结构中的光学 Tamm 态[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012: 28-29.

栏目编辑: 韩 峰