

亚波长介质光栅-金属 Ag 薄膜-周期性光子晶体混合结构的 Fano 共振传感机理

陈颖^{1*}, 周鑫德¹, 周健¹, 张敏¹, 丁志欣¹, 李少华²

¹燕山大学电气工程学院测试计量技术与仪器河北省重点实验室, 河北 秦皇岛 066004;

²河北先河环保科技股份有限公司, 河北 石家庄 050600

摘要 基于表面等离子体极化激元的传输特性和周期性光子晶体的光学特性, 提出了一种在亚波长介质光栅-金属 Ag 薄膜结构中产生离散态, 在周期性光子晶体结构中产生连续态的亚波长介质光栅-金属 Ag 薄膜-周期性光子晶体混合结构。通过对该结构进行理论分析和传输特性研究, 阐述了该结构中 Fano 共振产生的机理, 建立了基于角度调制的 Fano 共振传感结构模型, 并定量分析了结构参数对反射光谱曲线的影响。结果表明: 当周期性光子晶体周期层数 $N=4$ 、光栅周期 $\Lambda=258$ nm 和金属 Ag 薄膜厚度 $d_0=27$ nm 时, 该结构的品质因数 FOM 值高达 2.11×10^4 , 角灵敏度 $S=40$ ($^\circ$)/RIU。该结构为亚波长介质光栅结构中实现 Fano 共振提供了有效的理论参考, 对光学折射率传感结构的设计具有一定的指导意义。

关键词 表面光学; 表面等离子体极化激元; 亚波长介质光栅; 周期性光子晶体; 角度调制; Fano 共振

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.0413001

Fano-Resonance Sensing Mechanism of Sub-Wavelength Dielectric Grating-Metal Ag Thin Film-Periodic Photonic Crystal Hybrid Structure

Chen Ying^{1*}, Zhou Xinde¹, Zhou Jian¹, Zhang Min¹, Ding Zhixin¹, Li Shaohua²

¹Hebei Province Key Laboratory of Test/Measurement Technology and Instrument,

School of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China;

²Hebei Sailhero Environmental Protection Hi-tech Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei 050600, China

Abstract Based on the transmission characteristics of surface plasmon polaritons and the optical properties of periodic photonic crystals, a hybrid structure of sub-wavelength dielectric grating-metal Ag thin film-periodic photonic crystal is proposed, which produces discrete state in sub-wavelength dielectric grating-metal Ag thin film structure and continuous state in periodic photonic crystal structure. Through the theoretical analysis and transmission characteristics of the structure, the generation mechanism of Fano resonance in the structure is expounded, the Fano-resonance sensing structure model based on angle modulation is established, and the influence of the structural parameters on the reflection spectrum curve is quantitatively analyzed. Results show that when the periodic photonic crystal periodic layer number is $N=4$, the grating period is $\Lambda=258$ nm, and the Ag-film thickness is $d_0=27$ nm, the quality factor FOM value of the structure can be as high as 2.11×10^4 , and the angular sensitivity is $S=40$ ($^\circ$)/RIU. The proposed structure provides an effective theoretical reference for achieving Fano resonance in a sub-wavelength dielectric grating structure, and it has certain guiding significance to the design of the optical refractive index sensing structure.

Key words optics at surface; surface plasmon polaritons; sub-wavelength dielectric gratings; periodic photonic crystals; angle modulation; Fano resonance

OCIS codes 240.6680; 230.1950; 230.5298; 310.6628

收稿日期: 2019-10-22; 修回日期: 2019-11-27; 录用日期: 2019-12-12

基金项目: 国家自然科学基金(61201112, 61475133)、河北省重点研发计划(19273901D)、中国博士后基金(2018M630279)、河北省高等学校科学技术研究项目(ZD2018243)、河北省博士后择优资助项目(D2018003028)、河北省自然科学基金(F2016203188)

* E-mail: chenying@ysu.edu.cn

1 引言

光学微纳结构作为一种能够在纳米尺度上实现对光子调控的光学器件,具有制作工艺简单、易集成和小型化等特点,且能与别的光学微纳结构进行集成,获得良好的光学特性,从而能够应用于光学微纳集成器件领域。光子晶体、亚波长光栅和金属波导等微纳结构具有的光子禁带、衍射、表面等离子体共振等光学特性,使其在光学微纳集成器件领域受到了广泛关注^[1-3]。国内外研究人员基于光子晶体、亚波长光栅和金属波导等微纳结构设计了滤波器^[4]、调制器^[5]、耦合器^[6]和传感器^[7-8]等光学微纳集成器件。

近年来,基于微纳结构设计的光学传感器成为了研究热点之一。符运良等^[9]提出了一种基于高折射率铌酸锂棱镜耦合激发的表面等离子体共振传感器,并通过角度调制实现了对金属材料的优化,其角敏感度 S 为 40 RIU^{-1} ,品质因数 FOM 值最高仅为 100 左右;Zou 等^[10]提出了一种基于石墨烯的一维光子晶体传感结构,并通过分析 Bloch 表面波来实现对传感性能的研究,该结构的角敏感度 S 为 25.1 RIU^{-1} ;Li 等^[11]提出了一种基于磁光光学 Tamm 状态的传感器结构,并通过在金属和电介质表面形成电子局域表面态来实现对传感性能的研究(他们将在金属与电介质表面形成的电子局域表面态称为光学 Tamm 态,该结构的 FOM 值为 1224.21)。在上述结构中,研究人员都是通过分析对称的 Lorentz 曲线的变化来实现动态传感特性检测的。与对称的 Lorentz 曲线相比,非对称的 Fano 共振^[12]是由离散的束缚态与宽的连续谱耦合而成的,且在耦合过程中,Fano 共振光谱曲线不仅具有明显的不对称性和相位突变,还会对结构参数和周围环境折射率的变化表现出极其敏感的特性。因此,基于 Fano 共振设计的微纳结构具有更好的传感性能。Meng 等^[13]利用光子晶体纳米梁产生的连续态与光子晶体纳米梁腔产生的离散态进行侧耦合形成了 Fano 共振结构,并实现了在光子晶体微纳结构中对 Fano 共振的调谐;Li 等^[14]提出了一种基于棱镜耦合的等离子体谐振传感器,该结构在斜入射时能够实现类 Fano 共振。目前,对 Fano 共振微纳传感结构的研究大多集中在光子晶体微腔和等离子体波导等微纳结构领域,鲜有在亚波长介质光栅结构中对具有高 FOM 值的 Fano 共振结构传感特性的研究报道。

本文提出了一种亚波长介质光栅-金属 Ag 薄膜-

周期性光子晶体混合结构。通过对该结构进行理论分析和数值模拟研究,解释了该结构形成 Fano 共振的物理机制。在满足波矢匹配的条件下,TM 模式的入射光在介质光栅-金属 Ag 薄膜结构中传播时会产生离散态,而在周期性光子晶体结构中传播时会形成连续态,且两者在近场作用下会发生耦合,从而在该结构中形成 Fano 共振。本文首先建立了基于角度调制的 Fano 共振传感结构模型,然后研究该结构参数对传感特性的影响,并通过选择优化后的结构参数获得了具有良好性能的传感结构模型。

2 结构模型的建立与理论分析

2.1 结构模型的建立

表面等离子体极化激元(SPPs)^[15]能够利用其独有的光学特性来打破传统光学器件的衍射极限,因此在亚波长介质光栅结构中引入金属薄膜材料能够实现 SPPs 在亚波长微纳传感结构中的应用。周期性光子晶体是由两种不同折射率的电介质以不同厚度组成的周期性结构,而且在周期性结构中能够产生光子禁带,因此,将周期性光子晶体和金属 Ag 薄膜引入到亚波长介质光栅结构中,能够有效地将介质光栅-金属 Ag 薄膜结构中形成的光学特性与周期性光子晶体结构的光学特性相结合,并应用于微纳传感结构。这种结构易于集成和制作,并具有高的 FOM 值。

基于此,本文提出了如图 1 所示的亚波长介质光栅-金属 Ag 薄膜-周期性光子晶体混合结构。在该结构中,介质光栅层采用的是折射率 n_h 为 1.45 的 SiO_2 ,光栅周期 $\Lambda = 257 \text{ nm}$,金属 Ag 薄膜的厚度 $d_0 = 25 \text{ nm}$;该结构的电介质层是周期性光子晶体,电介质 A、B 层分别采用是折射率 $n_A = 1.76$ 的 Al_2O_3 和 $n_B = 2.62$ 的 TiO_2 ,光子晶体周期层数 $N = 4$,且 A、B 层的固定厚度分别为 $d_A = 111 \text{ nm}$ 和 $d_B = 75 \text{ nm}$ 。

该结构中金属 Ag 薄膜的介电常数可以用 Drude 模型来表示^[16],即

$$\epsilon_{\text{Ag}}(\omega) = \epsilon_{\infty} - \omega_p^2 / [\omega(\omega + i\gamma)], \quad (1)$$

式中: ω 为入射光的角频率; ϵ_{∞} 为无穷大角频率处金属 Ag 薄膜的相对介电常数, $\epsilon_{\infty} = 3.7$; ω_p 为等离子体振荡频率, $\omega_p = 1.38 \times 10^{16} \text{ rad/s}$; γ 为阻尼系数, $\gamma = 2.73 \times 10^{13} \text{ rad/s}$; i 为虚数单位。

2.2 理论分析

基于光学薄膜定理可知,实验中周期性光子晶体结构的光子禁带范围为 $600 \sim 930 \text{ nm}$,可提供一

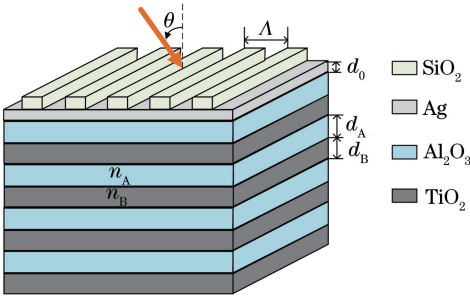


图 1 介质光栅-金属 Ag 薄膜-周期性光子晶体的三维立体结构图

Fig. 1 Three-dimensional structure diagram of dielectric grating-metal Ag thin films-periodic photonic crystal hybrid structure

个良好的连续态,并可使该结构产生良好的 Fano 共振效应。故选择 He-Ne 激光器作为入射光源,其入射光波长 $\lambda_0 = 632.8 \text{ nm}$ 。当入射光在固定波长下以不同的角度入射到介质光栅表面时,会产生衍射效应。该衍射效应可以表示为^[17]

$$\Lambda(n_s \sin \theta \pm n_h \sin \phi) = m\lambda_0 \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots), \quad (2)$$

式中: n_s 为周围环境的折射率; θ 为入射角; ϕ 为衍射角; m 为介质光栅的衍射级数。

入射光经过介质光栅层后产生的衍射波会与下一层金属 Ag 薄膜表面的自由电子发生耦合,故在介质光栅-金属 Ag 薄膜结构中是能够发生等离子体振荡的;又因为在金属 Ag 薄膜中存在等离子波,故当等离子波与入射光的波矢相遇时可能会发生共振。由于存在电磁场边界条件,故当采用 TE 模式的入射光时,其要满足边界条件 $E_y(k_{z,1} + k_{z,2}) = 0$,其中: E_y 为 TE 模式下的电场分量; $k_{z,i} (i = 1, 2)$ 为波矢的 z 分量,且 $k_{z,i}$ 为正实数。故当 $E_y = 0$ 时,TE 模式满足边界条件,这表明 TE 模式的入射光不能在介质光栅-金属 Ag 薄膜结构中形成表面模,即 TE 模式不能激发 SPPs。而采用 TM 模式的入射光时,在满足边界条件的情况下,其色散关系可以

表示为 $\beta = k_s \sqrt{\frac{\epsilon_{Ag}\epsilon_f}{\epsilon_{Ag} + \epsilon_f}}$,故可以采用 TM 模式的入射光来激发介质光栅-金属 Ag 薄膜结构中产生的 SPPs(ϵ_f 为介质光栅的有效介电常数)。该 SPPs 是在满足波矢匹配条件下形成的,故波矢匹配条件可以表示为^[18]

$$|\mathbf{k}_s| n_s \sin \theta + m \frac{2\pi}{\Lambda} = |\mathbf{k}_s| \sqrt{\frac{\epsilon_{Ag}\epsilon_f}{\epsilon_{Ag} + \epsilon_f}}, \quad (3)$$

式中: $|\mathbf{k}_s| = \frac{2\pi}{\lambda_0}$ 为入射光在真空中的波矢; ϵ_{Ag} 为金

属 Ag 薄膜的介电常数。

当满足波矢匹配条件时,在介质光栅-金属 Ag 薄膜结构中产生 SPPs 的磁场分布如图 2(c)和图 2(d)所示。其中,在介质光栅-金属 Ag 薄膜结构的表面局域了大量磁场能量,且磁场能量的分布是朝着周期性光子晶体方向逐渐递减的,其与形成 SPPs 的理论基本符合。介质光栅上表面的磁场能量分布比较弱,这表明入射光在介质光栅中经过衍射和在介质光栅-金属 Ag 薄膜结构中发生共振后,大部分能量被金属 Ag 薄膜吸收,使得其在介质光栅-金属 Ag 薄膜结构中的反射光能量急剧减少,并在反射光谱曲线中形成了一个缺陷峰,从而为 Fano 共振的形成提供了较窄的离散态,如图 2(a)中离散态反射光谱曲线所示。入射光在介质光栅-金属 Ag 薄膜结构中传播后,其能量会发生损耗,但也有部分能量会透过金属 Ag 薄膜,并渗透到周期性光子晶体结构中,且在该结构中发生光子局域,使得周期性光子晶体结构中形成光子禁带,从而在反射光谱曲线中形成了一个较宽的光滑曲线,进而为 Fano 共振的形成提供了一个较宽的连续态,如图 2(a)中连续态反射光谱曲线所示。其中:介质光栅-金属 Ag 薄膜结构通过产生 SPPs 来提供离散态,离散态具有窄带单一频率;而周期性光子晶体结构通过产生光子禁带来提供连续态,连续态具有较宽的频带。在满足波矢匹配的条件下,离散态将与连续态中相应的频率成分发生耦合,实现 Fano 共振。随着待测环境参数的变化,离散态可在一定频率范围内发生红移或蓝移,即与连续态中的不同频率成分耦合,从而可以在不同的入射角度下获得非对称 Fano 共振曲线,如图 2(a)中 Fano 共振反射光谱曲线所示。

当 $\theta = 18.82^\circ$ 时,由图 2(c)可知,在介质光栅-金属 Ag 薄膜和周期性光子晶体结构中都存在磁场能量分布,且入射光在介质光栅-金属 Ag 薄膜结构和周期性光子晶体结构中传播的相位差几乎到达了 π ,相位相反,如图 2(b)所示,这表明在介质光栅-金属 Ag 薄膜与周期性光子晶体结构之间发生了干涉相消,并在反射光谱曲线中形成了一个反射率几乎为 0 的波谷,如图 2(a)所示。当 $\theta = 18.9^\circ$ 时,介质光栅-金属 Ag 薄膜结构在反射曲线波峰处的磁场分布如图 2(d)所示,将其与图 2(c)所示的该结构在波谷处的磁场分布对比后可知,该结构的表面几乎都存在磁场能量分布,而周期性光子晶体结构在反射曲线波峰处的磁场分布与图 2(c)所示的该结构在波谷处的磁场分布相比,

几乎没有发生变化,这说明周期性光子晶体结构的
光学特性比较稳定,能够为 Fano 共振的形成提供
一个较好的连续态,并具有一定的反射率,反射
率可以达到 0.36 左右,如图 2(a)所示。又如
图 2(b)所示,入射光在介质光栅-金属 Ag 薄
膜结构和周期性光子晶体结构中传播的相位差
几乎为 0,即相位相同,这表明光在介质光栅-
金属 Ag 薄膜与

周期性光子晶体结构之间发生了干涉相长,并
在反射光谱曲线中形成了一个反射率约为 0.6
左右的波峰,如图 2(a)所示。该结构在近场
作用下,于介质光栅-金属 Ag 薄膜结构中形
成的离散态会与在周期性光子晶体结构中形
成的连续态发生耦合,从而导致整个结构的反
射光谱曲线发生剧烈变化,形成非对称 Fano
共振曲线,如图 2(a)所示。

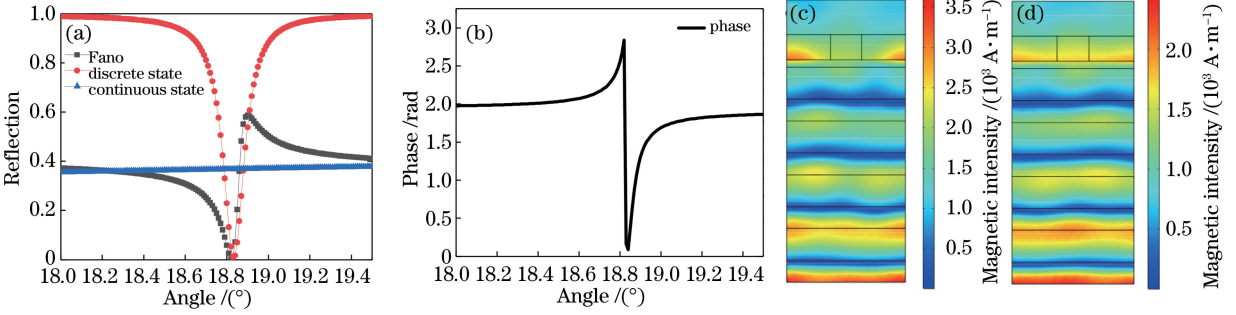


图 2 反射光谱及磁场分布。(a)反射光谱;(b)相位;(c)反射曲线波谷处的磁场分布;(d)反射曲线波峰处的磁场分布
Fig. 2 Reflectance spectra and magnetic field distribution. (a) Reflection spectra; (b) phase; (c) magnetic field
distribution at the dip of reflection curve; (d) magnetic field distribution at the peak of reflection curve

3 结构与讨论

为了获得更好的传感特性,建立了基于角度调制的 Fano 共振传感结构模型,然后采用有限元法对该结构的传感特性进行分析。为了满足周期性光子晶体和介质光栅的相关光学特性,应保证周期性光子晶体和介质光栅的相关结构参数固定不变,再采取控制变量法对周期性光子晶体周期层数 N 、光栅周期 Λ 和金属 Ag 薄膜厚度 d_0 进行研究。此外,为了更加合理地选择结构参数,采用角灵敏度 S 和品质因数 FOM 值^[19]作为衡量传感器性能的重要指标。FOM 值的表达式为

$$\alpha_{\text{FOM}} = \left| \frac{dR/dn}{R} \right|_{\text{max}} = \left| \frac{S(dR/d\theta_R)}{R} \right|_{\text{max}}, \quad (4)$$

式中: α_{FOM} 表示 FOM 值,该值是一个无量纲参数; R 为反射率; θ_R 为角度;角度灵敏度 $S = |d\theta_R/dn|$,将其代入(4)式可得

$$\alpha_{\text{FOM}} = \left| \frac{\Delta R}{R \Delta n} \right| = \left| \frac{R(\omega, n) - R(\omega, n_0)}{R(\omega, n_0) \Delta n} \right|, \quad (5)$$

式中: $R(\omega, n_0)$ 和 $R(\omega, n)$ 分别表示为初始状态和折射率变化后的反射率; Δn 为折射率差。

3.1 周期性光子晶体周期层数 N 对传感特性的影响

通过对周期性光子晶体的研究可知,光子晶体周期层数会影响结构的反射光谱特性。在此结构中,光子晶体周期层数会直接影响周期性光子晶体

与介质光栅-金属 Ag 薄膜结构之间的耦合程度以及结构的反射光谱特性。当周期性光子晶体周期层数 N 的取值范围为 2~6 时,结构的反射光谱曲线如图 3(a)和 3(c)所示,可以看出:当 $N=2$ 、 $N=5$ 和 $N=6$ 时,该结构形成的反射光谱曲线开始接近于对称的 Lorentz 曲线,说明该结构几乎不具有产生 Fano 共振的特性;当 $N=3$ 和 $N=4$ 时,结构产生了良好的 Fano 共振特性,且当 $N=4$ 时,Fano 共振的波谷相对于 $N=3$ 时发生了递减,这是由于周期性光子晶体的周期层数增加使得其对光子局域的能力得到了增强,从而导致在 $\theta = 18.82^\circ$ 时,周期性光子晶体与介质光栅-金属 Ag 薄膜结构之间的干涉增强,使反射率几乎达到了 0。

分析周期性光子晶体周期层数 N 对该结构 FOM 值的影响可以发现,随着周期层数 N 的增加,FOM 值在两侧的波动相对不大,但在中间出现了一个尖峰,即当光子晶体周期层数 $N=4$ 时,FOM 值达到最大(1.64×10^4)。

3.2 光栅周期 Λ 对传感特性的影响

在 TM 偏振光的入射下,介质光栅的等效折射率可以根据等效介质理论表示为^[20]

$$n_e = \left\{ \frac{n_H^2 n_L^2}{[\eta n_L^2 + (1 - \eta) n_H^2]} \right\}^{1/2}, \quad (6)$$

式中: n_H 、 n_L 分别为介质光栅的高低折射率; $\eta = l/\Lambda$ 为介质光栅的填充因子,其中 l 为介质光栅的脊宽。

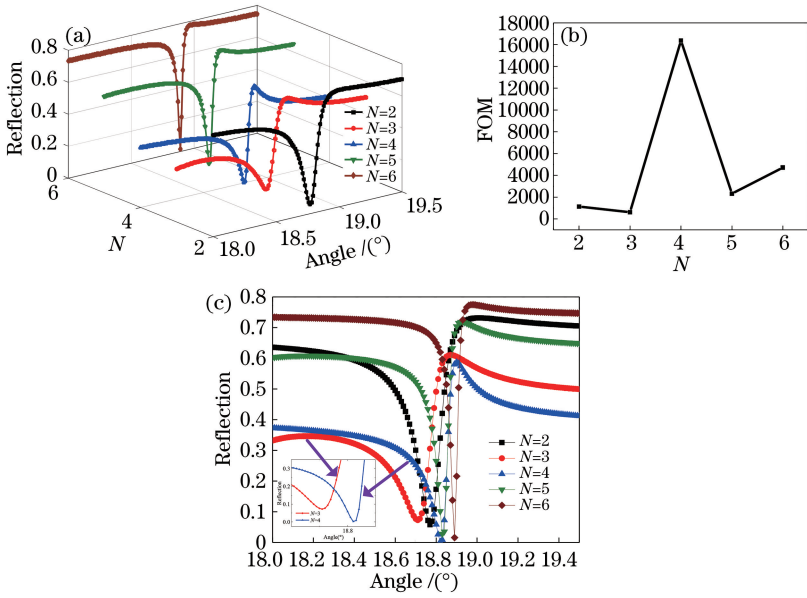


图 3 周期层数 N 对传感性能的影响。(a)反射光谱曲线的三维图；
(b)周期层数 N 对 FOM 值的影响；(c)反射光谱曲线的二维图

Fig. 3 Effect of period number N on sensing performance. (a) Three-dimensional diagram of reflection spectrum curves; (b) effect of periodic number N on FOM value; (c) two-dimensional diagram of reflection spectrum curves

在周期性光子晶体周期层数 $N=4$ 的条件下，由(3)式和(6)式可知，适当调节光栅周期 Λ 的大小，可以改变等效折射率和满足波矢匹配的条件，从而控制在介质光栅-金属 Ag 薄膜结构中产生 SPPs

的效果，进而实现对该结构反射光谱曲线和传感特性的优化。图 4 为光栅周期对传感性能的影响。当光栅周期 Λ 的取值范围为 255~259 nm 且间隔为 1 nm 时，介质光栅-金属 Ag 薄膜结构的磁场分布如

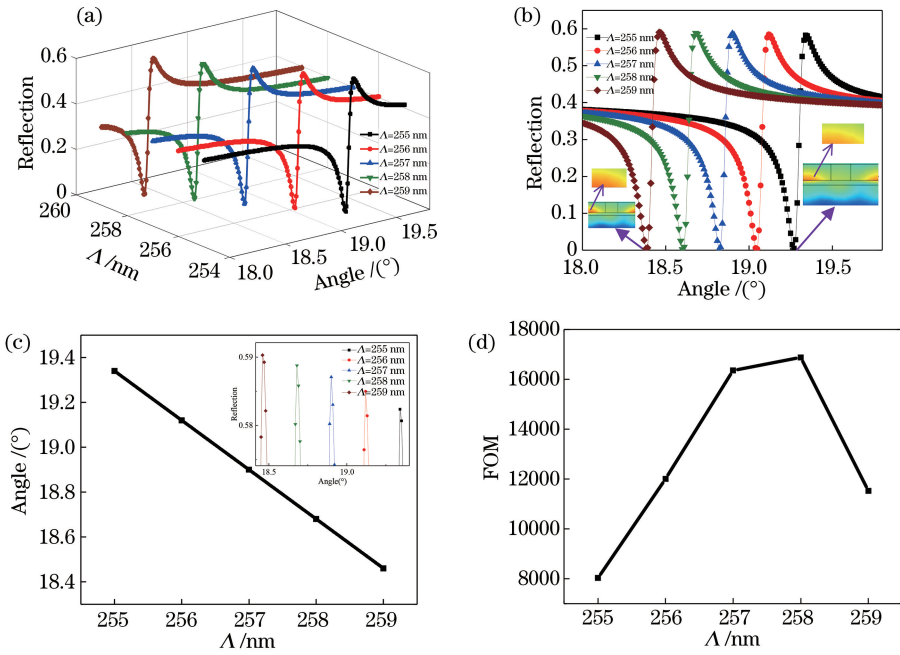


图 4 光栅周期 Λ 对传感性能的影响。(a)反射光谱曲线的三维图；(b)反射光谱曲线的二维图；
(c)光栅周期 Λ 与入射角 θ 的拟合曲线；(d)光栅周期 Λ 对 FOM 值的影响

Fig. 4 Effect of grating period Λ on sensing performance. (a) Three-dimensional diagram of reflection spectrum curves; (b) two-dimensional diagram of reflection spectrum curves; (c) fitting curve of grating period Λ and incident angle θ ; (d) effect of grating period Λ on FOM value

图 4(b)所示,通过对磁场能量颜色的深度进行对比后可知,随着光栅周期 Λ 不断增大,在介质光栅-金属 Ag 薄膜结构中的磁场能量分布总体变化不大(略微得到增强),在介质光栅-金属 Ag 薄膜结构中产生的 SPPs 效应也略微增强,从而导致其与周期性光子晶体结构之间的耦合作用略微提升,Fano 共振波峰的反射率也略微变大,但总体变化不明显,其与图 4(a)和图 4(b)中所示的反射曲线的变化趋势相符合。由图 4(c)可以看出,Fano 共振波峰反射率的变化范围为 0.58~0.59,几乎没有发生变化,与磁场能量变化相符合。图 4(c)中光栅周期 Λ 与入射角 θ 之间的拟合曲线呈良好的线性关系。如图 4(d)所示,随着 Λ 增大,FOM 值先增大后减小,当光栅周期 $\Lambda = 258$ nm 时,FOM 值达到最大(1.69×10^4)。

3.3 金属 Ag 薄膜厚度 d_0 对传感特性的影响

在周期性光子晶体周期层数 $N=4$ 和光栅周期 $\Lambda=258$ nm 不变的情况下,通过适当调节金属 Ag 薄膜厚度 d_0 的大小,来实现对该结构反射光谱曲

线和传感特性的优化。当金属 Ag 薄膜厚度 d_0 的取值范围为 21~29 nm 且间隔为 2 nm 时,随着金属 Ag 薄膜厚度 d_0 不断增大,金属 Ag 薄膜的透光率逐渐降低,磁场能量分布也发生相应的变化,如图 5(b)中 Fano 共振波谷处的磁场能量分布所示。对图 5(b)中磁场能量颜色的深度进行对比后可知,随着金属 Ag 薄膜厚度 d_0 不断增大,介质光栅-金属 Ag 薄膜结构中的磁场能量不断增强,这表明在介质光栅-金属 Ag 薄膜结构中产生的 SPPs 效应得到了增强,故其与周期性光子晶体结构之间的耦合作用也获得了增强,使得该结构的反射率逐渐增大,与图 5(a)和图 5(b)所示的反射光谱曲线的变化趋势相符合。如图 5(c)所示,金属 Ag 薄膜厚度 d_0 与入射角 θ 之间的拟合曲线呈良好的线性关系。分析金属 Ag 薄膜厚度 d_0 对结构 FOM 值的影响后可以发现,随着金属 Ag 薄膜厚度 d_0 的增加,FOM 值先增大后减小,且在金属 Ag 薄膜的厚度 $d_0 = 27$ nm 时,FOM 值达到最大,为 2.11×10^4 ,如图 5(d)所示。

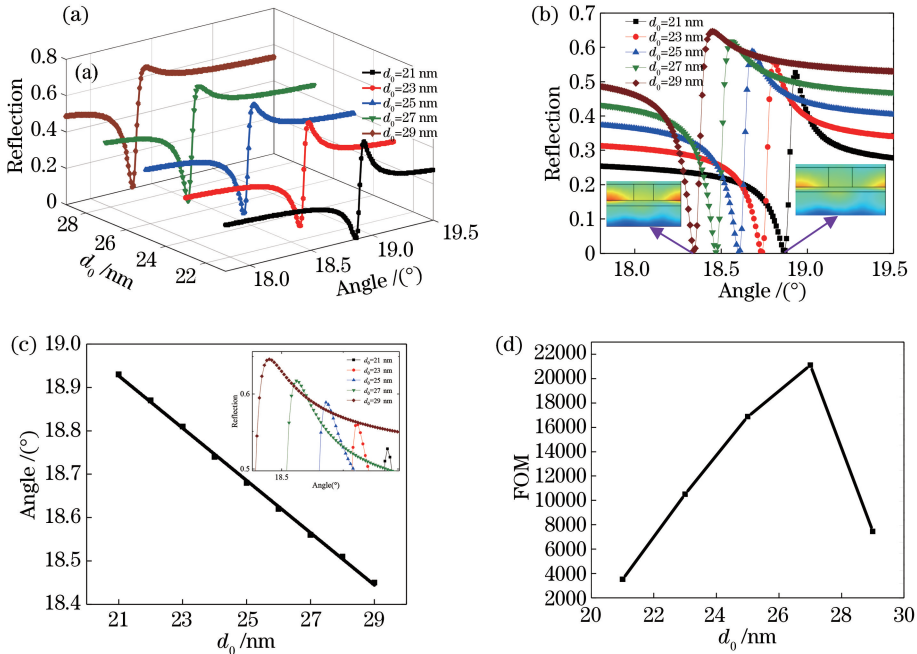


图 5 金属 Ag 薄膜厚度 d_0 对传感性能的影响。(a)反射光谱曲线的三维图;

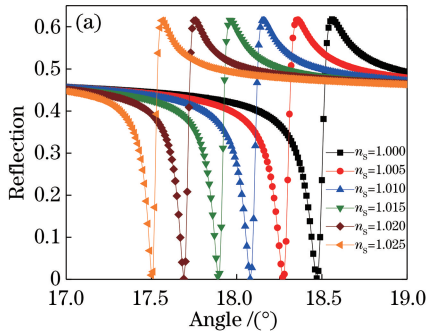
(b)反射光谱曲线的二维图;(c)厚度 d_0 与入射角 θ 的拟合曲线;(d)厚度 d_0 对 FOM 值的影响

Fig. 5 Effect of metal Ag thin film thickness d_0 on sensing performance. (a) Three-dimensional diagram of reflection spectrum curves; (b) two-dimensional diagram of reflection spectrum curves; (c) fitting curve of thickness d_0 and incident angle θ ; (d) effect of thickness d_0 on FOM value

通过控制变量法对周期性光子晶体周期层数 N 、光栅周期 Λ 和金属 Ag 薄膜厚度 d_0 进行结构参数优化研究后可知,当 $N = 4$ 、 $\Lambda = 258$ nm 和 $d_0 =$

27 nm 时,FOM 值达到最大,实现了对传感特性的优化。对优化后的结构进行传感特性分析,结果如图 6(a)和图 6(b)所示,可见:随着环境折射率 n_s 的

不断增大,结构的反射光谱曲线发生了蓝移,且环境折射率 n_s 与入射角 θ 之间的拟合曲线呈线性关系。



通过角灵敏度公式 $S = |d\theta_R/dn|$ 计算可知,该结构的角灵敏度约为 $S=40 (^{\circ})/\text{RIU}$ 。

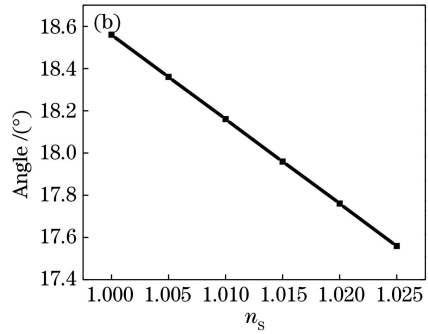


图 6 折射率 n_s 对传感性能的影响。(a) 对 Fano 共振曲线的影响; (b) 折射率 n_s 与入射角 θ 的拟合曲线
Fig. 6 Effect of refractive index n_s on sensing performance. (a) Effect of refractive index n_s on Fano resonance curves; (b) fitting curve of refractive index n_s and incident angle θ

4 结 论

在亚波长介质光栅结构中引入金属 Ag 薄膜和周期性光子晶体的基础上,提出了一种通过在介质光栅-金属 Ag 薄膜结构中产生 SPPs 来提供离散态的方法。该方法通过在周期性光子晶体结构中形成的光子禁带来提供连续态结构,且两者在近场作用下会发生耦合,从而在该结构中形成了 Fano 共振;然后建立了基于角度调制的 Fano 共振传感结构模型,并采用有限元法对该结构的传感特性进行了分析。结果表明:入射角 θ 与金属 Ag 薄膜厚度 d_0 、光栅周期 Λ 呈良好的线性关系,且当周期性光子晶体周期层数 $N=4$ 、光栅周期 $\Lambda=258 \text{ nm}$ 和金属 Ag 薄膜厚度 $d_0=27 \text{ nm}$ 时,品质因数 FOM 值高达 2.11×10^4 ,角灵敏度 $S=40 (^{\circ})/\text{RIU}$ 。该结构在亚波长介质光栅结构中实现了具有高 FOM 值的 Fano 共振,获得了良好的传感特性,为亚波长介质光栅和周期性光子晶体在微纳传感结构中的应用提供了新的思路和方法。

参 考 文 献

[1] Qiao P F, Yang W J, Chang-Hasnain C J. Recent advances in high-contrast metastructures, metasurfaces, and photonic crystals[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2018, 10(1): 180.
[2] Halir R, Ortega-Monux A, Benedikovic D, et al. Subwavelength-grating metamaterial structures for silicon photonic devices[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2018, 106(12): 2144-2157.
[3] Jun Z, Xu W J, Xu Z J, et al. Surface plasmon polariton mode in the metal-insulator-metal waveguide[J]. *Optik*, 2017, 134: 187-193.

[4] Suresh R, Rao K D, Udupa D V, et al. Raman supernotch filter based on dielectric waveguide-polymer nanoscale-grating structure [J]. *Optik*, 2017, 136: 112-122.
[5] Wang L, Luan K Z, Zuo Y F, et al. Graphene optical modulator based on optical Tamm states[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(11): 1106001. 王磊, 栾开智, 左依凡, 等. 基于光学 Tamm 态的石墨烯光调制器 [J]. *中国激光*, 2018, 45(11): 1106001.
[6] Zhang J J, Yang J B, Liang L M, et al. Broadband TM-mode-pass polarizer and polarization beam splitter using asymmetrical directional couplers based on silicon subwavelength grating [J]. *Optics Communications*, 2018, 407: 46-50.
[7] Zhang Y C, Jiang X M, Xia J, et al. Tunable high sensitivity temperature sensor based on transmittance changes of parity-time symmetry structure [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(7): 0710002. 张亦弛, 江晓明, 夏景, 等. 基于宇称-时间对称结构透射率变化的可调高灵敏度温度传感器 [J]. *中国激光*, 2018, 45(7): 0710002.
[8] Saha N, Kumar A, Mukherjee A. Enhancement of refractive index sensitivity of Bragg-gratings based optical waveguide sensors using a metal undercladding [J]. *Optics Communications*, 2017, 396: 83-87.
[9] Fu Y L, Liu H J, Zou X, et al. Bimetallic thin-film surface plasmon resonance sensor based on LiNbO₃ prism coupling [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2018, 37(3): 18-21. 符运良, 刘汉军, 邹旭, 等. LiNbO₃ 棱镜耦合双金属薄膜表面等离子共振传感器 [J]. *传感器与微系统*, 2018, 37(3): 18-21.
[10] Zou X J, Zheng G G, Chen Y Y. Confinement of

- Bloch surface waves in a graphene-based one-dimensional photonic crystal and sensing applications [J]. *Chinese Physics B*, 2018, 27(5): 054102.
- [11] Li N X, Tang T T, Li J, et al. Highly sensitive sensors of fluid detection based on magneto-optical optical Tamm state [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2018, 265: 644-651.
- [12] Luk'Yanchuk B, Zheludev N I, Maier S A, et al. The Fano resonance in plasmonic nanostructures and metamaterials [J]. *Nature Materials*, 2010, 9(9): 707-715.
- [13] Meng Z M, Liang A H, Li Z Y. Fano resonances in photonic crystal nanobeams side-coupled with nanobeam cavities [J]. *Journal of Applied Physics*, 2017, 121(19): 193102.
- [14] Li L X, Liang Y Z, Lu M D, et al. Fano resonances in thin metallic grating for refractive index sensing with high figure of merit [J]. *Plasmonics*, 2016, 11(1): 139-149.
- [15] Barnes W L, Dereux A, Ebbesen T W. Surface plasmon subwavelength optics [J]. *Nature*, 2003, 424(6950): 824-830.
- [16] Chen Y, Xie J C, Cao J G, et al. Filtering characteristics of metal-insulator-metal curved waveguide coupled with embedded-silver-bar disk cavity [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(8): 0805005.
- 陈颖, 谢进朝, 曹景刚, 等. 耦合内嵌银条圆盘腔的金属-介质-金属弯曲波导滤波特性 [J]. *中国激光*, 2019, 46(8): 0805005.
- [17] Zhang J, Zhang X P. Fano-like coupling between two oppositely enhanced processes by diffraction in a dielectric grating [J]. *Optics Express*, 2015, 23(23): 30429.
- [18] Bahrami F, Aitchison J S, Mojahedi M. Dual-wavelength spectroscopy of a metallic-grating-coupled surface plasmon resonance biosensor [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, 7(2): 1-7.
- [19] Becker J, Trügler A, Jakab A, et al. The optimal aspect ratio of gold nanorods for plasmonic biosensing [J]. *Plasmonics*, 2010, 5(2): 161-167.
- [20] Qian L Y, Zhu W, Wang K N, et al. Polarization-controlled reflectance tunable narrow-band filter with single channel based on sparse dielectric grating [J]. *Optics Communications*, 2019, 443: 123-128.