

亚波长金属光栅/电介质/金属混合波导 传感结构的研究

陈颖¹, 田亚宁¹, 何磊¹, 韩帅涛¹, 朱奇光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, 秦皇岛 河北 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器重点实验室, 秦皇岛 河北 066004

摘要 提出了一种亚波长金属光栅/电介质/金属混合波导传感结构, 在结构中可产生导模共振模式、表面等离子激元共振模式和局域表面等离子体模式, 模式之间互相耦合, 从而在反射光谱中形成两个窄带共振缺陷峰。通过研究共振缺陷峰处磁场分布和结构参数对反射谱的影响, 分析了结构中的共振模式。根据导模共振原理和表面等离子体共振形成条件, 建立共振缺陷峰波长与结构参数之间的关系模型, 通过观察共振缺陷峰波长的漂移实现待测样本气体浓度的动态实时监测。以多孔硅为传感载体、甲醛气体为待测样本, 分析传感器的品质因数和灵敏度。结果表明, 两个窄带共振缺陷峰的品质因数分别可达 42.3 RIU^{-1} 和 78.5 RIU^{-1} , 灵敏度分别为 466 nm/RIU 和 628 nm/RIU 。

关键词 传感器; 金属光栅; 导模共振; 表面等离子激元

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0110001

Research on Subwavelength Metal Grating/Dielectric/Metal Hybrid Waveguide Sensing Structure

Chen Ying¹, Tian Yaning¹, He Lei¹, Han Shuaitao¹, Zhu Qiguang²

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

²Key Laboratory for Special Fiber and Fiber Sensor of Hebei Province, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China

Abstract A subwavelength metal grating/dielectric/metal hybrid waveguide sensing structure is proposed. In the structure, the resonance mode of guided mode, surface plasmon polariton resonance mode and local surface plasmon polariton mode can be generated, and these modes are coupled with each other, resulting in two narrow band resonance defect peaks in the reflection spectrum. After studying the magnetic field distribution at the resonance defect peaks and the influence of structural parameters on the reflection spectrum, we analyze the resonance modes in the structure. According to the principle of mode resonance of guided mode and surface plasmon resonance, the relationships between the wavelength of resonance defect peaks and the structural parameters are established. The drifts of resonance peaks wavelengths are observed, and the dynamic real-time monitoring of the gas samples can be realized. The porous silicon is used as the sensing carrier, and the formaldehyde is used as the sample to be tested. The quality factor and sensitivity of the sensor are analyzed. The results shows that the quality factors of two narrow band resonance defect peaks are 42.3 RIU^{-1} and 78.5 RIU^{-1} , and the sensitivities are 466 nm/RIU and 628 nm/RIU , respectively.

Key words sensors; metal grating; guided mode resonance; surface plasmon polariton

OCIS codes 280.4788; 240.6680; 050.1950; 230.7390

收稿日期: 2017-08-04; **收到修改稿日期:** 2017-09-01

基金项目: 国家自然科学基金(61201112, 61475133)、河北省自然科学基金(F2016203188, F2016203245)、河北省普通高等学校青年拔尖人才计划(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, 教授, 博士生导师, 主要从事微纳光学器件及其应用等方面的研究。

E-mail: chenying@ysu.edu.cn

1 引 言

随着理论研究的深入和加工工艺的发展,利用亚波长光栅衍射特性,可实现许多传统光学器件所无法实现的光学功能,因此亚波长光栅广泛应用于偏振器^[1-2]、滤波器^[3]、集成光学^[4]、光开关^[5]、生物成像^[6]、等离子传感^[7-8]等领域。

近年来,亚波长金属光栅成为研究热点之一。陈聿等^[9]在一维金属光栅嵌入磁性介质的体系中实现了横向磁光克尔效应的增强。农金鹏等^[10]提出了一种 Kretschmann 结构亚波长金属光栅辅助传感器,该传感器的角度传感灵敏度可达 $51.484^\circ/\text{RIU}$ 。Li 等^[11]将石墨烯作为与被测分子直接接触的传感层,提出了一种石墨烯覆盖铝纳米光栅的表面等离子激元共振传感器,并进一步分析了结构优化后传感器的传感特性,结果表明单层石墨烯覆盖铝纳米光栅传感器具有最高的品质因数 (24.5 RIU^{-1}),灵敏度高达 $626 \text{ nm}/\text{RIU}$ 。Li 等^[12]通过实验证明了超灵敏横磁(TM)模式亚波长光栅跑道谐振器的灵敏度为 $429.7 \text{ nm}/\text{RIU}$,检测限为 $3.71 \times 10^{-4} \text{ RIU}$ 。

本文提出了一种亚波长金属光栅/电介质/金属混合波导传感结构。在该结构中可产生导模共振模式、表面等离子激元共振模式和局域表面等离子体模式(LSP),模式之间互相耦合,从而在反射谱中可获得两个共振缺陷峰,分析了结构参数对两个共振缺陷峰的影响,并将所得到的两个共振峰用于传感。多孔硅层具有高效的承载机制,将其作为待测样本的承载单元。根据导模共振理论和表面等离子体理论,建立两个共振缺陷峰波长与待测样本折射率之间关系的数学模型,通过观测共振峰波长漂移实现对待测样本浓度的动态监测。

2 结构模型建立与理论分析

2.1 结构模型建立

所提亚波长金属光栅/电介质/金属混合波导结构模型如图 1 所示,该结构由上至下依次为光栅层、电介质层和金属层。所使用的结构参数为:金属光栅和金属层的材料为银,金属光栅周期 $\Lambda = 550 \text{ nm}$,光栅狭缝宽度 $W = 80 \text{ nm}$,金属光栅厚度 $d = 65 \text{ nm}$;外部环境介质为空气,折射率 $n_c = 1$;电介质层的材料为多孔硅,厚度 $d_w = 350 \text{ nm}$,根据 Bruggeman 等效介质理论^[13],当孔隙率为 71.8%时,其等效折射率 $n_w = 1.5$ 。在衍射光栅中正入射时子波级次具有对称性,

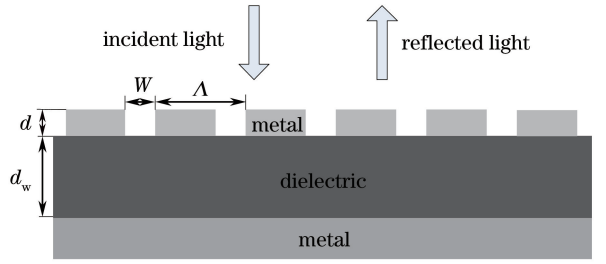


图 1 金属光栅/电介质/金属混合波导结构模型

Fig. 1 Structural model of metal grating/dielectric/metal hybrid waveguide

所以选择正入射的 TM 偏振光。

在计算中假设银的相对介电常数满足 Drude 模型^[14],即

$$\epsilon(\omega) = \epsilon_\infty - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\gamma\omega}, \quad (1)$$

式中 ω_p 为等离子体振荡频率, $\omega_p = 1.16 \times 10^{16} \text{ rad/s}$; γ 为阻尼系数, $\gamma = 6.81 \times 10^{13} \text{ rad/s}$; ϵ_∞ 为圆频率趋于无限大时的相对介电常数, $\epsilon_\infty = 1$ 。

利用有限元法对金属光栅/电介质/金属混合波导结构的光学特性进行研究。以一个光栅周期为一个单元,将单元的左右边界条件设置为周期性边界条件,顶端设置入射端口和反射端口,底端设置透射端口, TM 波垂直入射到光栅表面。

2.2 理论分析

表面等离子体波是在金属和电介质分界面上存在的自由振荡电子与光子相互作用而沿着金属表面传播的电子疏密波。当光照射到金属表面上时会激发表面等离子体共振,使得入射光场被束缚在金属和电介质界面附近,增大了金属表面的光吸收率。当光入射到金属表面时,由于金属薄膜不透明,入射光不能直接穿透金属,但是经过光栅波矢补偿,当满足下列条件^[15]时,可激发金属表面的等离子体波。传播系数可表示为

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} \sin \theta + m \frac{2\pi}{\Lambda} = \pm \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{\epsilon_m \epsilon_d}{\epsilon_m + \epsilon_d} \right)^{1/2}, \quad (2)$$

式中 ϵ_m 为金属的介电常数; ϵ_d 为相邻介质的介电常数; m 为衍射级次, \pm 表示正负衍射级次, $m > 0$ 时取正, $m < 0$ 时取负; θ 为入射角度。

光波进入金属光栅的狭缝时,由于狭缝较小,可在狭缝中耦合产生 LSP, LSP 可直接由入射光激发产生。当波矢与 LSP 相匹配时,在传播过程中可得到电磁增强。金属光栅狭缝类似于一个法布里-珀罗腔,可建立模型^[16]

$$2k_0 n_{\text{eff}} d + 2\varphi = 2a\pi, \quad (3)$$

式中 k_0 为真空中的波数, n_{eff} 为光栅狭缝中的等效折射率, φ 为衍射附加相位, a 为狭缝内模式数。

在所提亚波长金属光栅/电介质/金属混合波导结构中, 入射光为正入射, 由于金属光栅上下电介质不同, 可激发不同共振波长的表面等离子体共振模式, 即

$$m\lambda_{\text{res}} = \pm \Lambda \left(\frac{\epsilon_m \epsilon_d}{\epsilon_m + \epsilon_d} \right)^{1/2}, \quad (4)$$

式中 λ_{res} 为共振波长。金属光栅上表面形成的等离子体波与狭缝中 LSP 波矢匹配时, 可耦合进入电介质。由于光栅狭缝较小, 可将传感结构等效为金属/电介质/金属结构, 如图 2 所示。由于电介质两侧的金属界面可发生金属反射, 调节该结构的参数便能够产生导模共振模式。根据波导理论^[17], 建立共振模的本征方程为

$$k_z d_w = M\pi + 2\arctan \left(\frac{\epsilon_w \alpha}{\epsilon_m k_z} \right), \quad (5)$$

式中 $k_z = \sqrt{k_0^2 n_w^2 - \beta_1^2}$, β_1 为金属光栅上表面等离子体波传播常数; $\alpha = \sqrt{\beta_1^2 - k_0^2 \epsilon_m}$, $k_0 = 2\pi/\lambda_{\text{res}1}$, $m\lambda_{\text{res}1} = \pm \Lambda \left(\frac{\epsilon_m n_c^2}{\epsilon_m + n_c^2} \right)^{1/2}$, $\lambda_{\text{res}1}$ 为共振波长; M 为模式的阶数。若要使波导模式发生在介质层中, 则需满足 $n_w > |\beta_1/k_0|$ 。

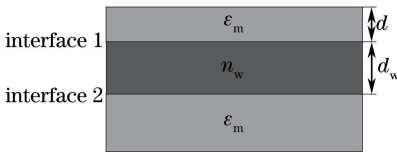


图 2 金属/电介质/金属结构

Fig. 2 Structure of metal/dielectric/metal

由于金属光栅狭缝的存在, 即使未激发光栅上表面的等离子体波的入射光波矢与 LSP 匹配, 也可实现透射增强。当电介质层与金属界面满足(2)式时, 激发的表面等离子体波产生表面等离子体共振, 此时 $m\lambda_{\text{res}2} = \pm \Lambda \left(\frac{\epsilon_m n_w^2}{\epsilon_m + n_w^2} \right)^{1/2}$, $\lambda_{\text{res}2}$ 为共振波长。

对于传感器的综合评价指标, 波长灵敏度 $S = \Delta\lambda_{\text{res}}/\Delta n$ ($\Delta\lambda_{\text{res}}$ 为共振波长变化量, Δn 为折射率变化量), 品质因数 $F_{\text{OM}} = S/W_{\text{FWHM}}$, 其中 W_{FWHM} 为共振峰的半峰全宽。

3 光学特性分析

利用有限元法进行数值模拟得到该结构的反射谱, 如图 3 所示。可以发现, 反射谱中包含两个共振缺陷峰。

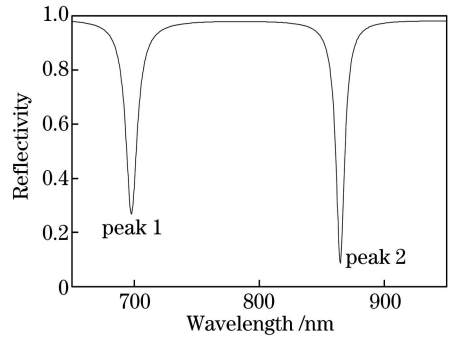


图 3 传感结构的反射谱

Fig. 3 Reflection spectrum of sensing structure

为了分析结构中的共振模式, 首先对共振波长处的磁场分布进行模拟计算。图 4(a) 为金属光栅在 $\lambda_{\text{res}1} = 697.5 \text{ nm}$ 处对应的磁场分布, 磁场主要局域在电介质与光栅和金属层交界处, 类似于 0 阶导模共振; 图 4(b) 为金属光栅在 $\lambda_{\text{res}2} = 864.8 \text{ nm}$ 处对应的磁场分布, 磁场主要局域在金属层与电介质层的交界面, 并且朝介质方向逐渐衰减, 表明在金属层上表面发生了表面等离子体共振。

此外, 研究了结构参数的改变对两个共振峰的影响。图 5(a) 给出了外部环境折射率改变对反射谱的影响。随着外部环境折射率的增大, 共振缺陷峰 1 发生红移, 共振缺陷峰 2 的位置和形状几乎没有改变, 可见在正入射下共振缺陷峰 2 的产生与外部环境无关。图 5(b) 给出了电介质层厚度的改变对反射谱的影响。随着电介质层厚度的增加, 共振缺陷峰 1 发生红移, 与导模共振理论一致。电介质层厚度的改变对共振缺陷峰 2 几乎没有影响。图 5(c) 给出了金属光栅周期的改变对结构反射谱的影响。随着金属光栅周期的增加, 两个共振缺陷峰同时发生红移, 与表面等离子体理论一致。图 5(d) 给出了金属光栅厚度的改变对两个共振缺陷峰的影响。随着金属光栅厚度的增加, 两个共振缺陷峰同时发生红移, W_{FWHM} 增大。因为光栅厚度是影响光栅狭缝中 LSP 的主要因素, 所以 LSP 的改变引起了共振缺陷峰 1 和共振缺陷峰 2 的红移和 W_{FWHM} 的增大。图 5(e) 给出了金属光栅狭缝的改变对结构反射谱的影响。随着金属光栅狭缝的增加, 两个共振缺陷峰同时发生蓝移, 而且共振缺陷峰的深度均减小, W_{FWHM} 均增大, 这与金属狭缝 LSP 有关。随着狭缝宽度的增加, 局域等离子模式减弱, 导致共振缺陷峰 1 和共振缺陷峰 2 的强度减弱, 深度减小。所以在传感时可通过调节光栅厚度和光栅狭缝宽度来优化传感结构的品质因数。

综上所述, 共振缺陷峰 1 的位置主要取决于光

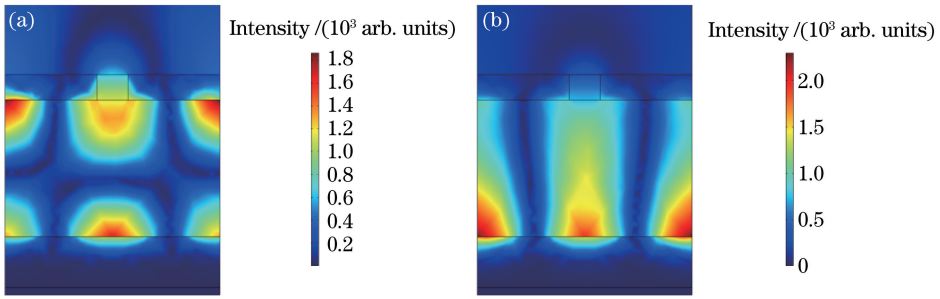


图 4 不同共振波长处的磁场分布图。(a) $\lambda_{res1} = 697.5 \text{ nm}$; (b) $\lambda_{res2} = 864.8 \text{ nm}$

Fig. 4 Magnetic field distributions at different resonant wavelengths. (a) $\lambda_{res1} = 697.5 \text{ nm}$; (b) $\lambda_{res2} = 864.8 \text{ nm}$

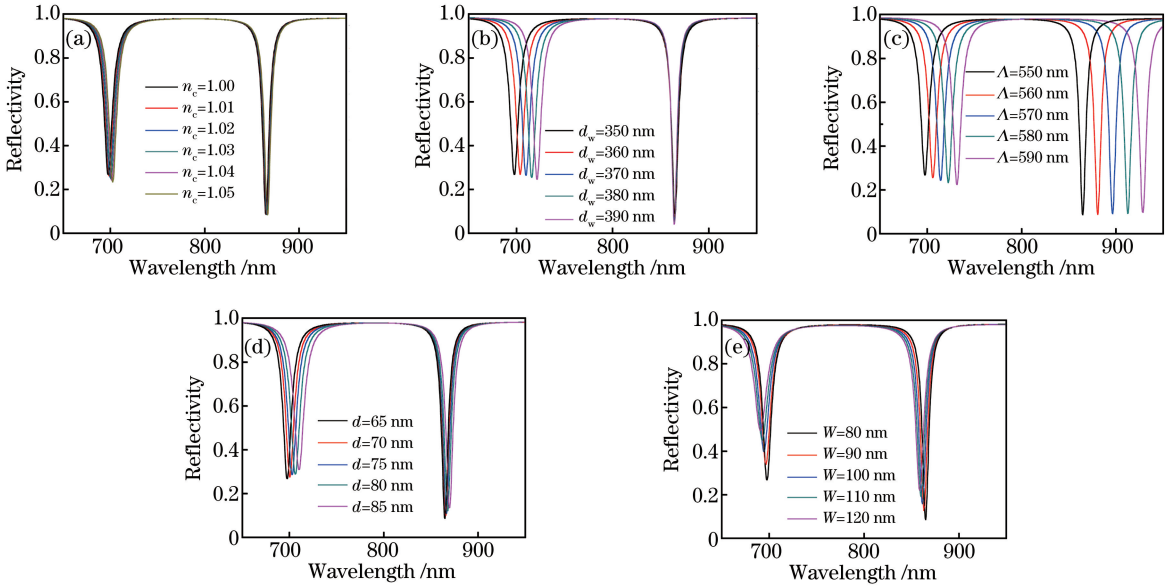


图 5 结构参数的改变对反射谱的影响。(a)外界环境折射率;(b)电介质层厚度;
(c)金属光栅周期;(d)金属光栅厚度;(e)金属光栅狭缝宽度

Fig. 5 Effects of structural parameters on reflection spectrum. (a) External environment refractive index;
(b) dielectric layer thickness; (c) period of metal grating; (d) thickness of metal grating;
(e) slit width of metal grating

栅周期和电介质层厚度。共振缺陷峰 1 主要由金属光栅上表面等离子模式和波导模式之间的混合模式产生,其位置和深度与外部环境折射率、金属光栅狭缝宽度和光栅厚度有关,说明金属狭缝中 LSP 对其有一定的影响。共振缺陷峰 2 的位置主要取决于光栅周期,与外部环境折射率和电介质层厚度无关。因此共振缺陷峰 2 与金属层表面激发表面等离子体共振有关。同时金属光栅厚度和狭缝宽度对共振缺陷峰 2 有一定的影响,说明共振缺陷峰 2 与光栅狭缝中 LSP 有一定的关系。

4 传感特性分析

利用该结构进行传感时,可用气体敏感材料取代结构中的电介质,电介质的折射率改变会引起光

学响应的变化,从而实现不同气体材料的传感测量。另外,电介质还可采用聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)材料替代,当上层金属光栅制备好后,利用化学方法去掉 PMMA 介质层,从而形成传感器结构,该结构可用于生物化学分子测量。使用多孔硅取代电介质作为传感单元,对于整个传感结构的制备工艺而言,可首先采用双槽电化学腐蚀法在硅样片表面制备形成多孔硅层,并通过改变电化学腐蚀的电流密度大小来剥离多孔硅层^[18],然后利用电镀法在多孔硅上下两侧沉积金属膜^[19],最后使用标准光刻工艺在上层金属中制作金属光栅。

多孔硅以硅原子为基础,是一种通过电化学腐蚀硅形成的其中充斥着空气的纳米多孔结构,其光学特性由物理参数和孔隙率决定。多孔硅的平均孔

径约为 16 nm,界面粗糙度约为 0.547 nm^[20],远小于入射光的波长,所以多孔硅界面的散射可忽略不计。不同孔隙率的多孔硅具有不同的折射率,高孔隙率对应低折射率,低孔隙率对应高折射率。将多孔硅置于一定浓度的气体(或液体)待测样本中,待测样本可以通过扩散作用到达多孔硅内部。当平衡压力达到饱和气压时,孔隙中的气体(或溶液)与外界达到最终平衡。随着有机物折射率的改变,多孔硅的有效折射率也会发生相应的改变。由 Bruggeman 介电函数近似模型可得

$$(1 - \rho) \frac{n_{\text{Si}}^2 - n_{\text{PS}}^2}{n_{\text{Si}}^2 + 2n_{\text{PS}}^2} + \rho \frac{n_c^2 - n_{\text{PS}}^2}{n_c^2 + 2n_{\text{PS}}^2} = 0, \quad (6)$$

式中 n_{Si} 为硅的折射率, n_{PS} 为多孔硅等效折射率, ρ 为孔隙率。当多孔硅传感单元有效折射率以 0.01 为步长从 1.50 变化到 1.55 时,可得其共振缺陷峰漂移特性如图 6 所示。共振缺陷峰均发生红移,共振缺陷峰 1 从 697.5 nm 漂移到 720.8 nm,半峰全宽为 11 nm,则其灵敏度 S_1 为 466 nm/RIU,品质因数达 42.3 RIU⁻¹;共振缺陷峰 2 从 864.8 nm 漂移到 896.2 nm,半峰全宽为 8 nm,计算可得该传感器的灵敏度为 628 nm/RIU,品质因数达 78.5 RIU⁻¹。

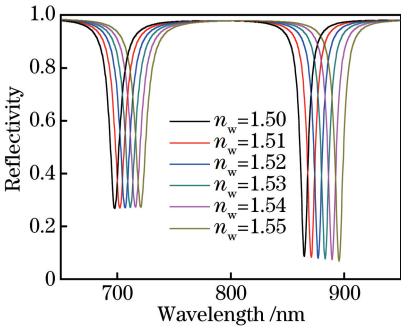


图 6 不同折射率多孔硅传感单元共振波长漂移

Fig. 6 Resonance wavelength shift with different refractive indexes of porous silicon sensing unit

选用甲醛气体为待测样本对该结构进行验证。甲醛的折射率比较高,其含量对待测气体的折射率影响较大,所以暂且不考虑其他组分对空气折射率的影响,不同含量的甲醛混合气体的折射率满足

$$n = xn_{\text{CH}_2\text{O}} + (1 - x)n_0, \quad (7)$$

式中 x 为甲醛的质量分数, $n_{\text{CH}_2\text{O}}$ 、 n_0 分别为甲醛和新鲜空气的折射率。由 $n_{\text{CH}_2\text{O}} = 1.3746$ 和 $n_0 = 1.000272$ 可得不同浓度的甲醛气体所对应多孔硅的有效折射率为

$$n = 1.000272 + 0.37433x. \quad (8)$$

将传感结构放置于 x 分别为 5%、10%、15%、

20%、25% 的甲醛气体的气室中。在长时间的多孔硅吸附作用与甲醛气体扩散作用下,多孔硅的有效折射率变大,可得到不同浓度的甲醛气体所对应的共振峰波长漂移情况,如图 7 所示。由图可知,甲醛的含量增大时,共振峰波长红移。为了表达甲醛含量与其共振峰波长的关系,将甲醛含量与对应的共振峰波长数据进行拟合,可得如图 8 所示的拟合曲线,甲醛含量与共振峰波长的关系分别为 $\lambda_{\text{res1}} = 200.5x + 698.22$, $\lambda_{\text{res2}} = 235.4x + 865.57$,灵敏度分别为 466 nm/RIU 和 628 nm/RIU。

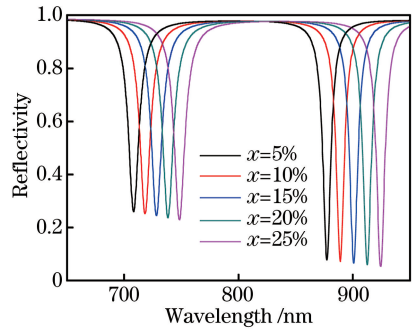


图 7 不同浓度甲醛气体的共振波长漂移

Fig. 7 Resonance wavelength shift of formaldehyde gas with different concentrations

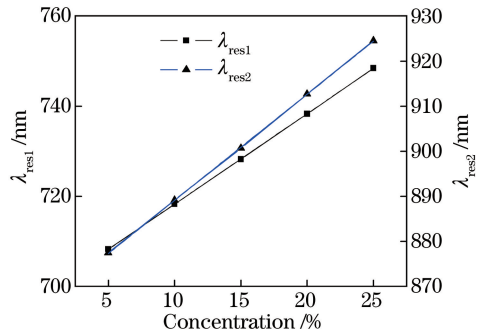


图 8 甲醛气体浓度与共振波长的线性拟合关系

Fig. 8 Linear fitting relationship between formaldehyde gas concentration and resonance wavelength

该传感结构表现出了高品质因数和高灵敏度的优势,两个共振峰波长与待测样本之间呈良好的线性关系,因此该传感结构具有良好的稳定性,通过观测共振波长的漂移即可实现对待测样本浓度的实时动态监测。

5 结 论

提出了一种亚波长金属光栅/电介质/金属层传感结构,利用该结构可产生导模共振模式、表面等离子激元共振模式和 LSP,模式之间互相耦合,从而在反射光谱中形成两个窄带共振缺陷峰。根据波导

原理和表面等离子体共振形成条件,建立了共振峰波长与待测样本折射率之间的关系模型,两个共振峰都可用于传感,其品质因数分别为 42.3 RIU^{-1} 和 78.5 RIU^{-1} ,灵敏度分别可达 466 nm/RIU 和 628 nm/RIU 。该研究可为空气污染监测及气体组分分析提供一定的理论参考。

参 考 文 献

- [1] Wang Q, Cao S H, Du Y H, *et al.* Broadband polarizing beam splitter based on two-layer metal grating with a high refractive index dielectric layer[J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2017, 140: 268-272.
- [2] Feng B, Shi Z L, Xu B S, *et al.* Performance characterization and design of wire grid polarizer applied to airlight rejection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(12): 1201003.
冯斌, 史泽林, 徐保树, 等. 面向大气背景光抑制的金属光栅偏振片效能表征及设计[J]. *光学学报*, 2015, 35(12): 1201003.
- [3] Hu J H, Liu X H, Zhao J J, *et al.* Design and analysis of optical filter based on subwavelength high-contrast grating[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(5): 050502.
胡劲华, 刘秀红, 赵继军, 等. 一种亚波长高折射率差光栅滤波器的设计与分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(5): 050502.
- [4] Wales D J, Parker R M, Quainoo P, *et al.* An integrated optical Bragg grating refractometer for volatile organic compound detection[J]. *Sensors & Actuators B: Chemical*, 2016, 232: 595-604.
- [5] Jin W, Chiang K S. Mode switch based on electro-optic long-period waveguide grating in lithium niobate [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(2): 237-240.
- [6] Mondal P P, Dilipkumar S, Mohan K. Efficient generation of diffraction-limited multi-sheet pattern for biological imaging[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(4): 609-612.
- [7] Kihm K D, Cheon S, Park J S, *et al.* Surface plasmon resonance (SPR) reflectance imaging: Far-field recognition of near-field phenomena[J]. *Optics and lasers in engineering*, 2012, 50(1): 64-73.
- [8] Michaelis S, Wegener J, Robelek R. Label-free monitoring of cell-based assays: Combining impedance analysis with SPR for multiparametric cell profiling[J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2013, 49: 63-70.
- [9] Chen Y, Liu L, Huang Z, *et al.* Great enhancement of transversal magneto-optical Kerr effect for magnetic dielectric film embedded by one-dimensional metallic grating[J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65(14): 147302.
- 陈聿, 刘堃, 黄忠, 等. 一维金属光栅嵌入磁性介质纳米结构下的横向磁光克尔效应的增强[J]. *物理学报*, 2016, 65(14): 147302.
- [10] Nong J P, Wei W, Zhu Y, *et al.* Resonance spectra and sensing characteristics of plasmons in graphene-covered aluminum nano-grating[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2017, 37(4): 997-1002.
农金鹏, 韦玮, 朱永, 等. 石墨烯覆盖铝纳米光栅表面等离激元共振光谱及传感特性[J]. *光谱学与光谱分析*, 2017, 37(4): 997-1002.
- [11] Li X F, Peng W, Zhao Y L, *et al.* A subwavelength metal-grating assisted sensor of Kretschmann style for investigating the sample with high refractive index [J]. *Chinese Physics B*, 2016, 25(3): 037303.
- [12] Li R F, Wu D, Liu Y M, *et al.* Infrared plasmonic refractive index sensor with ultra-high figure of merit based on the optimized all-metal grating[J]. *Nanoscale Research Letters*, 2017, 12(1): 1.
- [13] Ma L Li. Study on the "black silicon" based on porous silicon[D]. Shanghai: Fudan University, 2007: 6-7.
马蕾蕾. 多孔硅"黑硅"的研究[D]. 上海: 复旦大学, 2007: 6-7.
- [14] Liang L X, Xue W R, Yang R C. Optical absorber from surface plasmonic grating with depth-linear-gradient grooves[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(1): 0123002.
梁磊霞, 薛文瑞, 杨荣草. 槽深线性渐变的表面等离子光栅光吸收器[J]. *光学学报*, 2017, 37(1): 0123002.
- [15] Sun X L, Chen C H, Meng D J, *et al.* Split modes of composite metal grating and its application for high performance gas sensor[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(14): 147302.
孙小亮, 陈长虹, 孟德佳, 等. 复合金属光栅模式分离与高性能气体传感器应用[J]. *物理学报*, 2015, 64(14): 14302.
- [16] Xu S, Su H R, Qin K, *et al.* SERS application of propagating surface plasmon modes in 1D metallic gratings[C]. *SPIE*, 2015, 9673: 96730T.
- [17] Sang T, Chen G Q, Wang Y K, *et al.* Tunable optical reflectance using a monolithic encapsulated grating[J]. *Optics & Laser Technology*, 2016, 83: 163-167.
- [18] Chen Q D, Zhang Y X, Guo M, *et al.* Investigation on porous silicon layer stripping and reflectivity[J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2007, 36(6): 1435-1439.
陈庆东, 张宇翔, 郭敏, 等. 多孔硅层的剥离及反射

- 率研究[J]. 人工晶体学报, 2007, 36(6): 1435-1439.
- [19] Sun P, Hu M, Liu B, *et al.* Electrical properties of the metal/porous silicon/Si (M/PS/Si) microstructure [J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(5): 057303.
孙鹏, 胡明, 刘博, 等. 金属/多孔硅/单晶硅(M/PS/Si)微结构的电学特性[J]. 物理学报, 2011, 60(5): 057303.
- [20] Liang J R, Hu M, Dou Y W. Surface microstructure of porous silicon prepared by electrochemical etching[J]. *Nanotechnology & Precision Engineering*, 2006, 4(2): 162-166.
梁继然, 胡明, 窦雁巍. 电化学腐蚀多孔硅表面形貌的结构特性[J]. 纳米技术与精密工程, 2006, 4(2): 162-166.