

激光与光电子学进展

光栅辅助超窄带多光谱等离子体共振传感器结构的仿真分析

钟旭¹, 伍铁生^{1,3*}, 王学玉^{2**}, 张慧仙¹, 刘智慧¹, 杨丹¹, 杨祖宁¹, 刘岩¹, 刘锐¹¹桂林电子科技大学信息与通信学院广西无线宽带与信号处理重点实验室, 广西 桂林 541004;²北京邮电大学电子工程学院, 北京 100876;³深圳大学光电子器件与系统教育部/广东省重点实验室, 广东 深圳 518060

摘要 半峰全宽(FWHM)是影响传感器性能的重要因素,为了提高表面等离子体共振传感器的品质因数,提出了一种光栅辅助超窄带多光谱等离子体共振传感器结构。该结构由周期性交替的SiO₂与Au矩形纳米柱构成,并置于SiO₂/Al₂O₃薄膜层上。利用全矢量有限元法对该结构的传输特性及传感特性进行数值仿真,分析了结构参数及入射光偏振态对FWHM和传感特性的影响。仿真结果表明,在800~1100 nm波长范围内,该传感器的传输谱存在两个由光栅衍射及等离子体共振形成的凹点,相应的FWHM分别为0.35 nm及0.59 nm,折射率灵敏度分别为525.7 nm/RIU、475.7 nm/RIU,品质因数分别为1502.00 RIU⁻¹和806.27 RIU⁻¹,在生物检测、药物筛选、膜生物学等领域具有潜在的应用前景。

关键词 光栅; 表面等离子体共振; 半峰全宽; 折射率传感

中图分类号 TN256

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1105002

Simulation Analysis of Grating-Assisted Ultra-Narrow Band Multispectral Plasma Resonance Sensing Structure

Zhong Xu¹, Wu Tiesheng^{1,3*}, Wang Xueyu^{2**}, Zhang Huixian¹, Liu Zhihui¹, Yang Dan¹,
Yang Zuning¹, Liu Yan¹, Liu Rui¹¹Key Laboratory of Wireless Broadband and Signal Processing, School of Information and Communication, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, Guangxi, China;²School of Electronic Engineering Bupt, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China;³Key Laboratory of Optoelectronic Devices and Systems of Ministry of Education and Guangdong Province, Shenzhen University, Shenzhen 518060, Guangdong, China

Abstract Full width at half maximum (FWHM) is an important factor affecting the performance of the sensor. In order to improve the quality factor of the surface plasmon resonance sensor, a grating-assisted ultra-narrow band multispectral plasmon resonance sensor structure is proposed in this paper. The structure is composed of periodically alternating SiO₂ and Au rectangular nanorods and is placed on the SiO₂/Al₂O₃ thin film layer. The full vector finite element method is used to simulate the optical transmission and sensing characteristics, and the effects of structural parameters and polarization state of incident light on FWHM and sensing characteristics are analyzed. The

收稿日期: 2021-07-29; 修回日期: 2021-08-18; 录用日期: 2021-09-24

基金项目: 国家自然科学基金(61805051)、广西自然科学基金(2018JJB170035, 2018AD19071, 2019GXNSFFA245002, 2020JJA170047)、广西无线宽带与信号处理重点实验室(GXKL06190118, GXKL06160102)

通信作者: *tieshengw@163.com; **xueyuwang@hotmail.com

simulation results show that in the wavelength range of 800–1100 nm, there are two dips formed by plasma resonance and dielectric grating in the transmission spectrum of the structure. The corresponding FWHM can reach 0.35 nm and 0.59 nm, respectively. The refractive index sensitivity is 525.7 nm/RIU and 475.7 nm/RIU, respectively. The figure of merit is 1502.00 RIU⁻¹ and 806.27 RIU⁻¹, respectively, which had potential applications in biological detection, drug screening, membrane biology and other fields.

Key words gratings; surface plasmon resonance; full width at half maximum; refractive index sensing

1 引言

表面等离子共振(SPR)是一种物理现象,当入射光的频率与波数和金属表面振动的自由电子(等离子)频率一致时,金属表面的电子就会吸收光能发生共振,其共振波长对周围环境折射率变化非常敏感,在医疗检测、药物筛选、环境监测等领域得到了广泛应用^[1-8]。Wood^[9]首次发现了SPR现象并对其进行了简单的记录;Demerec等^[10]从物理原理上解释了SPR现象;Kretschmann等^[11]设计了激发SPR的传感器结构,为SPR传感技术的应用奠定了实验基础。近年来,人们先后提出了多种基于不同材料和结构的SPR传感器。如:李化月等^[12]提出了一种由闭合方环和开口谐振环组合构成的折射率传感器,其品质因数(FOM)为4.06;Chen等^[13]提出了一种增强U形金属开口环谐振器,其FOM为40;陈颖等^[14]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,可同时激发传输型表面等离子激元共振模式和局域表面等离子体模式;肖功利等^[15]提出了一种交叉领结形石墨烯阵列结构等离子体折射率传感器,实现了较好的传感性能和双共振透射现象;Agharazy Dormeny等^[16]设计了一种基

于表面等离子体共振的化学物质折射率传感器,通过对具有腔或突起的连续金属薄膜进行图形化,使其灵敏度可调;Yuan等^[17]提出了一种超窄带红外吸波体结构的SPR传感器,其横电(TE)波和横磁(TM)波的半峰全宽(FWHM)分别为1.94 nm和6.32 nm。

FWHM是影响SPR传感器性能的一个重要因素,但现有设计结构普遍存在FWHM过大,FOM过低的问题。为解决该问题,本文提出了一种光栅辅助超窄带多光谱等离子体共振折射率传感器结构。将间隔排列的SiO₂和Au矩形柱作为金属-介质光栅,有效减小了金属光栅结构透射谱凹点的FWHM。仿真结果表明,该结构在环境折射率范围为1~1.2时,透射谱上两个凹点的FWHM分别为0.35 nm、0.59 nm,相应的折射率灵敏度分别为525.7 nm/RIU、475.7 nm/RIU,FOM分别为1502.00 RIU⁻¹、806.27 RIU⁻¹。其中,RIU为折射率单元。

2 模型及传感原理

图1为该传感器结构的模型及相关结构参数条件下的透射谱。图1(a)和图1(b)分别为该传感器

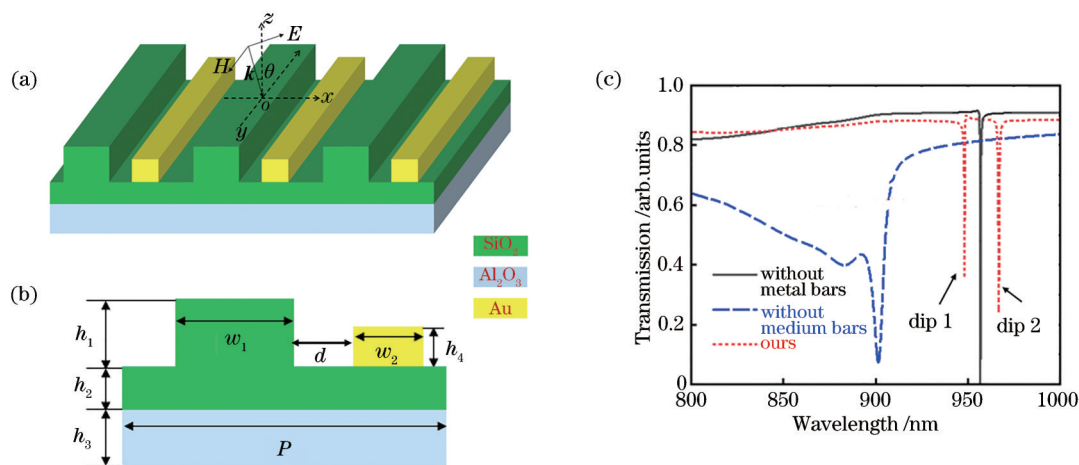


图1 传感器结构及透射光谱。(a)传感器结构的三维图;(b)传感器结构的二维图;(c)三种结构的透射光谱
Fig. 1 Structure and transmission spectrum of the sensor. (a) Three-dimensional structure of the sensor; (b) two-dimensional structure of the sensor; (c) transmission spectra of three structures

的三维和二维结构。微纳传感器结构由周期性相间的 SiO₂ 和 Au 矩形纳米柱构成并置于 SiO₂/Al₂O₃ 薄膜层上。其中, E 表示电场方向, H 表示磁场方向, $o-xyz$ 为直角坐标系, \mathbf{k} 为入射波矢量, θ 为波矢量的入射角。SiO₂ 构成的介质纳米柱高度 h_1 为 150 nm, 介质层厚度 h_2 为 10 nm, Al₂O₃ 层的厚度 h_3 为 10 nm, Au 纳米柱的高度 h_4 为 90 nm, 介质纳米柱的宽度 w_1 为 600 nm, 金属纳米柱的宽度 w_2 为 60 nm, 介质纳米柱及金属纳米柱之间的横向间距 d 为 50 nm, 周期 P 为 900 nm。采用有限元商业软件 COMSOL Multiphysics 5.5 进行二维建模仿真, 为获得较高的仿真精度, 设置的网格尺寸为 0.1 nm, 沿 x 轴方向设置周期性边界条件, TM 极化波沿 z 轴负方向入射并在 z 轴正负方向设置完美匹配层。SiO₂ 的折射率参数由文献[18]中的模型给出, Al₂O₃ 材料的折射率由文献[19]中的模型给出, Au 的折射率由文献[20]中的模型给出。在无其他说明的情况下, 环境折射率 n 默认为 1。在其他结构参数不变的条件下, 只有介质条或金属条以及两者组合光栅结构的透射谱如图 1(c) 所示。介质、金属材料的光学特性不同, 使金属-介质纳米柱组合光栅结构的透射谱呈现出两个凹点(dip 1 和 dip 2)。实际加工时, 需尽可能地降低金属纳米光栅的 FWHM, 从而有效提高 SPR 检测的灵敏性。可以发现, 在给定的结构参数条件下, 对于金属纳米光栅, SPR 效应产生的透射谱凹点的 FWHM 约为 50 nm, 而加入介质光栅构成组合结构后 SPR 效应产生的透射谱凹点对应峰值波长发生了红移, 其 FWHM 减小至 0.59 nm。这表明介质光栅的引入, 能有效降低 SPR 吸收峰的 FWHM, 从而有效改善 SPR 传感器结构的传感性能。

为分析该结构的传感原理, 引入了严格耦合理论(RCWA)。当光入射到光栅结构表面时, 会在每个光栅狭缝处产生衍射。由 RCWA 可知, 当入射波为 TM 波时, 光栅反射区和透射区的衍射效率^[21] 可表示为

$$\begin{cases} D_i^n = |R_i|^2 \operatorname{Re} \left[\frac{k_{1,zi}}{k_0 n_1 \cos \theta} \right] \\ D_i^t = |T_i|^2 \operatorname{Re} \left[\frac{k_{\parallel} / n_{\parallel}^2}{k_0 \cos \theta / n_1} \right] \end{cases} \quad (1)$$

式中, 下标 i 为衍射级数, 上标 n 为反射区, t 为透射区, R_i 和 T_i 分别为归一化后的电磁场反射振幅与透射振幅, $k_0 = \lambda_0 / 2\pi$, λ_0 为入射波的波长, $k_{1,zi}$ 为一级

衍射波矢在 z 轴的分量, k_{\parallel} 为二级衍射波矢, θ 为入射角, n_1, n_{\parallel} 分别为入射区和透射区的折射率。光栅衍射效率与入射波长、入射角度及折射率有关, 依据外界环境折射率与光栅衍射效率的关系, 可实现对外界环境折射率的测量。若传感器采用金属-介质光栅, 当光入射到纯金属光栅表面时, 在特定波长处光与金属光栅产生共振并激发 SPR, 激发条件^[22] 可表示为

$$k_{x,inc} \pm mk_{\Lambda} = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\epsilon_1 \epsilon_2}{\epsilon_1 + \epsilon_2}} \equiv k_{sp}, m = 1, 2, \dots, (2)$$

式中, $k_{x,inc} = \frac{\omega}{c} \sqrt{\epsilon_2} \sin \theta$ 为入射波波矢的横向分量, $k_{\Lambda} = 2\pi/\Lambda$ 表示周期为 Λ 的光栅倒格矢, ϵ_1 为透射区的介电常数, ϵ_2 为入射区的介电常数, ω 为入射光的角频率, c 为光速。当光栅倒格矢使入射光的横向波矢分量与金属表面等离子体的波矢吻合时, 就能激发表面等离子体共振, 这种共振随金属表面折射率的变化而变化, 从而实现对外界折射率的测量。

图 2 为该结构在透射谱中两个凹点对应波长的电场和磁场分布。对比透射谱两个凹点对应波长的电场分布可以发现: 当波长为 942.2 nm (dip 1) 时, 电场主要分布在结构上下边面附近区域, 表明该反射谱凹点是由光栅衍射引起; 当波长为 966.7 nm

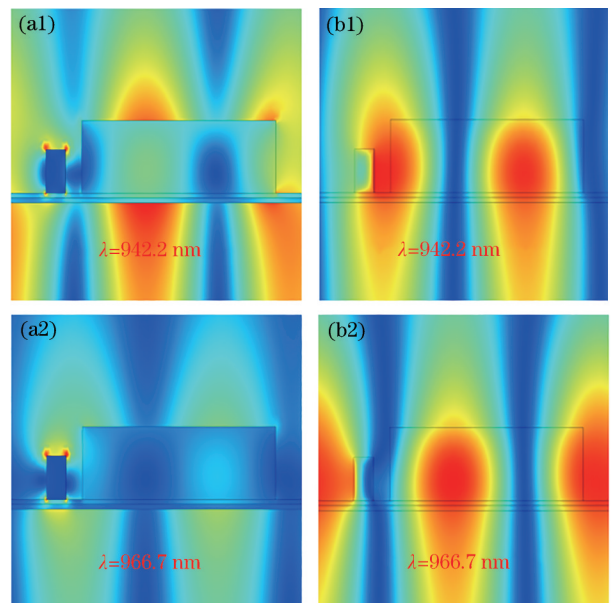


图 2 两个凹点对应波长的电场和磁场分布。(a) 电场分布; (b) 磁场分布

Fig. 2 Electric and magnetic field distributions at the corresponding wavelengths of two dips. (a) Electric field distribution; (b) magnetic field distribution

(dip 2)时,电场主要分布在金属柱上表面附近,表明该反射谱凹点是由 SPR 引起的。

3 分析与讨论

SPR 与金属微纳结构尺寸和形貌密切相关,为了优化 SPR 传感器的性能,先研究了结构参数对传感器透射谱特性的影响。保持其他参数不变,将金属纳米柱的高度由 50 nm 逐渐增大到 130 nm,得到金属纳米柱高度对透射谱的影响如图 3(a)所示。可以发现,随着金属纳米柱高度的增加,透射谱的两个凹点峰值波长都发生了红移,但 dip 2 产生的

红移现象比 dip 1 更显著,原因是 SPR 效应对金属尺寸的变化更敏感。图 3(b)为金属纳米柱高度与透射谱凹点处峰值波长及 FWHM 的关系。可以发现:峰值波长的漂移量随金属纳米柱高度的变化是一种非线性变化,两个峰值波长对应的 FWHM 随金属纳米柱高度的增加而增加,且在相同条件下 dip 2 的 FWHM 比 dip 1 大;金属纳米柱的高度越小,SPR 效应引起的峰值波长 FWHM 越小,获得的透射谱损耗峰 dip 2 就越大;相比较厚的贵金属层,薄贵金属层不仅易于加工实现,同时也能节省制造成本。

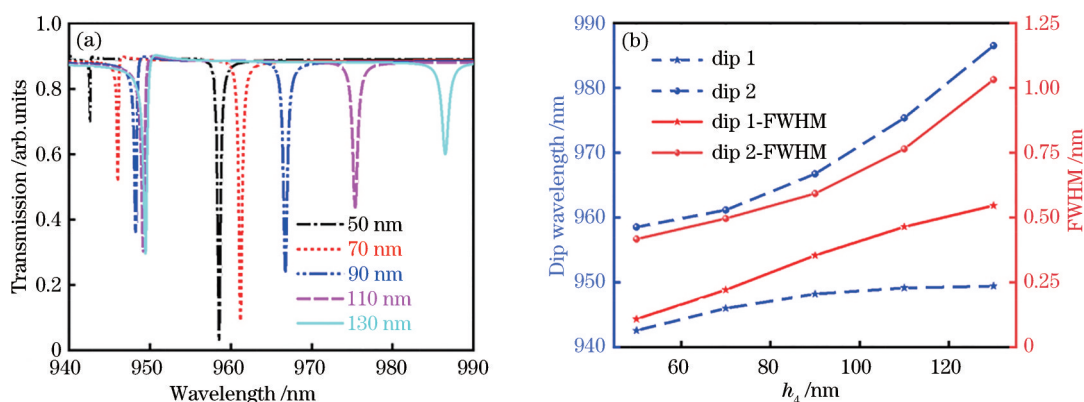


图 3 金属纳米柱高度对结构传输特性的影响。(a)金属纳米柱高度对透射谱的影响;(b)金属纳米柱高度与峰值波长和 FWHM 的关系

Fig. 3 Influence of metal nanopillar height on the structural transfer characteristic. (a) Influence of the height of the metal nanopillars on the transmission spectrum; (b) relationship between metal nanopillar height and peak wavelength and FWHM

保持其他结构参数不变,依次改变金属纳米柱的宽度,得到金属纳米柱宽度对透射谱的影响如图 4(a)所示。可以发现,光栅衍射引起的峰值波长 dip 1 和 SPR 效应引起的峰值波长 dip 2 随金属纳米

柱宽度的增加都发生红移,但衍射效应随金属纳米柱宽度的增加逐渐增强,而 SPR 效应随金属纳米柱宽度的增加先增强后减弱。图 4(b)为两个峰值波长及相应的 FWHM 与金属纳米柱宽度的关系。可

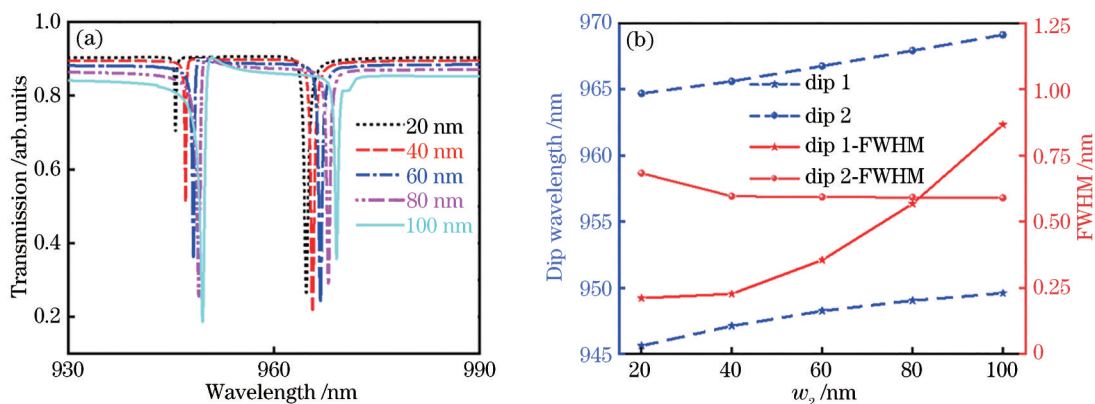


图 4 金属纳米柱宽度对结构传输特性的影响。(a)金属纳米柱宽度对透射谱的影响;(b)金属纳米柱宽度与峰值波长和 FWHM 的关系

Fig. 4 Influence of metal nanopillar width on structural transfer characteristic. (a) Influence of metal nanopillar width on transmission spectrum; (b) relationship between metal nanopillar width and peak wavelength and FWHM

可以发现,两个峰值波长与金属纳米柱宽度近似呈线性关系,但 dip 1 对应的 FWHM 随之增大, dip 2 对应的 FWHM 随之减小,金属纳米柱宽度在 20~100 nm 范围时,两者的 FWHM 均小于 1 nm。

图 5(a)为 TM 波入射角度对透射谱的影响,可以发现,当光的入射角度从 0°变化到 10°时, dip 1 发生蓝移, dip 2 发生红移,透射谱上两个 dip 点峰值波

长的间隔越来越大。图 5(b)为两个峰值波长及 FWHM 与光入射角度的关系,可以发现,峰值波长的漂移与光入射角度的变化呈线性关系。随着入射角度的增大, dip 2 的 FWHM 逐渐减小, dip 1 的 FWHM 明显增加。综上所述,要获得高性能 SPR 传感器,金属纳米柱的高度和宽度应该尽可能小,且入射光源尽可能满足正入射条件。

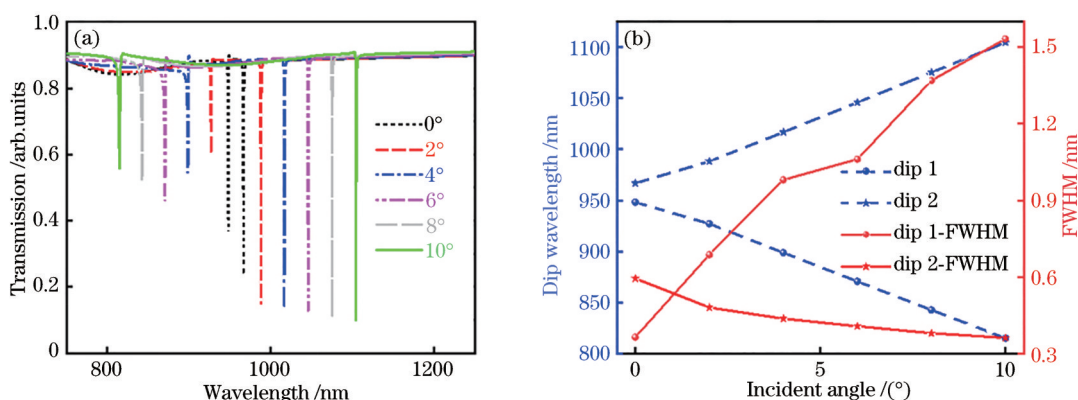


图 5 TM 波入射角度对结构传输特性的影响。(a) TM 波入射角度对透射谱的影响; (b) TM 波入射角度与峰值波长和 FWHM 的关系

Fig. 5 Influence of TM wave incident angle on the structural transfer characteristic. (a) Influence of TM wave incident angle on transmission spectrum; (b) relationship between TM wave incident angle and peak wavelength and FWHM

为了探究光源极化模式对透射谱特性的影响,图 6 给出了光源极化模式转变时结构的透射谱色图。可以发现:当极化角度从 0°变化到 90°时,光源由 TM 极化波逐渐转化为 TE 极化波;光源为 TM 极化时可以得到两个透射谱损耗峰, TE 极化波则只产生由光栅衍射引起的透射谱损耗峰;随着极化角度的增大,光栅衍射引起的峰值强度逐渐减弱并出现在其他波长位置,且在新位置的强度逐渐增强,而 SPR 效应引起的损耗强度逐渐减小直至消失,原因是只有 TM 波才能在等离子体金属波导结

构中激发出 SPR。

在器件制作过程中不可避免地会引入一定的制作误差,为了探究该结构的鲁棒性,图 7(a)~图 7(d)分别给出了将矩形介质块、矩形金属块、SiO₂/Al₂O₃层厚度及结构整体按比例增大/缩小 5% 时的透射谱。可以发现,存在误差的情况下,透射谱损耗峰存在几纳米的红移或蓝移。表 1、表 2 分别为结构偏差为 5% 时 dip 1 和 dip 2 的 FWHM,可以发现,该结构具有较好的鲁棒性。

对该结构的 SPR 传感特性进行分析。图 8(a)为该结构在不同环境折射率条件下获得的透射谱,可以发现,随着环境折射率的增加,透射谱两个凹点的峰值波长均发生了红移。图 8(b)为峰值波长及 FWHM 与外界环境折射率的关系,可以发现,两个峰值波长与外界折射率呈线性关系, dip 1 的 FWHM 随折射率的增大而减小, dip 2 的 FWHM 随折射率的增大先减小后增加。

折射率传感器的灵敏度 $S = d\lambda/dn$, 其中, $d\lambda$ 和 dn 分别为检测波长的漂移量和环境折射率的变化量。计算得到, dip 1 的折射率灵敏度为 525.7 nm/RIU, dip 2 的折射率灵敏度为 475.7 nm/RIU。在金属条厚度为 90 nm 时, dip 1 的 FWHM 为 0.35 nm,

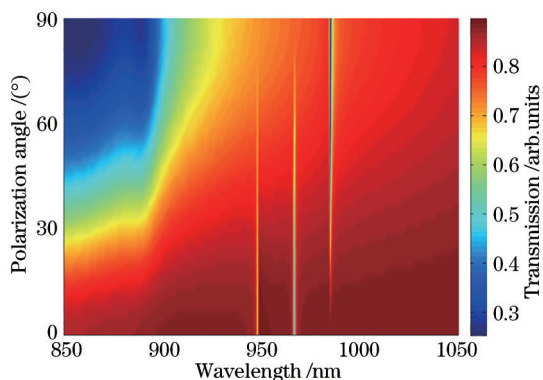


图 6 极化方式对透射谱的影响

Fig. 6 Influence of polarization on transmission spectrum

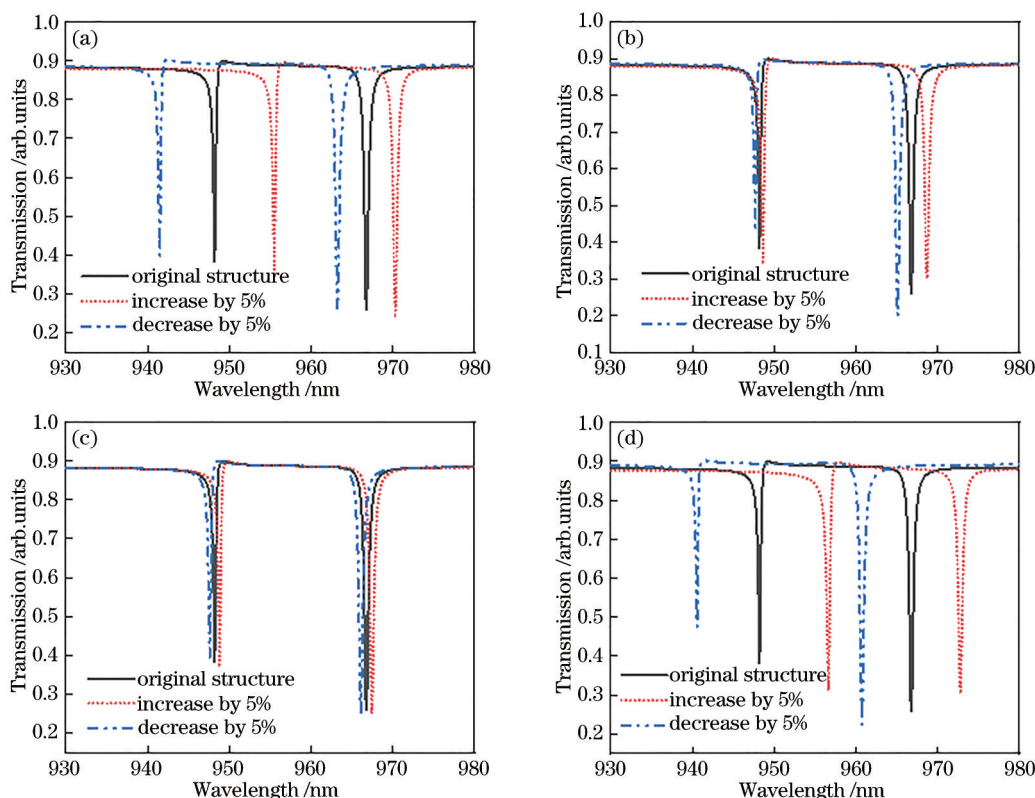


图 7 结构偏差对透射谱的影响。(a)矩形介质块尺寸变化 5%；(b)矩形金属块尺寸变化 5%；(c) SiO₂/Al₂O₃层的厚度变化 5%；(d)整体结构尺寸变化 5%

Fig. 7 Influence of structural deviation on transmission spectrum. (a) Size of rectangular dielectric block changes by 5%; (b) size of rectangular metal block changes by 5%; (c) thickness of SiO₂/Al₂O₃ layer changes by 5%; (d) overall structure size changes by 5%

表 1 结构偏差为 5% 时 dip 1 的 FWHM

Table 1 FWHM of dip1 at 5% structural deviation

unit: nm

Structural change type	Decrease by 5%	Original structure	Increase by 5%
Size of rectangular dielectric block	0.37	0.35	0.42
Size of rectangular metal block	0.42	0.35	0.38
Thickness of SiO ₂ /Al ₂ O ₃ layer	0.38	0.35	0.35
Overall structure size	0.53	0.35	0.39

表 2 结构偏差 5% 时 dip 2 的 FWHM

Table 2 FWHM of dip2 at 5% structural deviation

unit: nm

Structural change type	Decrease by 5%	Original structure	Increase by 5%
Size of rectangular dielectric block	0.78	0.59	0.82
Size of rectangular metal block	0.65	0.59	0.72
Thickness of SiO ₂ /Al ₂ O ₃ layer	0.85	0.59	0.61
Overall structure size	0.66	0.59	0.72

dip 2 的 FWHM 为 0.59 nm。FOM 为灵敏度与 FWHM 的比值,计算得到,dip 1 和 dip 2 的传感 FOM 分别为 1502.00 RIU⁻¹ 和 806.27 RIU⁻¹。虽然金属/介质组合光栅结构不能有效提高 SPR 检

测的灵敏度,但相比未添加介质光栅的 SPR 传感 FOM(单金属光栅结构获得的 FWHM 约为 50 nm, FOM 约为 9.5),该结构的 SPR 传感 FOM 提高了两个数量级。

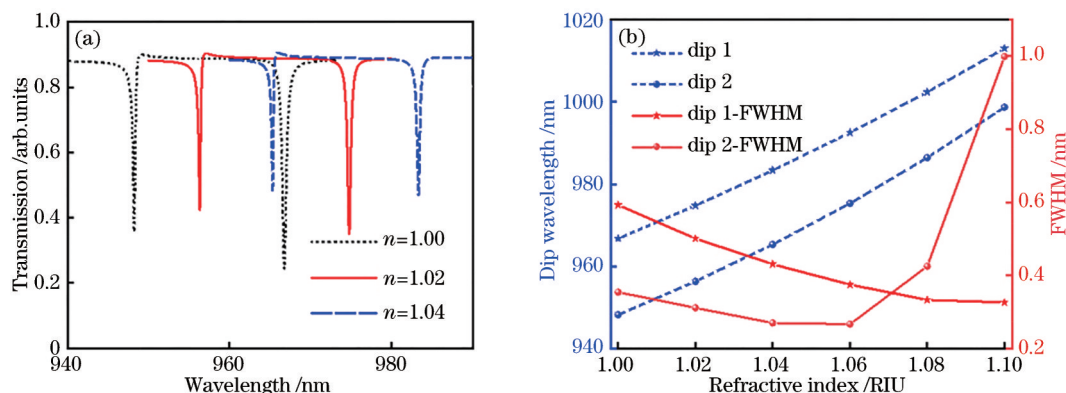


图 8 传感特性的仿真结果。(a)不同环境折射率条件对应的透射谱;(b)透射谱凹点峰值波长及 FWHM 与外界折射率的关系
Fig. 8 Simulation results of sensing characteristics. (a) Transmission spectrum corresponding to different ambient refractive index conditions; (b) relationship between the peak wavelength of the transmission spectrum and the FWHM and the external refractive index

4 结 论

FWHM 是影响传感器性能的重要参数,但现有 SPR 传感器普遍存在 FWHM 过宽、器件 FOM 过低等问题。通过在 Al_2O_3 薄层上涂覆一层 SiO_2 ,并将贵金属-介质矩形条作为金属/介质组合光栅周期性排列,设计了一种高 FOM 的 SPR 传感器结构。通过引入介质光栅,将纯金属光栅由 SPR 产生的透射谱损耗峰 FWHM 由 50 nm 减小到 0.59 nm。仿真结果表明:该结构的 SPR 检测折射率灵敏度为 475.7 nm/RIU , FOM 高达 806.27 RIU^{-1} ;相比未引入介质光栅的 SPR 传感器,该传感器的 SPR 传感 FOM 提高了两个数量级。该研究结果对设计高性能 SPR 传感器具有重要的指导意义。

参 考 文 献

- [1] Ebbesen T W, Lezec H J, Ghaemi H F, et al. Extraordinary optical transmission through sub-wavelength hole arrays[J]. *Nature*, 1998, 391(6668): 667-669.
- [2] Chen J, Zha T Q, Zhang T, et al. Enhanced magnetic fields at optical frequency by diffraction coupling of magnetic resonances in lifted metamaterials [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(1): 71-74.
- [3] Guo J P, Leong H S. Investigation of surface plasmon resonance in super-period gold nanoslit arrays[J]. *Journal of the Optical Society of America B-Optical Physics*, 2012, 29(7): 1712-1716.
- [4] Amarie D, Mosavian N, Waters E L, et al. Underlying subwavelength aperture architecture

drives the optical properties of microcavity surface plasmon resonance sensors[J]. *Sensors*, 2020, 20 (17): 4906.

- [5] Zhang L, Hao J M, Ye H P, et al. Theoretical realization of robust broadband transparency in ultrathin seamless nanostructures by dual blackbodies for near infrared light[J]. *Nanoscale*, 2013, 5(8): 3373-3379.
- [6] 赵丽娟, 赵海英, 徐志钮. 基于布里渊动态光栅的高灵敏度静压力传感器设计[J]. *光子学报*, 2021, 50 (2): 0206001.
Zhao L J, Zhao H Y, Xu Z N. Design of high-sensitivity hydrostatic pressure sensor based on Brillouin dynamic grating[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2021, 50(2): 0206001.
- [7] Ye H Y, Chen C B, Zhou J Y, et al. Sodium-based surface plasmon resonances for high-performance optical sensing in the near infrared[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2021, 27 (5): 4601308.
- [8] Wang G Y, Lu Y, Duan L C, et al. A refractive index sensor based on PCF with ultra-wide detection range[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2021, 27(4): 5600108.
- [9] Wood R W. On a remarkable case of uneven distribution of light in a diffraction grating spectrum [J]. *Proceedings of the Physical Society of London*, 1902, 18(1): 269-275.
- [10] Demerec M, Fano U. Mechanism of the origin of X-ray induced Notch deficiencies in drosophila melanogaster [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1941, 27(1): 24-31.

- [11] Kretschmann E, Raether H. Notizen: radiative decay of non radiative surface plasmons excited by light[J]. *Zeitschrift Für Naturforschung A*, 1968, 23(12): 2135-2136.
- [12] 李化月, 刘建军, 韩张华, 等. 基于类电磁诱导透明效应的太赫兹折射率传感器[J]. *光学学报*, 2014, 34(2): 0223003.
Li H Y, Liu J J, Han Z H, et al. Terahertz metamaterial analog of electromagnetically induced transparency for a refractive-index-based sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(2): 0223003.
- [13] Chen J, Fan W F, Zhang T, et al. Engineering the magnetic plasmon resonances of metamaterials for high-quality sensing[J]. *Optics Express*, 2017, 25(4): 3675-3681.
- [14] 陈颖, 田亚宁, 何磊, 等. 亚波长金属光栅/电介质/金属混合波导传感结构的研究[J]. *中国激光*, 2018, 45(1): 0110001.
Chen Y, Tian Y N, He L, et al. Research on subwavelength metal grating/dielectric/metal hybrid waveguide sensing structure[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(1): 0110001.
- [15] 肖功利, 杨秀华, 杨宏艳, 等. 可调谐交叉领结形石墨烯阵列结构等离子体折射率传感器[J]. *光学学报*, 2019, 39(7): 0728011.
Xiao G L, Yang X H, Yang H Y, et al. Plasma refractive index sensor with tunable cross tie-shaped graphene array structure[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(7): 0728011.
- [16] Agharazy Dormeny A, Abedini Sohi P, Kahrizi M. Design and simulation of a refractive index sensor based on SPR and LSPR using gold nanostructures [J]. *Results in Physics*, 2020, 16: 102869.
- [17] Yuan L M, Liao J M, Ren A B, et al. Ultra-narrow-band infrared absorbers based on surface plasmon resonance[J]. *Plasmonics*, 2021, 16(4): 1165-1174.
- [18] Ghosh G. Dispersion-equation coefficients for the refractive index and birefringence of calcite and quartz crystals[J]. *Optics Communications*, 1999, 163(1/2/3): 95-102.
- [19] Malitson I H. Refraction and dispersion of synthetic sapphire[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1962, 52(12): 1377-1379.
- [20] Johnson P B, Christy R W. Optical constants of the noble metals[J]. *Physical Review B*, 1972, 6(12): 4370-4379.
- [21] Moharam M G, Gaylord T K. Rigorous coupled-wave analysis of planar-grating diffraction[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1981, 71(7): 811-818.
- [22] 李志全, 刘同磊, 白兰迪, 等. 纳米光栅的表面等离子体增强型 GaN-LED[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(9): 0920005.
Li Z Q, Liu T L, Bai L D, et al. Surface-plasmon-enhanced GaN-LED based on nano-grating[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(9): 0920005.