引用本文:姚建波,龙开琳,郎咸忠. 基于斜角诱导Fano共振的双层Ag-Au双金属光栅折射率传感器[J]. 光通信技术,2026,50(5):46-50.

基于斜角诱导Fano共振的双层Ag-Au双金属光栅折射率传感器

姚建波[1,2],龙开琳[1,2],郎咸忠[3,4*]

(1.贵阳职业技术学院,贵阳 550081;2.贵阳产业技术研究院有限公司,贵阳 550081;
3.东南大学 物理学院,南京 211189;4.常州大学 微电子学院,江苏 常州 213159)

摘要:面向可穿戴的高灵敏折射率(RI)传感应用,提出了一种基于斜角诱导法诺(Fano)共振的双层Ag-Au双金属光栅RI传感器。利用有限元数值仿真和理论计算,发现双层光栅结构能够与特定入射角度的横磁波(TM)光场相互作用,在其表面产生Bloch表面等离子体激元(Bloch-SPPs)、Wood异常以及法布里-珀罗(F-P)腔多模式共振效应。通过各模式之间的耦合实现非对称Fano共振,获得最小半峰宽约为10 nm的共振谱线。当入射角为19°时,该传感器的灵敏度可达657 nm/RIU、决定系数为0.999 99、品质因数(FOM)为66 RIU^{-1}。

关键词:有限元法;法诺共振;表面等离激元极化激元;伍德异常;法布里-珀罗腔

中图分类号:TN929.1;O439　　**文献标志码:**A　　**文章编号:**1002-5561(2026)05-0046-05

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2026.05.008

Refractive index sensor based on oblique angle-induced Fano resonance in bilayer Ag-Au bimetallic gratings

YAO Jianbo[1,2], LONG Kailin[1,2], LANG Xianzhong[3,4*]

(1. Guiyang Vocational and Technical College, Guiyang 550081, China;
2. Guiyang Industrial Technology Institute Co., Ltd., Guiyang 550081, China; 3. School of Physics, Southeast University, Nanjing, 211189, China; 4. School of Microelectronics, Changzhou University, Jiangsu Changzhou 213159, China)

Abstract: For high-sensitivity refractive index (RI) sensing applications in wearable technology, an RI sensor based on an oblique angle-induced Fano resonance in bilayer Ag-Au bimetallic gratings has been proposed. Finite element numerical simulations and theoretical calculations reveal that the double-layer grating structure, when excited by TM-polarized light at specific incidence angles, can elicit a confluence of optical phenomena on its surface, including Bloch surface plasmon polaritons (Bloch-SPPs), Wood anomalies, and multimode Fabry-Pérot (F-P) cavity resonances. The coupling among these modes induces an asymmetric Fano resonance effect, yielding resonance spectra with a minimum full width at half maximum of approximately 10 nm. At an incident angle of 19°, the sensor achieves a sensitivity of 657 nm/RIU, a determination coefficient of 0.999 99, and a figure of merit (FOM) of 66 RIU^{-1}.

Key words: finite element method, Fano resonance, surface plasmon polaritons, Wood anomaly, Fabry-Perot cavity

0 引言

表面等离激元传感技术凭借高折射率(RI)灵敏度、实时无损监测及无标记检测等优势,在生物医学诊断、环境监测和食品安全等领域得到了广泛应用[1]。特别是柔性RI传感器,因其良好的贴合性与舒适性,在可穿戴设备和医疗监测应用中展现出独特潜力[2]。尽管基于棱镜耦合、光纤耦合及光波导耦合的新型RI传感器能实现超高灵敏度,但往往受限于设备复杂庞大、难以与人体直接交互或依赖刚性衬底微纳结构等问题[3-5],限制了其在可穿戴及长期医疗监测场景中的普及。

收稿日期:2025-10-23。

基金项目:贵州省教育厅自然科学研究项目(黔教技[2023]031号)资助;贵阳市工业和信息化局创新能力平台建设项目([2018-01])资助;中国博士后科学基金新冠肺炎疫情防控专项(2020T130013ZX)资助。

作者简介:姚建波(1972—),男,硕士,副教授,贵阳职业技术学院产业研究院院长,曾在北京邮电大学信息与通信工程学院做访问学者。主要研究方向是计算机仿真与数值分析、光信号传输与处理、大数据环境下数据抓取及过滤等。主持省部级项目3项,申请和授权中国发明专利3项。



***通信作者:**郎咸忠(1984—),男,博士,副教授,博士后,主要研究方向为微纳光子学。

相比之下,基于纳米阵列的RI传感器具备结构简单、微型化及易于集成等优势[1-2],已成为研究热点。Vala M等人[6]设计了具有表面等离子体共振(SPR)杂化效应的对称金(Au)纳米孔阵列,实现了双模传感检测,灵敏度分别为183、168 nm/RIU;张炎等人[7]提出了一种基于法诺(Fano)共振的Au异心圆环阵列RI传感器,灵敏度可达516 nm/RIU;Kim R M等人[8]设计的螺旋面Au光栅在葡萄糖溶液中的灵敏度达379.2 nm/RIU;Wu Wenjie等人[9]利用银(Ag)纳米盘阵列激发表面等离子体极化激元(SPP)与局域表面等离子体共振(LSPR)混合等离子体模式,灵敏度高达625.4 nm/RIU。其中,Ag因自由电子密度高、SPP激发效率高及成本低廉,被视为理想的等离子体材料[10]。然而,Ag在大气或水环境中易氧化,影响信号稳定性与寿命[3];Au虽化学稳定性好,但因自由电子碰撞损耗大、SPP衰减快及共振峰宽,导致传感分辨率受限。现有单一金属传感器虽能满足基本需求,但在灵敏度的进一步提升上仍面临瓶颈。

为解决上述矛盾,双金属RI传感器近年来备受关注。Babu R S等人[3]提出的棱镜基Ag-Au双金属SPR传感器,利用Au层提升了耐腐蚀性;杨芳等人[10]开发的岛状Ag-Au复合纳米颗粒阵列,灵敏度达155.8 nm/RIU;Kim H M等人[11]在光纤表面构筑的Au-钯纳米盘阵列,通过Pd壳层显著增强了等离子体效率。这些研究在一定程度上弥补了单一金属的缺陷。然而,相较于传统的氧化物保护层,表面金属层兼具保护与表面等离激元功能,这种"双功能"特性对RI传感性能的具体影响机制尚待深入探究[12]。

鉴于此,本文提出一种基于斜角诱导Fano共振的双层Ag-Au双金属光栅(BAABG)的RI传感器,实现对不同共振模式和局域电场的有效调控和优化。

1 BAABG结构与入射理论

BAABG和横磁波(TM)偏振光场与之相互作用的示意图如图1所示。BAABG结构由最下层聚碳酸酯(PC)光栅薄膜衬底、中层Ag层和上层Au层构成。其中,上层Au层与空气的接触界面称为上界面,中层Ag层与PC衬底相接的界面为下界面。具体参数分别为:光栅周期P为1 000 nm,PC衬底厚度T_{PC}为1 050 nm,PC光栅高度H_{PC}为50 nm、宽度W为100 nm,Ag膜厚度T_{Ag}为0~60 nm,Au层厚度T_{Au}为0~60 nm,PC的RI n_{PC}为1.56,Ag和Au的波长相关介电常数取自文献[13]。

本文采用基于有限元法的COMSOL Multiphysics

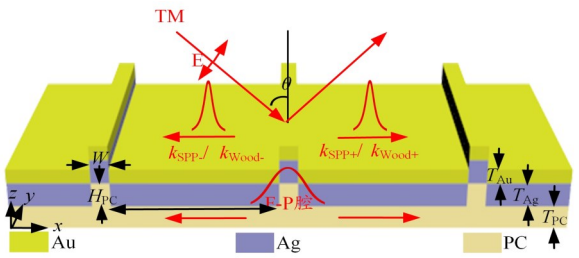


图1 BAABG和TM偏振光场与之相互作用的示意图

仿真软件,利用其波动光学模块对BAABG结构的反射、透射光谱及电场分布进行仿真计算。将光栅结构简化为xOz平面的周期性结构,x方向采用Floquet周期性边界条件,z方向设置完美匹配层(PML)边界条件。以横磁波TM作为激励光源,E为电场方向,波长范围设为350~1 000 nm,覆盖常规硅基光电探测器的光谱响应区间。当TM偏振光以入射角θ照射BAABG结构时,其表面可能激发3种电磁共振模式:金属两侧表面的Bloch表面等离激元(Bloch-SPPs)、Wood异常(k_{SPP+}和k_{Wood+}分别为正向的Bloch-SPPs和Wood的波矢,k_{SPP-}和k_{Wood-}分别为负向的Bloch-SPPs和Wood的波矢)[14-15],以及上下金属层间形成的类法布里-珀罗(F-P)腔共振[16]。

为了分析这些共振模式,计算了不同入射角θ(0~40°)下的Bloch-SPPs和Wood的波长位置。其中,激发一维阵列Bloch-SPPs的布拉格条件[14]可表示为

$$\lambda_{SPP}(n,\ i,\ \theta)=\frac{P}{i}\left\{\pm\mathrm{Re}\left[\left(\frac{\varepsilon_m n^2}{\varepsilon_m+n^2}\right)^{1/2}\right]-\sin\theta\right\} \quad (1)$$

式中:λ_{SPP}为Bloch-SPPs波长,i为共振级次,n为周围环境折射率,ε_m为金属的介电常数。

另外,空气中一维周期性纳米结构的Wood异常波长λ_{Wood}[17]表示为

$$\lambda_{Wood}(n,\ i,\ \theta)=\frac{P}{i}[n\pm\sin\theta] \quad (2)$$

2 BAABG的角度依赖传感性能分析

考虑到Au在可见光至近红外波段介电常数虚部较大、能量耗散较快,而Ag虽具有高效SPP激发特性但易氧化,结合前期对双层单一金属光栅反射光谱的对比分析,本文,最终选用T_{Ag}=40 nm、T_{Au}=10 nm和T_{Ag}=30 nm、T_{Au}=10 nm 2种参数的BAABG进行传感性能评估,首先,模拟仿真了常规RI n_{sol}范围(1.33~1.37)的葡萄糖水溶液环境中BAABG的角度依赖反射光谱,其中n_{sol}=1.33对应待检测溶液为纯水。结果表明:对于上述2种参数的BAABG,随着n_{sol}的增加,不同入射角

下的反射光谱中不同模式的共振谷发生不同程度的线性红移。

2.1 BAABG(T_{Ag}=40 nm、T_{Au}=10 nm)的角度依赖传感性能分析

对于参数为T_{Ag}=40 nm、T_{Au}=10 nm的BAABG,本文以θ=0°、θ=19°为例,对垂直入射与斜入射条件下的反射光谱及传感性能进行对比分析,得到反射光谱随n_{sol}的变化情况如图2所示。图中,深蓝色区域代表低反射率,即共振谷所在位置;冷色条纹的宽窄可定性反映峰宽大小,条纹沿横轴的偏移方向则表征红移趋势。

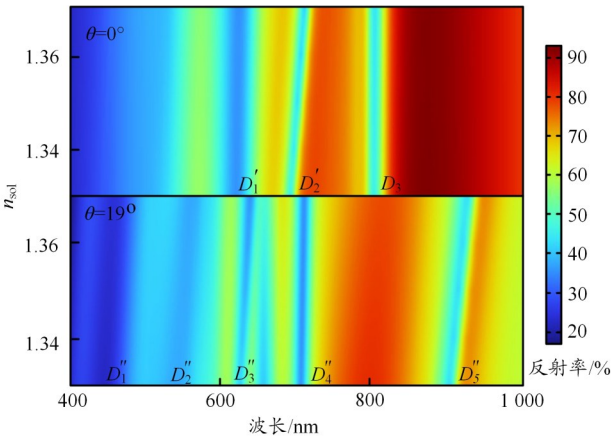


图2 T_{Ag}=40 nm、T_{Au}=10 nm,不同入射角下反射光谱随n_{sol}的变化情况

当θ=0°时,反射光谱存在3个明显共振模式(D'_1模~D'_3模),其中D'_2模半高全宽$\Delta\lambda_{FWHM}$最窄(约15 nm),且红移最显著(约19.7 nm);当θ=19°时,BAABG的传感性较优,此时反射光谱呈现5个明显的共振模式(D''_1模~D''_5模)。进一步分析该角度的反射光谱(如图3所示)可知:D''_5呈现明显的非对称Fano的线型,红移最显著(约23.7 nm),$\Delta\lambda_{FWHM}$较宽(约31.5 nm)。综合上述结果可知,θ=0°下的D'_2模和θ=19°下的D''_5模具有较优的传感潜力,因此选取这2个模式进一步分析RI传感器的传感性能。

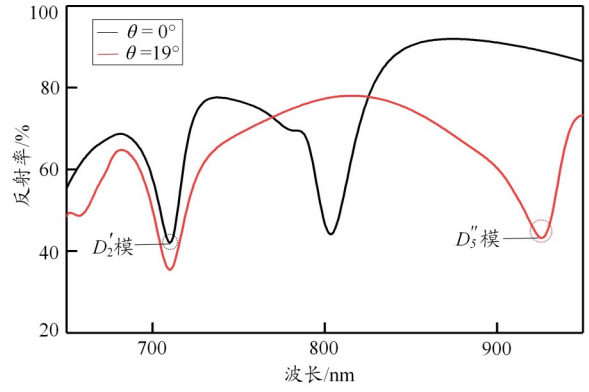


图3 T_{Ag}=40 nm、T_{Au}=10 nm时反射光谱中的D'_2模和D''_5模

图4展示了D'_2模和D''_5模共振波长与n_{sol}之间的线性关系。通过对线性拟合计算可知,D'_2和D''_5的灵敏度分别为473 nm/RIU和593 nm/RIU,相较于θ=0°的灵敏度,θ=19°的灵敏度提升了1.25倍。品质因数(FOM)分别约为32 RIU^{-1}和19 RIU^{-1},对应的决定系数R^2分别为0.999 89、0.999 93。以上结果表明,角度依赖的SPR特性为开发具有更宽动态范围的SPR传感器设计提供了可能,同时提升了传感应用中的灵活性。

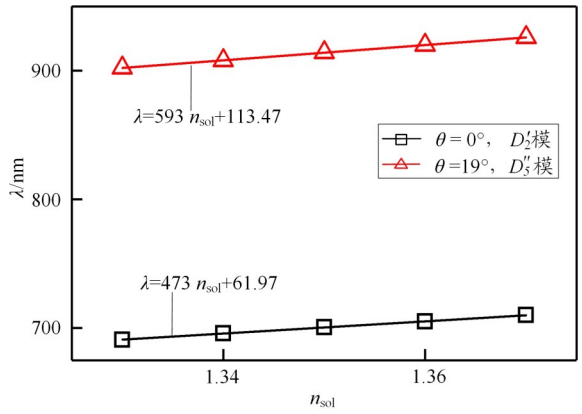
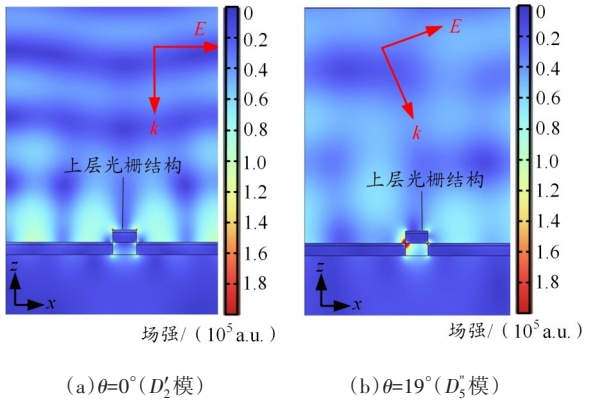


图4 D'_2模和D''_5模共振波长与n_{sol}之间的线性变化

为了进一步分析上述现象,本文模拟了D'_2和D''_5下的局域电场分布,结果如图5所示。图中k为波矢方向。当θ=0°时,共振以上界面的Bloch-SPPs为主,双金属层间形成较强的电场局域效应;少量Bloch-SPPs与经边缘辐射的腔模耦合,产生衰减长度小于250 nm的倏逝场,有利于提升传感性能。当θ=19°时,上界面负级次的Bloch-SPPs与F-P腔模式之间的耦合激发Fano共振,导致表面等离激元电场重新分布:近场被束缚于光栅上表面,尤其在左侧上下金属层间电场高度局域,倏逝场衰减长度显著缩短,从而有效提升了灵敏度[18]。



(a)θ=0°(D'_2模)　(b)θ=19°(D''_5模)

图5 BAABG(T_{Ag}=40 nm,T_{Au}=10 nm)的局域电场分布

2.2 BAABG(T_{Ag}=30 nm,T_{Au}=10 nm)的角度依赖传感性能分析

对于参数为T_{Ag}=30 nm,T_{Au}=10 nm的BAABG,本文同样选取θ=0°、θ=19°这2个角度进行对比分析,得到反射光谱随n_{sol}的变化情况如图6所示。

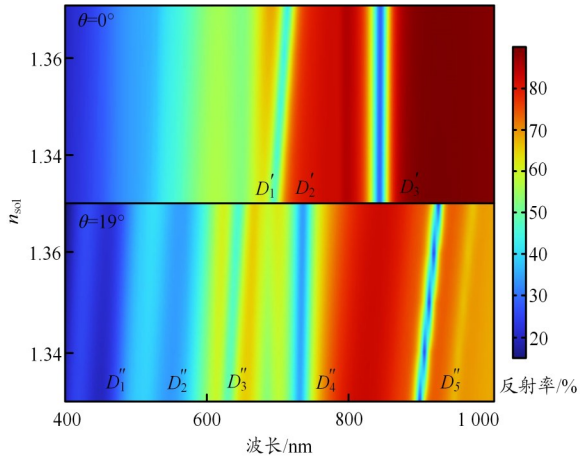


图6 T_{Ag}=30 nm、T_{Au}=10 nm,不同入射角度下反射光谱随n_{sol}的变化情况

当θ=0°时,反射光谱存在3个明显的共振模式(D'_1模~D'_3模),其中D'_2模半高全宽$\Delta\lambda_{FWHM}$最窄(约14 nm),且红移最显著(约19.3 nm);当θ=19°时BAABG的传感性较优,此时反射光谱呈现5个明显的共振模式(D''_1模~D''_5模)。进一步分析反射光谱(如图7所示)可知,D''_5模呈现以洛伦兹线型为主的轮廓,红移最显著(约26.3 nm),$\Delta\lambda_{FWHM}$约为10 nm。综合上述数据可知,θ=0°下的D'_2模和θ=19°下的D''_5模具有较优的传感潜力,因此,选取这2个模式进一步分析RI传感器的传感性能。

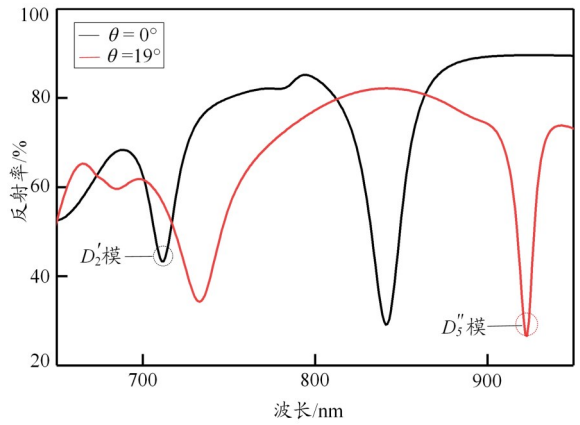


图7 T_{Ag}=30 nm、T_{Au}=10 nm时反射光谱中的D'_2模和D''_5模

图8展示了D'_2模和D''_5模共振波长与n_{sol}之间的线性关系。通过对数据进行线性拟合计算可知,D'_2模和D''_5模的灵敏度分别为482 nm/RIU和657 nm/RIU,相较于θ=0°的灵敏度,θ=19°的灵敏度提升了约1.4倍。FOM分别约为34 RIU^{-1}和66 RIU^{-1},对应的决定系数R^2分别为0.999 84、0.999 99。可见,BAABG的灵敏度优于大部分纯Au基纳米阵列RI传感器,可与纯Ag基等离激元传感器相媲美[6-10,12],并且具有极佳的线性度。

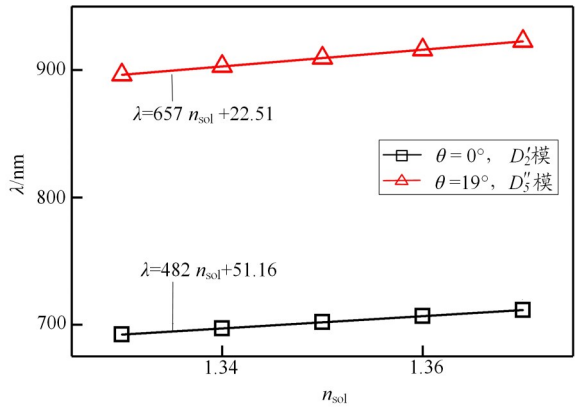


图8 D'_2模和D''_5模共振波长与n_{sol}的之间的线性关系

为了进一步分析上述现象,本文模拟了D'_2和D''_5模下的局域电场分布,结果如图9所示。当θ=0°时,局域电场分布特征与图5(a)相似;当θ=19°时,上界面负级次Bloch-SPPs和F-P腔均出现较高的场强,这与图7中D''_5模强吸收谷相符。然而,尽管倏逝场衰减长度明显增大,但在模式耦合作用下,光栅表面电场强度显著增强,使得灵敏度得到明显提高。

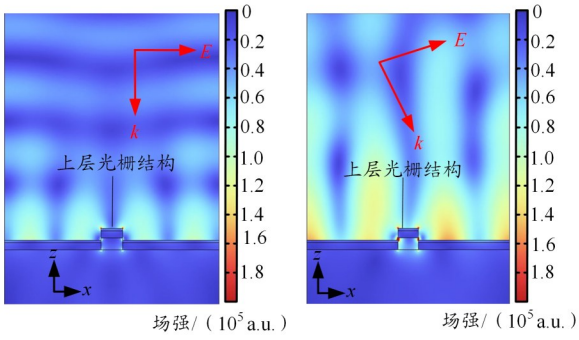


图9 BAABG(T_{Ag}=30 nm,T_{Au}=10 nm)的局域电场分布

3 结束语

本文提出了一种基于斜角诱导Fano共振的双层Ag-Au双金属光栅RI传感器。研究结果表明,该双层光栅结构能够与特定入射角度的TM光场相互作用,在其表面产生Bloch-SPPs、Wood异常以及F-P腔多模式共振,并通过模式耦合产生非对称Fano共振。由于上界面负级次Bloch-SPPs和F-P腔耦合导致电场强度

显著增强,相较于θ=0°时D_2'模的灵敏度(482 nm/RIU),θ=19°时D_5''模的灵敏度(657 nm/RIU)最高提升了1.4倍;当θ=19°,T_{Ag}=30 nm、T_{Au}=10 nm时,该传感器D_5''模的灵敏度为657 nm/RIU、决定系数为0.999 99、FOM为66 RIU^{-1},其灵敏度优于大部分Au基纳米阵列RI传感器。因此,该传感器在高稳定性、高灵敏度、宽检测范围的可穿戴设备和医疗监测领域具有潜在的应用价值。

参考文献:

[1] Lin Xunjie, Luo Yunfei, Li Dongxian, et al. Recent advances in localized surface plasmon resonance(LSPR)sensing technologies[J]. Nanotechnology, 2025, 36(20): 202001-1-202001-22.

[2] Fu Runfang, Lu Yan, Cheng Wenlong. Soft plasmonics: design, fabrication, characterization, and applications[J]. Advanced Optical Materials, 2022, 10(1): 2101436-1-2101436-26.

[3] Babu R S, Colenso H R, Gouws G J, et al. Performance enhancement of an Ag-Au bimetallic SPR sensor: a theoretical and experimental study [J]. IEEE Sensors Journal, 2023, 23(10): 10420-10428.

[4] 赵郝鑫,赵春柳,王海龙,等. 基于光栅结构的波长可控型海水折射率传感器[J]. 光通信技术,2021,45(5):32-35.

[5] 单义婷,赵丽娟,张智娟,等. MIM波导结构耦合椭圆八字形谐振腔的折射率传感器[J]. 光通信技术,2024,48(1):34-38.

[6] Vala M, Ertsgaard C T, Wittenberg N J, et al. Plasmonic sensing on symmetric nanohole arrays supporting high-Q hybrid modes and reflection geometry[J]. ACS Sensors, 2019, 4(12): 3265-3274.

[7] 张炎,宗诚,郭憬璇,等. 异心圆环阵列中Fano共振的形成及其传感性能[J]. 光学学报,2025,45(9):296-304.

[8] Kim R M, Lee S M, Han J H, et al. Helicoid grating-coupled surface plasmon resonance sensor[J]. Nano Letters, 2024, 24(49): 15668-15675.

[9] Wu Wenjie, Ni Haibin, Cai Tong, et al. Plasmonic nano-disc-shaped optical fiber probe[J]. Optics and Laser Technology, 2025, 188: 112962-1-112962-11.

[10] 杨芳,朱圣清,黄小丹,等. Ag@Au复合纳米颗粒薄膜的折射率传感特性研究[J]. 河南大学学报(自然科学版),2025(1):76-87.

[11] Kim H M, Kim H J, Park J H, et al. Bimetallic nanodisk-based fiber-optic plasmonic nanoprobe for gas detection[J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2024, 306: 123575-1-123575-8.

[12] Cai Tong, Ni Haibin, Wang Tingting, et al. Vertically coupled hybrid metasurfaces for multimodal and tunable plasmonic sensing[J]. Advanced Optical Materials, 2025, 13(29): e01531-1-e01531-10.

[13] Rakic A D, Djurisic A B, Elazar J M, et al. Optical properties of metallic films for vertical-cavity optoelectronic devices[J]. Applied Optics, 1998, 37(22): 5271-5283.

[14] Raether H. Surface plasmons on smooth and rough surfaces and on gratings: Vol. 111[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1988: 1-133.

[15] Wood W R. 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.

[16] Gordon R. Light in a subwavelength slit in a metal: propagation and reflection[J]. Physical Review B, 2006, 73(15): 153405-1-153405-3.

[17] Quan Jiaqi, Zhou Qingjia, Cao Yanyan, et al. Understanding of wood anomalies in metallic gratings from phase gradient metasurfaces[J]. Frontiers in Materials, 2022, 9: 901794-1-901794-6.

[18] Jung L S, Campbell C T, Chinowsky T M, et al. Quantitative interpretation of the response of surface plasmon resonance sensors to adsorbed films[J]. Langmuir, 1998, 14(19): 5636-5648.