一种基于介质光栅金属薄膜复合结构的折射率传感器

张东阳[1]，赵 磊[2]，王向贤[1]，王 茹[1]，庞志远[1]，杨 华[1]，冯旺军[1]

[1]兰州理工大学理学院，甘肃 兰州 730050；

[2]兰州城市学院电子与信息工程学院，甘肃 兰州 730070

摘要 设计了一种基于介质光栅金属薄膜复合结构的折射率传感器。利用 He-Ne 激光器输出的 632.8 nm 横磁偏振光激发复合结构中的表面等离子体，得到了高灵敏度的折射率传感器。运用有限元方法，数值模拟了具有不同光栅厚度、周期以及折射率的分析物的反射光谱。对占空比为 0.5、金属薄膜厚度为 45 nm 的复合结构进行了参数优化，得到最优参数为：光栅厚度 100 nm、光栅周期 500 nm。在最优参数条件下，计算了金属薄膜与具有不同折射率的分析物之间的界面共振角的变化，得到了高达 500 (°)/RIU 的角灵敏度。该折射率传感器操作简单、成本低、角灵敏度高，具有很好的应用前景。

关键词 表面光学；介质光栅/金属薄膜；表面等离子体；折射率

中图分类号 O436.1 **文献标识码** A

doi：10.3788/AOS201737.1124001

A Refractive Index Sensor Based on Composite Structure of Dielectric Grating with Metal Films

Zhang Dongyang[1], Zhao Lei[2], Wang Xiangxian[1], Wang Ru[1], Pang Zhiyuan[1], Yang Hua[1], Feng Wangjun[1]

[1] *School of Science, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu* 730050, *China*;

[2] *School of Electronic and Information Engineering, Lanzhou City University, Lanzhou, Gansu* 730070, *China*

Abstract A refractive index sensor with a composite structure based on dielectric grating with metal films is designed. The surface plasmas in the composite structure are excited by the transverse magnetic polarized light with a wavelength of 632.8 nm from a He-Ne laser and the refractive index sensor with a high sensitivity is obtained. With the finite element method, the reflection spectra for the analyte with different refractive indexes, grating thicknesses, and periods are numerically simulated. A grating thickness of 100 nm and a grating period of 500 nm are selected as the optimal parameters after the parameter optimization for the composite structure with a duty cycle of 0.5 and a metal film thickness of 45 nm. The variation of the resonance angle of the interface between the metal film and the analyte with different refractive indexes is calculated under the optimal parameters, and an angular sensitivity of 500 (°)/RIU is obtained. This refractive index sensor possesses the advantages of simple operation, low cost, and high angular sensitivity, which has considerable application prospects.

Key words optics at surfaces; dielectric grating/metal film; surface plasma; refractive index

OCIS codes 240.6680; 050.2770; 310.6628

1 引 言

表面等离激元光学是近年来非常热门的研究学科之一，在纳米光刻、生物传感和检测、等离子体器件模

收稿日期：2017-05-17；**收到修改稿日期**：2017-06-15

基金项目：国家自然科学基金(61505074)、国家重点基础研究发展计划(2013CBA01703)、兰州理工大学红柳青年教师培养计划(Q201509)

作者简介：张东阳(1990—)，男，硕士研究生，主要从事微纳光学、表面增强拉曼散射方面的研究。E-mail：dyzhang1217@sina.cn

导师简介：王向贤(1980—)，男，博士，副教授，硕士生导师，主要从事微纳光学、表面等离子体光学、表面增强拉曼散射等方面的研究。E-mail：wangxx869@126.com(通信联系人)

拟技术等方面得到了广泛应用[1-8]，特别是表面等离激元在生物传感领域的应用[9-10]。

近几年，折射率传感器得到了广泛研究，Teng 等[11]通过压丝棒对塑料光纤表面进行多缺口结构处理，发现弯曲后的多缺口结构具有很好的传感性能。Zhu 等[12]采用原子层沉积 Al_2O_3 技术，制备了一种基于锥形光纤的高灵敏度折射率传感器。此外，Qin 等[13]研究了硅纳米线镀金纳米球壳结构，大幅增强了光学耦合激发表面等离子体共振，提高了传感器的灵敏度。这些不同的微纳结构对传感器性能的影响也不尽相同，科研人员对光子晶体光纤[14]、金属多层膜结构进行了研究，包括金属-介质-金属结构，金属光栅结构，纳米孔、纳米棒阵列等[15-19]。基于棱镜系统传感器的角灵敏度大于光栅系统传感器的角灵敏度[20]。有报道指出，基于金属光栅通过双倾法制备的传感器的角灵敏度达到了 237 (°)/RIU[17]，超过了基于棱镜系统传感器的灵敏度。另外，双金属光栅复合结构构成的新型光栅传感器有着较大的折射率灵敏度[21]。由于 Ag 金属光栅的易氧化性能，Dhibi 等[22]设计了一种 Au/Ag 复合金属光栅传感器，其角灵敏度达到了 100 (°)/RIU。此外，红外区高效率吸波材料也有助于等离激元共振[23]，从而极大地改善传感器性能。2017 年，Abutoama 等[10]运用红外光谱在介质光栅金属薄膜结构上实现了很好的传感特性，其角灵敏度也达到了 230 (°)/RIU。但是，红外波段激发光源成本昂贵，且实际操作较难。

本文选取实验室中常见的输出波长为 632.8 nm 的 He-Ne 激光器作为激发源，当选取传感器的微结构占空比为 0.5、周期为 500 nm、介质光栅厚度为 100 nm、金属薄膜为 45 nm 时，其角灵敏度为 500 (°)/RIU。所提出传感器操作简单、成本低廉，且该传感器在可见光波段内的角灵敏度较高，这些优势使得该传感器在生物传感和检测方面具有较大的应用价值。

2　介质光栅金属薄膜复合结构的传感及基本理论

图 1 所示为基于介质光栅金属薄膜复合结构的折射率传感器示意图。其结构从下往上依次为：周期为 Λ、厚度为 h、折射率为 n_f 的 SiO_2 介质光栅，SiO_2 介质光栅槽中是折射率为 n_w 的 Si_3N_4，光栅上面是一层 45 nm厚的银薄膜，银薄膜上是待探测的分析物。以输出波长为 632.8 nm 的 He-Ne 激光器作为表面等离子体的激发光源，从 SiO_2 介质端入射，通过反射光谱的计算，可得到激发银薄膜和分析物间的界面的表面等离子体的共振角。研究不同折射率分析物的反射光谱和共振角，即可得到该折射率传感器的角灵敏度。

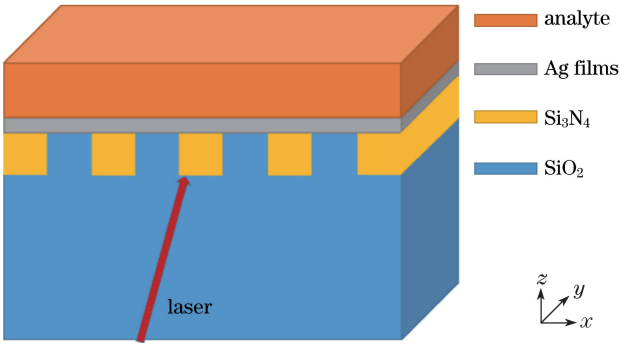

图 1　基于介质光栅金属薄膜复合结构的折射率传感器示意图

Fig. 1　Schematic of refractive index sensor based on composite structure of dielectric grating with metal films

介质光栅所满足的等效介电理论[24-25]公式为

$$n_{\mathrm{eff}}=n_{\mathrm{w}}n_{\mathrm{f}}\left[fn_{\mathrm{f}}^{2}+(1-f)n_{\mathrm{w}}^{2}\right]^{-1/2},\tag{1}$$

式中 n_{eff} 为横磁(TM)偏振光条件下介质光栅的等效折射率；当激发光源波长为 632.8 nm 时，分析物的折射率为 1.3317[26]，$n_{\mathrm{w}}=2.0105$[27-28]，$n_{\mathrm{f}}=1.457$[29-30]；介质光栅占空比 $f=0.5$。

介质光栅金属薄膜复合结构提供的波矢匹配方程为

$$k_{\mathrm{sp}}=\frac{2\pi}{\lambda}\sqrt{\frac{\varepsilon_{\mathrm{mr}}\varepsilon_{\mathrm{eff}}}{\varepsilon_{\mathrm{mr}}+\varepsilon_{\mathrm{eff}}}},\tag{2}$$

$$k'_{\mathrm{sp}}=\frac{2\pi}{\lambda}n_{\mathrm{f}}\sin\theta\pm m\frac{2\pi}{\Lambda},\tag{3}$$

式中 k_{sp} 为表面等离子体在 x 方向传播的波矢大小，k'_{sp} 为 TM 偏振光栅激发的表面等离子体的波矢大小，λ 为激发光的波长，θ 为激发光源的入射角，m 为衍射级数，ε_{mr} 为金属的介电常数，ε_{eff} 为金属薄膜不同界面处介质的介电常数。当 ε_{eff} 为金属薄膜与介质光栅间的界面的介电常数时，$\varepsilon_{eff}=n_{eff}^2$；当 ε_{eff} 为金属薄膜与分析物间的界面的介电常数时，$\varepsilon_{eff}=n_a^2$，其中 n_a 为分析物折射率。此外，(3)式中‘＋’、‘－’的选取与 m 的取值有关，当 $m>0$ 时，取‘＋’；当 $m<0$ 时，取‘－’[10]。

角灵敏度 S_θ 是折射率传感器的重要参数，表达式为

$$S_\theta=\frac{\mathrm{d}\theta_R}{\mathrm{d}n_a},\tag{4}$$

其由不同折射率分析物条件下界面共振角的变化量 $\mathrm{d}\theta_R$ 与折射率的变化量 $\mathrm{d}n_a$ 的比值决定。

3　分析与讨论

当分析物折射率为 1.3317、介质光栅周期为 300 nm 时，利用有限元方法，数值模拟得到的不同光栅厚度条件下入射角与反射率间的关系曲线如图 2 所示。结合(2)、(3)式发现，共振峰对应的入射角 θ_{res2} 和 θ_{res3} 分别为金属薄膜与介质光栅界面的＋1 级衍射角和－1 级衍射角；共振峰对应的入射角 θ_{res1} 和 θ_{res4} 分别为金属薄膜与分析物间的界面的 0 级衍射角。通过分析发现，随着光栅厚度的增加，峰的高度降低，金属薄膜与介质光栅间的界面的衍射角所对应的反射率减小，当光栅厚度达到 100 nm 左右时，反射率不再减小。此外，金属薄膜与分析物间的界面的衍射角所对应的反射率随着光栅厚度的增加而增大，当光栅厚度达到 100 nm左右时，反射率开始随光栅厚度的增加而减小，但是峰的宽度明显增加。这种现象是由光栅的衍射效率引起的[31]。光栅衍射效率越高，表面等离子的激发效果越好。随着光栅厚度的增加，光栅的衍射效率会逐渐增大，但是其衍射效率并不是随着厚度的增加而无限增大，必然有一个临界值。通过数值模拟发现，光栅厚度在 100 nm 左右时其相应的反射光谱最优。在后面的计算中选取光栅厚度为 100 nm。

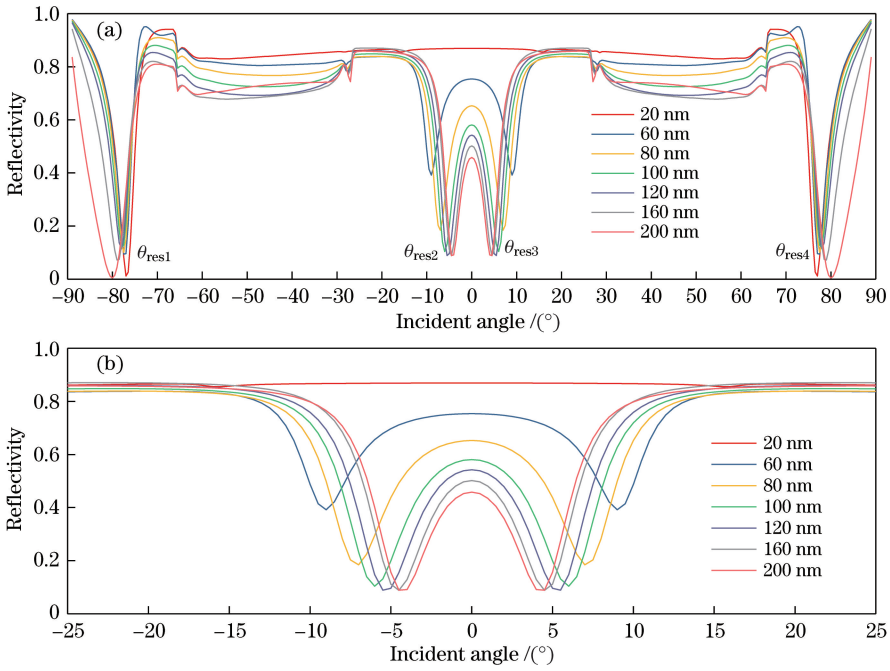

图 2　当分析物折射率为 1.3317、光栅周期 300 nm 时，不同光栅厚度下的(a)反射光谱曲线及(b)其局部放大图

Fig. 2　(a) Reflection spectra and (b) their corresponding enlarged partial views under different grating thicknesses when analyte refractive index is 1.3317 and grating period is 300 nm

通过上述分析，选取分析物的折射率为 1.3317、占空比为 0.5、光栅厚度为 100 nm，当光栅周期不同时，数值模拟了反射光谱，结果如图 3 所示。可以看出，光栅周期增大时，金属薄膜与分析物间的界面的共振角并没有变化，而金属薄膜与介质光栅间的界面的共振角增大、反射率减小，同时共振峰的宽度也增大，这表明

传感器的损耗也在增大。此外，当光栅周期增大至 500 nm 时，金属薄膜与介质光栅间的界面衍射角对应的反射率虽然有所减小，但是共振峰的宽度有明显增大趋势。综上所述，在光栅占空比为 0.5 时，选取介质光栅金属薄膜复合结构传感器的最优参数为：光栅厚度 100 nm、光栅周期 500 nm。

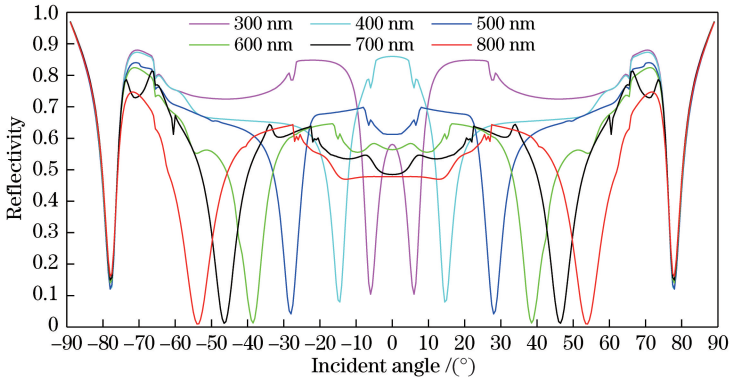

图 3　当分析物折射率为 1.3317、光栅厚度为 100 nm 时，不同光栅周期下的反射光谱

Fig. 3　Reflection spectra under different grating periods when analyte refractive index is 1.3317 and grating thickness is 100 nm

在传感器结构最优参数条件下，对不同折射率分析物进行了反射光谱的比较，如图 4 所示。通过分析发现，随着分析物折射率的增大，金属薄膜与分析物间的界面处 1 级衍射对应的共振角有明显的增大趋势，但反射率减小。其中，运用(4)式从理论上计算了介质光栅金属薄膜复合结构传感器的角灵敏度。当分析物折射率由 1.3117 变化为 1.3217 时，角灵敏度为 200 (°)/RIU。在金属薄膜与分析物间的界面处，由于正入射角和负入射角的激发，理论上其角灵敏度为 400 (°)/RIU；分析物折射率由 1.3217 变化为 1.3317 时，角灵敏度为400 (°)/RIU，分析物折射率由 1.3317 变化为 1.3417 时，角灵敏度为 500 (°)/RIU，是文献[11]中角灵敏度[230 (°)/RIU]的两倍多。基于 He-Ne 激光器以及介质光栅金属薄膜复合结构的折射率传感器，不仅成本低、操作简便，且可以实现高角灵敏度的传感。

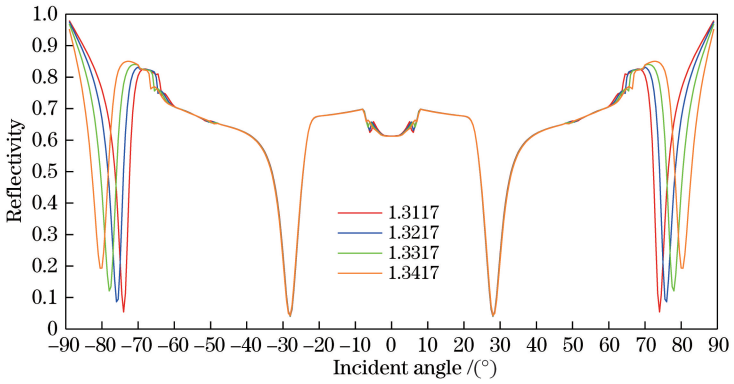

图 4　不同折射率分析物的反射光谱

Fig. 4　Reflection spectra of analytes with different refractive indexes

此外，当分析物折射率为 1.3317 时，在介质光栅金属薄膜复合结构的最优参数条件下，分别模拟了金属薄膜与介质光栅间的界面处 1 级衍射角和金属薄膜与分析物间的界面处 0 级衍射角对应的电场分布，证明在金属与分析物间的界面存在着表面等离子体，如图 5 所示。场强的分布同时也验证了图 2 所示共振峰对应的界面。此外，在远离金属薄膜方向，金属薄膜与分析物间的界面的场强呈减小趋势，如图 5(a)所示；在金属薄膜与介质光栅表面也存在着相当强度的电磁场分布，特别是介质光栅之间有较大的场强分布，如图 5(b)所示。相较于金属光栅传感器，在介质光栅金属薄膜复合结构传感器结构中，金属薄膜两个界面均有场强的分布，这进一步说明了介质光栅金属薄膜复合结构作为传感器的优势。

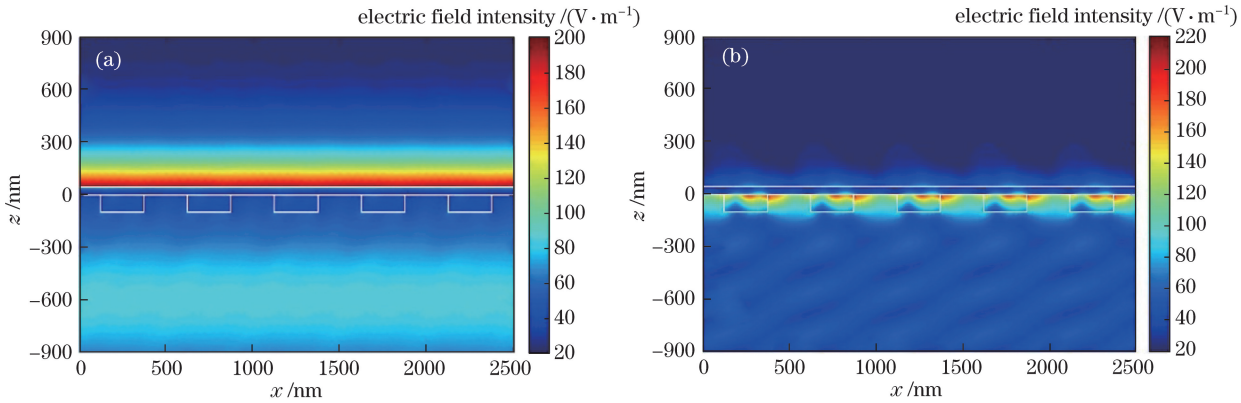

图 5　金属薄膜不同界面共振角处的电场分布。(a)金属薄膜与分析物间的界面;(b)金属薄膜与光栅间的界面

Fig. 5　Electric-field distributions of metal films under different resonance angles.

(a) Interface between metal films and analyte; (b) interface between metal films and grating

4　结　　论

以输出波长为 632.8 nm 的 He-Ne 激光器发出的 TM 偏振光为光源,激发了介质光栅金属薄膜复合结构中的表面等离子体,得到了高灵敏度的折射率传感器。通过理论分析,将占空比 0.5、银薄膜厚度 45 nm、光栅厚度 100 nm、光栅周期 500 nm 作为该结构的最优参数。研究了入射角模式下的反射光谱,通过理论计算得出此传感器的角灵敏度高达 500 (°)/RIU。此外,利用有限元方法数值模拟了该复合结构中金属薄膜两个界面附近的电场分布。

此设计具有操作简单、成本低廉,效果更佳等特点。此外,与金属光栅传感器相比,介质光栅金属薄膜复合结构传感器有效减小了传感的损耗,在应用上解决了金属光栅制备不易等难题,所制备的传感器将有望得到广泛应用。

参　考　文　献

[1] Stewart M E, Anderton C R, Thompson L B, *et al*. Nanostructured plasmonic sensors[J]. Chemical Reviews, 2008, 108(2): 494-521.

[2] Wang X X, Zhang D G, Chen Y K, *et al*. Large area sub-wavelength azo-polymer gratings by waveguide modes interference lithography[J]. Applied Physics Letters, 2013, 102(3): 031103.

[3] Wang Ru, Wang Xiangxian, Yang Hua, *et al*. Theoretical investigation of adjustable period sub-wavelength grating inscribed by TE_0 waveguide modes interference lithography[J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65(9): 094206.
王茹, 王向贤, 杨华, 等. TE_0导模干涉刻写周期可调亚波长光栅理论研究[J]. 物理学报, 2016, 65(9): 094206.

[4] Wang R, Wang X X, Yang H, *et al*. Theoretical investigation of hierarchical sub-wavelength photonic structures fabricated using high-order waveguide-mode interference lithograph[J]. Chinese Physics B, 2017, 26(2): 024202.

[5] Chen Y Z, Wang X X, Wang R, *et al*. Theoretical study of micro-optical structure fabrication based on sample rotation and two-laser-beam interference[J]. Chinese Physics B, 2017, 26(5): 054203.

[6] Brongersma M L, Kik P G. Surface plasmon nanophotonics[M]. Zhang Tong, Wang Qilong, Zhang Xiaoyang, *et al*, Transl. Nanjing: Southeast University Press, 2014: 130-137.
布隆格司马, 基克. 表面等离激元纳米光子学[M]. 张彤, 王琦龙, 张晓阳, 等, 译. 南京: 东南大学出版社, 2014: 130-137.

[7] Bartlett P N, Baumberg J J, Coyle S, *et al*. Optical properties of nanostructured metal films[J]. Faraday Discussions, 2004, 125: 117-132.

[8] Gates B D, Xu Q, Stewart M, *et al*. New approaches to nanofabrication: molding, printing, and other techniques[J]. Chemical Reviews, 2005, 105(4): 1171-1196.

[9] Tian C F, Deng Y H, Zhao D Y, *et al*. Plasmonic silver supercrystals with ultrasmall nanogaps for ultrasensitive SERS-based molecule detection[J]. Advanced Optical Materials, 2015, 3(3): 404-411.

[10] Abutoama M, Abdulhalim I. Angular and intensity modes self-referenced refractive index sensor based on thin dielectric

grating combined with thin metal film[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2017, 23(2): 1-9.

[11] Teng C X, Jing N, Yu F D, *et al*. Refractive index sensor based on a multi-notched plastic optical fiber[J]. Applied Optics, 2017, 56(7): 1833-1838.

[12] Zhu S, Pang F F, Huang S J, *et al*. High sensitivity refractive index sensor based on adiabatic tapered optical fiber deposited with nanofilm by ALD[J]. Optics Express, 2015, 23(11): 13880-13888.

[13] Qin L L, Zhang C, Li R F, *et al*. Silicon-gold core-shell nanowire array for an optically and electrically characterized refractive index sensor based on plasmonic resonance and Schottky junction[J]. Optics Letters, 2017, 42(7): 1225-1228.

[14] Shi Weihua, Wu Jing. Photonic crystal fiber sensor based on surface plasmonic and directional resonance coupling[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(2): 0206002.
施伟华, 吴静. 基于表面等离子体共振和定向耦合的光子晶体光纤传感器[J]. 光学学报, 2015, 35(2): 0206002.

[15] El-Gohary S H, Choi J M, Kim N H, *et al*. Plasmonic metal-dielectric-metal stack structure with subwavelength metallic gratings for improving sensor sensitivity and signal quality[J]. Applied Optics, 2014, 53(10): 2152-2157.

[16] Hu C K, Liu D M. High-performance grating coupled surface plasmon resonance sensor based on Al-Au bimetallic layer[J]. Modern Applied Science, 2010, 4(6): 8-13.

[17] Cai D B, Lu Y H, Lin K Q, *et al*. Improving the sensitivity of SPR sensors based on gratings by double-dips method (DDM)[J]. Optics Express, 2008, 16(19): 14597-14602.

[18] Crick C R, Albella P, Ng B, *et al*. Precise attoliter temperature control of nanopore sensors using a nanoplasmonic bullseye[J]. Nano Letters, 2014, 15(1): 553-559.

[19] Zhang C, Ni H W, Chen R S, *et al*. Enzyme-free glucose sensing based on Fe_3O_4, nanorod arrays[J]. Microchimica Acta, 2015, 182(9): 1811-1818.

[20] Gupta G, Kondoh J. Tuning and sensitivity enhancement of surface plasmon resonance sensor[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2007, 122(2): 381-388.

[21] Sun Xiaoliang, Chen Changhong, Meng Dejia, *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): 147302.

[22] Dhibi A, Sassi I, Oumezzine M. Surface plasmon resonance sensor based on bimetallic alloys grating[J]. Indian Journal of Physics, 2016, 90(1): 125-130.

[23] 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): 1-6.

[24] Moon S, Kim D. Fitting-based determination of an effective medium of a metallic periodic structure and application to photonic crystals[J]. JOSA A, 2006, 23(1): 199-207.

[25] Liao Y L, Zhao Y. Design of wire-grid polarizer with effective medium theory[J]. Optical and Quantum Electronics, 2014, 46(5): 641-647.

[26] Hale G M, Querry M R. Optical constants of water in the 200-nm to 200-microm wavelength region[J]. Applied Optics, 1973, 12(3): 555.

[27] Bååk T. Silicon oxynitride: a material for GRIN optics[J]. Applied Optics, 1982, 21(6): 1069-1072.

[28] Philipp H R. Optical properties of silicon nitride[J]. Journal of the Electrochemical Society, 1973, 120(2): 295-300.

[29] Malitson I H. Interspecimen comparison of the refractive index of fused silica[J]. JOSA, 1965, 55: 1205-1208.

[30] Tan C Z. Determination of refractive index of silica glass for infrared wavelengths by IR spectroscopy[J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 1998, 223(223): 158-163.

[31] Chen Nandian. Diffraction efficiency of sinusoidal grating and lamellar one with shallow groove[J]. Acta Optica Sinica, 1983, 3(1): 88-92.
陈南滇. 正弦形和矩形浅槽光栅的衍射效率[J]. 光学学报, 1983, 3(1): 88-92.