

基于梯形介质光栅金属薄膜结构的折射率传感器

刘啸, 王正岭*

江苏大学理学院, 江苏 镇江 212013

摘要 提出了一种基于梯形介质光栅金属薄膜结构的折射率传感器。利用有限元方法,研究了不同光栅厚度、梯形参数以及不同折射率下待分析液体的反射谱线。对传感器结构参数进行优化,得到了传感器的角灵敏度。考虑由反射谱线共振峰的对称移动导致的角灵敏度加倍效应,当待分析液体折射率从 1.33 变化到 1.34 时,传感器角灵敏度可达 $845.23(^{\circ})/\text{RIU}$ (RIU 为折射率单位);从 1.34 变化到 1.35 时,传感器角灵敏度可达 $1283.14(^{\circ})/\text{RIU}$,并且该传感器具有更宽折射率范围的检测应用。梯形参数对传感器的角灵敏度起着决定性的作用,具有最大灵敏度的传感器结构能形成对比度最大的电场分布驻波结构。

关键词 表面光学; 介质光栅; 金属薄膜; 折射率传感器; 加倍效应; 驻波结构

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.072401

Refractive Index Sensor Based on Trapezoidal Dielectric Grating and Metallic Film Structure

Liu Xiao, Wang Zhengling*

Faculty of Science, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China

Abstract A refractive index sensor based on the trapezoidal dielectric grating and the metallic film structure is proposed. The reflectivity of liquid to be analyzed is studied by the finite element method with different grating thicknesses, trapezoidal parameters and refractive indices. The angular sensitivity of the sensor is derived by optimizing the structure parameters. In consideration of the doubling effect of the angular sensitivity caused by the symmetrical movement of reflection resonance peaks, the angular sensitivity can reach $845.23(^{\circ})/\text{RIU}$ as the refractive index of liquid to be analyzed is changing from 1.33 to 1.34, and $1283.14(^{\circ})/\text{RIU}$ as the refractive index is changing from 1.34 to 1.35. The sensor has detection applications with a wide range of refractive index. The trapezoidal parameter plays a key role in the angular sensitivity of the sensor. A standing wave structure of the electric field distribution with the largest contrast corresponds to the highest sensitivity of the sensor structure.

Key words optics at surfaces; dielectric grating; metallic film; refractive index sensor; doubling effect; standing wave structure

OCIS codes 240.6680; 050.6624; 280.1415

1 引言

光学生物传感器因其高灵敏度、高精度、高可靠性和高检测速度的优势被认为是光学生物检测研究中的重要器件之一^[1]。近年来,大量理论和实验研究致力于寻找改进光学生物传感器性能的新方法,主要体现为表面等离子激元共振光学在

光学生物传感领域中的应用^[2-5]。目前,多个科研小组正聚焦于探索优化折射率传感器的灵敏度^[6-9]。2010年,赵华君等^[10]设计了一种基于表面等离子体(SP)效应的新型气体传感器及传感系统,该传感器的检测灵敏度达 $3050 \text{ nm}/\text{RIU}$,其中 RIU 代表折射率单位。2010年,Joó 等^[11]提出了一种非对称双电极波导结构的折射率传感器,利

收稿日期: 2018-09-25; 修回日期: 2018-10-19; 录用日期: 2018-10-22

基金项目: 江苏省自然科学基金(BK20161342)、江苏省“六大人才高峰”高层次人才项目(GDZB-018)、江苏省高校自然科学研究重大基金(15KJA140001)

* E-mail: zlwang@ujs.edu.cn

用布拉格光栅实现传感器的自参照。2015年, Abutoama等^[12]提出一种基于表面等离子体激元(SPs)的自参照传感器。2015年, Zhu等^[13]采用原子层沉积技术制备了一种高灵敏度折射率传感器。2017年, Qin等^[14]利用金纳米壳包覆、硅纳米线阵列构成的等离子体来增强折射率传感器的性能。2017年, Teng等^[15]设计出一种塑料光纤的多缺口结构的折射率传感器。2017年, Abutoama等^[16]提出一种介质光栅金属薄膜自参照传感器结构, 角灵敏度达到 $230(^{\circ})/\text{RIU}$ 。2017年, 张东阳等^[17]设计了一种介质光栅金属薄膜复合结构折射率传感器, 其角灵敏度能达到 $500(^{\circ})/\text{RIU}$ 。

为了获得更高灵敏度的传感器以及研究复杂光栅结构参数对灵敏度的影响, 本文提出一种梯形介质光栅金属薄膜的传感器结构, 通过优化光栅尺寸参数, 得到两种参数下的折射率传感器, 其角灵敏度分别可达 $1283.14(^{\circ})/\text{RIU}$ 和 $845.23(^{\circ})/\text{RIU}$, 并讨论了梯形结构参数对灵敏度的影响。

2 梯形介质光栅金属薄膜传感器方案

图1为梯形介质光栅金属薄膜传感器的结构示意图。如图1所示, 传感器结构由上往下分为三部分: 亚波长梯形介质光栅层、金属薄膜层和介质基底。介质光栅的材料是硅(Si), 光栅周期为 L , 光栅高度为 h_1 , 梯形的下底边宽度为 a , 上底边宽度为 b , 定义填充因子 $k_d = a/L$; 传感器结构的第二层是金属薄膜层(厚度为 h_2), 由于银材料具有较好的等离子体共振特性^[18], 本文选用的金属材料是银; 介质基底的材料与光栅材料一致。待分析液体填充在梯形介质光栅结构的上方。

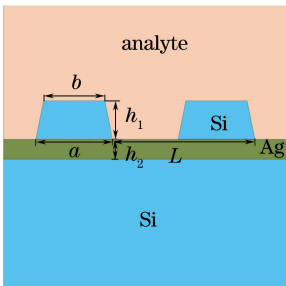


图1 传感器的横截面结构

Fig. 1 Cross-sectional structure of sensor

光波从分析物入射到介质光栅和银膜时, 会有一部分光透入到银膜的一定深度, 并呈指数衰减, 在银膜与待测物的界面上产生表面等离子体波(SPW), 其波矢大小为^[18]

$$k_{\text{spw}} = \text{Re} \left(\frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\epsilon_m \epsilon_s}{\epsilon_m + \epsilon_s}} \right), \quad (1)$$

式中: ω 为光波角频率; c 为真空光速; ϵ_m 为银膜介电常数; ϵ_s 为待测介质的介电常数。

角灵敏度 S_θ 是折射率传感器的重要参数, 在图1所示的传感器结构中, 通过观察不同折射率待分析液体的反射谱中共振峰所对应入射角度 θ_R 的变化(这里 θ_R 为反射谱线中共振峰所对应的入射光与法线的夹角), 研究传感器结构的入射角度随折射率的响应情况。传感器的角灵敏度可以定义为不同折射率待分析液体所对应的 θ_R 的微小变化量 $d\theta_R$ 与待分析液体折射率 n_a 的微小变化量 dn_a 的比值, 即^[16]

$$S_\theta = \frac{d\theta_R}{dn_a}. \quad (2)$$

3 梯形介质光栅金属薄膜结构传感器的灵敏度

在生物传感中, 待分析液体大多是细胞溶液, 其折射率一般在水的折射率 1.33 之上变化。本文重点考虑当液体的折射率从 1.33 变化到 1.34 以及从 1.34 变化到 1.35 的角灵敏度。在 COMSOL 软件仿真中, 如图1所示, 传感器结构取银层厚度 $h_2 = 48 \text{ nm}$, 光栅周期 $L = 800 \text{ nm}$, 填充因子 $k_d = a/L$ 为 0.5, 入射波长为 1550 nm, 对应银的折射率为 0.515, 消光系数为 10.81^[15], 硅的折射率为 3.48。定义梯形参数 k_s 为梯形的上底边宽度 b 与下底边宽度 a 之比。在仿真时, 基底厚度与待分析液体的厚度远大于光栅厚度。

首先取典型值 $k_s = 0.75$ 进行研究。取待分析液体折射率 $n_a = 1.33$, 当光栅高度 h_1 取 165~185 nm 时, 反射率随入射角的变化曲线如图2(a)所示。由图2(a)可知, 在反射率曲线中有共振吸收峰出现。图2(a)中入射角 θ_{res1} 和 θ_{res4} 均为传感器结构的零级衍射角, θ_{res2} 和 θ_{res3} 分别为+1级和-1级衍射角^[17], 并且对称地分布在 0° 入射角的两侧。当改变待分析液体折射率 n_a 时, θ_{res2} 和 θ_{res3} 几乎没有变化, 而 θ_{res1} 和 θ_{res4} 会发生变化, 并且这种变化是对称的(参见对图4的分析), 因此由 θ_{res1} 或 θ_{res4} 的变化, 根据(1)式可以得到该结构的角灵敏度 S_θ 。图2(b)为折射率 n_a 从 1.33 变化到 1.34 时的角灵敏度 S_θ 随光栅高度 h_1 的变化图。由图2(b)可知, 当光栅高度 h_1 小于 165 nm 或大于 185 nm 时, S_θ 相对较小, 而当光栅高度 h_1 在 170~175 nm 之间时, 传感器的角灵敏度 S_θ 出现波动, 并可以达到较大值 $421.2(^{\circ})/\text{RIU}$ 。

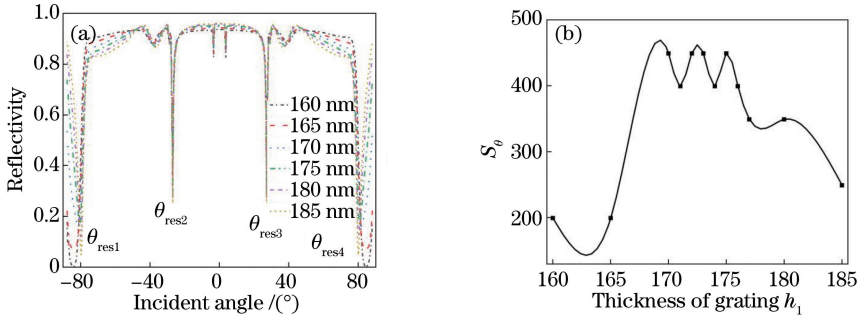


图 2 反射率与灵敏度的关系曲线。(a)当折射率为 1.33 时不同光栅高度情况下反射率曲线；
(b)当折射率由 1.33 变化到 1.34 时的灵敏度随光栅高度的变化图

Fig. 2 Relationship curves of reflectivity and sensitivity. (a) Reflectivity curve at different grating heights when refractive index is 1.33; (b) sensitivity as a function of grating height as refractive index changes from 1.33 to 1.34

由梯形参数 k_s 的定义可知, $k_s = 1$ 时介质光栅为矩形。为了研究梯形光栅相对矩形光栅的异同, 选择光栅高度 $h_1 = 175 \text{ nm}$, 得到 n_a 由 1.33 变化到 1.34 时的角灵敏度 S_θ 随 k_s 的变化, 结果如图 3(a) 所示。同时得到 n_a 由 1.34 变化到 1.35 时的角灵敏度 S_θ 随 k_s 的变化曲线, 结果如图 3(b) 所示。从图 3(a) 中可见, 当折射率 n_a 由 1.33 变化到 1.34 时, 在 k_s 约为 0.66 处, 出现角灵敏度最小值, 此时的角灵敏度 S_θ 仅为 $40^\circ/\text{RIU}$, 而当 $k_s = 0.73$ 时, 出现角灵敏度最大值, 此时的角灵敏

度 S_θ 可以达到 $422.615^\circ/\text{RIU}$, 而矩形光栅只能得到较小的角灵敏度[约为 $236^\circ/\text{RIU}$]。由图 3(b) 可知, 当 n_a 由 1.34 变化到 1.35 时, 角灵敏度会出现共振峰, 在 $k_s = 0.66$ 处, 角灵敏度 S_θ 可以达到 $641.57^\circ/\text{RIU}$, 而矩形光栅只能得到较小的角灵敏度[约为 $188.66^\circ/\text{RIU}$]。由此可见, 梯形光栅的参数 k_s 对传感器的角灵敏度的起着决定性的作用, 当 n_a 由 1.34 变化到 1.35 时, 梯形光栅的最大角灵敏度比矩形光栅的角灵敏度甚至可以大 3 倍以上。

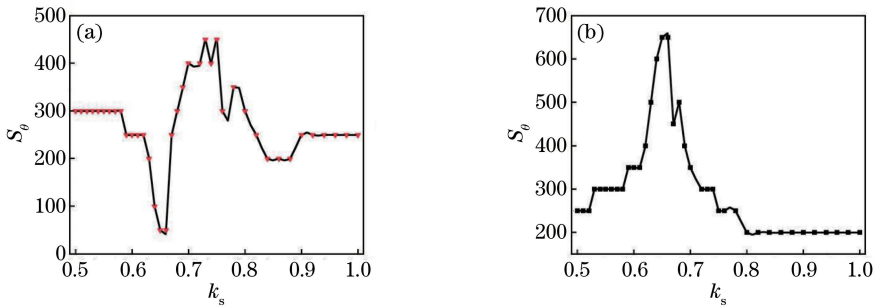


图 3 不同折射率区间的 S_θ 随 k_s 变化的曲线。(a)折射率由 1.33 变化到 1.34;(b)折射率由 1.34 变化到 1.35
Fig. 3 Curves of S_θ with k_s in different refractive index intervals. (a) Refractive index changes from 1.33 to 1.34;
(b) refractive index changes from 1.34 to 1.35

由图 3 可知, 当 n_a 由 1.33 变化到 1.34 时, 在 k_s 约为 0.73 处, 出现角灵敏度最大值, 而当 n_a 由 1.34 变化到 1.35 时, 角灵敏度最大值出现在 k_s 约为 0.66 处。因此, 在不同折射率变化区间, 灵敏度最大值出现在不同 k_s 处。为了研究给定 k_s 时不同折射率变化区间对灵敏度的影响, 并观察反射率曲线中共振吸收峰的对称特性, 取 $k_s = 0.73$, n_a 为 1.33~1.36 时反射率随入射角的光谱曲线如图 4 所示。随着 n_a 的变大, 反射谱线的共振峰出现对称移动, 在左侧共振峰处出现右移现象, 而在右侧发生左

移现象。根据这种反射特性, 角灵敏度 S_θ 可根据 (1) 式由 θ_{res1} 和 θ_{res4} 的共同变化得到, 可以实现如图 2(b) 和图 3 所示的角灵敏度加倍效果^[15]。当 n_a 由 1.33 变化到 1.34 时, 此结构的传感器角灵敏度为 $845.23^\circ/\text{RIU}$, 当 n_a 从 1.34 变化到 1.35 时, 角灵敏度为 $586.41^\circ/\text{RIU}$, 当 n_a 从 1.35 变化到 1.36 时, 角灵敏度为 $384.24^\circ/\text{RIU}$ 。

同样, $k_s = 0.66$ 时不同折射率的反射率随入射角的光谱曲线与图 4 类似。考虑角灵敏度的加倍效应, 当 n_a 从 1.34 变化到 1.35 时, 角灵敏度为

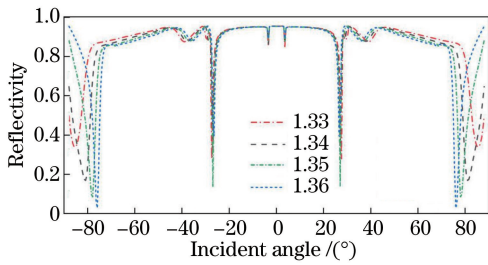


图4 $k_s = 0.73$ 时不同折射率待分析液体的反射谱曲线

Fig. 4 Reflection spectrum curves of liquids with different refractive indexes when $k_s = 0.73$

1283.14(°)/RIU, 当 n_a 从 1.35 变化到 1.36 时, 角灵敏度为 492.36(°)/RIU, 当 n_a 从 1.36 变化到 1.37 时, 角灵敏度为 394.2(°)/RIU。

由图 4 可知, 随着待分析液体折射率 n_a 增大, 左侧共振峰出现右移现象, 而右侧共振峰发生左移, 即对应入射角的绝对值减小。这与矩形光栅中反射谱线共振峰的偏移方向相反。在矩形光栅结构中, 随着待分析液体折射率变大, 反射谱线中共振峰所对应入射角的绝对值将会接近 90°, 从而不能检测。因此本文结构能够突破文献[17]中所不能实现的大角度检测, 甚至在待分析液体折射率为 1.44 时也能够取得较大的灵敏度。

为了研究梯形结构参数 k_s 对传感器灵敏度的影响, 讨论了不同梯形结构参数 k_s 的光场分布。当光栅周期 $L = 800$ nm、光栅高度 $h_1 = 175$ nm、填充因子 $k_a = 0.5$ 、银层厚度 $h_2 = 48$ nm 时, 选取待分析液体折射率 $n_a = 1.34$, 取不同的梯形结构参数 k_s 分别为 1, 0.92, 0.85, 0.73, 0.66 和 0.5, 得到反射谱线共振峰对应入射角 θ_{res1} 入射时的电场分布, 结果分别如图 5(a)~(f) 所示。在图 5(e) 中, 光的透射率几乎为 0, 反射率为 0.0276, 超过 97% 的光局域分布在梯形光栅结构中。在梯形光栅结构上方, 入射光和反射光之间符合相干条件, 在光栅结构的上方形成了稳定的驻波分布。从图 5(e) 可以看出, 在竖直方向上入射光和反射光的分量形成的两种驻波, 一种在光栅上表面反射, 两个相邻的波谷的距离约为 1339 nm, 另一种在银表面反射, 两个相邻驻波波峰之间的距离约为 1307 nm。两种反射光波长不同并且相对入射光减小是由于入射光与梯形介质光栅金属薄膜结构相互作用产生了表面等离子激元现象^[19]。图 5(e) 形成了对比度最大的周期性驻波结构, 在该参数下, 待分析液体折射率的较小变化就会引起反射谱线共振峰对应入射角的较大变化, 从而获得较大的灵敏度。当 k_s 分别取 0.5, 0.73, 0.85,

0.92 和 1 时, 其电场分布也存在驻波, 但它们偏离了对比度最大的驻波结构, 只能获得较小的灵敏度。

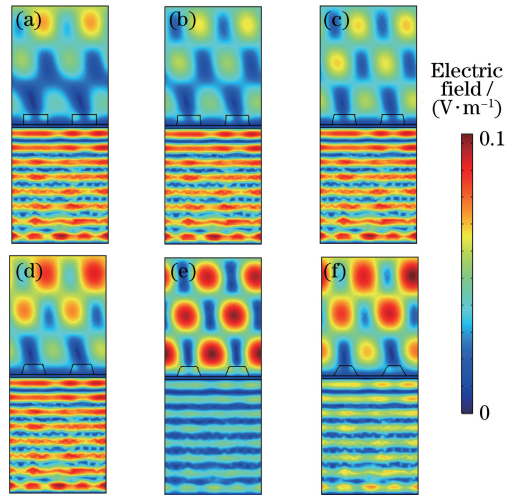


图 5 当 k_s 不同时, 传感器结构在入射角 θ_{res1} 处的电场分布。(a) $k_s = 1$; (b) $k_s = 0.92$; (c) $k_s = 0.85$; (d) $k_s = 0.73$; (e) $k_s = 0.66$; (f) $k_s = 0.5$

Fig. 5 Electric field distribution of sensor structure at incident angle of θ_{res1} with different k_s values. (a) $k_s = 1$; (b) $k_s = 0.92$; (c) $k_s = 0.85$; (d) $k_s = 0.73$; (e) $k_s = 0.66$; (f) $k_s = 0.5$

4 结 论

提出了一种基于梯形介质光栅金属薄膜结构的折射率传感器。运用有限元方法, 研究了该折射率传感器反射谱, 发现反射谱的共振峰出现对称移动的现象, 从而可以实现角灵敏度的加倍效应。同时, 随着待分析液体折射率变大, 对应入射角的绝对值会变小, 这与矩形光栅中反射谱线共振峰的偏移方向相反, 故能够突破矩形光栅所不能实现的大角度检测, 具有更宽折射率范围的检测应用, 甚至在待分析液体折射率为 1.44 时也能够获得较大的灵敏度。传感器梯形光栅参数 k_s 对传感器的角灵敏度起着决定性的作用, 得到的最大角灵敏度比矩形光栅的角灵敏度大 3 倍以上。当待分析液体折射率从 1.33 变化到 1.34 时, 传感器角灵敏度可以达到 845.23(°)/RIU, 从 1.34 变化到 1.35 时传感器角灵敏度可以达到 1283.14(°)/RIU。传感器角灵敏度取决于梯形介质光栅传感器结构所形成电场分布驻波结构的对比度。该传感器制作成本低、操作简单、角灵敏度高、检测范围宽, 具有广泛的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Kabashin A V, Patskovsky S, Grigorenko A N.

- Phase and amplitude sensitivities in surface plasmon resonance bio and chemical sensing [J]. *Optics Express*, 2009, 17(23): 21191-21204.
- [2] Shalabney A, Abdulhalim I. Sensitivity-enhancement methods for surface plasmon sensors [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2011, 5(4): 571-606.
- [3] Brongersma M L, Kik P G. Surface plasmon nanophotonics[M]. Zhang T, Wang Q L, Zhang X Y, *et al.* Transl. Nanjing: Southeast University Press, 2014: 130-137.
布隆格司马, 基克. 表面等离子激元纳米光子学[M]. 张彤, 王琦龙, 张晓阳, 等, 译. 南京: 东南大学出版社, 2014: 130-137.
- [4] Guo J, Keathley P D, Hastings J T. Dual-mode surface-plasmon-resonance sensors using angular interrogation[J]. *Optics Letters*, 2008, 33(5): 512-514.
- [5] Byun K M, Kim S J, Kim D. Grating-coupled transmission-type surface plasmon resonance sensors based on dielectric and metallic gratings[J]. *Applied Optics*, 2007, 46(23): 5703-5708.
- [6] Stewart M E, Mack N H, Malyarchuk V, *et al.* Quantitative multispectral biosensing and 1D imaging using quasi-3D plasmonic crystals[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2006, 103(46): 17143-17148.
- [7] Lin H, Zhang X, Zhu X S, *et al.* Refractive index sensor based on hollow optical fiber with metal-dielectric-metal multilayered films structure[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(6): 0606006.
林华, 张娴, 朱晓松, 等. 基于金属-介质-金属多层膜结构的空芯光纤折射率传感器 [J]. *光学学报*, 2018, 38(6): 0606006.
- [8] Malyarchuk V, Stewart M E, Nuzzo R G, *et al.* Spatially resolved biosensing with a molded plasmonic crystal[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 90(20): 203113.
- [9] Guo T. Review on plasmonic optical fiber grating biosensors[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(3): 0328006.
郭团. 等离子体共振光纤光栅生物传感器综述 [J]. *光学学报*, 2018, 38(3): 0328006.
- [10] Zhao H J, Yuan D R. A gas sensor based on metal gratings with a spacer between the periodic strips and a metal film[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(s1): s100305.
赵华君, 袁代蓉. 介质隔层金属光栅气体传感器研究 [J]. *光学学报*, 2010, 30(s1): s100305.
- [11] Joo Y H, Song S H, Magnusson R. Demonstration of long-range surface plasmon-polariton waveguide sensors with asymmetric double-electrode structures [J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 97(20): 201105.
- [12] Abutoama M, Abdulhalim I. Self-referenced biosensor based on thin dielectric grating combined with thin metal film[J]. *Optics Express*, 2015, 23(22): 28667-28682.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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): 72-80.
- [17] Zhang D Y, Zhao L, Wang X X, *et al.* A refractive index sensor based on composite structure of dielectric grating with metal films [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(11): 1124001.
张东阳, 赵磊, 王向贤, 等. 一种基于介质光栅金属薄膜复合结构的折射率传感器 [J]. *光学学报*, 2017, 37(11): 1124001.
- [18] Liu C, Sun Q. Research on simulation of metallic coating on optical fiber surface plasma resonance sensors [J]. *Science Technology and Engineering*, 2012, 12(17): 4171-4173.
刘超, 孙祺. 光纤表面等离子体共振传感器敏感膜的仿真研究 [J]. *科学技术与工程*, 2012, 12(17): 4171-4173.
- [19] Wang Z L. A review on research progress in surface plasmons [J]. *Progress in Physics*, 2009, 29(3): 287-324.
王振林. 表面等离子激元研究新进展 [J]. *物理学进展*, 2009, 29(3): 287-324.