

基于金纳米层的微结构光纤表面等离子体共振传感器

郑龙 张霞 施雷 高静 马会芳 黄永清 任晓敏

(北京邮电大学信息光子学与光通信研究院信息光子学与光通信教育部重点实验室, 北京 100876)

摘要 采用有限元法分析了基于金纳米层的新型微结构光纤表面等离子体共振传感器的相关特性。在数值仿真中,使用精确的德鲁德-洛伦兹(Drude-Lorentz)模型来描述金属介电常数。计算结果表明,随待测样品折射率的增加,表面等离子体共振峰波长向长波长方向漂移。该微结构光纤表面等离子体共振传感器的探测灵敏度可达1200 nm/RIU(refractive index unit),探测极限可达 8.33×10^{-5} RIU。

关键词 光纤光学; 微结构光纤; 表面等离子体共振; 传感器; 金纳米层

中图分类号 TN247

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP48.012401

Surface Plasmon Resonance Sensors Based on Au-Metalized Nanolayer in Microstructured Optical Fibers

Zheng Long Zhang Xia Shi Lei Gao Jing Ma Huifang
Huang Yongqing Ren Xiaomin

(Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications, Ministry of Education, Institute of Optical Communications and Optoelectronics, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract Surface plasmon resonance sensors based on Au-metalized nanolayer in microstructured optical fibers are theoretically analyzed by using finite element method. In simulations, the accurate Drude-Lorentz model is used to describe the metal dielectric constant. The numerical results show that as the refractive index of the liquid increases, the surface plasmon resonance peak shifts to longer wavelength. The sensitivity of Au-metalized surface plasmon resonance sensor can reach 1200 nm/RIU (refractive index unit) and the corresponding resolution is 8.33×10^{-5} RIU.

Key words fiber optics; microstructure optical fiber; surface plasmon resonance; sensor; Au nanolayer

OCIS codes 280.4750; 240.6680; 230.0230; 310.0310

1 引言

表面等离子体共振(SPR)传感器在化学、生物、环境与医学等方面有着广泛的应用^[1]。近年来,基于微结构光纤(MOF)^[2]的SPR传感器吸引了很多关注^[3,4]。MOF有着更灵活的拉制技术,可以通过设计光纤截面的结构来控制其光学特性,MOF的独特结构便于优化光场分布,进而提高传感器性能^[5~15]。

本文设计了一种新型含有金纳米层的基于MOF的SPR传感器。仿真过程中,使用精确的德鲁德-洛伦兹(Drude-Lorentz)模型来描述金属介电常数,它的优点是更接近金属真实特性。该基于MOF的SPR传感器的检测极限可以达到 8.33×10^{-5} RIU(refractive index unit)。

收稿日期: 2010-08-23; 收到修改稿日期: 2010-10-15

基金项目: 国家973计划(2010CB327605)、国家自然科学基金(61077049)、新世纪优秀人才支持计划((NCET-08-0736)、中央高校基本科研业务费专项资金(BUPT2009RC0410)和高等学校学科创新引智计划(B07005)资助课题。

作者简介: 郑龙(1985-),男,硕士研究生,主要从事基于微结构光纤的表面等离子体共振传感器方面的研究。

E-mail: ncr22222@gmail.com

导师简介: 张霞(1973-),女,博士,副教授,主要从事全光波长变换和基于微结构光纤的光电子器件等方面的研究。

E-mail: xzhang@bupt.edu.cn

2 基于 MOF 的 SPR 传感器结构

SPR 传感器结构如图 1 所示,该结构可以满足两个关键要求:1)等离子体波与光纤芯导模的相位匹配;2)更佳的微流体流量。图 1 中的 MOF 共有 7 圈圆孔。第 1 圈的 6 个大孔为待测液体的通道,内壁侧镀金膜。其较大孔径便于液体在内部流动,且易于镀膜,其直径 $d_1 = 4.03125 \mu\text{m}$ 。其余所有空气孔直径均为 $d_2 = 1.6125 \mu\text{m}$ 。气孔间距 $\Lambda = 4.3 \mu\text{m}$,设待测物的折射率 $n_{\text{analyte}} = 1.33$,空气折射率 $n_{\text{air}} = 1$ 。

在仿真过程中,使用德鲁德-洛伦兹模型来描述金纳米层的介电常数

$$\epsilon(\omega) = 1 + \sum_k \frac{\Delta\epsilon_k}{-\omega^2 + a_k(i\omega) + b_k}, \quad (1)$$

式中 ω 为入射光的角频率, $\Delta\epsilon_k$ 为谐振强度, a_k 为阻尼系数的 2 倍, b_k 为谐振频率的平方。与 Palik^[16] 所给出的金属光学参数相比,表 1 中的 $\Delta\epsilon_k$, a_k 和 b_k 的值可以更加精确地描述金的真实状态^[17]。根据 Sellmeier 公式可以确定石英玻璃的折射率。

表 1 Drude-Lorentz 模型下金的参数

Table 1 Parameters of Au in Drude-Lorentz model

k	$\Delta\epsilon_k$	a_k	b_k
1	1589.516	0.268419	0
2	50.19525	1.220548	4.417455
3	20.91469	1.747258	17.66982
4	148.4943	4.406129	226.0978
5	1256.973	12.63	475.1397
6	9169	11.21284	4550.765

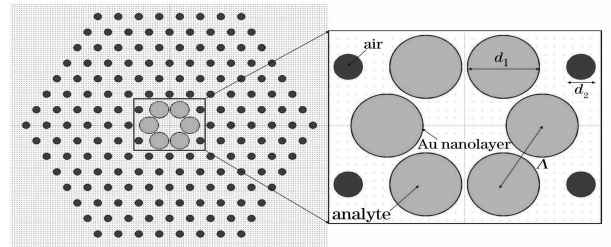


图 1 基于 MOF 的 SPR 传感器结构图

Fig. 1 Schematic of SPR sensor based on MOF

3 计算结果与讨论

使用 RSoft 公司出品的基于有限元法 (FEM) 的 FemSIM 模块,利用完美匹配层(PML)边界条件,实现对等离子体共振传感器的分析。第 1 圈大孔内壁均匀涂覆了 1 层 40 nm 厚的金膜。通过计算,由于 500~700 nm 范围内共振波长对于待测液体折射率的变化较为敏感,所以把研究重点放在这个区域。

3.1 传感器灵敏度分析

根据传感机制,灵敏度定义为

$$S_\lambda = \left| \frac{d\lambda_{\text{peak}}}{dn_{\text{analyte}}} \right|, \quad (2)$$

式中 λ_{peak} 为共振峰波长。图 2(a)表明,当 n_{analyte} 从 1.315 变化到 1.345 时,共振峰处的损耗不断增加,且共振波长 λ 也向长波长方向移动。激发金膜产生的 SPR 模的 n_{eff} (有效折射率)随波长 λ 而变化。当芯导模的 n_{eff} 与等离子体模的 n_{eff} 相等时会实现共振耦合,相应的波长即共振波长。当 λ 小于共振波长时,芯导模的 n_{eff} 比 SPR 的大;当 λ 大于共振波长时,芯导模的 n_{eff} 比 SPR 的小。当 n_{analyte} 变大时,芯导模的 n_{eff} 整体增加,导致共振波长向长波长方向移动。图 2(b)为 n_{analyte} 和 λ 的关系。拟合出了一条直线,可以计算出此 SPR 传感器的

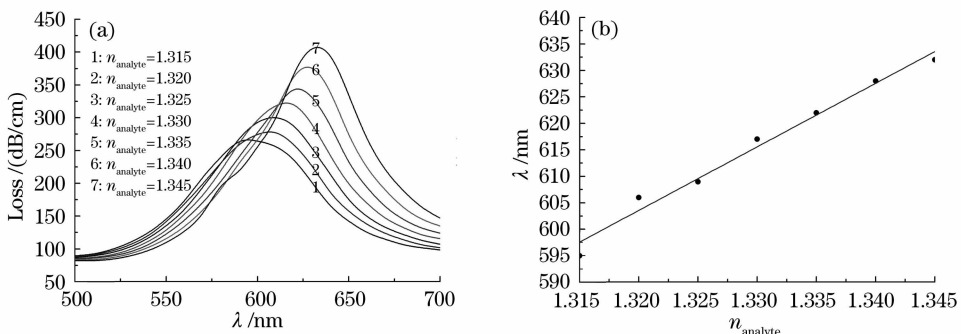


图 2 (a) MOF 损耗随 λ 变化, (b) λ 随 n_{analyte} 变化

Fig. 2 (a) Loss of MOF versus λ , (b) λ versus n_{analyte}

灵敏度为 1200 nm/RIU。一般情况下,光谱仪能识别的最小波长偏移为 0.1 nm,进而计算得出此传感器的分辨率为 8.33×10^{-5} RIU。

3.2 等离子体激发的影响因素

因为金属的趋肤深度在 20~30 nm,如果金膜太薄将会影响等离子体的激发,所以将讨论范围确定在 40~60 nm^[18,19]。图 3 为金纳米层厚度在 40~60 nm 变化的情况下,等离子体峰位置的变化情况。当金纳米层厚度增加的时候,共振峰处的模式损耗随之下降,同时共振峰的位置向长波长移动。可以看到在膜厚为 40 nm 时的 Q 值比 50 nm 时的要更高一些,意味着更好的检测性能。而当金膜厚度为 60 nm 时,已经没有特别明显的共振峰了。

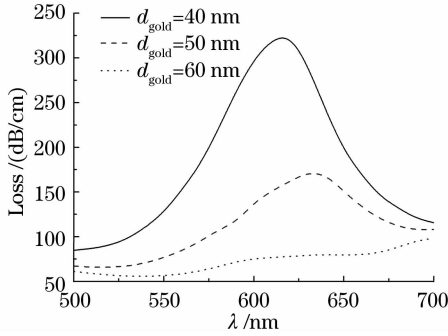


图 3 对于镀有不同厚度的金纳米层的 MOF 的损耗谱

Fig. 3 Loss spectra of the plasmonic peak for MOF with different thicknesses gold coating

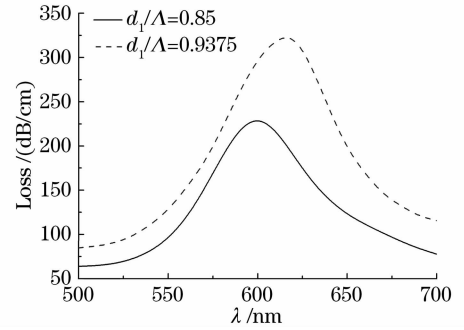


图 4 $d_{\text{gold}} = 40 \text{ nm}$, $d_2 = 0.375\Lambda$ 时,不同的第 1 圈孔径对应的损耗谱

Fig. 4 Loss spectra of the plasmonic with different d_1 when $d_{\text{gold}} = 40 \text{ nm}$, $d_2 = 0.375\Lambda$

图 4 为在第 1 圈圆孔不同直径 $d_1 = 0.85\Lambda$, 0.9375Λ 的情况下,共振峰附近的光纤芯导模的损耗谱。可以看出,随着第一圈圆孔直径的变大,光纤的损耗有一个明显的递增趋势。

4 结 论

设计了一种新型含金纳米层的基于 MOF 的 SPR 传感器,并使用有限元法进行了理论研究。此传感器的灵敏度为 1200 nm/RIU,相应的探测极限是 8.33×10^{-5} RIU。此结构拥有 6 个较大的圆孔,易于待测液体的流动,而且便于制作及镀膜。研究结果对研制基于 MOF 的 SPR 传感器有一定的借鉴意义。

参 考 文 献

- 1 J. Homola, S. S. Yee, G. Gauglitz. Surface plasmon resonance sensors; review [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 1999, **54**(1,2): 3~15
- 2 P. Russell. Photonic crystal fibers [J]. *Science*, 2003, **299**(5605): 358~362
- 3 M. Skorobogatiy. Microstructured and photonic band gap fibers for applications in the resonant bio- and chemical sensors [J]. *J. Sensors*, 2009, **2009**: 1~20
- 4 B. D. Gupta, R. K. Verma. Surface plasmon resonance-based fiber optic sensors; principle, probe designs, and some applications [J]. *J. Sensors*, 2009, **2009**: 1~12
- 5 M. Skorobogatiy, A. Kabashin. Plasmon excitation by the Gaussian-like core mode of a photonic crystal waveguide [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(18): 8419~8424
- 6 A. Amezcua-Correa, J. Yang, C. E. Finlayson *et al.*. Surface-enhanced Raman scattering using microstructured optical fiber substrates [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2007, **17**(13): 2024~2030
- 7 B. Gauvreau, A. Hassani, M. F. Fehri *et al.*. Photonic bandgap fiber-based surface plasmon resonance sensors [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(18): 11413~11426
- 8 X. Zhang, R. Wang, F. M. Cox *et al.*. Selective coating of holes in microstructured optical fiber and its application to in-fiber absorptive polarizers [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(24): 16270~16278
- 9 J. Hou, D. Bird, A. George *et al.*. Metallic mode confinement in microstructured fibres [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(9):

5983~5990

- 10 H. Yan, J. Liu, C. Yang *et al.*. Novel index-guided photonic crystal fiber surface-enhanced Raman scattering probe[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(11): 8300~8305
- 11 M. Hautakorpi, M. Mattinen, H. Ludvigsen. Surface-plasmon-resonance sensor based on three-hole microstructured optical fiber[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(12): 8427~8432
- 12 A. Hassani, M. Skorobogatiy. Photonic crystal fiber-based plasmonic sensors for the detection of bilayer thickness[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2009, **26**(8): 1550~1557
- 13 Xiao Gongli, Yao Xiang, Ji Xinming *et al.*. Effect of array type on extraordinary transmission characteristics for metal/dielectric photonic crystal[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(6): 062401
肖功利,姚翔,纪新明等. 阵列类型对金属/电介质光子晶体强透射影响[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, **47**(6): 062401
- 14 Hong Xiaogang, Xu Wendong, Zhao Chengqiang *et al.*. Effect of probe on surface plasmon resonance[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(10): 3049~3053
洪小刚,徐文东,赵成强等. 探针表面等离子体共振的影响[J]. *光学学报*, 2010, **30**(10): 3049~3053
- 15 A. Hassani, M. Skorobogatiy. Design criteria for microstructured-optical-fiber-based surface-plasmon-resonance sensors [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2007, **24**(6):1423~1429
- 16 E. D. Palik. Handbook of Optical Constants of Solids[M]. San Diego: Academic Press, 1998
- 17 A. Dhawan, S. J. Norton, M. D. Gerhold *et al.*. Comparison of FDTD numerical computations and analytical multipole expansion method for plasmonics-active nanosphere dimers[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(12): 9688~9703
- 18 Cao Zhenxin, Liang Dakai, Guo Mingjiang. Experimental study on the relationship between film thickness and resonant wavelength based on the optic fiber SPW sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(1): 125~128
曹振新,梁大开,郭明江. 光纤表面等离子体波传感器中膜厚与共振波长关系的实验研究[J]. *光学学报*, 2003, **23**(1): 125~128
- 19 Zhang Xiaoli, Zeng Jie, Liang Dakai *et al.*. Study on the performance influence of the thickness of the metal film on the optical fiber surface plasma wave resonance sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(s2): 373~377
张晓丽,曾捷,梁大开等. 金属膜层对光纤表面等离子体传感器的影响研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(s2): 373~377