

金膜与银膜光纤 SPR 传感器*

曹振新¹ 吴乐南¹ 梁大开²

(1 东南大学无线电工程系信息科学与工程实验室, 南京 210096)

(2 南京航空航天大学航空科技智能材料与结构重点实验室, 南京 210016)

摘 要 不同的金属传感层对光纤 SPR 传感器的特性有着重要的影响. 根据该传感器的理论公式, 计算了金膜、银膜传感器的输出光谱, 并与实验结果进行了比较. 结果表明, 银膜光纤 SPR 传感器的理论输出光谱和实验检测光谱吻合很好, 而金膜吻合较差. 分析了出现这种偏差的原因.

关键词 物理光学; 光纤传感器; SPR; 金属膜层

中图分类号 TP212.1 **文献标识码** A

0 引言

20 世纪 60 年代末出现了基于表面等离子体共振 (SPR) 技术的棱镜传感器^[1], 80 年代已经被广泛用于生化、医学、环保等多个领域^[2~4]. 在 90 年代初出现了基于 SPR 技术的光纤传感器^[5~7], 同棱镜传感器相比, 它体积小、响应快、成本低, 可以实现在线实时检测, 有着更大的研究前景和经济价值.

通常, 基于 SPR 技术的传感器的传感膜层是一层金属层, 金属的特性直接影响传感器的性能. 尤其是光纤 SPR 传感器. 因为光纤 SPR 传感器的激励光源是白光, 输出是波长谱, 因此要求所用的材料均具有良好的色散特性和化学稳定性.

本文首先建立光纤 SPR 传感器的理论模型和理论计算公式, 然后利用文献[8]的数据给出金和银的色散特性; 再利用这些参数进行理论计算, 并与实验结果进行分析比较. 结果表明, 该模型与银膜光纤 SPR 传感器吻合得很好, 而与金膜光纤 SPR 传感器的实验结果相差较大, 其原因在于文献[8]中的金膜数据不够准确. 最后指出利用光纤 SPR 传感器可以反过来测试金属膜层的色散特性.

1 理论

光纤 SPR 传感器模型如图 1 所示. 与棱镜 SPR

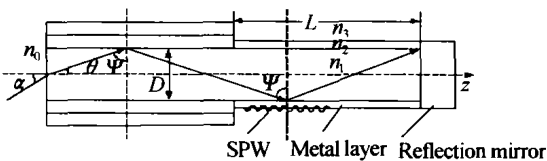


图 1 子午线在光纤中传播示意图
Fig. 1 The diagram of meridian light propagating along cylindrical optical fiber

传感器相类似, 当入射光波矢在界面上的水平分量与表面等离子体波矢相等时, 发生表面等离子体共振, 导致对应波长的反射光能量急剧下降.

根据光波导理论、Fesnel 公式和 SPR 理论可得光纤 SPR 传感器输出光谱

$$R_p(d, l, t, n_2(\lambda, t), n_1(\lambda), n_3(\lambda)) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M r_p \cdot (\alpha_i, l, t, n_1(\lambda, t), n_2(\lambda), n_3(\lambda))^{2N(L, D, \alpha_i)} I(\alpha_i) \quad (1)$$

式中: $N(L, D, \Psi) = \frac{L}{D \tan \Psi}$ 是光线在传感器中的反射次数; $I(\alpha) = (18510 + 369.4\alpha - 1071\alpha^2 + 133\alpha^3 - 4.754\alpha^4) / 103760$ 是传播模式密度分布函数, 而 $n_0 \sin \alpha = n_1 \cos \Psi, \Psi_c \leq \Psi < 90; r_p(\lambda, n_1, n_2, n_3, \Psi, d) = \frac{r_{12}^p + r_{23}^p \exp(2ik_2 d)}{1 + r_{12}^p r_{23}^p \exp(2ik_2 d)}$ 为双层界面时 p 光反射一次的

反射系数, 其中 $r_{01}^p = (\frac{\epsilon_0}{k_{0z}} - \frac{\epsilon_1}{k_{1z}}) / (\frac{\epsilon_0}{k_{0z}} + \frac{\epsilon_1}{k_{1z}}), r_{12}^p = (\frac{\epsilon_1}{k_{1z}} - \frac{\epsilon_2}{k_{2z}}) / (\frac{\epsilon_1}{k_{1z}} + \frac{\epsilon_2}{k_{2z}}); k_{0x} = \frac{\omega}{c} \sqrt{\epsilon_0} \sin \theta, k_{0z} = \sqrt{(\frac{\omega}{c})^2 \epsilon_0 - k_{0x}^2}, k_{1z} = \sqrt{(\frac{\omega}{c})^2 \epsilon_1 - k_{0x}^2}, k_{2z} = \sqrt{(\frac{\omega}{c})^2 \epsilon_2 - k_{0x}^2}; \epsilon_i = n_i^2, i=0, 1, 2, \lambda = \frac{2\pi c}{n_0 \omega}$. r_{01}^p 和 r_{12}^p 分别为光纤纤芯与金属界面的反射率和金属与环境介质的反射率, d 为金属层的厚度, $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ 分别为光纤纤芯、金属、环境介质的介电常数, $k_{ij} (i=1, 2, 3, j=x, z)$ 为各介质中的光波波矢分量, c 为光速, ω 为光波频率. 400 nm 到 1000 nm 之间, 金和银的色散拟合公式^[8]为

$$\epsilon_g(\lambda) = (-7.3667 \times 10^{-5} \times \lambda^2 + 0.029084 \times \lambda + 5.3773) + i \times (3.7476 \times 10^{-5} \times \lambda^2 - 0.056876 \times \lambda + 22.641) \quad (2)$$

$$\epsilon_s(\lambda) = (-5.1596 \times 10^{-5} \times \lambda^2 - 0.0033253 \times \lambda + 6.2403) + i \times (3.1776 \times 10^{-6} \times \lambda^2 - 0.002018 \times$$

* 国家自然科学基金资助项目 (19872034)
Tel: 025-3792443 Email: zhenxincao@sohu.com
收稿日期: 2003-09-08

$$\lambda + 0.54037) \tag{3}$$

根据式(1)可以计算光纤 SPR 传感器的输出光谱.

2 计算结果

均取石英光纤纤芯折射率1.458,数值孔径0.37,光纤传感器探头长度15 mm,光纤直径600 μm,环境介质折射率1.3330,入射采用p光,并根据式(1)算出光纤 SPR 传感器的输出光谱曲线. 则:

1)对于银膜光纤 SPR 传感器,镀层厚度40 nm,计算结果如图2虚线所示;

2)对于金膜光纤SPR传感器,镀层厚度54.4 nm,计算结果如图3虚线所示.

比较两种光纤 SPR 传感器理论上的输出光谱曲线,可以发现银膜光纤 SPR 传感器的共振谷值更低,输出曲线更狭窄,表明银膜光纤 SPR 传感器能得到更好的光谱分析准确度. 但是,由于银膜的化学稳定性非常差,一般寿命只有数周,使其传感器的应用受到了很大的限制. 而金膜光纤 SPR 传感器的寿命则很长,目前我们自行设计的传感器已经使用了10个月,仍然保持良好的性能.

3 实验结果

根据理论计算中采用的参量设计了银膜光纤 SPR 传感器和金膜光纤 SPR 传感器,其实验输出曲线分别如图2和图3中的实线所示. 图2表明银膜光纤 SPR 传感器的理论计算结果与实验结果吻合得很好,但是图3中金膜光纤 SPR 传感器的理论计算结果却和实验结果相去甚远. 我们反复做了很多组实验,以去除实验中的偶然情况. 同时,由于建立的理论计算模型与银膜光纤 SPR 传感器本身吻合很好,这表明所建立的模型也是正确的. 因此,这里最主要的原因疑为文献提供的金膜在400~1000 nm的色散特性不够准确. 但是,通过多组实验结果却可以获得金膜的色散特性,这是光纤 SPR 传感器一个新的应用领域.

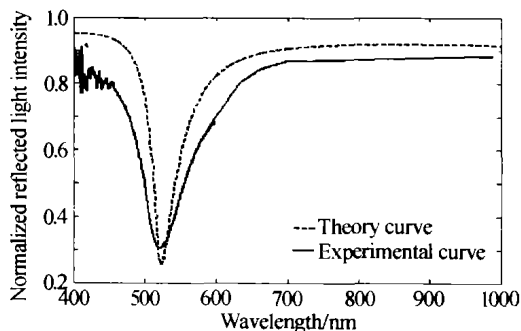


图2 银膜光纤 SPR 传感器的理论和实验输出光谱
Fig. 2 Theory and experimental output spectra of Silver film optical fiber SPR sensor

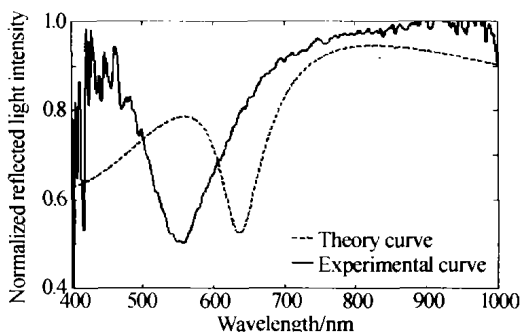


图3 金膜光纤 SPR 传感器的理论和实验输出光谱
Fig. 3 Theory and experimental output spectra of Gold film optical fiber SPR sensor

对于金膜光纤 SPR 传感器,理论计算和实验结果虽然共振波长变化较不一致,但是整体共振曲线形状比较相似. 这进一步说明,通过文献[6]数据获得的金膜色散特性拟合式(2)中,只有部分系数不够准确.

实际设计中,如果采用银膜,则可以完全采用式(1)计算,根据理论计算提供的参数来设计实际传感器. 但是采用金膜时,由于式(2)中系数不准确,理论计算的结果必须修正,才能获得实际的设计结果.

当然,真正实用的是金膜光纤 SPR 传感器,虽然准确度有所下降,但是寿命长、可靠性高. 采用适当的

二次数据处理也可望进一步提高传感器的检测准确度.

4 结论

通过理论分析、公式推导、数值计算和实际测试得到了金膜光纤 SPR 传感器和银膜光纤 SPR 传感器特性,可以为光纤 SPR 传感器的设计提供依据.

参考文献

- 1 Otto A. Excitation of nonradiative surface plasma waves in silver by the method of frustrated total reflection. *Z Physik*, 1968, **216**:398~410
- 2 Salamon Zdzislaw. Surface plasmon resonance spectroscopy as a tool for investigating the biochemical and biophysical properties of membrane protein systems I: Theoretical principles. *Biochemical et Biophysical Acta*, 1997, **1331**: 117~129
- 3 Abdelghnani A, Renault N J. SPR fibre sensor sensitized by fluorosiloxane polymers. *Sensors and Actuators (B)*, 2001, **74**: 117~123
- 4 Homola J. Spectral surface plasmon resonance biosensor for detection of staphylococcal enterotoxin B in milk. *International Journal of Food Microbiology*, 2002, **75**: 61~69
- 5 Corleissen J R. Surface Plasmon Resonance Based Bulk Optic and Fiber Optic Sensors [Ph. D. dissertation]. Washington: University of Washington. 1993, 40
- 6 Ordal M A. Optical properties of the metals Al, Co, Cu,

- Au, Fe, Pb, Ni, Pd, Pt, Ag, Ti, and W in the infrared and far infrared. *Applied Optics*, 1983, **22**(7): 1099 ~ 1120
- 7 朱健,王永昌,王勤. 胶体金纳米颗粒的荧光光谱特性. 光子学报, 2003, **32**(3): 357 ~ 360
Zhu J, Wang Y C, Wang Q. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(3): 357 ~ 360
- 8 孙艳,孙峰,杨玉孝,等. 用于纳米生物膜层厚度测试额度光纤生物传感器. 光子学报, 2002, **31**(6): 657 ~ 661
Sun Y, Sun F, Yang Y X, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **31**(3): 657 ~ 661

Gold and Silver Film Optical Fiber SPR Sensors

Cao Zhenxin¹, Wu Le'nan¹, Liang Dakai²

¹ Information Science & Engineering Lab, Dept. of Radio Engineering of Southeast University, Nanjing 210096

² The Aeronautical Science Key Laboratory for Smart Materials and Structures,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016

Received date: 2003-09-08

Abstract The type of metal films deposited on the surface of fiber core plays a very important role on the properties of an optical fiber surface plasmon resonance (SPR) sensor. The output spectra of gold and silver optical fiber SPR sensors are presented theoretically according to equation of the sensors and compared with experimental results. The results show that the theoretic output spectrum is consistent with experimental one for the silver sensors but not for the gold sensors. And the reason is given out in the end.

Keywords Physical optics; Optical fiber sensors; SPR; Metal films



Cao Zhenxin was born in Jiangsu Province. He received his M. S. degree from Aeronautical Science Key Laboratory for Smart Materials and Structures, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, China in 2002. He is now pursuing his Ph. D. in Signal and Information Processing Lab of Radio Engineering Department, Southeast University. His research interests include SPR sensors, signal and information processing etc.