

利用 SPR 效应测定可见光波段金膜折射率*

曹振新

(东南大学 毫米波国家重点实验室, 南京 210096)

摘 要:利用金膜光纤 SPR 传感器测定标准试剂折射率, 实现了对金膜折射率的测试. 给出金膜光纤 SPR 传感器总反射系数与金膜折射率等参量关系表达式. 采用经典金膜折射率计算结果与试验结果相比具有相当差距. 为此采用一组标准试剂进行试验, 对测试数据进行计算, 修正了可见光波段金膜的折射率.

关键词:SPR 效应; 光纤传感器; 金膜; 折射率

中图分类号: O435

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2008)08-1563-3

0 引言

基于表面等离子体共振 (Surface Plasmon Resonance, SPR) 效应的棱镜和光纤传感器广泛的应用于生化检测、环保检测等多个领域^[1-5]. 通常这些传感器中采用的金属膜为金膜或银膜^[6-7]. 根据光波导理论和表面等离子体共振理论, 可以得到针对光纤 SPR 传感器的计算公式^[8]. 该式容易通过实验验证^[9], 当金属膜为银膜时, 理论计算和实验测试结果相吻合. 这一现象表明获得的理论计算公式是合适的. 然而当金属膜是金膜时, 采用经典金光学参量^[10]进行的理论计算结果则与实验测试相差较多. 因此, 可以认为厚度为几十 nm 金膜的实际折射率与经典金光学参量有所不同.

本文通过建立金膜光纤 SPR 传感器总反射系数与金膜折射率等参量关系表达式, 分析了通过该表达式可以计算金膜折射率, 包括实部和虚部. 并设计了金膜光纤 SPR 传感测试系统, 利用标准试剂进行了测试. 根据测试数据重新计算了金膜在可见光波段的折射率.

1 原理

本论文研究的光纤 SPR 传感器结构如图 1. 采用圆柱形多膜光纤, 传感器由光纤纤芯 $n_0(\lambda)$ 、黏结层 $n_1(\lambda)$ 、金属层 $n_2(\lambda)$ 、调制层 n_3 和纤芯端头反射层组成, n_4 表示被测对象的折射率, I_{in} 表示单色入射光线, 并以入射角 α_i 从空气 (n_a) 耦合入光纤纤芯, 折射角为 φ_i , 纤芯/黏结层界面上以 θ_i 角发生全反射. I_{out} 表示出射光线, 探头长度为 l , 光纤纤芯直径为 d , 光纤数值孔径为 NA, 其中黏结层厚度为

d_1 , 金属层厚度为 d_2 , 调制层厚度为 d_3 ; 反射层仅仅对光线有反射作用, 不会发生表面等离子体共振, 因此与理论计算无关.

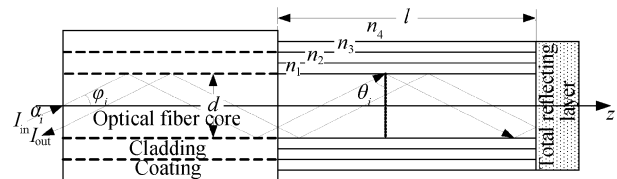


图 1 光线在光纤 SPR 传感器中的传播示意图

Fig. 1 Light propagation diagram in an optical fiber SPR sensor

该光纤 SPR 传感器中 p 光的总反射系数^[8]

$$R_p(\lambda, n_0, n_1, n_2, n_3, n_4, d, d_1, d_2, d_3, l) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M R_p^{N(l, d, \theta_i)} I(\varphi_i) \quad (1)$$

式中, $\varphi_i = 90^\circ - \theta_i$, $\theta_c \leq \theta_i \leq 90^\circ$, $400 \text{ nm} \leq \lambda \leq 900 \text{ nm}$. 金层的折射率为^[10]

$$n_{2g}(\lambda) = (9.1504e-06\lambda^2 - 0.14906e-01\lambda + 6.0947) + i(8.9024e-07\lambda^2 + 0.77787e-02\lambda - 2.001) \quad (2)$$

其它参量的具体说明请参见文献[9].

显然, 为了重新获得金膜的折射率, 在式(1)中只需要已知除 $n_2(\lambda)$ 以外的所有参量, 然后通过在不同波长上测试反射系数, 即可确定金膜的折射率, 包括实部和虚部. 因此, 式(1)可以表示为

$$R_p(\lambda, n_{2r}, n_{2i}) = R_p(\lambda, n_0, n_1, n_2, n_3, n_4, d, d_1, d_2, d_3, l) |_{\lambda, n_0, n_1, n_3, n_4, d, d_1, d_2, d_3, l = \text{constant}} \quad (3)$$

当该传感器放置于标准试剂中, 会发生等离子体共振效应, 反射系数对应于特定共振波长产生明显衰减. 显然, 根据测试反射系数 $\min\{R_p(\lambda, n_{2r}, n_{2i})\}$ 和对应的波长 $\lambda_{\text{resonant}}$, 利用式(3)可以计算出金膜折射率实部和虚部.

2 实验

实验测试系统如图 2^[9]. 被测溶液为 0% 到

* 国家自然科学基金(19872034)资助

Tel: 13821864422 Email: caozx@seu.edu.cn

收稿日期: 2007-07-11

65%的甘油水溶液,相应的光学参量如表 1. 其它参量同文献[9].

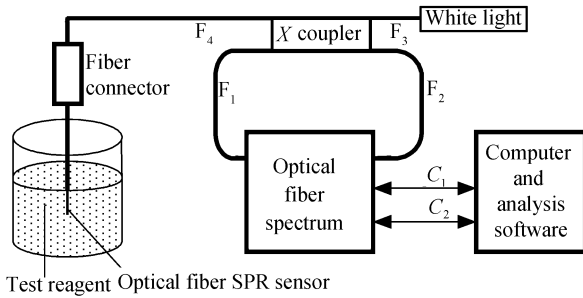


图 2 光纤 SPR 传感测试系统
Fig. 2 Optical fiber SPR sensing test system

表 1 不同配比的甘油水溶液光学参量

浓度/(%)	折射率
0	1.333 03
5	1.338 8
10	1.344 81
14	1.349 80
20	1.357 49
25	1.364 04
30	1.370 70
35	1.377 40
40	1.384 13
45	1.390 89
50	1.398 09
55	1.405 54
60	1.412 99
65	1.420 44

针对不同配比的标准试剂,采用图 2 的测试系统测定 $\min\{R_p(\lambda, n_{2r}, n_{2i})\}$ 和对应的波长 λ_{sp} . 同时改写式(2)为一般形式的表达式

$$n_{2g}(\lambda) = (c_r\lambda^2 + b_r\lambda + a_r) + i(c_i\lambda^2 + b_i\lambda + a_i) \quad (4)$$

由于没有重新计算金膜光学参量,而只是针对经典光学参量利用测试数据做修正. 因此式(4)可进一步变换为

$$n_{2g}(\lambda) = \left[\delta c_r c_r \left(\lambda + \frac{b_r}{2c_r} \right)^2 + \left(-\frac{b_r^2}{4c_r} + a_r \right) \right] + i \left[c_i \left(\lambda + \frac{b_i}{2c_i} \right)^2 + \left(-\frac{b_i^2}{4c_i} + a_i \right) + \delta c_i \right] \quad (5)$$

式中 δc_r 和 δc_i 为分别为实部修正参量和虚部修正参量.

根据测试数据和经典金膜光学参量,利用式(3)进行计算后可以获得对应不同波长的修正 δc_r 和 δc_i 以及修正后的金膜折射率实部 n_{2gr} 和虚部 n_{2gi} ,如表 2.

表 2 修正后的金膜折射率

λ/nm	δc_r	δc_i	n_{2gr}	n_{2gi}
558	0.2	0.640	0.145 6	3.247 9
566		0.620	0.134 5	3.333 3
575		0.645	0.125 7	3.446 3
582		0.695	0.121 5	3.540 4
596		0.755	0.111 6	3.706 3
608		0.820	0.103 8	3.859 8
623		0.885	0.094 2	4.040 1
639		0.945	0.083 2	4.242 4
657		1.000	0.070 8	4.476 0
679		1.060	0.057 8	4.751 2
706		1.130	0.044 2	5.100 6
741		1.265	0.033 1	5.553 2
786		1.464	0.025 5	6.145 4
850		1.730	0.026 3	6.965 5

3 结论

本文通过建立光纤 SPR 传感器总反射系数与各参量的关系表达式,利用经典金膜光学参量进行计算,发现金膜参量在可见光波段并不准确. 因此采用了一组标准试剂进行了测试,利用获得的测试结果对金膜参量进行了修正,得到了比较准确的金膜光学参量. 当然这里给出的数据并不十分完美,因为采用的测试系统准确度有限. 此外,本文的修正过程采用的是比对修正,即根据实验和理论的差异来修正金膜的色散特性参量,只是一个近似方法. 实际上,理想的修正需要通过严格的求解方程组来完成,即认为金膜的色散特性实部和虚部分别可以由一个二次多项式来描述,然后把该色散特性代入式(1),求解 6 元超越方程组,这样可以对实部和虚部进行比较理想的修正,然而这需要更高准确度的实验系统.

参考文献

[1] JORGENSEN R J. Surface plasmon resonance based bulk optic and fiber optic sensors [D]. Washington: University of Washington,1993.

[2] JIANG Hong. The study on heterodyne interferometric system based on phase measurement and its applications[D]. Beijing: Tsinghua University,1999.
蒋弘. 基于相位测量的外差干涉系统及其应用研究[D]. 北京:清华大学,1999.

[3] LÜ Qiang, HUANG De-xiu, YUAN Xiu-hua. Stability research of water quality analysis system based on surface plasmon resonance[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(7):1268-1272.
吕强,黄德修,元秀华. 基于表面等离子体共振的水质分析系统稳定性研究[J]. 光子学报, 2007, **36**(7):1268-1272.

- [4] ZHU Jian, WANG Yong-chang, WANG Qin. Fluorescence characteristics of au colloidal nanoparticles[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(3):357-360.
朱健,王永昌,王勤. 胶体金纳米颗粒的荧光光谱特性[J]. 光子学报, 2003, **32**(3):357-360.
- [5] SUN Yan, SUN Feng, YANG Yu-xiao, *et al.* Fiber optic direct-sensing biosensor applied in detecting biolayer thickness of nanometer grade[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(6):657-661.
孙艳,孙锋,杨玉孝,等. 用于纳米生物膜层厚度测试的光纤生物传感器[J]. 光子学报, 2002, **31**(6):657-661.
- [6] OTTO A. Excitation of surface plasma waves in silver by the method of frustrated total reflection[J]. *Z Physik*, 1968, **216**:398-410.
- [7] KRETESCHMANN E, RAETHER H. Radiative decay of non-radiative surface plasmons excited by light[J]. *Z Naturforsch*, 1968, **23A**:2135-2136.
- [8] CAO Zhen-xin, WU Le-nan, WANG Xing. Theoretical study of optical fiber surface plasmon resonance sensors[J]. *Journal of Southeast University*, 2004, **34**(5):582-584.
曹振新,吴乐南,王兴,等. 关于光纤表面等离子体波传感器的理论研究[J]. 东南大学学报, 2004, **34**(5):582-584.
- [9] CAO Zhen-xin, WU Le-nan, LIANG Da-kai. Gold and silver film optical fiber SPR sensors [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(10):1169-1171.
曹振新,吴乐南,梁大开. 金膜和银膜光纤 SPR 传感器[J]. 光子学报, 2004, **33**(10):1169-1171.
- [10] 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[J]. *Appl Opt*, 1983, **22**(7):1099-1120.

Measurement of Gold Film Refractive Index at Visible Light Bandwidth Based on SPR Effect

CAO Zhen-xin

(State key Lab of Millimeter Wave, Southeast University, Nanjing 210096 China)

Received date: 2007-07-11

Abstract: Measurement of gold film refractive index at visible light bandwidth by using optical fiber Surface Plasmon Resonance (SPR) sensor for a group standard reagent is realized. The relationship between total reflective coefficient and parameters including refractive index of gold film etc is listed. Because the calculation result by using classical gold refractive index is different from the test result much more, a revision method is used to get better refractive index of gold film at visible light bandwidth.

Key words: SPR effect; Optical fiber sensor; Gold film; Refractive index



CAO Zhen-xin was born in 1976 and received M. S. degree from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics in 2002 and PH. D degree from Southeast University in 2005 respectively. Now he is working in the state key lab of millimeter wave and his main research interest includes SPR, optics, RF technique, and antenna design etc.