

文章编号: 0253-2239(2010)05-1354-04

基于偏振分光棱镜的表面等离子体波传感系统

万 艳 梁大开 曾 捷 赵志远 张晓丽

(南京航空航天大学智能材料与结构航空科技重点实验室, 江苏 南京 210016)

摘要 常规棱镜表面等离子体共振 (SPR) 传感器检测系统共振波谷浅且谷底平坦, 从而导致共振波长不易确定。在常规棱镜 SPR 传感器系统基础上, 加入偏振分光棱镜 (PBS), 构建了一种新型棱镜 SPR 传感器系统。对 PBS 的分光带宽展宽进行了研究, 提出了基于膜系设计的展宽方法。在无水乙醇检测的实验中, 滤除 s 偏振光后, 共振波谷谷底曲率半径由 86.2394 减小到 39.3990, 近似减少为滤除 s 偏振光之前的 1/2, 这与理论分析相吻合。采用常规和新型棱镜 SPR 检测系统分别对折射率在 1.32~1.39 内的 6 种液体进行了测量, 分辨率从 1.62×10^{-4} 提高到 1.55×10^{-4} 。该系统能较好地滤除 s 偏振光, 使得共振波谷更加尖锐, 从而提高共振光谱的检测精度。

关键词 传感器; 偏振分光棱镜 (PBS); 表面等离子体共振 (SPR); 棱镜传感器; 曲率半径

中图分类号 TN253 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103005.1354

Prism Surface Plasmon Wave Sensor System Based on Polarizing Beam Splitter

Wan Yan Liang Dakai Zeng Jie Zhao Zhiyuan Zhang Xiaoli

(Aeronautical Science Key Laboratory for Smart Materials and Structures,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China)

Abstract In the traditional prism surface plasmon resonance (SPR) sensor system, the resonance trough is shallow and the valley is smooth, which causes the resonant wavelength difficult to determine. A novel detecting system is built which added a polarized beam splitter (PBS) based on traditional prism SPR sensor system. In the experiment of alcohol detection, when the S polarized light is filtered, the resonance radius of curvature decreases from 86.2394 to 39.3990, similar to the S polarized light presented's 50%, which coincides with the theoretical analysis. Traditional and novel prism SPR sensor system is used to measure 6 kinds of liquid whose refractive index is 1.32~1.39. The resolution ranges from 1.62×10^{-4} to 1.55×10^{-4} . The detecting system with filter S polarized light that doesn't excite SPR effect, which making a more acute resonance trough, thus detecting system has been improved.

Key words sensor; polarizing beam splitter (PBS); surface plasmon resonance (SPR); prism sensor; radius of curvature

1 引 言

表面等离子体共振效应 (surface plasmon resonance, SPR) 是一种发生在金属与电介质分界面的物理光学现象。SPR 传感器在生物、化学和物理等多个领域都得到了广泛应用^[1~3], 其中棱镜 SPR 传感器发展最为成熟, 应用也最为广泛。常规波长调制型棱镜 SPR 传感器检测系统能实现基本折射率检测, 但由于所用的宽带光源中同时存在 p, s 偏振光, 使得共振波谷过浅且谷底平坦, 影响最小

反射光强点的确定及共振波长的检测, 降低系统检测精度。C. L. Wong 等^[4,5]在相位调制型和角度调制型检测系统中利用 Wollaston 棱镜分开 p 偏振光和 s 偏振光, 但只能将二束光分开较小角度, 不适合宽带光源分光。

考虑到偏振分光棱镜 (polarizing beam splitter, PBS) 能将二束光分开成 90° , 所以采用 PBS 来滤除 s 偏振光。通过研究 PBS 的展宽方法, 确定使用膜系设计展宽常规 PBS 的分光带宽, 并将其应

收稿日期: 2009-06-11; 收到修改稿日期: 2009-07-08

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (60535020)、国家自然科学基金 (60477031) 和南京航空航天大学研究生创新基金 (200901002) 资助课题。

作者简介: 万 艳 (1986—), 女, 硕士研究生, 主要从事新型光纤传感器方面的研究。

E-mail: woshiwanyan@yahoo.com.cn

导师简介: 梁大开 (1956—), 男, 博士, 教授, 主要从事光纤光栅传感技术方面的研究。E-mail: liangdk@nuaa.edu.cn

用到波长调制型棱镜 SPR 传感器检测系统中。

2 基本原理

2.1 偏振光对棱镜 SPR 传感器的影响

根据麦克斯韦(Maxwell)方程,棱镜 SPR 传感器反射率为^[6~8]

$$R^t = \left| \frac{r'_{12} + r'_{23} \exp(i2k_{z2}d_2)}{1 + r'_{12}r'_{23} \exp(i2k_{z2}d_2)} \right|^2, \quad t = p, s \quad (1)$$

式中

$$r'_{ij} = \frac{E'_i - E'_j}{E'_i + E'_j}, \quad t = p, s \quad (2)$$

$$E'_m = \begin{cases} k_{zm}/n_m^2, & t = p \\ k_{zm}, & t = s \end{cases} \quad (3)$$

d_2 为金属膜厚度, $t=p, s$ 分别表示 p 和 s 偏振光, k_{zm} 为等离子体波矢在金属/环境介质交界面垂直方向上的分量, $m=i, j, i=1, 2, j=i+1$, 下标 1, 2, 3 分别表示棱镜、金属膜和液体介质。

未进行分光时,系统总反射率为

$$R = \frac{R^p I^p + R^s I^s}{I^p + I^s}, \quad (4)$$

式中 I^p 和 I^s 分别为 p 偏振光和 s 偏振光强度,可认为入射光中二者相等。由(4)式可得

$$R = \frac{R^p + R^s}{2}. \quad (5)$$

由于表面等离子体波矢在金属/环境介质交界面平行方向上无分量,而 s 偏振光波矢平行于该方向,不能与之耦合,因此不能激发 SPR 效应。 R^s 近似为 1,远大于 R^p ,且 $R > R^p$ 。根据(1)式和(5)式可分别绘得仅含 p 偏振光、仅含 s 偏振光和二者同时存在时的反射曲线,如图 1 所示。

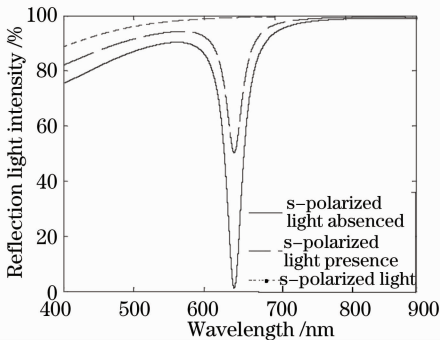


图 1 S 偏振光影响效果仿真图

Fig. 1 Simulation diagram of S polarized light's impact effect

从图 1 中可见滤除 s 偏振光后,共振波谷深度增加了近一倍,采用谷底曲率半径表征其尖锐程度。对光谱进行多项式拟合后,将拟合曲线最低点的曲率半

径作为原光谱谷底曲率半径。值得注意的是,采用十阶多项式对整个光源波长范围进行拟合,得到滤除 s 偏振光前后的光谱的拟合均方根误差分别为 15.1078 和 14.8432,这说明由于数据量太大而导致拟合阶次高,拟合效率低。所以只对共振波长左右 10 nm 范围内占整个数据量 1/25 的数据进行拟合,图 2 为光谱拟合曲线图。滤除 s 偏振光前后的光谱拟合均方误差分别为 0.0266 和 0.1065,可知曲线拟合效果很好。计算可得滤除 s 偏振光后谷底曲率半径为 105.1711,小于滤除前的 210.3663,减少近 1/2。这说明共振波谷明显变尖锐,更利于共振波长的检测。

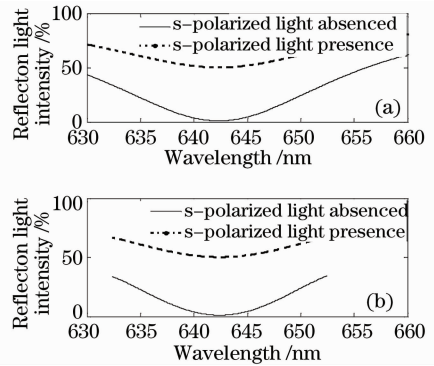


图 2 原始光谱(a)及四阶多项式拟合的光谱曲线(b)

Fig. 2 Initial relative reflection spectra (a) and fitting curves with four-order polynomial (b)

2.2 展宽 PBS 分光带宽的研究

考虑利用偏振分光棱镜的分光特性来滤除 s 偏振光。但由于常规 PBS 分光带宽大约只有 250 nm,相对于系统中 600 nm 的光源带宽过于狭窄,不满足对波长调制型棱镜 SPR 传感器检测系统的分光要求,故需自行设计大带宽 PBS 棱镜分光膜系。

图 3 为常规 PBS 的基本结构,PBS 通常包含两个等腰直角棱镜和一个 $\lambda/4$ 膜系。该膜系薄膜有效厚度为入射光中心波长的 1/4,可保证 s 偏振光的高反射率^[9~11]。有效厚度定义为

$$d_{ei} = d_i \cos \theta_i, \quad i = H, L \quad (6)$$

式中 d_i 表示薄膜实际厚度, θ_i 表示光折射角,下标 i

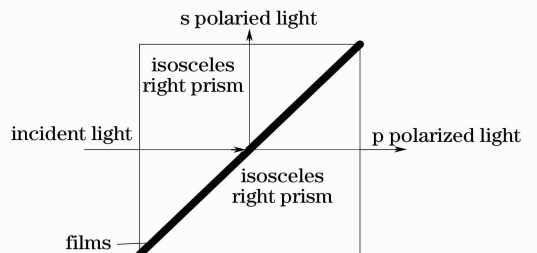


图 3 PBS 结构示意图

Fig. 3 Pictorial diagram of PBS

表示相应材料, H 和 L 分别为高折射材料和低折射率材料。

偏振分光棱镜中的多层膜系通常构成为 (HL)^{(N-1)/2} H, N 表示镀膜层总数。分光带宽的展宽一般通过改变膜层的厚度来实现, 有等差递增法和等比递增法两种^[11]。由于两种方法效果相当, 为便于计算选用后者作为展宽方案。各层厚度可表示为 $t, qt, q^2t, \dots, q^{N-1}t$, 其中 t 为入射光所经过的第一层膜的厚度, q 为等比数列的公比。

以 500~900 nm 波长范围内的分光膜系设计为例, 若按照 $\lambda/4$ 膜系的膜层厚度选取规则用 700 nm 设计, 则分光范围约为 575~825 nm, 窄于实验要求的 500~900 nm。应用厚度展宽法后, 也只能将分光带宽向低波长方向扩展, 实现 500~825 nm 范围的分光。因此按照中心波长为 800 nm 设计, 再用厚度展宽法展宽后即成功保证了 500~925 nm 范围内 s 偏振光的低透射率, 满足了分光要求。

选用折射率分别为 2.281 和 1.376 的 ZnS 和 MgF₂ 为镀膜材料, 折射率为 1.65 的 ZF1 重火石玻璃为棱镜材料。 $t=200$ nm, $q=0.97, N=21$ 。研究中采用 MASS 软件(浙江大学薄膜研究所)进行仿真, 可得展宽带宽后 p 偏振光和 s 偏振光透射率曲线如图 4 所示。

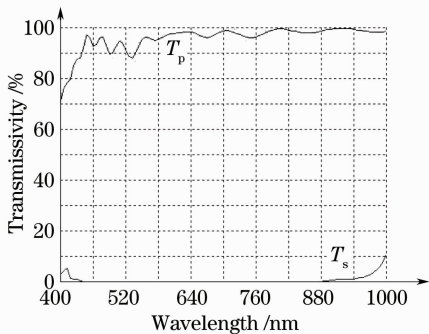


图 4 p 偏振光和 s 偏振光的透射率曲线
Fig. 4 Transmission of p and s polarized light

从图 4 可看出, 500~900 nm 范围内 p 偏振光透射率 $T_p \approx 1$, s 偏振光的透射率 $T_s \approx 0$, 满足分光要求。

3 实 验

基于 p 偏振光的棱镜 SPR 传感器检测系统结构如图 5 所示。光源发出的宽带光经 PBS 分光后入射到棱镜 SPR 传感器, 然后由凸透镜聚焦耦合入射到光谱仪。首先, 将常规检测系统的反射光谱作为基信号保存, 再用新型检测系统将反射光谱信号与基信号进行比较, 就可知滤除 s 偏振光前后棱镜

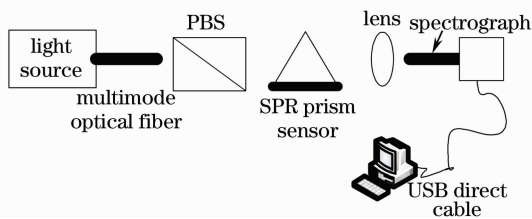


图 5 检测系统的结构示意图

Fig. 5 Structure of examination system

SPR 检测效果的变化。

实验中分别采用常规和新型检测系统测量无水乙醇, 光谱如图 6 所示。从图 6 能发现滤除 s 偏振光后共振谷明显加深。对实验数据进行小波滤波和多项式曲线拟合后, 计算谷底曲率半径。计算得检测系统加 PBS 前后的谷底曲率半径分别为 86.239 和 39.399, 这与理论分析结果相吻合。

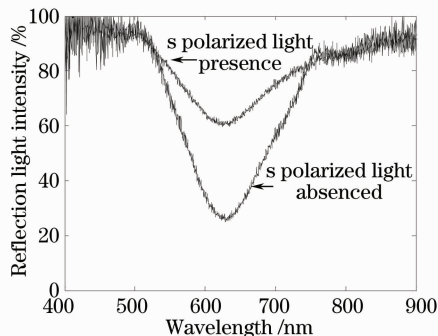


图 6 两种情况乙醇反射光谱

Fig. 6 Relative reflection spectra for alcohol in two different cases

常温下选取 6 种折射率相近的液体, 应用常规和新型棱镜 SPR 传感器检测系统分别对其进行检测, 得到光谱曲线如图 7 所示。可见, 常规检测系统

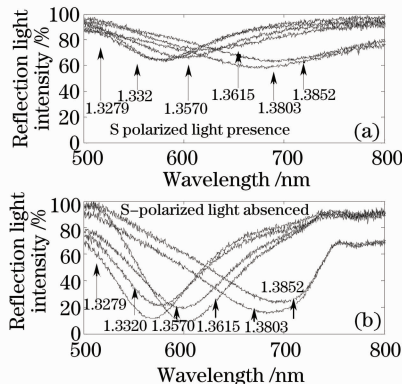


图 7 不同液体对应的反射光谱图。(a) 常规检测系统; (b) 新型检测系统

Fig. 7 Relative reflection spectra for different liquids. (a) traditional detecting system; (b) novel detecting system

几乎不能区分 6 种液体,而新型检测系统则能将折射率接近的各液体明显区分开,显著提高了棱镜 SPR 传感器检测系统的分辨率。加 PBS 前后的检测系统的分辨率分别为 1.62×10^{-4} 和 1.55×10^{-4} 。

图 8(a)为折射率与反射光谱波谷深度的对应图,加 PBS 前后对应于理论值的均方根误差分别为 5.2809 和 2.0710。图 8(b)为折射率与反射光谱波

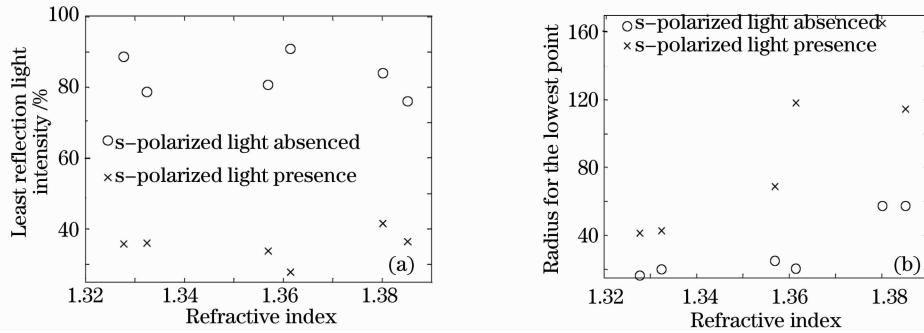


图 8 折射率与反射光谱最低点深度(a)曲率半径(b)曲线

Fig. 8 Corresponding diagram for refractive index and depth (a) radius (b) of the deepest point of reflecting spectrum

4 结 论

在常规棱镜 SPR 传感器检测系统的基础上,通过增加 PBS 滤除无法激发 SPR 效应的 s 偏振光,设计了新型检测系统。理论分析和实验结果均表明,滤除 s 偏振光后能显著提高共振波谷的深度和尖锐度,提高共振波长的检测精度。测量无水乙醇得到滤除 s 偏振光前后的谷底曲率半径由 86.2394 减小为 39.3990,共振波谷明显变尖锐。采用常规和新型棱镜 SPR 检测系统,分别对折射率在 1.32~1.39 范围内的 6 种液体测量后发现,分辨率从 1.62×10^{-4} 提高至 1.55×10^{-4} 。不同折射率液体滤除 s 偏振光前后对应得到的反射光谱,其最低点的深度及曲率半径相对于理论值的均方根误差分别为 5.2809 和 2.0710 及 17.6789 和 10.4008。研究表明,此系统优化了波长调制型棱镜 SPR 传感器共振波长的检测和分析,稳定性和检测精度得到了提高。

参 考 文 献

- 1 J. Dostalek, J. Ctyroky, J. Homola *et al.*. Surface plasmon resonance biosensor based on integrated optical waveguide[J]. *Sensors and Actuat. B-Chem*, 2001, **76**(1): 8~12
- 2 E. Krestschmann, H. Raeter. Radiative decay of non-radiative surface plasmons excited by light [J]. *Z. Naturforsch A*, 1968, **23**(9): 2135~2136
- 3 B. D. Gupta, K. S. Anuj. Sensitivity evaluation of a multi-layered surface plasmon resonance-based fiber optic sensor[J]. *Sensors and Actuat. B-Chem*, 2004, **20**(1): 1~6
- 4 C. L. Wong, H. P. Ho, Y. K. Suen *et al.*. Real-time protein biosensor arrays based on surface plasmon resonance differential

谷曲率半径的对应图,加 PBS 前后对应于理论值的均方根误差分别为 17.6789 和 10.4008。以上所有均方根误差均根据最小二乘法原理对实验数据计算得到,表示实验值与理论值的差异。新型检测系统的反射光谱较常规检测系统的反射光谱深度有所增加,最低点曲率半径减小,与理论值相比误差更小,系统相对更加稳定。

- phase imaging [J]. *Biosens. Bioelectron.*, 2008, **24**(4): 606~612
- 5 J. Dostálek, R. F. Roskamp, W. Knoll. Coupled long range surface plasmons for the investigation of thin films and interfaces [J]. *Sensors and Actuat. B-Chem*, 2009, **139**(1): 9~12
- 6 Gu Zhengtian, Feng Shimeng, Liang Peihui *et al.*. Solgel film sensor based on surface plasmon resonance [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(1): 83~87
- 顾铮天, 冯仕猛, 梁培辉 等. 表面等离子体激元共振溶胶-凝胶薄膜传感器[J]. *光学学报*, 2001, **21**(1): 83~87
- 7 Zeng Jie, Liang Dakai, Zeng Zhenwu *et al.*. Reflective optical fiber surface plasma wave resonance sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(3): 404~409
- 曾 捷, 梁大开, 曾振武 等. 反射式光纤表面等离子体波共振传感器特性研究[J]. *光学学报*, 2007, **27**(3): 404~409
- 8 Cao Di, Zhang Huifang, Tao Feng. Theoretical study on properties of surface plasmon polaritons at interfaces of metamaterials with three-layered asymmetric structures [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(8): 1601~1610
- 曹 迪, 张惠芳, 陶 峰. 三层不对称人工电磁材料界面处表面等离子体激元的理论研究 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(8): 1601~1610
- 9 Wang Yanzhi, Zhang Weili, Fan Zhengxin *et al.*. Analysis for accurately fitting the refractive index of SiO₂ thin film [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(5): 760~761
- 王胭脂, 张伟丽, 范正修 等. SiO₂ 薄膜折射率的准确拟合分析 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(5): 760~761
- 10 Tang Jinfa, Zheng Quan. *Optics of Thin Film* [M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishing House, 1984. 154~163
- 唐晋发, 郑 权. *应用薄膜光学* [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1984. 154~163
- 11 Ge Guoku, Li Chunfang, Duan Tao *et al.*. Enhancement of Goos-Hönchen shift in prism film coupling configuration [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(4): 768~772
- 葛国库, 李春芳, 段 骁 等. 棱镜-薄膜耦合结构中光束 Goos-Hönchen 位移的增强 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(4): 768~772