

基于光盘光栅的表面等离子体共振传感器

刘 畅 邹正峰 陈淑芬 付 雷 孟彦彬 张兵心 陈 博 林为秀

(北京理工大学光电学院, 北京 100081)

摘要 采用 CD 光盘光栅作为表面等离子体共振 (SPR) 传感器的耦合元件, 通过检测共振角的变化对液体浓度进行传感测量。结果表明 CD 光栅耦合型 SPR 传感器对葡萄糖溶液的灵敏度可达 3% (质量分数), 理论分辨率为 1% (质量分数)。通过模拟不同光栅周期、光栅槽形和待测介质折射率对共振曲线的影响, 发现缩短光栅周期、使用正弦槽形的光栅作为耦合基底, 都可以进一步提高这种传感器的灵敏度。

关键词 传感器; 光栅传感器; 传感器技术; 表面等离子体共振; 共振角

中图分类号 TP212.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0314001

Surface Plasmon Resonance Sensor Based on Compact Disk Grating

Liu Chang Zou Zhengfeng Chen Shufen Fu Lei Meng Yanbin

Zhang Bingxin Chen Bo Lin Weixiu

(School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract The compact disc (CD) is used as a grating-coupled element in the surface plasmon resonance (SPR) sensor. And the changes in solution concentration are measured by detecting the resonance angle. The results show that the CD grating-coupled SPR sensor's sensitivity to the glucose solution is low to mass fraction of 3%, and the theoretical resolution is mass fraction of 1%. The resonance curves with different grating periods, grating groove forms and refractive indexes of analyte are simulated and the results show that reducing the grating period or using the sinusoidal grating as coupling element can further improve the sensitivity of the sensor.

Key words sensors; grating sensor; sensor technique; surface plasmon resonance; resonance angle

OCIS codes 280.4788; 240.6680; 050.2770; 260.5740

1 引 言

表面等离子体共振 (SPR) 是被电磁波所激发的存在于金属和电介质界面上的电荷密度振动效应^[1], 对环境介质折射率变化非常敏感。目前, 基于 SPR 效应的传感器结构已被广泛应用于生化与环保监测、纳米光子器件^[2]等领域, 并在基因检测^[3]、工业湿度监控^[4,5]等领域取得重大进展。而这些研究中, 相当部分集中在基于 Kretschmann 模型的棱镜 SPR 传感器的结构优化与设计。在这种传感结构中, 光经过棱镜激发金属薄层的 SPR 效应, 待测介质位于金属膜的另一侧, 因此避免了待测物周围环境的变化给测量带来的影响。但是只有厚度在某一定范围内的金属膜才能激发较为理想的 SPR

效应, 因此具有一定加工难度, 对工艺要求较高。

基于光栅耦合的 SPR 传感器可以很好地弥补这一缺陷, 这种结构不需要棱镜作为激发介质, 不需要特定厚度的金属膜, 可采用肉眼可见厚度的金属膜, 基底的光学质量对传感器性能也没有决定性影响。光栅耦合型 SPR 传感器另一引人注目的特性在于该结构可以采用塑料光栅作为基底, 比如说商业通用的光盘 (CD)、数字多功能光盘 (DVD) 等; 2004 年 Fontana^[6] 利用金光栅型 CD-R 光盘作为 SPR 载体进行了理论和实验研究; 2006 年 Singh 等^[7] 利用 CD-R 光盘研制了 SPR 生物分子传感阵列, 测得了牛血清蛋白与羧基、胺基和羟基自组装敏感膜的结合。

收稿日期: 2011-10-14; **收到修改稿日期**: 2011-11-28

作者简介: 刘 畅 (1986—), 女, 硕士研究生, 主要从事表面等离子体共振传感器方面的研究。

E-mail: xiongxiong721@sina.com

导师简介: 邹正峰 (1974—), 男, 博士, 讲师, 主要从事光纤传感器方面的研究。E-mail: zouzhengfeng@163.com

本文采用一种基于 CD 光栅耦合的 SPR 传感器, 实验中测试了不同浓度葡萄糖溶液对应的共振角, 实现了 SPR 传感器对周围介质参数变化的检测。为了确保检测灵敏度和精度最优, 对影响传感器灵敏度的参量进行了理论分析, 通过数值模拟获得了具有指导意义的研究结果。

2 基本原理

入射光与金属表面等离子体动量匹配时, 也就是当入射光沿界面方向的波矢 k_x 与表面等离子体波矢 k_{SP} 相等时, 才能激发金属-电介质界面处的 SPR 效应。金属的介电常数可以表示为^[8]

$$\epsilon_M = \epsilon'_M + j\epsilon''_M. \quad (1)$$

电介质的介电常数为 ϵ_D , 平行于界面的表面等离子体波矢可表示为

$$k_{SP} = k'_{SP} + jk''_{SP}, \quad (2)$$

实部和虚部分别代表振动的传播常数和阻尼常数。在低损耗范围内, 表面等离子体波矢经一级近似后, 实部可表示为

$$k'_{SP} = \frac{2\pi}{\lambda_0} \sqrt{\frac{\epsilon'_M \epsilon_D}{\epsilon'_M + \epsilon_D}}. \quad (3)$$

式中 λ_0 为入射光波长。由于空气中入射光的波矢小于(3)式的 k'_{SP} , 所以需要耦合器件来激发 SPR。

1984 年, Tiefenthaler 等^[9]首次提出以衍射光栅作为光波耦合元件的 SPR 传感器, 其后又相继有一些以衍射光栅作为光学耦合元件的研究报道。金属光栅可以用来实现动量匹配。第 m 级衍射光沿 x 方向的波矢大小可表示为

$$k'_x = \frac{2\pi}{\lambda_0} \sqrt{\epsilon_D} \sin \theta_0 + m \frac{2\pi}{\Lambda}, \quad (4)$$

式中 θ_0 为入射角, $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ 为衍射级。

当耦合发生时^[10]

$$k'_{SP} = k'_x, \quad (5)$$

由(3)、(4)式可得

$$\theta_{SP} = \arcsin \left[\pm \sqrt{\frac{\epsilon'_M}{\epsilon'_M + \epsilon_D}} - m \frac{\lambda_0}{\Lambda \sqrt{\epsilon_D}} \right], \quad (6)$$

式中 θ_{SP} 为共振角, 不同衍射级的共振角位置不同, $m=1$ 级衍射光发生共振时耦合最强, 但其自身原始光强较弱, 且由光栅方程

$$\Lambda(\sin \theta \pm \sin i) = m\lambda \quad (7)$$

可得, 当入射角 i 改变时, 衍射角 θ 与入射光波长等变量相关, 与入射角关于法线不对称, 不便于角度调制; 而 0 级衍射光共振现象足够明显, 且便于探测角度, 所以文中选择 0 级衍射光为检测光^[5], 环境液体

介质折射率的任何微弱变化, 将会引起反射光强最小值所对应入射光角度即共振角度的偏移。

3 影响共振曲线的参数模拟

由于光栅 SPR 反射光强不仅受到被测介质折射率变化的影响, 而且还对光栅激励结构参数变化敏感。利用光栅仿真软件(PCGrate, International Intellectual Group, Inc., Penfield, NY)来分析各参数对共振曲线的影响。

3.1 光栅周期对共振曲线的影响

当入射光为波长 632.8 nm 的 p 偏振光, 光栅槽形为梯形, 待测介质为空气, 仿真光栅周期在 1000~2000 nm 之内变化时, 得到的共振曲线如图 1 所示。由图 1 可以看出, 光栅周期增大时共振峰逐渐变宽。

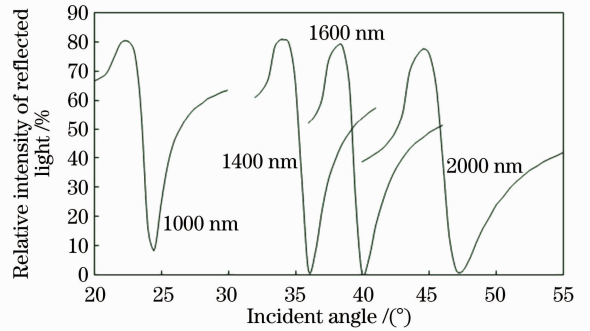


图 1 光栅周期对 SPR 曲线的影响

Fig. 1 Effect of grating period on SPR curves

3.2 光栅槽形对共振曲线的影响

当入射光为波长 632.8 nm 的 p 偏振光, 待测介质为空气, 光栅周期为 1600 nm 时, 仿真光栅槽形分别为正弦、正弦梯形、梯形, 得到共振曲线如图 2 所示, 可算得其半峰全宽分别为 0.9°、1.6°、3.5°, 可见采用正弦槽型的光栅可获得较好的共振响应。

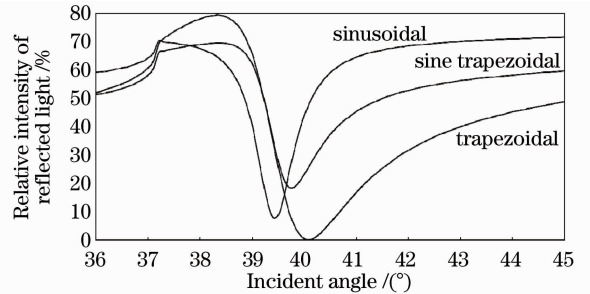


图 2 光栅槽型对 SPR 曲线的影响

Fig. 2 Effect of grating groove form on SPR curves

3.3 共振角与样品折射率的关系

当入射光为波长 632.8 nm 的 p 偏振光, 光栅

槽形为梯形,光栅周期为 1600 nm 时,仿真得到待测介质折射率分别为 1.0、1.1、1.2、1.3、1.4 时的共振角,如图 3 所示,相关系数 $R^2 = 0.999$,即共振角与折射率线性关系良好;SPR 传感器即是利用这一关系,通过测量共振角的变化检测待测介质折射率。

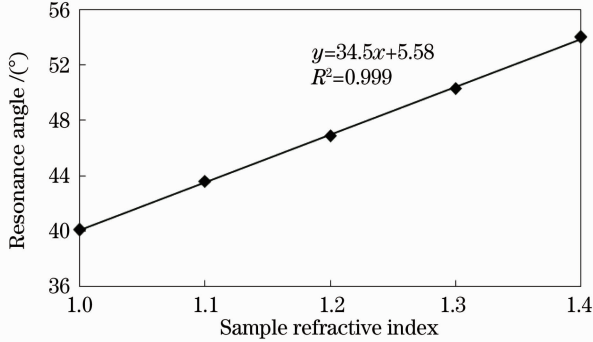


图 3 样品折射率与共振角的关系曲线

Fig. 3 Curve between analyte refractive index and resonance angle

4 实验测试

4.1 实验系统

传感器整体由光学系统、传感系统、检测系统、机械转动系统四部分构成,实验装置如图 4 所示。

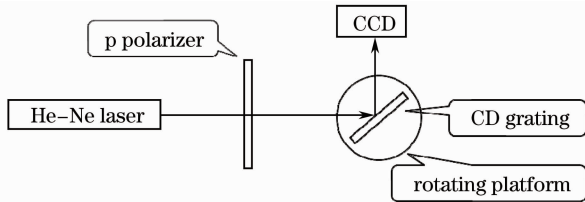


图 4 实验装置图

Fig. 4 Experimental diagram

光学系统包括光源和光路,用于产生合乎性能要求的入射光^[11]。理论上 550 nm 以上光波均可激发金的 SPR 效应,考虑等离子体共振厚度与激发波长成反比,入射光波长越短则 SPR 效果越明显,故选用 10 mW 的 633 nm He-Ne 激光器,且这个波长为红色可见光,便于调整光路。由于只有 p 偏振光能激发 SPR 效应,使用 p 偏振片可以滤除 s 偏振光,使得共振峰更加尖锐,从而增强 SPR 信号提高共振光谱的检测精度^[12]。

传感系统以 Kodak CD-R 金盘(容量 700 Mb、时长 80 Min)为基片,其反射层为 24 K 金。CD-R 光盘采用 4 层结构形式:底层为聚碳酸酯透明塑料注塑成形的衬盘,第二层为镀在衬底上的很薄的有机染料记录层,第三层使用厚度 70~100 nm 的抗

腐蚀金膜作反射层,顶层为 10~30 μm 的涂漆保护层。CD-R 光盘的塑料衬盘上预先刻有用于记录信息的螺旋形“光道”,可看成圆光栅。实验中将光盘切割成小块,放入立式染色缸,加入浓硝酸浸泡 4 min,即可去除顶层涂漆保护层,裸露出金光栅;依次用无水乙醇、蒸馏水冲洗后氮气吹干即完成 SPR 光栅基底的制备。此光栅周期约 1600 nm,幅度约 110 nm^[13]。

检测系统采用黑白线阵 CCD 检测 0 级衍射光的强度并记录共振峰的位置,以达到对待测物进行分析的目的。

机械转动系统是角度分辨率为 0.1° 的电动转台,光源发出的光束首先发生衍射,0 级衍射光被 CCD 接收。激光束与 SPR 基片法线的夹角为入射角 θ ,由单片机控制转台获得。

4.2 SPR 传感器测试葡萄糖溶液浓度

葡萄糖溶液的折射率与浓度成线性关系

$$n = 1.33230545 + 0.00011889C, \quad (8)$$

式中 n 为折射率, C 为葡萄糖溶液的浓度^[14]。依据此线性关系及共振角-待测介质折射率的线性关系,可以定量测量葡萄糖溶液的浓度。

实验前配制质量分数分别为 3%、6%、9%、12% 的葡萄糖溶液作为待测介质,将传感芯片浸于葡萄糖溶液中,样品池为透明圆柱烧杯,入射光透过待测介质照射到传感芯片区,并由 CCD 记录探测反射光强曲线,每个浓度的葡萄糖溶液测试不少于 8 次,同时记录此浓度对应的角度,取平均值。

实验得到其共振角分别为 51.9°、52.2°、52.6°、52.7°、53.0°,结果如图 5 所示。计算可得当葡萄糖溶液的质量分数每改变 3%,对应共振角改变值约 0.3°,即当转台角度分辨率为 0.1° 时,理论上可探测到葡萄糖溶液质量分数改变值为 1%,由(8)式计算,即折射率改变值为 10^{-3} 。

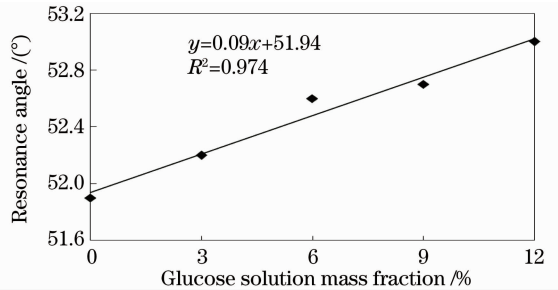


图 5 葡萄糖溶液浓度与共振角的关系曲线

Fig. 5 Curve between glucose solution concentration and resonance angle

5 结 论

采用 CD 光盘作为 SPR 传感器的耦合基底,自制传感芯片。通过模拟不同光栅周期、光栅槽形和待测介质折射率对共振曲线的影响,发现缩短光栅周期、使用正弦槽形的光栅作为耦合基底,都可以进一步提高这种传感器的灵敏度。

实验测试了质量分数分别为 3%、6%、9%、12% 的葡萄糖溶液的浓度-共振角曲线,结果表明当机械转动系统角度分辨率为 0.1° 时,该 CD 光栅耦合型 SPR 传感器理论上可探测到葡萄糖溶液质量分数改变值为 1%,即折射率改变值为 10^{-3} 。

参 考 文 献

- 1 Fu Yunliang, Fu Jun, Wu Yingcai. Development and application of surface plasmon resonance sensor technique [J]. *Laser Journal*, 2006, **27**(6): 15~17
符运良, 傅 军, 吴英才. 表面等离子共振传感技术的发展与应用[J]. 激光杂志, 2006, **27**(6): 15~17
- 2 Zhang Xingfang, Zhang Lamei, Fan Qunfang *et al.*. Tunable localized surface plasmon resonance of gold nanoshell particle[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(9): 0910001
张兴坊, 张腊梅, 范群芳等. 金纳米球壳结构局域表面等离子体共振调谐特性[J]. 中国激光, 2011, **38**(9): 0910001
- 3 D. R. Mernagh, Janscakp, K. Firman *et al.*. Protein-protein and protein-DNA interactions in the type I restriction endonuclease R. EcoR124I[J]. *Biol. Chem.*, 1998, **379**(4-5): 497~503
- 4 M. N. Weiss, R. Srivastava, H. Groger. Experimental investigation of a surface plasmon-based integrated-optic humidity sensor[J]. *Electron. Lett.*, 1996, **32**(9): 842~843
- 5 J. Homola, G. Schwotzer, H. Lehmann *et al.*. A new optical fiber sensor for humidity measurement [C]. *Photonics 95.2A, Eur. Opt. Soc. II*, 1995, **691**: 245~248
- 6 Eduardo Fontana. Theoretical and experimental study of the surface plasmon resonance effect on a recordable compact disk [J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(1): 79~87
- 7 Bipin K. Singh, Andrew C. Hillier. Surface plasmon resonance imaging of biomolecular interactions on a grating-based sensor array[J]. *Anal. Chem.*, 2006, **78**(6): 2009~2018
- 8 E. Kretschmann. Determination of optical constants of metals through the stimulation of surface plasma oscillations[J]. *Z. Phys.*, 1971, **241**(4): 313~324
- 9 K. Tiefenthaler, W. Lukosz. Integrated optical switches and gas sensors[J]. *Opt. Lett.*, 1984, **9**(4): 137~139
- 10 Shuai Binbin, Xia Li, Zhang Yating *et al.*. Principle and study progress of surface plasmon resonance sensors based on gratings [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(10): 100502
帅彬彬, 夏 历, 张雅婷等. 基于光栅的表面等离子体共振传感器的原理及进展[J]. 激光与光电子学进展, 2011, **48**(10): 100502
- 11 Liu Guohua, Chang Lu, Zhang Wei *et al.*. Research and application of SPR sensor technique [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2005, (11): 1~5
刘国华, 常 露, 张 维等. SPR 传感技术的发展与应用[J]. 仪表技术与传感器, 2005, (11): 1~5
- 12 Wan Yan, Liang Dakai, Zeng Jie *et al.*. Prism surface plasmon wave sensor system based on polarizing beam splitter [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(5): 1354~1357
万 艳, 梁大开, 曾 捷等. 基于偏振分光棱镜的表面等离子体波传感系统[J]. 光学学报, 2010, **30**(5): 1354~1357
- 13 K. C. Pohlmann. Principles of Digital Audio [M]. New York: McGraw-Hill, 2000. 243~301
- 14 L. Y. Yeh. Real-time measurement of glucose concentration and average refractive index using a laser interferometer [J]. *Opt. & Lasers in Engng.*, 2008, **46**(9): 666~670

栏目编辑:何卓铭