

# 幅度调制型等离子体共振光纤生物传感器

邱旭徽, 刘甫, 郭团

(暨南大学光子技术研究所, 广州 510632)

**摘要:** 纳米镀银倾斜布拉格光纤光栅 (TFBG) 传感器能够激发明显的表面等离子体共振 (SPR), 这一结论在实验中已得到证实。该传感器提供了一个精细的梳状窄带共振的透射光谱, 与表面等离子体广泛的吸收谱重合, 从而获得了一个独特的可用以测量等离子体微小变化的工具。与外界环境接触的金属膜层对环境折射率 (SRI) 变化具有非常高的灵敏度。同时, 幅度调制法比波长调制法测量的 SRI 更直观、简便, 为生物量测量提供了一种更可靠的方法。实验结果表明, 对生物溶液 (不同浓度的水通道蛋白的大鼠尿, 具有不同折射率, 范围从 1.3400 到 1.3408) 进行波长偏移和对应的幅度变化的测量, 得出波长调制灵敏度 505nm/RIU, 幅度调制灵敏度 843dB/RIU。

**关键词:** 表面等离子体共振; 倾斜布拉格光纤光栅; 生物传感器; 波长调制; 幅度调制

**中图分类号:** TN253

## Amplitude-modulated plasmonic fiber-optic biosensors

QIU Xuhui, LIU Fu, GUO Tuan

(Institute of Photonics Technology, Jinan University, Guangzhou 510632)

**Abstract:** A nano-scale silver-coated tilted fiber Bragg grating (TFBG) sensor with clear surface plasmon resonance (SPR) is proposed and experimentally demonstrated. The transmission spectrum of the sensor provides a fine comb of narrowband resonances that overlap with the broader absorption of the surface plasmon and thus provide a unique tool to measure small shifts of the plasmon. The metal film sensing the environment has a very high sensitivity to the change of surrounding refractive index (SRI). Meanwhile, measuring SRI by amplitude modulation is more intuitive and simple than wavelength modulation method, provides a more reliable method for biomass measurement. The experimental results show that biological solutions (urine of rats with different concentration of Aquaporin) with different SRI ranging from 1.3400 to 1.3408 were measured by wavelength and amplitude methods, obtaining that the wavelength modulation sensitivity is 505 nm/RIU, while amplitude modulation sensitivity is 843 dB/RIU.

**Key words:** surface plasma resonance; tilted fiber Bragg grating; biosensor; wavelength-modulation; amplitude-modulation

## 0 引言

表面等离子体共振 (Surface Plasmon Resonance, SPR) 光纤传感器可以进行高灵敏度生物样品原位测量, 它是一个有效的和相对简单的测量方法, 替代了笨重的棱镜结构。在过去的十年中, 已经提出了多种光纤 SPR 传感器<sup>[1]</sup>。最直接的方式是利用一根多模光纤连接上剥去包层的或者是包层足够薄, 能够使纤芯光外溢并与表面金属镀膜层相互作用的这样一段光纤来实现 SPR 传感<sup>[2]</sup>。由于等离子体共振的存在, 致使光透射谱上会出现一个凹陷。这可以通过使用 D 型或侧面抛光的单模光纤来改进<sup>[3]</sup>。但是, 该过程损坏了光纤结构的完整性。

使用倾斜布拉格光纤光栅 (Tilted Fiber Bragg Grating, TFBG), 加以偏振控制, 来产生光等离子体共振, 该光纤 SPR 方法已于 2007 年由 J.艾伯特的小组提出<sup>[4]</sup>。这一概念的简易型在于, 不是修饰光纤表面或镀上金属膜, 而是纤芯上用光学方法刻写上 TFBG 来实现对

**基金项目:** 国家自然科学基金 (61205080); 广东省自然科学基金 (2014A030313387); 高等学校博士学科点专项科研基金 (20114401120006)

**作者简介:** 邱旭徽 (1990-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 倾斜光纤光栅传感器

**通信联系人:** 郭团 (1979-), 男, 研究员、博士生导师, 主要研究方向: 光纤传感、光子器件、生物光子学. E-mail: tuanguo@jnu.edu.cn

等离子体的共振耦合，其中的倾斜光栅能够促使光从纤芯耦合到包层模，从而打破了模式耦合过程的圆柱对称性，而且这个过程也受引导光的偏振态影响<sup>[5,6]</sup>。因此，这种传感器的透射光谱是一个优良的窄带共振峰梳状谱，该谱线与表面等离子体广泛的吸收谱是重合的，从而提供了一个独特的高精度的工具来测量等离子体的微小调制变化<sup>[7,8]</sup>。

波长调制型 SPR 传感器已经广泛应用到对各种物理量、生化量（如蛋白浓度的特异性测量等）的检测中<sup>[9]</sup>。这种传感器目前已经通过棱镜、各种结构的光纤（如微纳光纤、光子晶体光纤、长周期光纤光栅、传统 TFBG 光纤）实现了<sup>[10,11]</sup>。但是，波长调制也有其不足，例如波长变化受温度影响大、误差增大分辨率降低。

在本文中，提出了一种包层模幅度调制法来解调镀银倾斜布拉格光纤光栅（TFBG）传感器的测量数据，并实验证明是可行的，可靠性、灵敏度均高于波长调制法。首先在蔗糖溶液中（RI=1.3330-1.3410）验证波长调制和幅度调制对 RI 测量的可行性，并得出波长调制灵敏度 505nm/RIU，幅度调制灵敏度 843dB/RIU。然后将传感器应用到大鼠尿蛋白浓度的微小变化测量中，其 RI 范围在 1.3400-1.3408，并能精确的重复以上实验。

## 1 原理与装置

等离子体镀银 TFBG 传感探针工作光源为一波长在 1440-1570nm 范围的宽带 SLED 光源（Broadband Source, BBS），透射光谱显示在光谱仪上（Optical Spectrum Analyzer, OSA），其最小波长分辨率达 0.02nm。

如图 1 所示，为光纤传感器的系统图。

一个起偏器和偏振控制器放置在 TFBG 探针的上游来调整和控制输入到光纤光栅上的光的偏振态，从而为激发最强烈的 SPR 共振提供了条件。

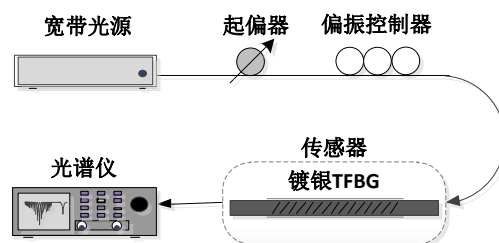


图 1 传感系统图

光纤表面的 50 纳米银薄膜是利用 TRI-500 光纤涂覆成膜系统磁控溅射法镀膜而成。如图 2 所示，20° 的 TFBG 把纤芯模耦合到包层模中，包层边沿的模式与银薄膜互相作用产生表面等离子波（Surface Plasmon Wave, SPW），SPW 对外界折射率变化非常敏感<sup>[12]</sup>。

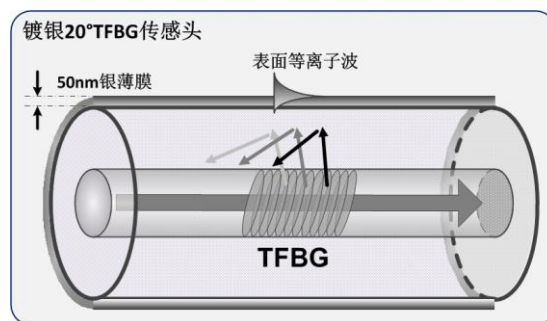


图 2 光纤传感头结构

偏振面平行于倾斜光栅平面的入射光（P 态偏振光）会耦合到不同的包层模中，而偏振

面垂直于倾斜光栅平面的入射光 (S 态偏振光) 则不会有此现象。在前一种情况下, 高阶包层模的电场极性在包层-金属膜边界处大多是成放射状的, 而如果入射光偏振态是正交的的话, 高阶包层模就变成各向异性的了 (进而与金属表面相切) [4,13]。

因此, P 态入射光能够非常有效的将光能量从纤芯模式传递到特定的包层模, 进而传递到外表面纳米金属薄膜上形成表面等离子波 [14]。TFBG 透射谱中包层模的幅度显著下降是判断既定的包层模和等离子波之间发生了能量交换的有力证据, 如图 3 所示, 矩形方框区域则是 SPR 共振区域, 星号 “\*” 表示 SPR 模式 [15]。

另一方面, S 态入射光不能有效地穿过金属和相关的包层模, 因此不能产生 SPR 效应。这种现象在图 3 中给出了两个正交偏振态 (P 和 S 态) 下, 分别将镀银 TFBG 浸入水中。透射谱中 P 态光谱中幅度明显的减小, 而 S 态光谱则呈现 “饱满的” 梳状结构 [12,16]。

同时地, 纤芯模 (布拉格共振) 可以作为一个参考, 对温度进行自校正温度自校正, 这是因为纤芯不受 SRI 的影响, 但纤芯模与包层模具有相同的温度灵敏性。

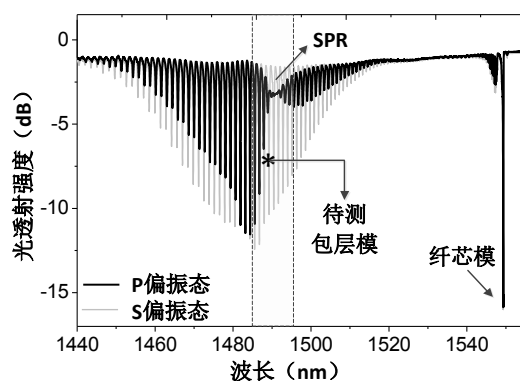


图 3 P 和 S 偏振态下的透射谱

## 2 实验数据分析

实验过程中, 首先配备好与水 and 常见生物溶液折射率 (RI) 相近的蔗糖溶液, RI 从 1.3330 成梯度变化到 1.3410。如图 4 所示, 星号 “\*” 位置有两个含义, 一是表示 SPR 模, 当 RI 增大时, SPR 模会向波长较大的方向漂移, 即向右漂移; 另一个含义是在 “\*” 号位置的这一个模式, 波长不变的前提下, 当 RI 增大时, 该模式 (即包层模) 的幅度会向下漂移。

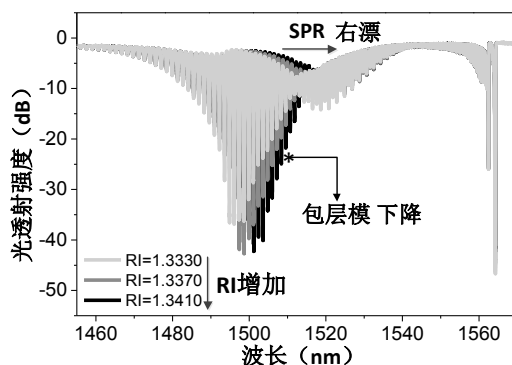


图 4 不同 SRI 下透射谱变化

透射谱中 SPR 共振峰的形态是基本一致的, 因此可以记录下特定的 SPR 模, 观察其在折射率增大过程中波长  $\Delta\lambda$  的变化, 如图 5 所示。

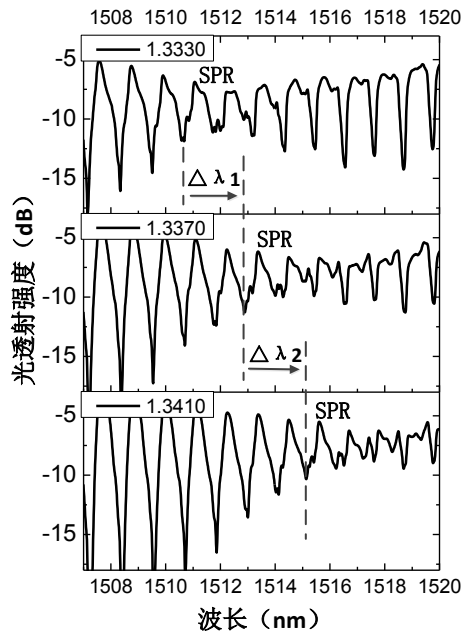


图5 波长调制法测 SRI (利用 SPR 模漂移)

相对应的, 在三个不同的折射率 (RI) 下, 也可以通过特定的包层模, 观察单一模式的幅度变化  $\Delta I$  就可以探测出 RI 的变化, 这种方法既简化了数据的处理过程, 观察同一个模式, 稳定性高, 减少了误差, 同时温度的变化引起的波长漂移对此方法影响极小, 大大增加了可靠性。如图 6。

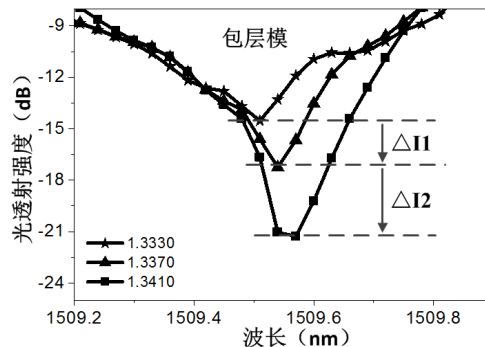


图6 幅度调制法测 SRI (利用包层模幅度变化)

即使环境温度出现了变化, 也可以利用透射谱中的纤芯模来进行温度校正。因为在光纤传感器的各个部位上基本处于同一等温线上, 而环境折射率 (SRI) 不会影响到纤芯, 因此利用纤芯模进行温度校正的方法是可行的。如图 7。

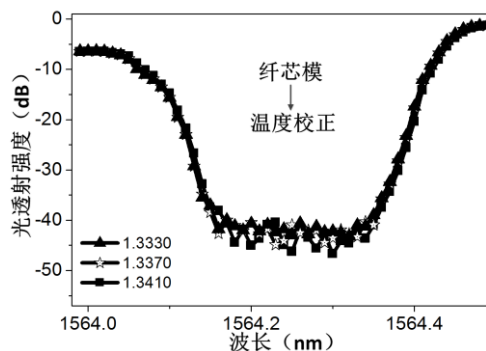


图7 纤芯模放大图

如图 8, 在不同浓度的尿蛋白测量实验中, 同样利用波长调制和幅度调制两种方法对数据进行行处理分析, 发现灵敏度同样的幅度调制型的更高。有力的证明了该方法具有良好的重复性<sup>[3,17]</sup>。

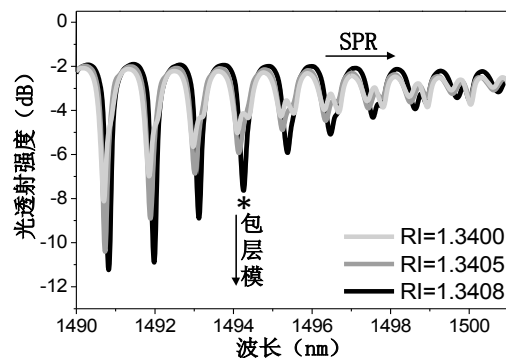


图 8 不同浓度尿蛋白的 RI 测量

### 3 结论

幅度调制型倾斜光纤光栅已被实验证明其可行性。50nm 镀银 TFBG 能够很好的激发 SPR, 并且对 SRI 具有很高的灵敏度。尿蛋白的变化与不同折射率的范围从 1.3400 到 1.3408 进行了测量, 波长调制灵敏度 505nm/RIU, 幅度调制灵敏度 843dB/RIU。它提供了快速的潜在途径, 在医学中的低浓度亚微升剂量和分析物的高灵敏度检测, 化学和环境监测。

### [参考文献]

- [1] M. Piliarik and J. Homola, Surface plasmon resonance (SPR) sensors: approaching their limits?[J]. Opt. Express, 2009, 17(19): 16505-16517.
- [2] Anuj K. Sharma, Rajan Jha, B. D. Gupta, Fiber-optic sensors based on surface plasmon resonance: a comprehensive review[J]. IEEE Sensors Journal, 2007, 7(8): 1118-1129.
- [3] Tuan Guo, Fu Liu, Xing Liang, et al. Highly sensitive detection of urinary protein variations using tilted fiber grating sensors with plasmonic nanocoatings[J]. Biosensors and Bioelectronics, 2016, 78(15): 221-228.
- [4] Y. Shevchenko, J. Albert. Plasmon resonances in gold-coated tilted fiber Bragg gratings[J]. Optics Letters, 2007, 32(3): 211-213.
- [5] Jacques Albert, Shao Liyang, C. Caucheteur. Tilted fiber Bragg grating sensors[J]. Laser and Photonics Reviews 2013, 7 (1): 83-108.
- [6] J. U. Thomas, N. Jovanovic, R. G. Krämer, et al. Cladding mode coupling in highly localized fiber Bragg gratings II: complete vectorial analysis[J]. Optics Express 2012, 20 (19): 21434-21449.
- [7] J. Albert, S. Lepinay, C. Caucheteur, et al. High resolution grating-assisted surface Plasmon resonance fiber optic aptasensor[J]. Methods, 2013, 63(3): 239-254.
- [8] C. Caucheteur, C. Chen, V. Voisin, et al. A thin metal sheath lifts the EH to HE degeneracy in the cladding mode refractometric sensitivity of optical fiber sensors[J]. Applied Physical Letters, 2011, 99, 041118.
- [9] Tuan Guo, Fu Liu, Yu Liu, et al. In-situ detection of density alteration in non-physiological cells with polarimetric tilted fiber grating sensors[J]. Biosensors and Bioelectronics, 2014, 55: 452-458.
- [10] F. Bahrami, M. Maisonneuve, M. Meunier, et al. Self-referenced spectroscopy using plasmon waveguide resonance biosensor[J]. Biomed Optics Express, 2014, 5(8): 2481-2487.
- [11] 杨军, 战磊, 吴松, 等. 光纤表面等离子体激元共振传感器中的光传播特性的理论分析[J]. 传感技术学报, 2010, 23(10): 1421-1425.
- [12] Yang Jun, Zhan Lei, Wu Song, et al. Theoretical study on the light-propagation property of an optical fiber surface plasmon resonance sensor[J]. Chinese Journal of Sensor and Actuators, 2010, 23(10): 1421-1425. (in Chinese)
- [13] M. Zahirul Alam, Student Member, Jacques Albert, et al. Selective excitation of radially and azimuthally polarized optical fiber cladding modes[J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(19): 3167-3175.
- [14] Homola Jiri. Surface plasmon resonance sensors for detection of chemical and biological species[J]. Chemical Reviews, 2008, 108 (2): 462-493.
- [15] Y. Shevchenko, C. Chen, M. Dakka, et al. Polarization-selective grating excitation of plasmons in cylindrical optical fibers[J]. Optics Letters, 2010, 35(5): 637-639.
- [16] Christophe Caucheteur, Tuan Guo, Jacques Albert, Review of plasmonic fiber optic biochemical sensors: improving the limit of detection[J]. 2015, 407(14): 3883-3897.

[16] C. Caucheteur, V. Voisin, J. Albert. Polarized spectral combs probe optical fiber surface plasmons[J]. Optics Express, 2013, 21 (3): 3055-3066.

[17] 王霄, 许吉英, 陈义. 生物分子互相作用动力学的表面等离子体共振研究方法[J]. 化学进展, 2015, 27(5): 550-558.

155 Wang Xiao, Xu Jiying, Chen Yi. Surface plasmon resonance methodology for interaction kinetics of biomolecules[J]. Progress in Chemistry, 2015, 27(5): 550-558. (in Chinese)