

光纤表面等离子体共振传感器锥型探头的研制

张鹏程 吕敏 陈笑 王义全

(中央民族大学理学院, 北京 100081)

摘要 理论模拟并实验制作了一种基于波长调制的高灵敏度的锥型光纤探头表面等离子体共振传感器。理论上研究了锥型探头的锥度比(TR)与传感器灵敏度和检测精度的关系,结果表明,随着锥度比的增加,传感器灵敏度上升,精确度下降。综合考虑这两个指标,当 TR 在 1.2 至 1.8 之间时,传感器有较高的性能。在理论设计的基础上,实验制作了锥型探头,并且搭建了实验系统,实验结果显示,传感器灵敏度达到 $3.94 \mu\text{m}/\text{RIU}$ (RIU 表示折射率单位),与理论模拟值($3.90 \mu\text{m}/\text{RIU}$)符合得很好。

关键词 传感器;表面等离子体共振;光纤传感器;锥型探头;灵敏度

中图分类号 O439 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201340.0305005

Study and Fabrication of Surface-Plasmon-Resonance Fiber Optic Sensor with Tapered Probe

Zhang Pengcheng Lü Min Chen Xiao Wang Yiquan

(College of Science, Minzu University of China, Beijing 100081, China)

Abstract A high sensitivity of surface-plasmon-resonance (SPR) fiber optic sensor based on the wavelength modulation with tapered probe is studied theoretically and fabricated. The influence of different taper ratios (TRs) on the sensitivity and accuracy of the sensor is analyzed. It shows that with the increase of the TR, the sensitivity increases and the accuracy reduces. Considering the two indicators, the sensor has a good performance when TR is between 1.2~1.8. Based on the theoretical simulation result, the tapered probe is fabricated and the experimental system is set up. The experimental results show that the sensitivity of the sensor is $3.94 \mu\text{m}/\text{RIU}$, which is well consistent with the result of theoretical simulation ($3.90 \mu\text{m}/\text{RIU}$).

Key words sensors; surface plasmon resonance; fiber sensor; tapered probe; sensitivity

OCIS codes 060.2370; 120.4630; 160.4236

1 引言

目前,基于表面等离子体共振(SPR)的光纤传感器得到了世界各国的极大关注和广泛研究。光纤 SPR 技术结合了光纤柔软,可以在强电磁干扰、易燃易爆、毒性气体等复杂环境条件下工作,并且具有体积小响应快、成本低的优点,在生命科学、药物开发、公共安全、环境污染检测等领域具有广阔的应用前景^[1,2]。提高 SPR 光纤传感器性能,实现集成化,发展微结构光纤以及拓展新的应用领域已成为当前及

未来 SPR 光纤传感器发展的主要方向^[3]。随着光纤 SPR 传感器在多个领域的广泛应用,迫切需提高 SPR 光纤传感器的灵敏度。传统的基于波长调制型的光纤 SPR 传感器的灵敏度在 $2.2 \sim 3.0 \mu\text{m}/\text{RIU}$ (RIU 表示折射率单位)之间^[4],满足不了检测需求。提高 SPR 传感器的灵敏度有多种方法,如采用相位检测^[5,6],采用新型的镀膜材料^[7]等。其中对光纤探头进行拉锥是一种有效的方法,在光纤探头中,入射光在传感区域的入射角大小由光纤探头的形状决

收稿日期: 2012-09-26; **收到修改稿日期:** 2012-11-29

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(1112KYZY46)、教育部科学技术研究重点项目(212205)、(98507-012009)和工程项目资助课题。

作者简介: 张鹏程(1987—),男,硕士研究生,主要从事光纤光学方面的研究。E-mail: zpengcheng2006@126.com

导师简介: 吕敏(1975—),女,博士,副教授,主要从事光纤传感、光纤通信及其光纤无源器件等方面的研究。

E-mail: lvmin62589149@163.com(通信联系人)

定,而减小入射角可以增加传感器的灵敏度,因此可以通过改变光纤 SPR 探头的结构来提高传感器灵敏度。目前对于光纤探头的优化设计及其应用已经成为研究热点。Verma 等^[8]研究了儿种不同形状的锥型光纤探头,理论模拟了不同锥度形状的探头对传感器灵敏度的影响,结果显示对光纤探头进行拉锥或者弯曲操作,能极大地提高传感器灵敏度。Leitea 等^[7]研究了一种表面涂染料的双沉积均匀腰锥(DLUWT)的锥型光纤探头,这种探头对于非吸收性被测物表现出一种不同于常规探头的性质,可以被用来研制新型的 SPR 传感器。Socorro 等^[9]研究了一种单模的 SPR 锥型光纤探头传感器,其灵敏度随着光纤探头锥区的长度增加而增大,随着锥区直径的增大而减小。在特定波长下,锥区长度和直径的变化能对出射光的能量产生显著的影响,可用于精确地检测光纤涂层在某些被测物的影响下产生的细微变化。

以上对于锥型探头的研究大都局限在理论模拟

上,缺少对传感器检测精度的讨论,而传感器的检测精度直接影响到实际应用中传感器的性能。本文依据理论模拟结果,实验制作了光纤 SPR 传感锥型探头,并且系统分析了锥形探头的锥度比(TR, P_{TR})对传感器的灵敏度和检测精度的影响。

2 拉锥光纤探头的理论设计

本文设计的锥型传感探头形状如图 1 所示,传感器探头由锥形区域 1、传感区域、锥形区域 2 三部分组成。锥型区域 1 的作用是减小入射光射入传感区域的角度,锥型区域 2 的作用是将传感区域传输的光恢复到入射以前的角度,从而使所有的输出光都能在光纤中传播^[10]。传感区域表面镀银,光在传感区中传输时的角度将比不采用锥型结构时的要小。通过对传感区域内光强透射率的模拟,可以得到光经过传感区域后的出射光谱。光在传感区金属膜反射一次的反射率 R 可以通过菲涅耳反射率公式来计算。

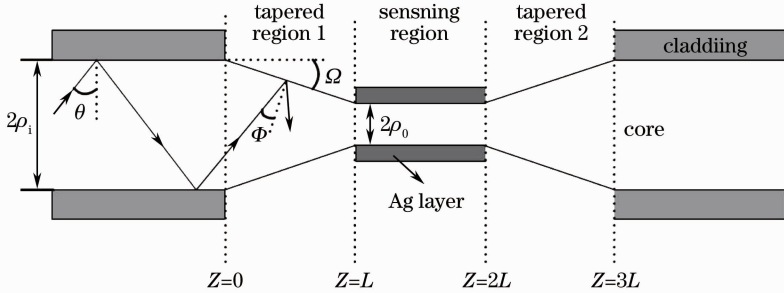


图 1 锥型结构的光纤 SPR 传感器

Fig. 1 SPR fiber optic sensor with tapered probe

$$R = \left| \frac{r_{cm} + r_{ms} \exp(2ik_{mz}d)}{1 + r_{cm}r_{ms} \exp(2ik_{mz}d)} \right|^2, \quad (1)$$

$$r_{cm} = \frac{k_{cz}\epsilon_m - k_{mz}\epsilon_c}{k_{cz}\epsilon_m + k_{mz}\epsilon_c},$$

$$r_{ms} = \frac{k_{mz}\epsilon_s - k_{sz}\epsilon_m}{k_{mz}\epsilon_s + k_{sz}\epsilon_m},$$

$$k_{jz} = \left(\epsilon_j \frac{4\pi^2}{\lambda^2} - k_x^2 \right)^{1/2}, \quad j = c, m, s,$$

$$k_x = \sqrt{\epsilon_c} \frac{2\pi}{\lambda} \sin \theta,$$

$$6.2403) + i(3.1776 \times 10^{-6} \lambda^2 + 0.002018\lambda + 0.54037), \quad (2)$$

$$N(\theta) = \frac{L}{2\rho_0 \tan(\theta - \Omega)}, \quad (3)$$

入射角为 θ 的光在此传感区域内的总反射次数为

式中 L 为传感区长度, ρ_0 为拉锥后传感区域光纤纤芯半径, Ω 为锥形探头的锥度角(如图 1 所示)。经过多次反射后,入射角为 θ 的光通过传感区后的光强透射率 T 为

$$T = R^{N(\theta)} = R^{L/[2\rho_0 \tan(\theta - \Omega)]}, \quad (4)$$

在光纤中,不同模式的光有着不同的入射角 θ ,光能量相对分布为^[8]

$$P_\theta = \frac{n_c^2 \sin \theta \cos \theta}{(1 - n_c^2 \cos^2 \theta)^2}, \quad (5)$$

因此光穿过传感区后总的光强透射率为^[8]

式中 d 为金属膜的厚度, λ 为入射光的波长, θ 为入射角, R 为反射率, $\epsilon_m, \epsilon_c, \epsilon_s$ 分别为金属膜, 光纤纤芯, 待测介质的介电常数。其中银膜的介电常数采用 Drude 模型, 在 400 ~ 1000 nm 间银的介电常数^[11]为

$$\epsilon_m = (-5.1596 \times 10^{-5} \lambda^2 - 0.0033253\lambda +$$

$$P_{\text{trans}} = \frac{\int_{\Phi_1}^{\Phi_2} R^{N(\theta)} \frac{n_c^2 \sin \theta \cos \theta}{(1 - n_c^2 \cos^2 \theta)^2} d\theta}{\int_{\Phi_1}^{\Phi_2} \frac{n_c^2 \sin \theta \cos \theta}{(1 - n_c^2 \cos^2 \theta)^2} d\theta}, \quad (6)$$

式中传感区域光的入射角积分下限为 $\Phi_1 = \arccos(\rho_i \cos \theta_{\text{cr}} / \rho_0) - \Omega$ ，积分上限为 $\Phi_2 = \arccos(\rho_i \cos \theta_2 / \rho_0) - \Omega$ ， $\theta_{\text{cr}} = \arcsin\left(\frac{n_{\text{cl}}}{n_c}\right)$ ， n_{cl} 为包层折射率， n_c 为纤芯折射率， $\theta_2 = \pi/2$ ， ρ_i 为光纤纤芯半径。

根据(1)式和(6)式，就可模拟计算出光经过传感区域后的出射光谱(光强透射率曲线)，得到该传感器的 SPR 共振峰(光强透射率曲线的最低值)，进而得出传感器的灵敏度和检测精度。传感器的灵敏度和检测精度是衡量光纤 SPR 传感器性能的两个重要参数。这两项参数的值越高表示传感器的性能越好。传感器的灵敏度取决于周围介质折射率变化时 SPR 共振峰的位移。待测介质折射率变化 δn_s 时，共振峰 λ_{res} 的位移为 $\delta \lambda_{\text{res}}$ ，则传感器的灵敏度 S_n 表示为^[10]

$$S_n = \frac{\delta \lambda_{\text{res}}}{\delta n_s}. \quad (7)$$

传感器的检测精度取决于 SPR 共振峰的宽度，共振峰的宽度越窄，检测精度越高。一般用 SPR 共振峰的一半全宽 $\delta \lambda_{0.5}$ 来衡量检测精度， $\delta \lambda_{0.5}$ 越小，检测精度越高。光纤探头的几何参数用 TR 表示，表达式为

$$P_{\text{TR}} = \rho_i / \rho_0. \quad (8)$$

分别讨论了不同的 TR 对传感器的灵敏度和检测精度的影响。理论模拟中采用多模光纤，纤芯直径为 $400 \mu\text{m}$ ，纤芯折射率 n_c 为 1.445，数值孔径为 0.22，银膜厚度为 50 nm，取外界折射率从 1.33 到 1.43 之间变化。传感器灵敏度与 TR 的关系曲线如图 2 所示。

从图 2 中可以看出，随着 TR 的增大，传感器的灵敏度也在变大。TR 在 1.0 到 1.7 范围内，灵敏度变化随着 TR 的增大变化较小，TR 在 1.7 到 1.9 范围内时，灵敏度有较大的提高。当 $P_{\text{TR}}=1.9$ 时，传感器的灵敏度达到 $11 \mu\text{m}/\text{RIU}$ ，大约是未经过拉锥的探头($P_{\text{TR}}=1$)的 4 倍。这是因为随着 TR 的增大，入射光线的入射角也在减小，导致传感器的灵敏度增大。但是，随着 TR 的增加，共振波长的位置也在变化，当 TR 达到 1.9 以上的时候，共振波长已经

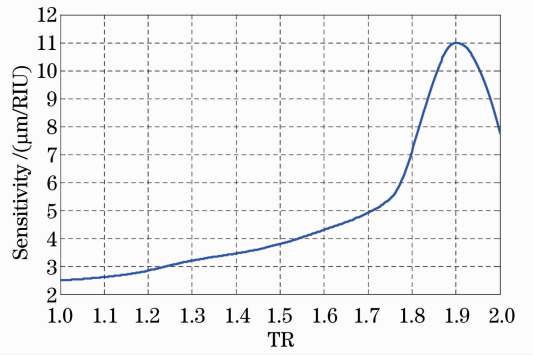


图 2 传感器灵敏度($\mu\text{m}/\text{RIU}$)跟 TR 的关系

Fig. 2 Relationship between sensitivity ($\mu\text{m}/\text{RIU}$) of the SPR fiber optic sensor and TR

超出了光源的光谱范围和光谱仪的测量范围。

图 3 为在外界折射率为 1.33 时，在不同 TR 下的能量透射率曲线。从图中可以得出传感器检测精度与 TR 的关系。随着 TR 的增加，共振峰的形状和位置都发生变化。TR 变大时，共振峰的位置发生红移，共振峰的深度发生变化， $\delta \lambda_{0.5}$ 也在展宽。当 TR 分别取 1, 1.3, 1.6, 1.9 时， $\delta \lambda_{0.5}$ 分别为 100, 120, 180, 260 nm。可以看出，随着 TR 的变化，这种锥形探头的检测精度在下降，与灵敏度成反比的关系。实验中要合理取 TR 值使传感器灵敏度和检测精度都有较高的值。分析表明，当 TR 在 1.2 至 1.8 之间时，传感器有较高的性能。

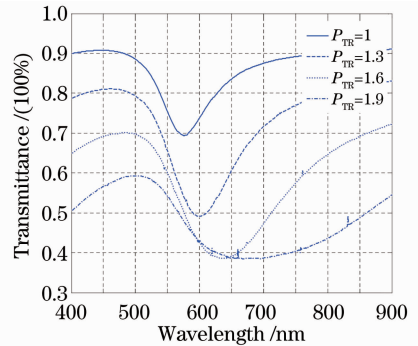


图 3 不同 TR 下的能量透射率曲线

Fig. 3 Transmittance ratio of the SPR fiber optic sensor with different TRs

3 拉锥光纤探头的制作及其测试

采用芯径 $400 \mu\text{m}$ 的塑料包层光纤，纤芯折射率 n_c 为 1.445，数值孔径为 0.22，用丙酮将塑料包层溶解，露出纤芯，然后用拉锥机对纤芯进行拉锥，采用真空蒸镀工艺在传感区表面镀一层银膜，厚度为 50 nm。图 4 为镀膜后光纤探头的扫描电镜图像(SEM)，可测得锥度比约为 1.5，传感区长度为 5 mm。

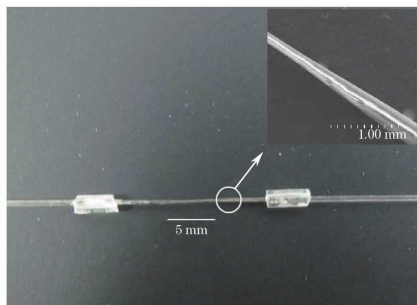


图 4 锥形光纤探头的扫描电镜扫描图像

Fig. 4 SEM picture of SPR fiber optic sensor with tapered probe

光纤 SPR 传感器测试系统如图 5 所示:光源采用光谱范围 200~2000 nm、输出功率 30 W(功率偏差 ± 0.05 dB)氙灯,用 10 倍透镜聚焦到纤芯 400 μm 的光纤上,入射光经过传感区域光纤锥形探头,输出端用探测范围 200~1100 nm、分辨率 0.3 nm 的光谱仪(海洋光学 USB-2000)探测光谱。

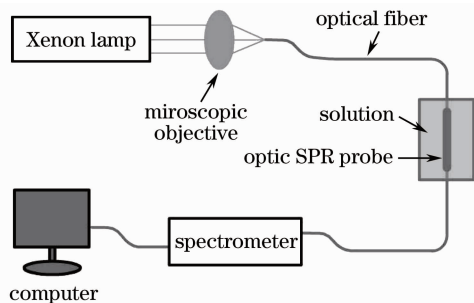


图 5 光纤 SPR 传感器测试系统

Fig. 5 Experimental setup of SPR fiber optic sensor

实验中用去离子水和甘油配置了折射率分别为 1.333, 1.345 和 1.357 的溶液。将光纤探头置于这些的溶液中,输出端得到对应的透射率曲线如图 6 实线所示。

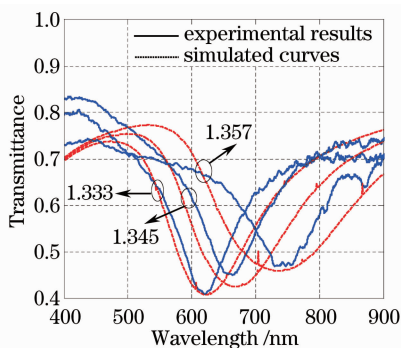


图 6 光纤 SPR 传感器的理论模拟和实验测得透射率曲线

Fig. 6 Simulated and experimental transmittance ratio curves

图 6 为在 $P_{TR} = 1.5$ 时不同被测介质折射率下的实验测得曲线(实线)与理论模拟的曲线(虚线)对比图。从图中可以看出,实验结果与理论模拟符合得很好。随着介质折射率的变大,共振峰发生红移,同时,共振曲线的透射率变小,共振曲线的半峰全宽也在展宽。共振曲线的半峰全宽在折射率为 1.333 时为 130 nm 左右,在折射率为 1.345 时为 200 nm 左右,传感器的精确度较好。传感器灵敏度的理论模拟值为 $3.90 \mu\text{m}/\text{RIU}$ (1.345~1.333),实验数据测得值为 $3.94 \mu\text{m}/\text{RIU}$,误差为 1%。相比于没有经过拉锥处理的光纤 SPR 传感器灵敏度($2.4 \mu\text{m}/\text{RIU}$)^[4]提高 1.6 倍左右。

4 结 论

本文设计并通过实验验证了一种新型的高灵敏度的光纤 SPR 传感器。通过对光纤探头进行拉锥处理,提高了传感器的灵敏度。理论模拟结果表明,随着 TR 的增加,传感器灵敏度上升。当 TR 在 1.2 至 1.8 之间时,传感器灵敏度和精确度都较好,传感器有较高的性能。根据理论模拟结果,实验制作了光纤 SPR 传感锥形探头,实验结果显示,传感器灵敏度达到 $3.94 \mu\text{m}/\text{RIU}$,与理论模拟值($3.90 \mu\text{m}/\text{RIU}$)符合得很好,该结果对于高灵敏度光纤 SPR 传感器的研制具有重要的参考价值。

参 考 文 献

- Zhang Mei, Dai Jixiang, Yang Minghong *et al.*. Fiber-optic surface plasmon resonance hydrogen sensor based on palladium coating[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(12): 1205005
- 张 美, 代吉祥, 杨明红 等. 基于表面等离子体共振的钯膜氢气传感器[J]. *中国激光*, 2011, **38**(12): 1205005
- Zhao Huaxin, Jiang Yongxiang, Luo Tianqiong *et al.*. Hollow optical fiber sensor based on surface plasmon resonance[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(6): 0628001
- 赵华新, 蒋永翔, 罗天穹 等. 基于表面等离子体共振原理的空芯光纤传感器[J]. *光学学报*, 2012, **32**(6): 0628001
- Guan Chunying, Yuan Libo, Shi Jinhui. Microstructured-fiber surface plasmon resonance sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(2): 0206003
- 关春颖, 苑立波, 史金辉. 微孔光纤表面等离子体共振传感特性分析[J]. *光学学报*, 2011, **31**(2): 0206003
- B. Lee, S. Roh, J. Park. Current status of micro- and nano-structured optical fiber sensors[J]. *Opt. Fiber Technol.*, 2009, **15**(3): 209~221
- S. G. Nelson, K. S. Johnston, S. S. Yee. High sensitivity surface plasmon resonance sensor based on phase detection[J]. *Sens. Actuators B: Chemical*, 1996, **35**(3): 187~191
- J. Yan, Y. H. Lu, P. Wang *et al.*. Improving the sensitivity of fiber-optic SPR sensor via radially polarized beam excitation[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(10): 909~911
- I. Leitea, M. C. Navarrete, N. D. Herrera *et al.*. Selectivity of SPR fiber sensors in absorptive media: an experimental

- evaluation[J]. *Sens. Actuators, B: Chemical*, 2011, **160**(1): 592~597
- 8 R. K. Verma, A. K. Sharma, B. D. Gupta. Surface plasmon resonance based tapered fiber optic sensor with different taper profiles[J]. *Opt. Commun.*, 2008, **281**(6): 1486~1491
- 9 A. B. Socorro, I. D. Villar, J. M. Corres *et al.*. Lossy mode resonances dependence on the geometry of a tapered monomode optical fiber[J]. *Sens. Actuators, A: Physical*, 2012, **180**(1): 25~31
- 10 R. K. Verma, A. K. Sharma, B. D. Gupta. Modeling of tapered fiber-optic surface plasmon resonance sensor with enhanced sensitivity[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2007, **19**(22): 1786~1788
- 11 M. A. Ordal, L. L. Long, R. J. Bell *et al.*. 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

栏目编辑:何卓铭