

文章编号 1004-924X(2015)增-0000-05

反射式双芯光纤锥角结构表面等离子体共振传感器

刘佩坤, 李彦, 魏勇*, 张羽, 刘春兰
(哈尔滨工程大学理学院, 黑龙江哈尔滨 150001)

摘要:提出了一种使用双芯光纤的反射式新型表面等离子体共振(SPR)光纤微传感器。该SPR微传感器是通过研磨技术将双芯光纤研磨成锥角结构并在锥角端面 and 斜面分别镀制50 nm金膜和500 nm金反射膜制备的。将单模光纤侧面抛磨后与双芯光纤的一纤芯对芯并焊接,实现给双芯光纤的一纤芯注光;用110 μm芯径的阶跃多模光纤与双芯光纤的另一纤芯焊接,实现接收SPR探针反射至另一纤芯中的SPR反射光谱。实验结果表明:双芯光纤锥角结构SPR探针的共振谷波长可对SPR探针接触到的折射率1.333~1.385的液体做出响应,平均灵敏度达4 769 nm/RIU。与传统光纤SPR传感器相比,使用的双芯光纤直径仅有125 μm,可复合在5号针头中插入血管进行在线生物监测。该纤芯直径为8 μm,光纤中模式较少,灵敏度高。该传感器可通过改变研磨角度移动共振谷工作范围,改变反应灵敏度,具有较大的应用潜力。

关键词:表面等离子体共振;光纤SPR传感器;双芯光纤;锥角结构

中图分类号:TN253 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152313.0000

Twin-core fiber SPR sensor with cone angle structure

LIU Pei-kun, LI Yan, WEI Yong*, ZHANG Yu, LIU Chun-lan

(College of Science, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

* Corresponding author, E-mail: weiyong198747@163.com

Abstract: A novel Surface Plasmon Resonance (SPR) sensor was developed based on the twin-core fiber. The fiber grinding technology was employed to fabricate the sensor probe. The twin-core fiber was grinded into a incline plane shape (building the taper angle structure) and was plated the 50 nm thickness gold film on the end surface and 300 nm thickness gold film on the side surface of the fiber. A normal single mode fiber was used to launch the light source power into one core of the twin-core fiber, and a multimode fiber with a core diameter of 110 μm was employed to receive the SPR reflected spectrum. The experiment shows that the SPR sensor based on the twin-core fiber can measure the refractive index of 1.333 – 1.385, and the testing average sensitivity is 4 769 nm/RIU. As compared with the traditional optical fiber SPR sensor, the novel SPR sensor based on the twin-core fiber has the diameter of 125 μm, which is convenient to integrate in a 5# Syringe needle to monitor bio-information in vivo. The diameter of the fiber core is 8 μm, therefore the beam mode is few, which helps to improve the sensitivity. Besides that, The working range can be moved by changing the fiber grinding angle, and sensitivity can be improved, so the sensor has a great potential applications.

Key words: Surface Plasmon Resonance(SPR); fiber SPR sensor; twin-core fiber; taper angle structure

收稿日期:2015-06-08;修订日期:2015-06-31.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 11204047, No. 61227013, No. 61275087);哈尔滨工程大学基础研究基金资助项目;111计划(No. B13015)

1 引言

表面等离子体共振 (Surface Plasma Resonance, SPR) 在分析生物材料和环境检测方面有着广泛的应用。基于电磁现象的 SPR 技术能够探测折射率和接近传感表面的电介质厚度。SPR 传感平台通常基于 Kretschmann 结构, 由薄的高导电金属 (常见的是金或者银) 层覆盖在棱镜表面组成。其反射光谱特性对临近金属层外侧介质的折射率高度敏感^[14]。相比于空间棱镜结构需要流体处理系统给传感探头送样, 光纤 SPR 传感探针具有小型化, 可以直接浸泡在待测溶液中的优点。在过去的 20 多年中, 大部分研究都集中在小型化光纤 SPR 传感器上, 如大芯径多模石英光纤部分去除包层^[5-9]、侧抛光纤^[10]、光纤拉锥^[11]等。它们的困难在于不仅要在光纤上集成覆盖有薄金属层的 Kretschmann 棱镜结构, 而且还要调整光源的入射角。而微结构多芯光纤是在 125 μm 的包层空间中排列多根纤芯的特殊光纤, 目前已应用于光通信和传感领域的多种光学元件中。本文将多芯光纤应用于 SPR 光纤微传感器, 利用双芯光纤端面反射实现了 Kretschmann 棱镜结构, 制成了反射式双芯光纤锥角结构 SPR 传感器。

通过光纤研磨技术将双芯光纤一端磨制成双锥角结构, 并分别在锥角端面和斜面镀制 50 nm 金膜和 500 nm 金膜形成反射膜, 制成了光纤 SPR 微传感器。其优势主要有: 第一, 对于传统大芯径多模光纤 SPR 探针, 为使金膜与传输光夹角匹配为 SPR 共振角, 从而实现 Kretschmann 棱镜结构, 需在大芯径多模光纤中激励起高阶模式, 存在高阶模式混合噪声, 而且入射光与金膜夹角不易调整, 仿真计算较为困难, 灵敏度低, 而本文通过在双芯光纤锥角结构上镀制金膜, 双芯光纤纤芯直接为 8 μm , 正入射短距离传输时基模占主导, 有效解决了以上问题。第二, 通过光纤研磨技术磨制不同角度的锥角结构, 即可实现光源入射角的调整。第三, 将单模光纤侧面抛磨后与双芯光纤一纤芯对芯并焊接, 实现了给双芯光纤的一纤芯注光, 用 110 μm 芯径的阶跃多模光纤与双芯光纤另一纤芯焊接实现了 SPR 探针反射至另一纤

芯中的 SPR 反射光谱的接收。该 SPR 传感器可在光纤同一端进行入射光和反射光的接收, 光纤另外一端是 SPR 微传感器, 具有易于使用, 可进入狭小空间等优势。第四, 与传统光纤 SPR 传感器相比, 双芯光纤直径较小, 仅有 125 μm , 可复合在 5 号针头中插入血管进行在线生物监测。

2 探针制备及原理

2.1 探针制备

将双芯光纤端面切平, 夹持在光纤研磨系统上, 在两芯中同时通入白光, 便于通过研磨系统的 CCD 定位光纤的两个纤芯。沿轴向转动双芯光纤, 使两纤芯所在直线垂直于研磨盘, 下压光纤, 使其与研磨盘成 α 角进行研磨。当研磨至设计深度时, 上抬光纤并沿轴向将光纤旋转 180°, 再次下压光纤至与研磨盘成 α 角进行研磨。第二次研磨时, 在已经磨制完一侧的纤芯中通入单频激光, 在另一侧纤芯中监测光强, 当光强达到最大值时停止研磨, 光在双芯光纤端面锥角结构处经过 3 次反射, 从入射纤芯回到了反射光收集纤芯。取 $\alpha = 37.5^\circ$, 磨制完毕的双芯光纤锥角结构探针如图 1(a) 所示。

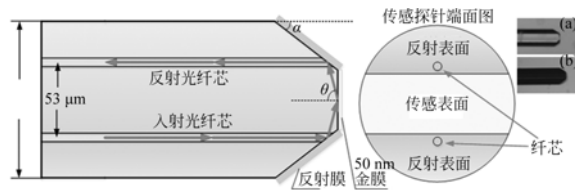


图 1 双芯光纤的锥角结构

Fig. 1 Structure of taper angle of dual core fiber

将磨制完毕的双芯光纤锥角探针端面向上放置在离子溅射仪金靶下方, 镀制 500 nm 厚金膜形成反射膜, 保证在水溶液中光可以由入射纤芯反射至出射纤芯。用光纤研磨系统小心去除锥角探针顶面的金膜, 并在锥角探针顶面镀制 50 nm 厚的金膜, 作为 SPR 膜。镀制好的探头如图 1(b) 所示。

如图 1 所示, 双芯光纤锥角结构 SPR 光纤微传感器探针结构由两个对称的锥形反射区及端面

传感区组成。超连续谱光源从入射光纤芯注入,在下方锥形反射区反射,反射光传输至锥角端面传感区,金膜与传输光夹角匹配为 SPR 共振角,从而实现 Kretschmann 棱镜结构,发生表面等离子体共振,产生一个衰减的反射光谱。经过锥角端面传感区反射的信号光在上方锥形反射区发生第三次反射,由于上下两锥形反射区对称分布,信号光将进入并沿双芯光纤上方反射纤芯传输,反射纤芯中的光送入光谱仪进行数据采集。当锥角 $\alpha = 37.5^\circ$ 时,端面传感区的 SPR 共振角 $\theta = 75^\circ$ 。

2.2 探针仿真计算

本文使用的双芯光纤的纤芯直径为 $8\ \mu\text{m}$,当正入射短距离传输时,光纤中低阶模式较少,以基模为主在双芯光纤端面可以实现 Kretschmann 棱镜结构。利用 matlab 软件计算经过 SPR 传感面全反射后的 P 光反射率,光纤纤芯折射率取固定值 1.467,金膜介电常数参考文献[12]。当 SPR 共振角 $\theta = 75^\circ$ 时,端面传感区不同膜厚对应的 SPR 衰减反射光谱如图 2(a) 所示,所以为了使反射光谱谷尽量深,应将端面传感区的膜厚控制在 $50 \sim 60\ \text{nm}$ 。图 2(b) 给出了 SPR 共振角 $\theta = 75^\circ$ 时,双芯光纤锥角结构 SPR 探针对不同折射率溶液的衰减反射光谱曲线。

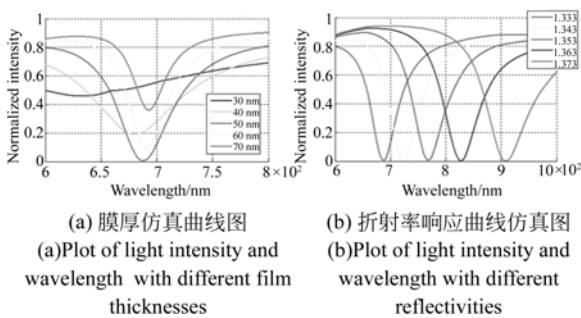


图 2 探针的 matlab 仿真计算图

Fig. 2 Numerical simulation of the sensor

3 实验

3.1 双芯光纤耦合

本文将单模光纤侧面抛磨后与双芯光纤一纤芯对芯并焊接实现给双芯光纤的一纤芯注光,用 $110\ \mu\text{m}$ 芯径的阶跃多模光纤与双芯光纤另一纤芯焊接,实现了 SPR 探针反射至另一纤芯中的

SPR 反射光谱的接收。侧抛后的单模光纤端面显微镜照片,见图 3(a),将侧抛后的单模光纤与双芯光纤放入保偏焊接机,在单模光纤中通入 $532\ \text{nm}$ 的激光光源,仔细用焊接机调节两光纤位置及转向,使双芯光纤出射端光功率达到最大。在确定错芯焊接参数后进行焊接,焊接了侧抛单模光纤的双芯光纤显微照片如图 3(b) 所示。当双芯光纤另一端的探针加工完毕后,在单模光纤中再次注入 $532\ \text{nm}$ 的激光光源,在焊接点处滴加罗丹明荧光指示剂,可以看到双芯光纤另一芯收集到的反射光,如图 3(c) 所示。将纤芯直径为 $110\ \mu\text{m}$ 的阶跃多模光纤(数值孔径为 0.22)焊接在双芯光纤的另一芯上,实现反射光的收集。制作完成的双芯光纤注光收光装置如图 3(d) 所示。

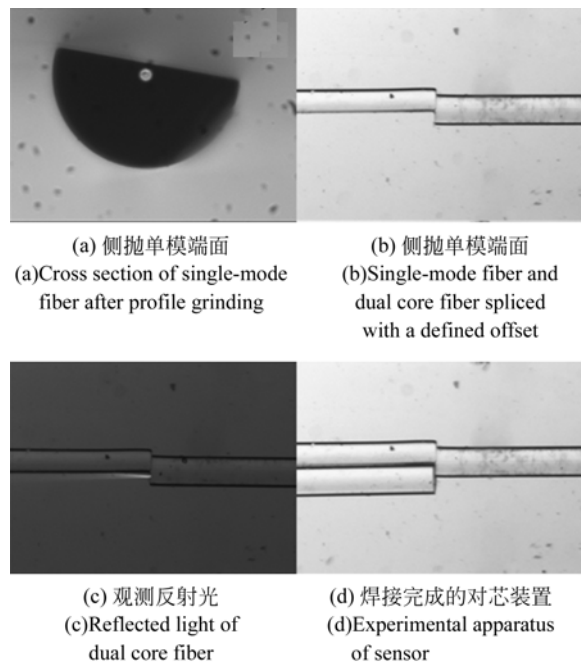


图 3 双芯光纤注光收光显微镜图

Fig. 3 Microphotographs of SPR fiber optic micro sensor based on dual core fiber

图 4 是本文的实验系统图。将超连续谱光源通过双芯光纤注光收光对芯装置注入双芯光纤入射光纤芯。入射光在 SPR 微传感器探针处发生 3 次全反射,第二次在锥角探针端面全反射时发生表面等离子体共振。探针的反射光进入双芯光纤反射光纤芯,再次通过耦合装置送入光谱仪采集

反射衰减光谱。用可编程微量注射泵向微流芯片中注入甘油的水溶液,控制微流芯片微流通道中的待测溶液匀速流动,溶液流过测量区后由废液区的导管流入废液池。用阿贝折射率分析仪标定不同浓度甘油溶液的折射率,并用微量注射泵依次注入微流芯片,采集测量光谱。

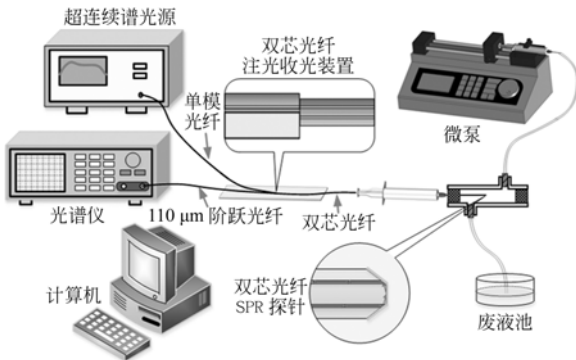


图 4 双芯光纤锥角结构 SPR 探针实验系统图

Fig. 4 Experimental devices of two-core fiber SPR probe with a cone angle structure

4 实验结果

图 5(a) 为水溶液的衰减反射光谱与光源光谱平滑并归一化的结果,可以看到反射光谱在 687 nm 处产生了塌陷。将两个光谱相减,即可得到 SPR 光谱。依次通入蒸馏水及折射率为 1.345, 1.355, 1.365, 1.375, 1.385 的甘油水溶液,得到双芯光纤锥角结构 SPR 微传感器对液体折射率的响应曲线,如图 5(b) 所示。从图中可以看出,双芯光纤锥角结构 SPR 微传感器对溶液折射率变化反应灵敏,在 1.333 ~ 1.385 的平均灵敏度可达 4 769 nm/RIU。

参考文献:

- [1] 范林勇,江微微,赵瑞峰,等. 双芯光纤马赫-曾德尔干涉仪的温度特性[J]. 光学精密工程,2011,1: 2-6.
FAN L Y,JIANG W W,ZHAO R F,et al. . Temperature characteristic of in-fiber Mach-Zehnder interferom-

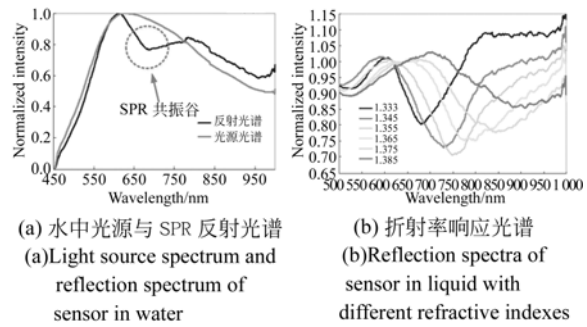


图 5 SPR 探针的反射光谱

Fig. 5 Reflection spectra of SPR probe

5 结论

本文将微结构多芯光纤与 SPR 传感相结合,成功设计并制作出一种双芯光纤锥角结构 SPR 微传感器。通过在磨制的双芯光纤锥角结构上镀制反射膜和 50 nm 金膜,利用双芯光纤中占主导传输的光束基模巧妙实现了 Kretschmann 棱镜结构,有效解决了光纤 SPR 共振角匹配困难、高阶混合模式计算复杂、灵敏度低等问题。同时,本文提出的双芯光纤锥角结构 SPR 传感探针可以通过改变磨锥角度 α 来改变共振角 θ ,从而进行光源入射角的调节。

双芯锥角结构 SPR 微传感器在光纤同一端进行光入射和反射光收集,另外一端是探针,易于进入狭小空间;其传感面位于锥角结构端面,具有不需要将探针完全浸入待测溶液,只需与待测溶液表面接触即可传感的优势。与传统光纤 SPR 传感器相比,双芯光纤直径大幅减小,仅有 125 μm ,可复合在 5 号针头中插入血管进行在线生物监测。当锥角 $\alpha = 37.5^\circ$,端面传感区的 SPR 共振角 $\theta = 75^\circ$ 时,在溶液折射率 1.333 ~ 1.385 内该传感器的灵敏度可达 4 769 nm/RIU。若将更多芯的多芯光纤与 SPR 传感技术相结合,有望实现端面多通道 SPR 微传感器。

- eter using twin-core fiber [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011,1:2-6. (in Chinese)
[2] 郝鹏,吴一辉. 基于噪声分析的波长表面等离子体共振分析仪的数据处理[J]. 光学精密工程,2009,9:2160-2164.
HAO P,WU Y H, Data process of spectroscopic surface plasmon resonance analyzer based on noise analysis [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009,9: 2160-2164.

- (in Chinese)
- [3] 刘德福,段吉安. 光纤端面研磨加工机理研究[J]. 光学精密工程,2004,12:571-574.
LIU D F, DUAN J A. Mechanism research on lapping of optical fiber end-face [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004,12:571-574. (in Chinese)
- [4] 黄强,王敏,李昂,等. 对称型长程表面等离子体共振分析系统[J]. 光学精密工程,2014,1:45-48.
HUANG Q, WANG M, LI A, *et al.*. Symmetrical long range surface plasmon resonance sensing system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014,1:45-48. (in Chinese)
- [5] JORGENON R C, YEE S S. A fiber-optic chemical sensor based on surface plasmon resonance [J]. *Sens. Actuators B*, 1993, 12(3): 213-220.
- [6] JORGENON R C, YEE S S. Control of the dynamics range and sensitivity of a surface-plasmon resonance based fiber optics sensor [J]. *Sens. Actuators B*, 1994, 43: 44-48.
- [7] JUNG C C, SABAN S B, YEE S S, *et al.*. Chemical electrode surface plasmon resonance sensor [J]. *Sens. Actuators B*, 1996, 32: 143-147.
- [8] NIGGEMANN M, KATERKAMP A, PELLMANN M, *et al.*. Remote sensing of tetrachloroethene with a micro-fibre optical gas sensor based on surface plasmon resonance spectroscopy [J]. *Sens. Actuators B*, 1996, 34: 328-333.
- [9] MERIAUDEAU F, DOWNEY T, WIG A, *et al.*. Fiber optic sensor based on gold island plasmon resonance [J]. *Sens. Actuators B*, 1999, 54: 106-117.
- [10] SLAVÍK R, HOMOLA J, BRYNDA E. A miniature fiber optic surface plasmon resonance sensor for fast detection of staphylococcal enterotoxin B [J]. *Sens. Actuators B*, 2002, 17: 591-595.
- [11] TUBB A J C, PAYNE F P, MILLINGTON R B, *et al.*. Single-mode optical fibre surface plasma wave chemical sensor [J]. *Sens. Actuators B*, 1997, 41: 71-79.
- [12] JOHNSON P B, CHRISTY R W. Optical Constants of the noble metals [J]. *Physical Review B*, 1972, 6: 4370-4379.

作者简介:



刘佩坤(1994-),男,黑龙江双鸭山人,2012年至今就读于哈尔滨工程大学理学院,主要从事 SPR 折射率传感技术方面的研究。E-mail:247683760@qq.com

通讯作者:



魏勇(1987-),男,内蒙包头人,博士研究生,2009年、2013年于哈尔滨工程大学分别获得学士、硕士学位,主要从事光纤表面等离子体共振传感的研究。E-mail: weiyong198747@163.com