

基于细芯光纤结构的表面等离子体共振折射率传感器

王雨,韩飞,郎婷婷,赵春柳*

(中国计量大学 光学与电子科技学院,杭州 310018)

摘要:表面等离子体共振(SPR)传感器常用的光纤处理方法易使光纤结构脆弱,从而导致机械性能下降,提出了一种基于细芯光纤(TCF) SPR原理的折射率传感器。通过使用单侧均匀涂覆金(Au)膜的多模光纤-细芯光纤-多模光纤(MMF-TCF-MMF)结构作为传感单元,折射率传感器能够在 $1.34\sim 1.4161$ 的范围内达到 3045.69 nm/RIU 的衰减谷宽度灵敏度和 48.09 dB/RIU 的能量损耗灵敏度;在 $1.34\sim 1.3797$ 的范围内达到 112.21 nm/RIU 的 SPR 峰波长灵敏度和 -86.27 dB/RIU 的 SPR 峰值灵敏度。实验结果表明:与传统 SPR 传感器相比,该传感器易制备,且机械稳定性和灵敏度高。

关键词:表面等离子体共振;细芯光纤;折射率光纤传感器

中图分类号:TN212 文献标识码:A 文章编号:1002-5561(2019)08-0032-03

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2019.08.008

开放科学(资源服务)标识码(OSID)



Surface plasmon resonance refractive index sensor based on thin-core optical fiber structure

WANG Yu, HAN Fei, LANG Tingting, ZHAO Chunliu*

(College of Optical and Electronic Technology, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: The common optical fiber processing methods of surface plasmon resonance (SPR) sensors can easily make the optical fiber structure fragile, which leads to the decline of mechanical properties. A refractive index sensor based on thin core fiber (TCF) surface plasmon resonance SPR principle is proposed. Multimode optical fiber-thin core optical fiber-multimode optical fiber (MMF-TCF-MMF) structure with uniformly coated gold (Au) film on one side is used as sensing unit, and the refractive index sensor can reach 3045.69 nm/RIU attenuation Valley width sensitivity and 48.09 dB/RIU energy loss sensitivity in the range of $1.34\sim 1.3797$, and 112.21 nm/RIU SPR peak wavelength sensitivity and -86.27 dB/RIU SPR peak wavelength sensitivity in the range of $1.34\sim 1.3797$. PR peak sensitivity. The experimental results show that compared with traditional SPR sensors, the sensor is easy to fabricate and has high mechanical stability and sensitivity.

Key words: SPR; TCF; RI optical fiber sensors

0 引言

自上世纪 80 代表面等离子体共振 (SPR) 现象被提出以来^[1],开展了各种关于 SPR 效应的研究,SPR 传感器在技术上逐渐完善,在应用方面逐渐成熟^[1-9]。从 1993 年 Jorgenson 和 Yee 提出了第一个光纤 SPR

传感器以来^[10],研究人员开发了许多新的光纤 SPR 传感器。大多数基于光纤结构的 SPR 传感器需要设法移除包层,使得倏逝波可以到达金属与电介质的界面,与激发的表面等离子体波 (SPW) 产生共振。常见的方法有化学溶解^[11,12]、制作微结构光纤^[8,13-17]、机械抛光^[18-20]和光纤拉锥^[21-23]等,但这些方法会导致光纤结构脆弱、机械性能下降。还有一些其它方法,例如使用倾斜光栅^[24]或以特定角度抛光端面的探针^[25],虽然能够保持光纤的性能,但都需要复杂的操作来实现。而细芯光纤 (TCF) 作为一种特殊结构的光纤,具有比普通光纤几何尺寸小很多的纤芯结构。当信号光进入 TCF 时,芯径比例失配会导致在纤芯传播的光大量泄漏进入包层,使倏逝波很容易达到 TCF 和环境电介质的交

收稿日期:2018-12-04。

基金项目:国家重点研发专项(批准号:2017YFC0805905)资助。

作者简介:王雨(1995-),女,河南郑州人,研究生(博士在读),OSA、IEEE 会员。本科毕业于北京航空航天大学,研究生毕业于英国南安普敦大学,目前系中国计量大学在读研究生,以及英国南安普敦大学在读博士生。主要研究方向是光学传感器、光学放大器。

* 通信作者:赵春柳(E-mail: clzhao@cjl.u.edu.cn)。



界面处, 因此不需要对 TCF 特殊处理, 便可以保持光纤良好的机械性能。由于 SPW 的光学特性强烈依赖于周围介质的折射率, 因此 TCF 可用于环境折射率的高精度传感。

本文提出一种基于 TCF 的 SPR 原理折射率传感器, 可有效地激发 SPR 效应, 实现高精度折射率传感。

1 实验装置和传感原理

基于 TCF 的 SPR 原理折射率传感器的系统结构如图 1 所示。为了有效地激发 SPW, 光源采用覆盖了 350~1050 nm 波长范围的卤素光源。该装置由宽带光源(BBS)、单侧均匀涂覆金(Au)膜的多模光纤-细芯光纤-多模光纤(MMF-TCF-MMF)结构和光谱仪(OSA)组成。其中, 传感单元由 MMF-TCF-MMF 结构在单侧均匀涂覆一层 Au 膜制成。

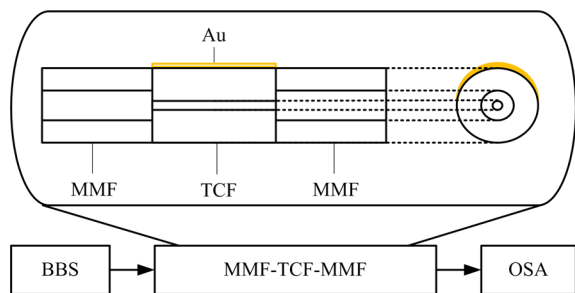


图 1 基于 TCF 的 SPR 折射率传感器结构

从图 1 可以看出, 两端的 MMF 完全相同(纤芯直径为 62.5 μm , 包层直径为 125 μm), 用以连接 BBS 和 OSA。由于 MMF 大芯径的特点, 提高了传播模式进入 TCF 时的芯径差异, 更有利于光能量在 TCF 中向包层泄露。1 段 18 mm 长的 TCF(纤芯直径约为 3 μm)被熔接在两段 MMF 之间, 之后采用离子束溅射的技术将用于 SPR 传感的 Au 膜涂覆在 MMF-TCF-MMF 结构的外表面。

由于 TCF 的芯径明显小于 MMF, 当信号光从前一段 MMF 入射到 TCF 中时, 包层模式将被激发。其中, 高阶的包层模将传播到达 TCF 和 Au 膜的交界处, 发生衰减全反射(ATR), 形成强烈的倏逝场和激发 SPW。当倏逝波和 SPW 的波矢相匹配时, 产生 SPR 效应。SPR 谐振波长和 SPR 共振引起的能量损耗随着环境介质的折射率而发生改变。因此, 通过检测 SPR 谐振波长的漂移量或 SPR 能量损耗的变化量, 可实现对折射率的检测。

2 实验结果和分析

根据 SPR 效应的发生条件, 传感区样品折射率的变化将导致 SPR 谐振波长漂移和谐振损耗变化。在如图 1 所示实验装置中, 本文检测了基于 MMF-TCF-MMF 结构的 SPR 传感器在 1.34~1.4161 折射率范围内的响应。环境折射率的改变是通过在传感区添加不同折射率的溶液来实现。SPR 透射光谱随传感区样品折射率的变化如图 2 所示, 其中小图为 SPR 波长的细节图。当传感区介质的折射率增加时, SPR 谐振波长向长波方向轻微漂移, 对应的峰谷逐渐变深。SPR 光谱的衰减深度变深(其中长波区域干涉谱的加深尤为明显), 且衰减谷的宽度向长波方向变宽(即 SPR 波长的红移所致)。因此, 由 SPR 峰的移动和 SPR 衰减能量的变化可以得到环境介质折射率。

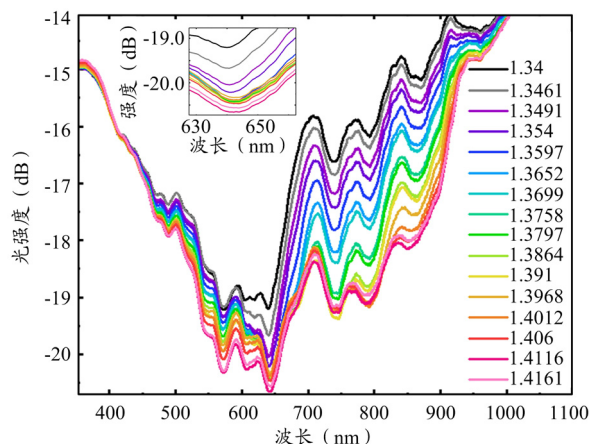


图 2 SPR 透射光谱随折射率变化图

由图 2 可知, 当传感区样品折射率从 1.34 变化到 1.4161 时, SPR 谐振波长从 640.04 nm 漂移到 643.89 nm, 变化并不明显。同时, 在传感区折射率增加的过程中, 透射光谱的衰减谷变深, 且衰减范围向长波方向扩展, 衰减谷宽度从 115.1 nm 增加到 200.12 nm, SPR 引

起的能量损耗从 2.66 dB 增加到 4.45 dB。本文拟合并分析了 SPR 衰减谷宽度和传感区样品折射率数据, 得出 SPR 衰减谷宽度与传感区样品折射率的关系曲线如图 3 所示。在传感区折射率从 1.34 变化到 1.4161 的过

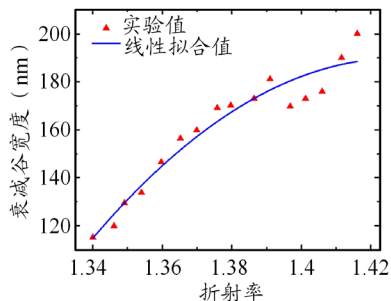


图 3 SPR 衰减谷宽度随折射率变化曲线

程中, SPR 衰减谷宽度的增加量为 85.02 nm, 因此, 可得基于 TCF 结构的 SPR 折射率传感器的平均宽度灵敏度为 1117.21 nm/RIU。经分析并拟合, 得到 SPR 衰减谷宽度随传感区样品折射率的变化呈二次函数关系, 且得到拟合曲线 W 的表达式为:

$$W = -9679.96n^2 + 27647.98n - 19552.21 \quad (1)$$

相关系数 $R^2 = 0.92$ 。二次曲线公式两边对样品区折射率 n 求导可得:

$$\frac{dW}{dn} = -18359.92n + 27647.98 \quad (2)$$

从 SPR 衰减谷宽度随折射率变化速率方程可知, 基于 TCF 结构的 SPR 折射率传感器的灵敏度随着样品区的折射率变化而变化。在折射率范围 1.34~1.4161 内, 基于 TCF 的 SPR 原理折射率传感器的宽度灵敏度在 3045.69~1648.5 nm/RIU 范围内。

本文拟合分析了 SPR 谐振峰强度值和传感区样品折射率数据, 得出 SPR 谐振峰强度值与传感区样品折射率的关系曲线如图 4 所示。可以看出, 在传感区折射率 1.34 变化到 1.4161 的过程中, SPR 损耗的增加量为 1.79 dB, 因此,

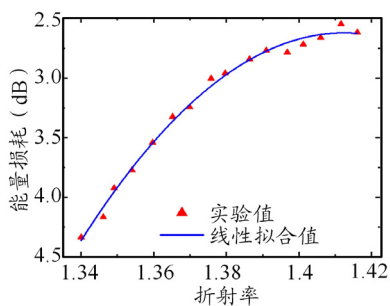


图 4 SPR 能量损耗随折射率变化曲线

基于 TCF 结构的 SPR 折射率传感器的平均损耗灵敏度 23.52 dB/RIU。经分析 SPR 损耗与传感区样品折射率数据, 得到 SPR 损耗随传感区样品折射率的变化呈二次函数关系, 得到拟合曲线 α 的表达式为:

$$\alpha = -331.36n^2 + 936.13n - 656.78 \quad (3)$$

相关系数 $R^2 = 0.99$ 。二次曲线公式两边对样品区折射率 n 求导可得:

$$\frac{d\alpha}{dn} = -662.72n + 936.13 \quad (4)$$

从 SPR 能量损耗随折射率变化速率方程可知, 基于 TCF 结构的 SPR 折射率传感器的灵敏度随着样品区的折射率变化而变化。在折射率范围 1.33~1.4161 内, 基于 TCF 的 SPR 原理折射率传感器的损耗灵敏度在 48.09~2.35 dB/RIU 范围内。

3 结束语

本文提出了一种基于 TCF 的 SPR 原理折射率传感器。该传感器的传感单元由一侧镀有 Au 膜的 MMF-

TCF-MMF 结构组成, 仅利用 BBS 和光探测器即可实现传感, 装置简单且实用。实验表明, 该传感器结构可有效激发 SPR 效应; 随着传感区样品折射率的增大, SPR 谐振波长向长波方向漂移, 对应的峰值强度减小, 且 SPR 引起的能量损耗增加, 透射光谱的衰减谷向长波方向变宽。因此, 基于 TCF 结构的光纤 SPR 传感器可实现折射率的精确测量, 且 SPR 衰减谷宽度灵敏度极高, 已达到 3045.69 nm/RIU。所提出的传感器具有体积小和机械稳定性高的优势, 在生物化学领域拥有更广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] LIEBERG B, NYLANDER C I, Lundstrom. Surface plasmon resonance for gas detection and biosensing[J]. Sensors and Actuators, 1983, 4(1): 299-304.
- [2] MATSUBARA K, KAWATA S, MINAMI S. Optical chemical sensor based on surface plasmon measurement[J]. Appl. Opt., 1988, 27(6): 1160-1163.
- [3] HOMOLA J, YEE S. S, Gauglitz G. Surface plasmon resonance sensors: review[J]. Sens. actuators B, 1999, 54(1-2): 3-15.
- [4] IGA M, SEKI A, WATANABE K. Gold thickness dependence of SPR-based hetero-core structured optical fiber sensor[J]. Sensors Actuators B, 2005, 106(1): 363-368.
- [5] 王雁茹, 赵春柳, 康娟. 基于 Otto 结构的光纤 SPR 微位移传感器[J]. 光通信技术, 2016, 4(1): 30-32.
- [6] DING Z, LANG T, WANG Y, et al. Surface Plasmon Resonance Refractive Index Sensor Based on Tapered Coreless Optical Fiber Structure [J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(21): 4734-4739.
- [7] JORGENSEN R.C, YEE S.S. A fiber-optic chemical sensor based on surface plasmon resonance [J]. Sensors Actuators B Chem, 1993, 12(3): 213-220.
- [8] CARLOS L, COELHO C. Multiplexing of Surface Plasmon Resonance Sensing Devices on Etched Single-Mode Fiber[J]. J. Light. Technol., 2015, 33(2): 432-438.
- [9] PATNAIK A, SENTHILNATHAN K, JHA R. Graphene-Based Conducting Metal Oxide Coated D-Shaped Optical Fiber SPR Sensor[J]. IEEE Photonics Technol. Lett., 2015, 27(23): 2437-2440.
- [10] WOO-HU T, YU-CHENG L, JIU-KAI T, et al. Multi-step structure of side-polished fiber sensor to enhance SPR effect [J]. Opt. Laser Technol., 2010, 42(3): 453-456.
- [11] 石朝霞, 胡兴柳, 杨忠, 等. 高灵敏度镀膜拉锥光纤液体折射率传感器[J]. 光通信技术, 2017, 41(7): 25-28.
- [12] 张鹏程, 吕敏, 陈笑, 等. 光纤表面等离子体共振传感器锥型探头的研制[J]. 中国激光, 2013, 40(3): 1-5.
- [13] CAUCHETEUR C, SHEVCHENKO Y, SHAO L, et al. High resolution interrogation of tilted fiber grating SPR sensors from polarization properties measurement[J]. 2011, 19(2): 2153-2155.
- [14] LIHANG F, JIE Z, DAKAI L, et al. Development of fiber-optic surface plasmon resonance sensor based on tapered structure probe [J]. Acta Phys. Sin., 2013, 62(12): 1-8.