

doi:10.3788/gzxb20174610.1006004

基于 U 型结构的单模光纤 SPR 折射率传感器

薛萌, 刘琨, 王涛, 常鹏翔, 江俊峰, 刘铁根

(天津大学 精密仪器与光电子工程学院 天津大学光纤传感研究所, 天津市光纤传感工程中心,
天津大学光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072)

摘 要:设计了一种基于 U 型结构的单模光纤表面等离子体共振折射率传感器, 采用在移除部分包层并弯曲成 U 型固定后的单模光纤表面镀金纳米层和 TiO_2 调制层的方式, 实现表面等离子体共振的激发. 利用有限元仿真软件 COMSOL Multiphysics, 研究了不同弯曲半径和 TiO_2 调制层厚度对传感性能的影响. 通过对四种弯曲半径 ($R=0.3\text{ cm}, 0.5\text{ cm}, 0.8\text{ cm}, 1\text{ cm}$) 的分析, 结果表明随着弯曲半径增大, 表面等离子体共振信号强度增大且峰值波长有微小的蓝移. 在弯曲半径为 0.5 cm 的条件下, 研究了 TiO_2 调制层厚度从 0 变化到 40 nm 对传感器性能的影响, 结果表明随着 TiO_2 调制层厚度增大, 表面等离子体共振峰峰值波长红移且对外界折射率变化的灵敏度显著增大. 在弯曲半径为 0.5 cm , TiO_2 调制层厚度为 40 nm 的条件下, 传感器在低折射率区 ($n_d=1.333$) 灵敏度达到了 $5\ 959\text{ nm/RIU}$, 高折射率区 ($n_d=1.383$) 灵敏度达到了 $11\ 092\text{ nm/RIU}$. 与没有调制层的结果相比, 灵敏度提高了一倍左右.

关键词: 光纤传感器; 表面等离子体共振; 有限元方法; 电介质薄层; 多层膜

中图分类号: TP212.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2017)10-1006004-6

Single Mode Fiber SPR Refractive Index Sensor Based on U-shaped Structure

XUE Meng, LIU Kun, WANG Tao, CHANG Peng-xiang, JIANG Jun-feng, LIU Tie-gen

(School of Precision Instrument & Opto-electronics Engineering, Institute of Optical Fiber Sensing of Tianjin University, Tianjin Optical Fiber Sensing Engineering Center, Key Laboratory of Opto-Electronics Information Technology, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: A single-mode fiber surface plasmon resonance refractive index sensor based on U-shaped structure was designed. The sensor is fabricated by coating the gold nanometer layer and the TiO_2 modulation layer on the surface of single-mode optical fiber whose cladding is partially removed and then is bent into U-shape. The impact of different bending radius and thickness of TiO_2 on the sensing performance was studied by using finite element simulation software COMSOL Multiphysics. Through analyzing four different bend radii ($R=0.3\text{ cm}, 0.5\text{ cm}, 0.8\text{ cm}, 1\text{ cm}$), we found that with the increase of the bending radius, the surface plasmon resonance signal intensity increases and the peak shifts to shorter wavelength slightly. The performance of the sensor with different thickness of the TiO_2 modulation layer from 0 to 40 nm was studied under the condition of bending radius of 0.5 cm . With the increase of the thickness of the TiO_2 modulation layer, the surface plasmon resonance peak shifts to longer wavelength and the sensitivity of the peak to the analyte refractive index increases significantly. The sensitivity of the sensor in the low refractive index region ($n_d=1.333$) reached $5\ 959\text{ nm/RIU}$ and the sensitivity of the high refractive index region ($n_d=1.383$) reached $11\ 092\text{ nm/RIU}$ at the bending radius of 0.5 cm and the thickness of the TiO_2 modulation layer was 40 nm . Compared with the results of no modulation layer, the sensitivities increase by about doubled.

Key words: Keywords: Fiber optic sensors; Surface plasmon resonance; Finite element method;

基金项目: 国家自然科学基金 (Nos. 61108070, 61227011, 61378043, 61475114) 和国家仪器专项 (No. 2013YQ030915) 资助

第一作者: 薛萌 (1990-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光纤 SPR 传感技术. Email: 1165936664@qq.com

导师: 刘琨 (1981-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为光纤传感及光电检测. Email: beiyangkl@tju.edu.cn

收稿日期: 2017-04-27; 录用日期: 2017-06-15

<http://www.photon.ac.cn>

Dielectric films; Multilayer films

OCIS Codes: 060.2370; 240.6680; 310.0310; 280.5395

0 引言

近年来,基于光纤的表面等离子体共振(Surface Plasmon Resonance, SPR)传感技术引起了广泛关注。相比于棱镜 SPR 激发结构,光纤结构具有体积小,结构简单,抗电磁干扰能力强,易于实现长距离实时检测等优点,在生物医学^[1]、食品安全^[2]、环境监测^[3]等领域具有广阔的应用前景。

随着光纤 SPR 传感器的发展,各种各样的结构被报道出来,大体上可以分为三类^[4]:光纤几何结构改变型;光纤光栅结构辅助型;特种光纤型。光纤几何结构改变型是指通过拉锥^[5-6]、弯曲、多模-单模-多模拼接^[7]、侧边抛磨^[8]等方式使得纤芯能量泄露出来激发表面等离子体共振的一类结构,相比其他两类,其制作成本低且灵活多样。特别是弯曲光纤结构,通过弯曲改变传导光的波矢使其能够更好地与表面等离子体波耦合激发 SPR,结构简单稳定,实用价值高。R K Verma 和 B D Gupta^[9]通过 N 层膜传输矩阵的方法理论计算了 600 微米 U 型光纤 SPR 传感结构弯曲半径与灵敏度的关系;Daniel P. Duarte 等^[10-11]进一步利用 N 层膜传输矩阵方法计算了单模 U 型光纤在 1 550 nm 波段的传感特性并基于这种结构提出了一种压力传感器。

由于单模光纤纤芯直径并不是远远大于光波长,几何光学的研究方法不太适用,需要使用波动光学来描述,并且光纤是三维结构, Daniel P. Duarte 等的方法是将光纤简化为二维波导来模拟,因此存在一定的误差。有限元模式分析的方法是将求解区域分解为很多个小的网格单元然后求解麦克斯韦方程组,得到结构所支持的波导模式,通过模式损耗来得到透射光谱,这种方法网格划分越精细,结果就越准确。为了更精确地研究并改善 U 型光纤 SPR 传感器的性能,本文提出了去除单模光纤部分包层并增加 TiO₂ 调制层的新结构,通过有限元的方法来模拟这种 U 型光纤 SPR 传感器的折射率传感特性,研究了不同弯曲半径和调制层厚度对 SPR 光谱特征的影响。

1 理论模型

U 型光纤 SPR 传感器结构如图 1(a)所示,纤芯直径 $d_{co}=8\ \mu\text{m}$,包层直径 $d_{cl}=20\ \mu\text{m}$,弯曲半径为 R 。为了分散弯曲应力,提高结构的稳定性,将 U 型光纤缠绕在相应尺寸的橡胶柱上用胶水固定。光纤中的传导

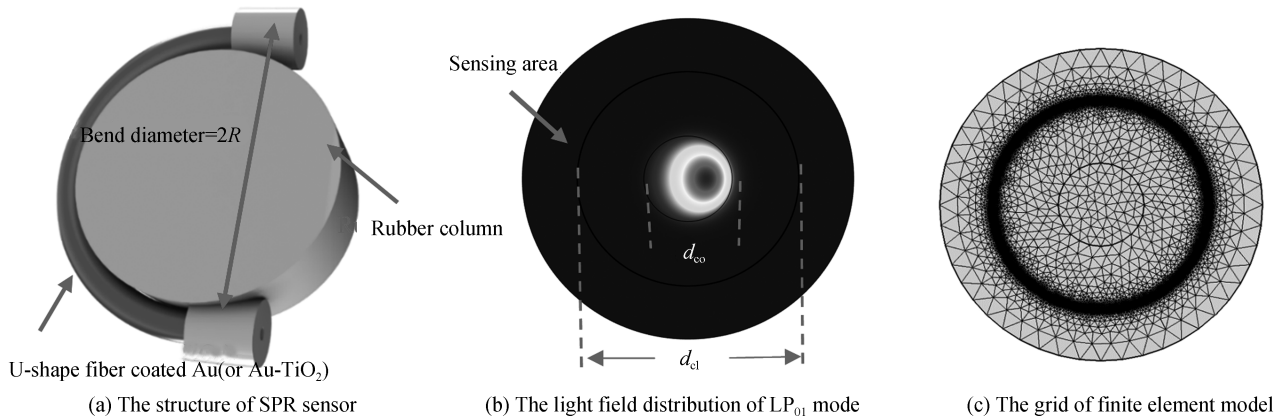


图 1 U 型光纤 SPR 传感器的结构及其有限元模型

Fig.1 The structure and finite element model of U-shaped optical fiber SPR sensor

光进入 U 型区域后,由于光纤弯曲,传导光在纤芯与包层界面不再满足全反射从而进入包层,产生了许多高阶传播模式,在光纤表面镀一层金,厚度为 $d_m=50\ \text{nm}$,如果高阶传播模式为 p 偏振模式且与金属外表面的表面等离子体的传播常数满足波矢匹配条件(式(1))时,将会产生表面等离子体共振,将能量耦合给表面等离子体波。

$$\beta_g = \beta_{\text{spp}} = k_0 \sqrt{\epsilon_m n_d^2 / (\epsilon_m + n_d^2)} \quad (1)$$

式(1)中, β_g 和 β_{spp} 分别为高阶传播模式和表面等离子体波的传播常数, k_0 为真空中的波矢, ϵ_m 为金属的介电常数, n_d 为待测介质的折射率。在采用宽带光源作为传感光源的条件下,透射光谱中特定的波长将会形成

损耗峰,当待测物质折射率改变时,损耗峰峰值波长的位置也会漂移,从而通过检测损耗峰峰值波长的位置便可求出待测物质的折射率.设定纤芯材料的折射率为 $n_{co}=1.4457$,包层材料折射率为 $n_{cl}=1.4378$ ^[12].待测物质折射率 n_d 变化范围为 $1.333\sim 1.383$.金的介电常数由 Drude 模型给出

$$\epsilon_{Au}(\lambda)=1-\{\lambda^2\lambda_c/[\lambda_p^2(\lambda_c+i\lambda)]\} \quad (2)$$

式(2)中, λ_c 和 λ_p 分别为金属的共振波长和等离子体波长,对金(Au)来说, $\lambda_p=0.16826\mu\text{m}$, $\lambda_c=8.9342\mu\text{m}$ ^[13].在金纳米层的表面镀一层电介质薄层作为调制层,电介质层的材料选择 TiO_2 ,主要是由于其介电常数高,化学性质稳定并且在可见和近红外呈现透明特性,具有较低的吸收率.其介电常数表示为^[14]

$$\epsilon_{\text{TiO}_2}(\lambda)=5.913+\{0.2441/[(\lambda^2-0.0803)]\} \quad (3)$$

此时,影响 SPR 谐振特征的是 TiO_2 调制层和待测物质二者的有效折射率 n_{eff} ,其可以表示为^[15]

$$n_{\text{eff}}=n_d \exp(-2d/l)+n_{\text{TiO}_2}[1-\exp(-2d/l)] \quad (4)$$

式(4)中, d 为调制层厚度, l 为表面等离子体波的穿透深度.通过控制 TiO_2 的厚度,可以改变有效折射率,从而将 SPR 谐振峰向长波方向移动,进而获得更高的灵敏度.

本文采用有限元模式分析的方法,对这种 U 型光纤结构所能支持的传播模式进行计算,得到每种模式的有效折射率 N_{eff} ,利用导模有效折射率的实部满足($n_{\text{eff}}<\text{real}(N_{\text{eff}})<n_{co}$)筛选出真实存在的传播模式将一些并非光纤传播模式的表面等离子体极化模式(Surface Plasmon Polariton mode, SPP mode)去除,利用有效折射率的虚部通过式(5)^[16]计算传播模式的损耗,从而得到 U 型光纤 SPR 传感器的损耗光谱.

$$\text{Loss}=\frac{40\pi}{\ln(10)\lambda}\text{Im}(N_{\text{eff}})\times L\approx 8.686\times\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)\text{Im}(N_{\text{eff}})\times L \text{ (dB)} \quad (5)$$

式(5)中, $L=\pi R$ 为弯曲区域的长度, λ 为光波长.在某一波长下,将上述求解出的所有传播模式的损耗相加,得到该波长的损耗值,然后对波长进行扫描就能求出损耗光谱.图 2(a)(b)为 SPP 模,当光纤导模有效折射率的实部与 SPP 模有效折射率的实部相等时,二者耦合产生表面等离子体共振现象.图 2(c)(d)为 U 型光纤所支持的两种高阶传播模式的光场分布,右侧为远离弯曲中心的一侧,在光纤外表面可以观察到明显的表面等离子体共振现象.这种 U 型光纤结构激发的低阶 SPP 模式处于远离弯曲中心的一侧,低阶 SPP 模与光纤导模之间耦合比高阶 SPP 模更为容易且耦合强度高,其耦合产生的损耗是构成 SPR 损耗峰的主要部分,因此光纤镀膜时仅镀一侧即可(先弯曲成 U 型固定再镀膜),无需让光纤旋转,从而避免光纤折断,减小工艺难度.

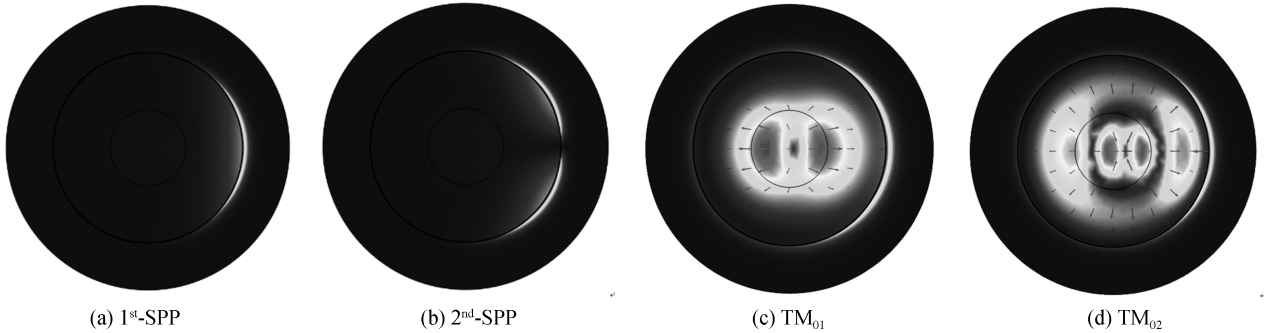


图 2 U 型光纤 1 阶和 2 阶 SPP 模以及 TM_{01} 和 TM_{02} 传导模(箭头表示偏振态)

Fig.2 The 1st-order and 2nd-order SPP mode, TM_{01} and TM_{02} mode of the U-shaped optical fiber (arrow indicates polarization)

2 结果分析

采用模式分析法在每个波长对应的基模附近求解 30 个模式,剔除不符合条件的模式后计算其总损耗,然后对波长进行扫描,扫描间隔为 1 nm .图 3 为弯曲半径 $R=0.5\text{ cm}$ 且仅有厚度为 50 nm 的金膜条件下,不同待测物质折射率的损耗谱.可以看出,随着待测物质折射率的增大,损耗峰峰值波长红移.同时,由于待测物质折射率与包层折射率的差减小,包层模倏逝场增强,进而激发的 SPR 强度增加,导致损耗峰强度增大.特别地,当待测物质折射率为 $n_d=1.383$ 时,损耗峰强度达到了 28.7 dB 左右.这是因为发生了“anti-crossing”,即光纤导模与 SPP 模的有效折射率实部之间非常接近但并未形成相位匹配,而有效折射率的虚部之间

发生了“loss-matching”,导模能量几乎完全耦合给等离子体模,因此损耗峰强度特别高^[17-18].此外,因为在计算模式损耗时选取的模式个数有限,且激发的SPR强度太大会导致剔除等离子体模式的难度增大,从而损耗峰上会存在许多毛刺.为减小由此带来的寻峰误差,在求峰值波长时采用高斯函数拟合的方法.

图4(a)为不同弯曲半径 $R=0.3\text{ cm}$, 0.5 cm , 0.8 cm 和 1 cm 在待测物质折射率 $n_d=1.333$ 条件下损耗峰对比.峰值高度依次为 2.84 dB , 4.36 dB , 7.44 dB 和 10.24 dB .可以看出损耗峰峰值强度随弯曲半径增大而增大,这是因为大弯曲半径对应的有效传感长度大,从而获得了更强的传感信号.此外,损耗峰峰值波长随弯曲半径增大有微小的蓝移,如图4(b).在待测物质折射率 $n_d=1.333$ 时,对应的SPR损耗峰波长分别为 638.2 nm , 638.1 nm , 637.3 nm , 636.9 nm .这与 Daniel P. Duarte 等得到的规律是一致的.

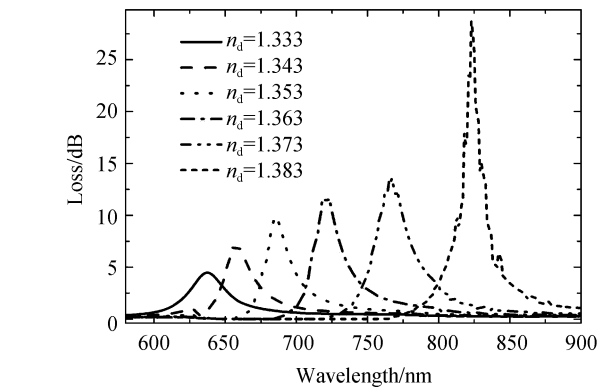
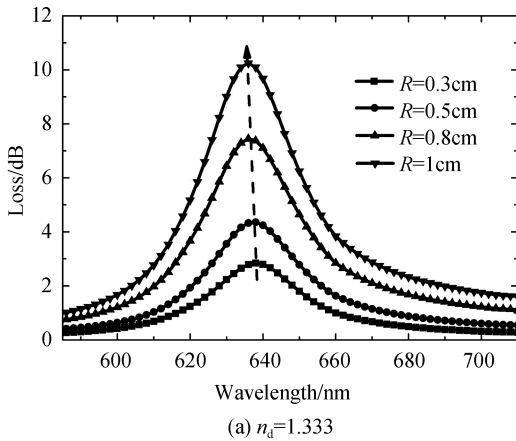


图3 不同待测物质折射率下的SPR损耗光谱(弯曲半径 $R=0.5\text{ cm}$)

Fig.3 The SPR loss spectra for different analyte refractive indices (in the condition of bend radius $R=0.5\text{ cm}$)

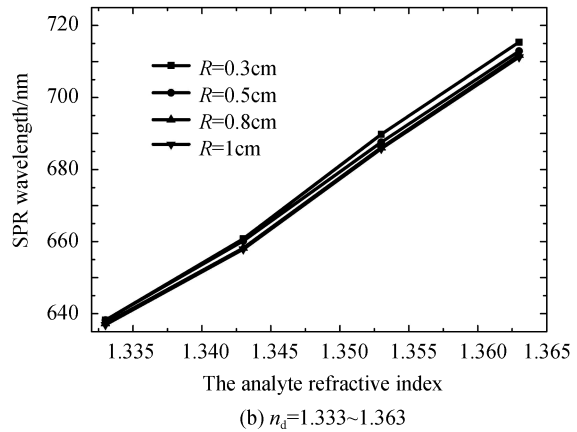


图4 SPR损耗峰强度变化

Fig.4 Variation of the SPR loss peaks' intensities

增大 TiO_2 电介质层的厚度,SPR损耗峰向长波方向移动,如图5所示.在弯曲半径 $R=0.5\text{ cm}$ 待测物质折射率 $n_d=1.333$ 的条件下, TiO_2 厚度每增加 10 nm ,SPR峰值波长漂移量变化依次为 156 nm , 163 nm , 166 nm , 173 nm .本文计算了不同 TiO_2 厚度下,SPR损耗峰峰值波长随待测物质折射率的变化如图6所示.

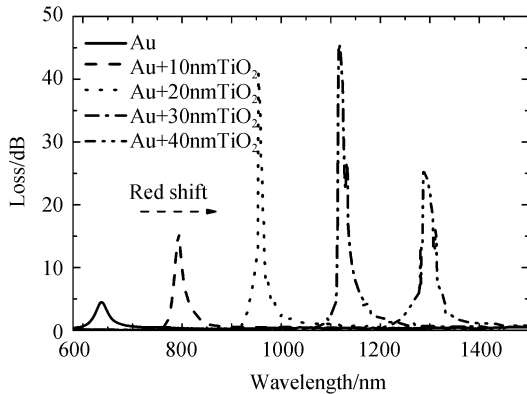


图5 在 $n_d=1.333$, $R=0.5\text{ cm}$ 条件下,不同 TiO_2 层厚度下的SPR损耗光谱

Fig.5 The SPR loss spectra for different thicknesses of TiO_2 layer in the condition of $n_d=1.333$ and $R=0.5\text{ cm}$

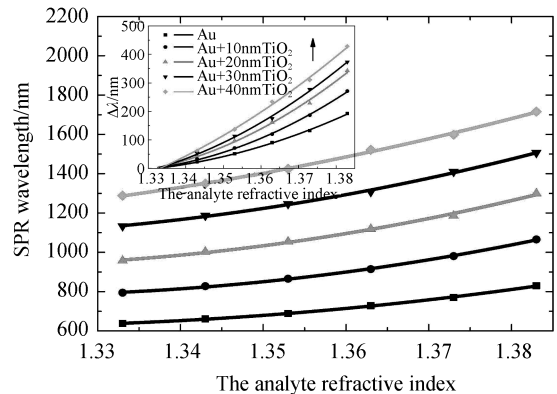


图6 SPR损耗峰波长随待测物质折射率的变化,插图为对应波长漂移量的变化

Fig.6 Variations of the SPR loss peaks' wavelengths with the analyte refractive index, inset shows the variation of the corresponding $\Delta\lambda$

SPR 损耗峰峰值波长随折射率的增大向长波方向移动;并且在同一折射率 n_d 下,漂移量 $\Delta\lambda$ 随 TiO_2 厚度增加而增大.特别地,SPR 损耗峰波长与待测折射率 n_d 之间不是线性关系,通过二次多项式对得到的数据点进行拟合,并用每一点的斜率来表征灵敏度,得到灵敏度随折射率的变化关系如图 7.在待测物质折射率 $n_d = 1.333$ 时,对应的折射率灵敏度分别为 1 637 nm/RIU, 2 018 nm/RIU, 3 016 nm/RIU, 4 003 nm/RIU, 5 959 nm/RIU.在待测物质折射 $n_d = 1.383$ 时,对应的折射率灵敏度分别为 5 940 nm/RIU, 8 624 nm/RIU, 10 282 nm/RIU, 10 833 nm/RIU, 11 092 nm/RIU.由于寻峰误差和拟合误差的存在,不同 TiO_2 厚度下的灵敏度随折射率变化曲线的一致性有差异,但是基本上灵敏度随 TiO_2 厚度增大而增大.

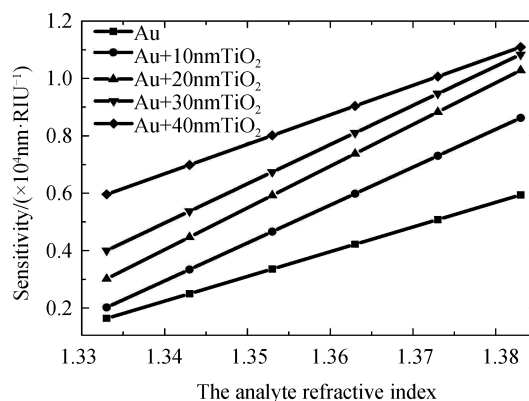


图 7 不同 TiO_2 厚度下灵敏度随待测物质折射率的变化
Fig.7 Variation of the sensitivity with the analyte refractive index for different thickness of TiO_2 layer

3 结论

本文设计了一种去除单模光纤部分包层并在金膜表面加镀 TiO_2 调制层的 U 型结构光纤 SPR 折射率传感器,通过有限元仿真的方法,计算了弯曲半径和 TiO_2 厚度对 SPR 损耗峰强度及峰值波长的影响.结果表明,弯曲半径增大,得到的 SPR 信号强度增大,峰值波长蓝移; TiO_2 厚度增大,SPR 损耗峰波长红移,且折射率灵敏度显著增大.在弯曲半径为 0.5 cm, TiO_2 调制层厚度为 40 nm 的条件下,传感器在低折射率区 ($n_d = 1.333$) 灵敏度达到了 5 959 nm/RIU,高折射率区 ($n_d = 1.383$) 灵敏度达到了 11 092 nm/RIU.与没有调制层相比灵敏度提高了一倍左右.

参考文献

- [1] ARGHIR I, DELPORT F, SPASIC D, *et al.* Smart design of fiber optic surfaces for improved plasmonic biosensing[J]. *New Biotechnology*, 2015, **32**(5): 473-484.
- [2] PILIARIK M, PAROVA L, HOMOLA J. High-throughput SPR sensor for food safety[J]. *Biosensors & Bioelectronics*, 2009, **24**(5): 1399-1404.
- [3] ZHANG Xiao-li, LIANG Da-kai, ZENG Jie, *et al.* Monitoring the sewage degradation by analyzing optic fiber sprspectrum character[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, **30**(2): 532-536.
张晓丽, 梁大开, 曾捷, 等. 基于光纤 SPR 光谱分析的污水降解过程监测研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2010, **30**(2): 532-536.
- [4] CAUCHETEUR C, GUO T, ALBERT J. Review of plasmonic fiber optic biochemical sensors: improving the limit of detection[J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2015, **407**(14): 3883-3897.
- [5] DÍEZ A, ANDR S M V, CRUZ J L. In-line fiber-optic sensors based on the excitation of surface plasma modes in metal-coated tapered fibers[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2001, **73**(2-3): 95-99.
- [6] MONZ N-HERN N D, VILLATORO J. High-resolution refractive index sensing by means of a multiple-peak surface plasmon resonance optical fiber sensor[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2006, **115**(1): 227-231.
- [7] HU Tao, ZHAO Yong, SONG An-ning. Fiber optic SPR sensor for refractive index and temperature measurement based on MMF-FBG-MMF structure[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2016, **237**: 521-525.
- [8] ZHAO Jing, CAO Shao-qing, LIAO Chang-rui, *et al.* Surface plasmon resonance refractive sensor based on silver-coated side-polished fiber[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2016, **230**: 206-211.
- [9] VERMA R K, GUPTA B D. Theoretical modelling of a bi-dimensional U-shaped surface plasmon resonance based fibre optic sensor for sensitivity enhancement[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2008, **41**(9): 095106.
- [10] DUARTE D P, ALBERTO N J, BILRO L, *et al.* Theoretical modeling of an U-shaped SPR fiber sensor in 1550 nm spectral range for sensing applications[C]. Second International Conference on Applications of Optics and Photonics. Bellingham; Spie-International Society Optical Engineering, 2014: 928640-928645.
- [11] DUARTE D P, ALBERTO N J, BILRO L, *et al.* Theoretical design of a high sensitivity SPR-based optical fiber pressure sensor[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, **33**(22): 4606-4611.
- [12] FENG De-jun, LIU Guan-xiu, ZHANG Mao-sen, *et al.* D-shaped fiber optic SPR biosensors based on a metal-graphene structure[J]. *Chinese Optics Letters*, 2013, **11**(11): 38-41.

- [13] ORDAL M A, LONG L L, BELL R J, *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]. *Applied Optics*, 1983, **22**(7): 1099-1119.
- [14] DEVORE J R. Refractive indices of rutile and sphalerite[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1951, **41**(6): 416-419.
- [15] LEE Kuang-li, CHANG Chia-chun, YOU Meng-lin, *et al.* Enhancing the surface sensitivity of metallic nanostructures using oblique-angle-induced fano resonances[J]. *Scientific Reports*, 2016, **6**: 33126.
- [16] AKOWUAH E K, GORMAN T, ADEMGIL H, *et al.* Numerical analysis of a photonic crystal fiber for biosensing applications[J]. *IEEE Journal of QuantumElectronics*, 2012, **48**(11): 1403-1410.
- [17] SHUAI Bin-bin, LIU De-ming, XIA Li, *et al.* A multi-core holey fiber based plasmonic sensor with large detection range and high linearity[J]. *Optics Express*, 2012, **20**(6): 5974-5986.
- [18] NAYAK J K, JHA R. Numerical simulation on the performance analysis of a graphene-coated optical fiber plasmonic sensor at anti-crossing[J]. *AppliedOptics*, 2017, **56**(12): 3510-3517.

Foundation item: The National Natural Science Foundation of China(Nos. 61108070, 61227011, 61378043, 61475114) and the National Instrumentation Program(No.2013YQ030915)