

基于Otto模型的双芯光纤SPR位移传感器

王文彬, 顾宏*, 张敏, 陈志勇, 杨天琪

天津工业大学物理科学与技术学院, 天津

收稿日期: 2022年12月9日; 录用日期: 2023年1月3日; 发布日期: 2023年1月12日

摘要

基于表面等离子体共振(SPR)理论, 研究了一种双芯光纤侧面抛磨结构的纳米位移传感器; 这种微型传感器在双芯光纤侧面抛磨区采用Otto模型, 使用45 nm厚的银膜来激发双芯光纤抛磨表面的等离子体共振效应, 抛磨面与银膜之间的间隙距离即为所要测量的纳米位移。基于有限元分析方法对传感模型以及双芯光纤中的传输光路进行仿真, 然后通过多层膜传输理论计算, 来进一步验证和优化传感器的性能, 从而获得不同纳米位移时共振曲线的分布。间隙层纳米位移的变化与共振波长的偏移具有良好的线性关系, 位移测量范围为50 nm至150 nm, 灵敏度为0.12594 nm/nm。

关键词

表面等离子体共振, 光纤传感器, 纳米位移, Otto模型, 双芯光纤

Twin-Core Fiber SPR Displacement Sensor Based on Otto Model

Wenbin Wang, Hong Gu*, Min Zhang, Zhiyong Chen, Tianqi Yang

School of Physical Science and Technology, Tiangong University, Tianjin

Received: Dec. 9th, 2022; accepted: Jan. 3rd, 2023; published: Jan. 12th, 2023

Abstract

Based on the theory of surface plasmon resonance (SPR), a novel nano-displacement sensor with a twin-core fiber side polished structure was studied. This micro sensor adopts Otto model in the side polishing area of the twin-core fiber, and a 45 nm silver film is used to excite the plasma resonance effect on the polishing surface of the twin-core fiber. The gap distance be-

*通讯作者。

tween the polishing surface and the silver film is the nano-displacement to be measured. The sensor model and the transmission optical path in the twin-core fiber are simulated based on the finite element analysis method. Then the performance of the sensor is further verified and optimized through the theoretical calculation of multi-layer film transmission, so that the distribution of the resonance curve with different displacements can be obtained. The change of the nano-displacement of the gap layer has a good linear relationship with the shift of the resonance wavelength. The displacement measurement range is 50 nm to 150 nm, and the sensitivity is 0.12594 nm/nm.

Keywords

Surface Plasmon Resonance, Optical Fiber Sensor, Nano-Displacement, Otto Model, Twin-Core Fiber

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 简介

随着位移传感器的发展,基于光纤的新型位移传感器[1]-[5]逐渐脱颖而出。与传统传感器相比,光纤位移传感器具有抗干扰、抗腐蚀、成本低等优点,被广泛应用于位移测量领域。为了提高位移测量的灵敏度和精度,近几年提出了一些基于表面等离子体共振(SPR)的光纤微纳位移传感器[6] [7] [8]。基于 SPR 的光纤传感器因其微纳尺寸、高灵敏度、高精度、可靠性强和易于实时远程监控等优异特性而广受好评 [9] [10],具有角度调制、波长调制、强度调制、相位调制等调制方式。

光纤 SPR 传感原理是基于衰减全反射产生的倏逝场[11],其中光子束通过纤芯传播的倏逝场将部分穿透包层区域。这种倏逝场与金属表面等离子体(SPs)相互作用,并激发金属和电介质界面上的自由电子。当倏逝波和表面等离子体的频率匹配时,等离子体发生共振,从而产生沿金属-电介质表面界面传播的表面等离子体波(SPW) [12] [13] [14],由于共振吸收的作用使得光谱图中观察到窄带损耗波谷。

本文提出了一种基于 SPR 效应的双芯光纤位移传感器,典型的 Otto [15]模型被用在双芯光纤的侧面抛磨区,通过优化传感区域的膜层厚度,以获得最佳的传感效果,实现对纳米位移的高精度测量。

2. 理论分析

2.1. SPs 耦合理论

表面等离子体共振(SPR) [16]是一种强大的敏感表面和传感现象,在金属和电介质(可以是固体、液体或气体)或具有相反介电常数符号的任何两种材料的界面处自由电子密度振荡的共振激发。当电磁场撞击金属-电介质界面处的自由电子时,SPW 会沿着金属表面传播[17] [18],从而激发 SPR 效应。

如图 1 所示,假设介质 1 和介质 2 中的 TM 平面简谐波用下式表示:

$$E_j(r, t) = (E_{xj}, 0, E_{zj}) e^{-k_j |z|} e^{i(k_j x - \omega t)} \quad (1)$$

$$H_j(r, t) = (0, H_{yj}, 0) e^{-k_j |z|} e^{i(k_j x - \omega t)} \quad (2)$$

其中($j = 1, 2$), k_{xj} 和 k_{zj} 分别是介质 j 中波矢量的 x 分量和 z 分量, ω 是入射光波的频率。从上述公式和相位匹配条件可知,倏逝波的 x 分量 k_x 等于待激发的表面等离子体波(SPW)的波矢量 k_{sp} [19]:

$$k_x = k_{sp} = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{\epsilon_1 \epsilon_2}{\epsilon_1 + \epsilon_2} \right)^{1/2} \quad (3)$$

根据德鲁德理论[20], 金属电介质的波长依赖性可以表示为:

$$\epsilon_m = \epsilon_{mr} + \epsilon_{mi} = 1 - \frac{\lambda^2 \lambda_c}{\lambda_p^2 (\lambda_c + i\lambda)} \quad (4)$$

其中 ϵ_{mr} 和 ϵ_{mi} 是金属层电介质 ϵ_m 的实部和虚部。 λ 是自由空间波长, λ_p 和 λ_c 分别是金属的等离子体波长和碰撞波长。一般通过棱镜耦合、衍射光栅耦合、波导耦合、光纤耦合和纳米探针耦合等技术[21] [22] 增强波矢量来激发 SPR, 这些技术利用衰减全反射(ATR) [23]、光学衍射或波导模式中的倏逝波与 SPW 进行耦合。基于表面等离子体共振的传感器通常使用衰减全反射(ATR)模型, 如图 2 所示有两种典型的衰减全反射模型: Otto 模型和 Kretschmann 模型。

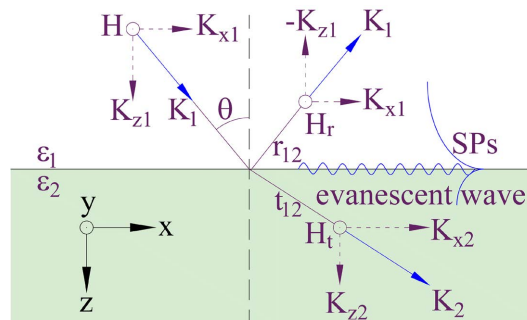


Figure 1. Schematic diagram of evanescent field coupling (surface plasmons) SPs
图 1. 倏逝场耦合(表面等离子体)SPs 原理图

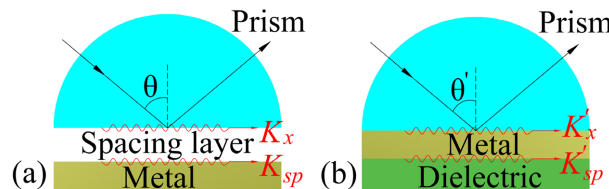


Figure 2. (a) Otto model, (b) Kretschmann model
图 2. (a) Otto 模型, (b) Kretschmann 模型

如图 3 所示为不同介质中的色散曲线以及不同介质与金属膜之间界面的色散曲线。a、c 分别为电磁波在空气和电介质中的色散曲线, b 为全反射产生倏逝波的色散曲线。I 和 II 分别为不同介质与金属膜交界面处的色散曲线, k_{sp} 和 ω_{sp} 分别是激发 SPR 效应的波矢量和等离子体频率。

2.2. 多层膜传输矩阵理论

考虑多层堆叠介质参数对反射光谱的影响, 如图 4 为 N 层均匀且各向同性的堆叠介质层, 具有平面边界, 第 j 层的光学特性由介电常数 ϵ_j 和磁导率 μ_j 表征。入射面为 xz 平面, 对于 TM 偏振波, $H_x = H_z = 0$, $E_y = 0$, 第 j 层中的场分量为:

$$\begin{aligned} H_{yj}(x, z, t) &= H_{yj}(z) \exp\{i(k_0 \alpha_j x - \omega t)\} \\ E_{xj}(x, z, t) &= E_{xj}(z) \exp\{i(k_0 \alpha_j x - \omega t)\} \\ E_{zj}(x, z, t) &= E_{zj}(z) \exp\{i(k_0 \alpha_j x - \omega t)\} \end{aligned} \quad (5)$$

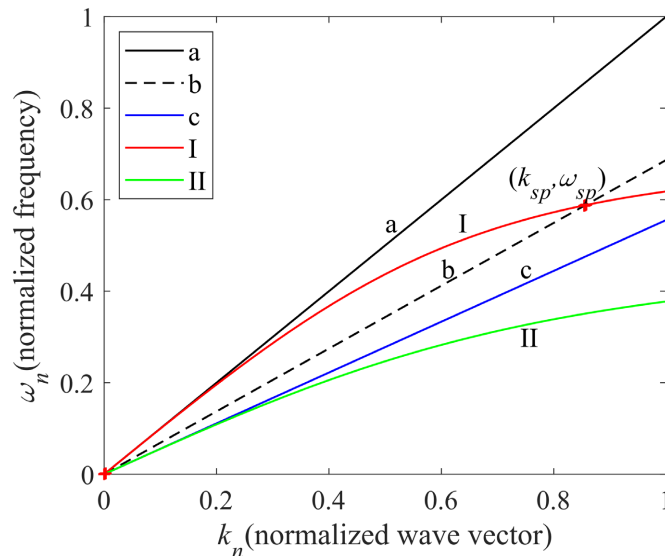


Figure 3. Dispersion relationship of TM polarization wave coupling SPs
图 3. TM 偏振波耦合 SPs 的色散关系

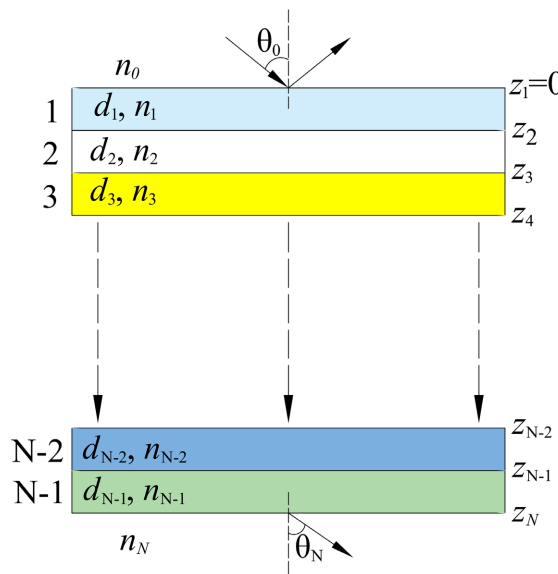


Figure 4. N-layer stacked media layer
图 4. N 层堆叠介质层

根据麦克斯韦方程，将各层界面处场振幅与层内距离 z 处的场振幅联系起来，获得 Abeles 矩阵形式的解：

$$\begin{bmatrix} H_{yj}^0 \\ -E_{xj}^0 \end{bmatrix} = M_j \cdot \begin{bmatrix} H_{yj}(z) \\ -E_{xj}(z) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \beta_j & -\frac{i}{q_j} \sin \beta_j \\ -iq_j \sin \beta_j & \cos \beta_j \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} H_{yj}(z) \\ -E_{xj}(z) \end{bmatrix} \quad (6)$$

H_{yj}^0 ， E_{xj}^0 分别是层 j 在边界 $z = Z_j$ 处 $H_{yj}(z)$ ， $E_{xj}(z)$ 的振幅， M_j 为层 j 的特征矩阵，由光学特性和层厚度决定，其中 $\beta_j = k_0 n_j d_j \cos \theta_j$ ， $q_j = (\mu_j / \epsilon_j)^{1/2} \cos \theta_j$ 。对于多层结构，第一个边界处的场振幅通过总特征矩阵与最后一个边界处场振幅的关系为：

$$\begin{bmatrix} H_{y1}^0 \\ -E_{x1}^0 \end{bmatrix} = M_{TOT} \cdot \begin{bmatrix} H_{yN}^0 \\ -E_{xN}^0 \end{bmatrix}, \quad M_{TOT} = \prod_{j=1}^{j=N-1} M_j \quad (7)$$

复反射系数 r 可以用整个系统的总特性矩阵 M_{ij} 的元素表示:

$$r = \frac{(M_{11} + M_{12} \cdot q_N) \cdot q_0 - (M_{21} + M_{22} \cdot q_N)}{(M_{11} + M_{12} \cdot q_N) \cdot q_0 + (M_{21} + M_{22} \cdot q_N)} \quad (8)$$

当在光纤中使用多层膜传输理论时, 由于光纤是圆柱体, 因此 TM 和 TE 偏振光都将在纤芯中传播, 由于只有 TM 偏振光能激发表面等离子体共振, 光纤输出端的传输功率是未受影响的 TE 偏振光和受影响的表面等离子体波 TM 偏振光的总和。TE 偏振光不会影响 SPR 光谱中共振波长的位置。

3. 基本结构与仿真

如图 5 所示, 光束从纤芯 1 中入射, 在侧面抛磨区激发 SPR 效应, 继续传输至端部时, 发生三次全反射进入纤芯 2 中, 最终经过表面等离子体共振吸收的光信号从纤芯 2 输出, 端部斜抛角度为 $\varphi = 35^\circ$, 两个斜抛面均镀上 500 nm 厚度的金反射膜, 防止双芯光纤纤芯中的光束在端部斜抛面发生全反射时泄露出去。如图 6 所示, 基于有限元分析方法对入射到纤芯 1 中的光束在双芯光纤端部发生全反射时进行光路仿真。

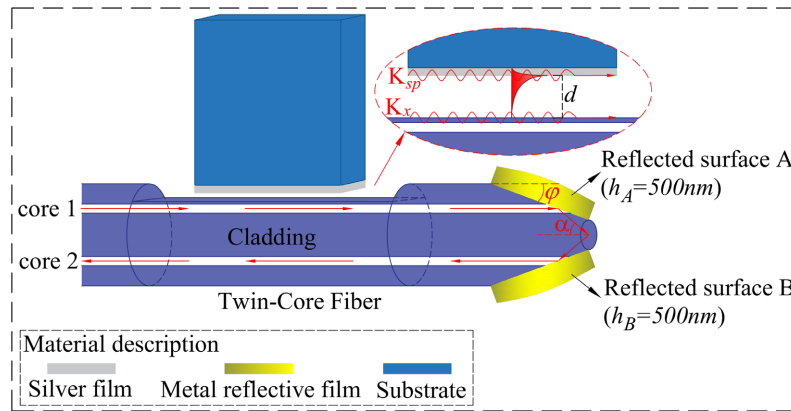


Figure 5. Schematic diagram of sensing principle of twin-core fiber
图 5. 双芯光纤传感原理示意图

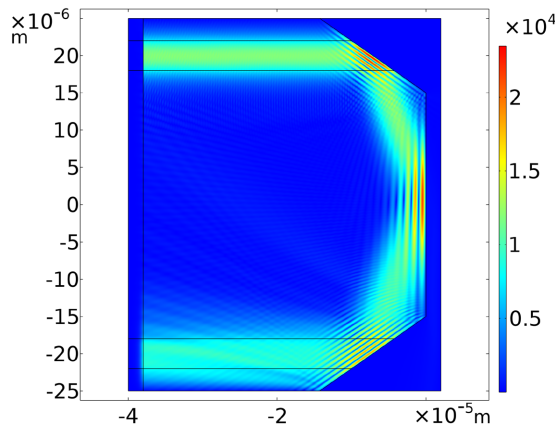


Figure 6. Reflected optical path at the end of twin-core fiber
图 6. 双芯光纤端部反射光路

如图 7 所示, 将双芯光纤侧面抛磨区看作 D 形光纤抛磨结构, 然后基于有限元分析法, 对 D 形光纤抛磨表面的 SPPs 耦合进行有效模式分析。将纤芯的折射率设置为 1.47, 包层的折射率设置为 1.45, 残留包层的厚度设置为 150 nm, 这里使用银材料作为激发金属膜, 银膜的厚度设置为 45 nm, 间隙层的厚度设置为 50 nm, 当入射光波长为 788 nm 时, 在光纤侧面抛磨处产生的倏逝波通过间隙层到达银膜表面激发 SPR 效应。通过有限元分析方法对传感模型进行仿真, 如图 8(b)所示为使用纤芯模式中的基模激发 SPR 效应获得的电场模式分析图; 如图 8(c)所示为使用纤芯基模激发 SPR 效应时的电场增强曲线, 从图 8(c)中可以清晰地看出, 在距离纤芯中心大约 4 微米处的间隙层附近, 有明显的场增强。

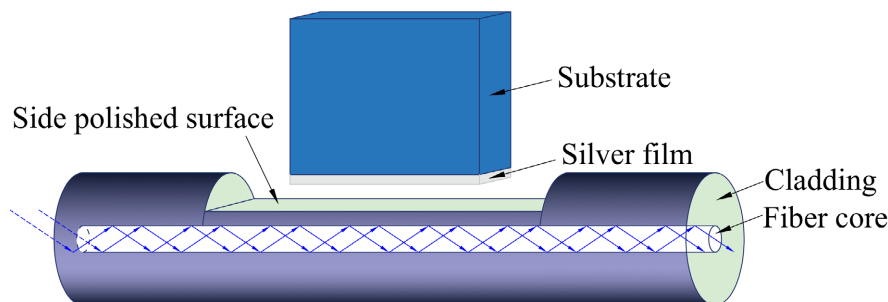


Figure 7. D-shaped optical fiber polishing structure based on Otto model
图 7. 基于 Otto 模型的 D 形光纤抛磨结构

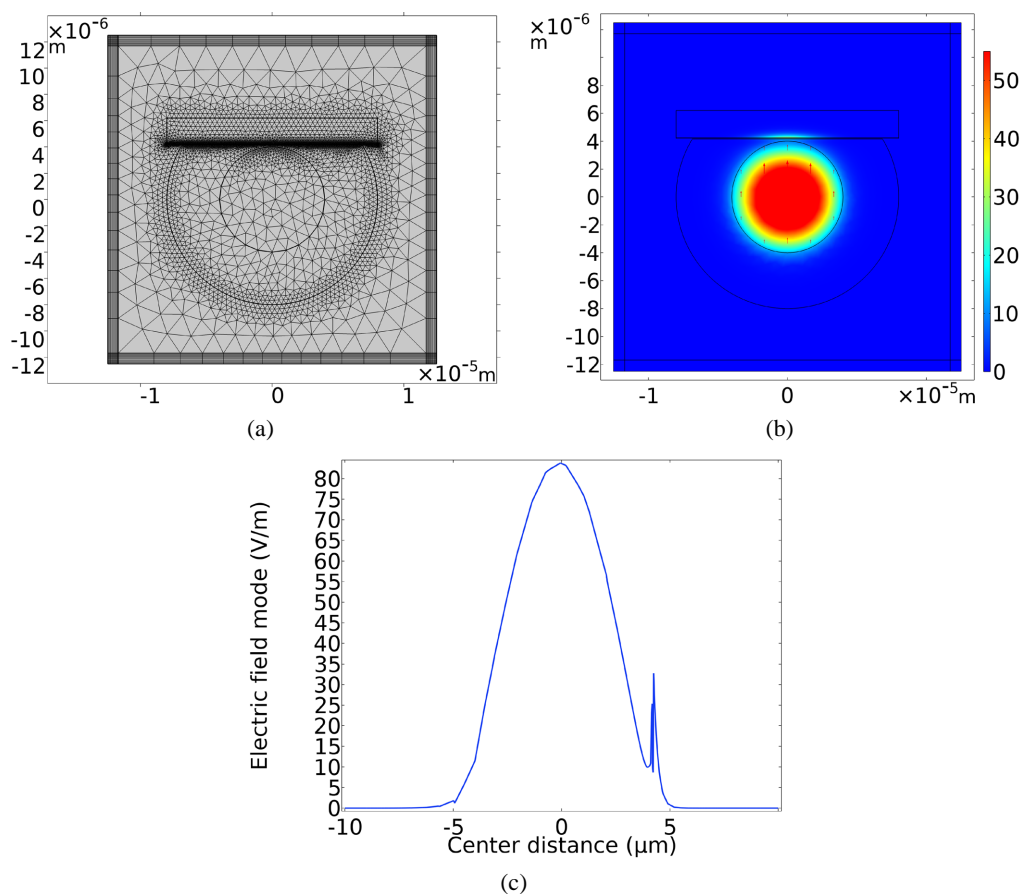


Figure 8. SPPs coupling of D-shaped optical fiber polishing structure based on Otto model
图 8. 基于 Otto 模型 D 形光纤抛磨结构的 SPPs 耦合

4. 优化和分析

在该传感系统中,通过分析传感区银膜厚度和残余包层厚度对共振曲线的影响,以获得最佳共振曲线随位移变化的偏移效果,从而对传感器性能进行优化。

将双芯光纤侧面抛磨区的间隙距离设置为 60 nm,残余包层厚度以 40 nm 的步长从 40 nm 增加到 200 nm,如图 9(a)所示,共振波的半宽度几乎不受影响。因此只需设置合适的残留包层厚度即可,设置残留包层厚度为 150 nm。然后,以 10 nm 的步长将银膜的厚度从 35 nm 增加到 75 nm,如图 9(b)中获得了不同银膜厚度的共振波分布,当银膜厚度为 45 nm 时,共振波谷最尖锐。

通过分析残留包层厚度和银膜厚度后,将 TCF 侧面的残余包层和银膜厚度分别设置为 150 nm 和 45 nm,然后以 9 nm 的步长将双芯光纤端面抛磨区的间隙层距离从 50 nm 增加至 150 nm,如图 9(c)可以看出共振波产生了偏移。如图 9(d)所示,对共振曲线进行归一化处理,可以看出,当间隙层的距离增加时,共振曲线将会向左发生偏移。

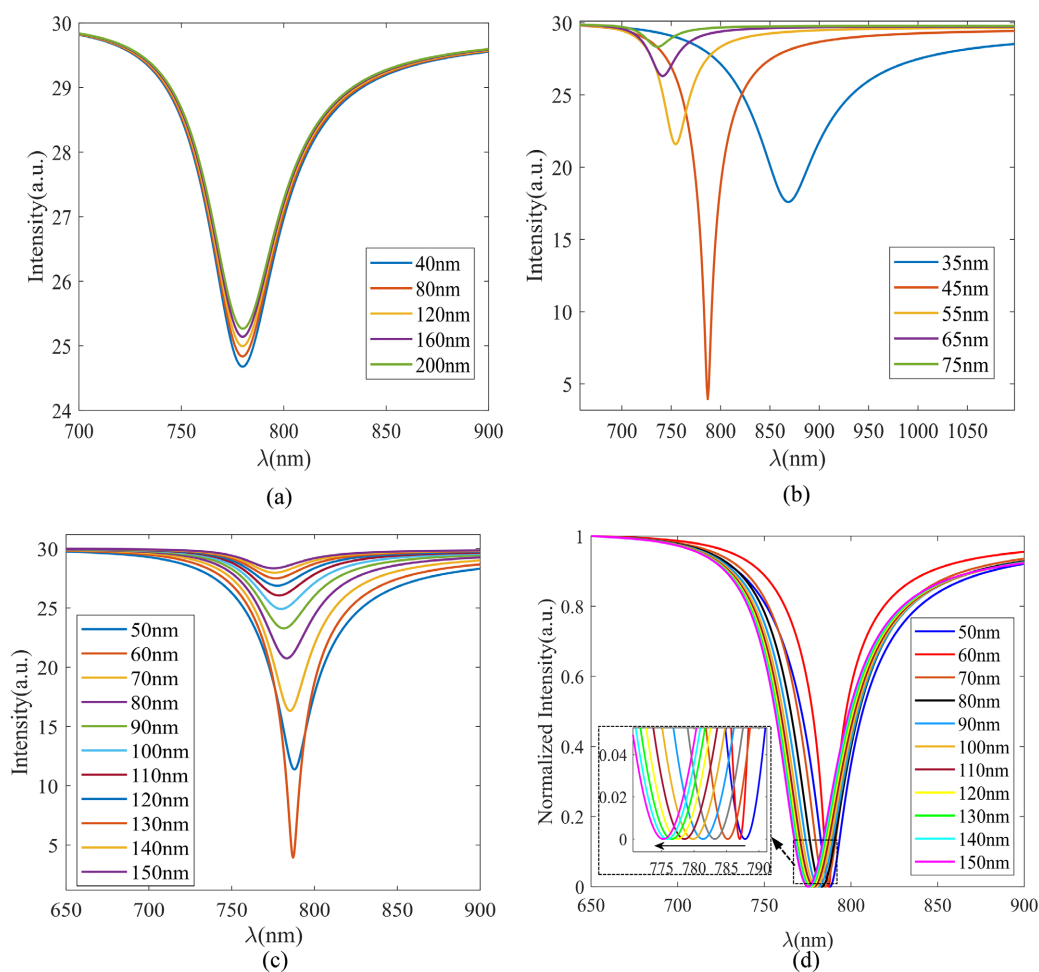


Figure 9. (a) Analysis of residual cladding thickness, (b) Analysis of silver film thickness, (c) Resonance curve distribution of different displacements, (d) Normalization of resonance curve

图 9. (a) 残余包层厚度分析, (b) 银膜厚度分析, (c) 不同位移的共振曲线分布, (d) 共振曲线归一化处理

这种基于 Otto 模型的双芯光纤 SPR 位移传感器,采用宽光谱光源进行共振波长的监测,其表现为共振波长在反射光谱的强度分布中的变化。该传感器性能的主要特征是间隙距离灵敏度、分辨率和检测极

限。间隙距离灵敏度(S)定义为相对于间隙距离变化的监测参数的变化,由以上分析可知,共振波长会随着传感区域间隙距离的变化而变化,当间隙距离从 50 nm 增加值 150 nm 时,共振波长从 787.869 nm 减小至 775.275 nm,则该传感器灵敏度 S 定义为共振波长的变化 $|\Delta\lambda_{res}|$ 与间隙距离的变化 $|\Delta d|$ 的绝对值之比:

$$S = \frac{|\Delta\lambda_{res}|}{|\Delta d|} = \left| \frac{775.275 - 787.869}{150 - 50} \right| = 0.12594 \text{ nm/nm} \quad (9)$$

根据图 9(d)可以获得共振波长随位移变化的数据,绘制并拟合传感区共振波长与位移的线性关系。如图 10 所示,通过线性拟合可知,在双芯光纤侧面抛磨区,可以较精确地监测 50~150 nm 的位移,共振波长的变化范围是从 787.869 nm 向左偏移至 775.275 nm。因此可知共振波长随所测量位移的线性拟合函数如下:

$$\lambda = -0.1343 \times d + 794.2 \quad (10)$$

该线性拟合函数的拟合系数 R-square 为 0.9731。

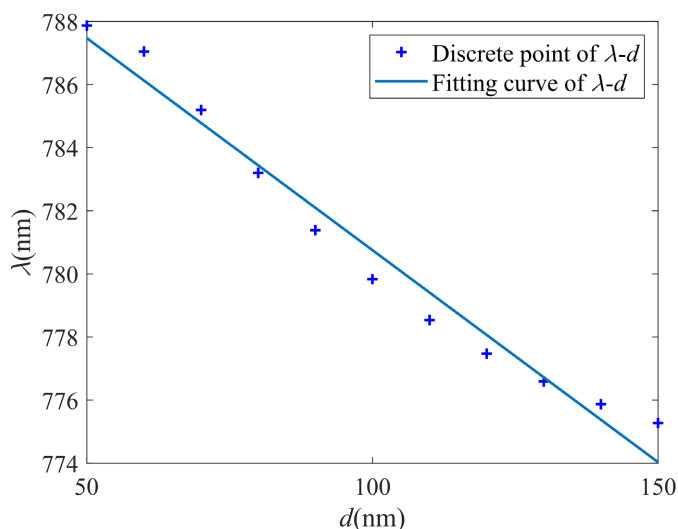


Figure 10. Linear fitting of resonance wavelength with displacement
图 10. 共振波长随位移变化的线性拟合

5. 结论

我们研究了一种基于 Otto 模型的双芯光纤 SPR 微纳位移传感器。通过有限元分析方法对双芯光纤的传输光路以及传感模型进行仿真,然后使用多层膜传输理论对传感膜层进行优化和分析。通过仿真和计算可知,该传感器在纳米位移测量时的灵敏度非常高,即使改变纳米级别的间隙层厚度,也能获得清晰的共振波长偏移,因此很适合应用于高灵敏度和高精度的位移测量当中。经过对传感膜层的优化可知,残留包层厚度从 40 nm 增加到 200 nm 时对传感效果很难产生影响,因此设置合适的残留包层厚度为 150 nm;当银膜厚度从 35 nm 增加到 75 nm 时,使用 45 nm 的银膜激发 SPR 效应的共振曲线最尖锐,因此设置银膜厚度为 45 nm。经过分析可知,这种双芯光纤位移传感器的主要测量范围为 50 nm 至 150 nm,灵敏度为 0.12594 nm/nm。该传感器在有限范围内监测纳米尺度位移方面具有优异的效果,然而在实际测量中将暴露该传感器的局限性,测量范围较小。因此,为了提高该传感器的传感性能,需要选择合适的金属膜或金属复合膜以及选取最佳的膜层厚度,才能实现这种类型传感器在测量时具有更大测量范围以及更高的测量精度和灵敏度。

参考文献

- [1] Zhang, X. and Broere, W. (2022) Sensing Fiber Selection for Point Displacement Measuring with Distributed Optic Fiber Sensor. *Measurement*, **197**, Article ID: 111275. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111275>
- [2] Liu, P., Liu, Z. and Zhou, C. (2022) Measurement and Region Identification in Deep Displacement of Slopes Based on Rod-Fiber Coupling Structure. *Sensors*, **22**, 3623. <https://doi.org/10.3390/s22103623>
- [3] Liu, P., Liu, Z. and Zhou, C. (2022) Deep Lateral Displacement Sensing Experiment for Rod-Fiber Coupling Structure Based on Macrobending Loss. *Sensors and Actuators A: Physical*, **336**, Article ID: 113410. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2022.113410>
- [4] Kulpa, M., Howiacki, T., Wiater, A., *et al.* (2021) Strain and Displacement Measurement Based on Distributed Fibre Optic Sensing (DFOS) System Integrated with FRP Composite Sandwich Panel. *Measurement*, **175**, Article ID: 109099. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109099>
- [5] Ghaffar, A. (2021) A Novel Sensor Design for Displacement Measurement Using Plastic Optical Fiber-Based on Face-Coupling Method. *Optical Fiber Technology*, **67**, Article ID: 102684. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2021.102684>
- [6] Wei, Y., Shi, C., Liu, C., *et al.* (2022) Fiber SPR Two-Dimensional Micro Displacement Sensor Based on the Coaxial Double Waveguide with a Conical Structure. *Optics Express*, **30**, 24909-24923. <https://doi.org/10.1364/OE.462141>
- [7] Liu, C., Wu, P., Wei, Y., *et al.* (2022) Dual-Detection-Parameter SPR Sensor Based on Graded Index Multimode Fiber. *Sensors and Actuators A: Physical*, **335**, Article ID: 113360. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2021.113360>
- [8] Zhu, Z., Liu, L., Liu, Z., *et al.* (2017) High-Precision Micro-Displacement Optical-Fiber Sensor Based on Surface Plasmon Resonance. *Optics Letters*, **42**, 1982-1985. <https://doi.org/10.1364/OL.42.001982>
- [9] Wu, M., Liu, X.Y., Zhou, G.Y., *et al.* (2019) Design and Optimization of Microstructure Optical Fiber Sensor Based on Bimetal Plasmon Mode Interaction. *Chinese Physics B*, **28**, Article ID: 124202. <https://doi.org/10.1088/1674-1056/ab4d48>
- [10] Pathak, A.K. and Singh, V.K. (2020) SPR Based Optical Fiber Refractive Index Sensor Using Silver Nanowire Assisted CSMFC. *IEEE Photonics Technology Letters*, **32**, 465-468. <https://doi.org/10.1109/LPT.2020.2980470>
- [11] Schasfoort, R.B.M. (2017) Handbook of Surface Plasmon Resonance. 2nd Edition, Royal Society of Chemistry, Cambridge, P001-P004. <https://doi.org/10.1039/9781788010283>
- [12] Hu, D.J.J. and Ho, H.P. (2017) Recent Advances in Plasmonic Photonic Crystal Fibers: Design, Fabrication and Applications. *Advances in Optics and Photonics*, **9**, 257-314. <https://doi.org/10.1364/AOP.9.000257>
- [13] Hasan, M., Akter, S., Rifat, A., *et al.* (2017) A Highly Sensitive Gold-Coated Photonic Crystal Fiber Biosensor Based on Surface Plasmon Resonance. *Photonics*, **4**, 18. <https://doi.org/10.3390/photonics4010018>
- [14] Momota, M.R. and Hasan Md, R. (2018) Hollow-Core Silver Coated Photonic Crystal Fiber Plasmonic Sensor. *Optical Materials*, **76**, 287-294. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2017.12.049>
- [15] Otto, A. (1968) Excitation of Nonradiative Surface Plasma Waves in Silver by the Method of Frustrated Total Reflection. *Zeitschrift für Physik A Hadrons and nuclei*, **216**, 398-410. <https://doi.org/10.1007/BF01391532>
- [16] Nuster, R., Paltauf, G. and Burgholzer, P. (2007) Comparison of Surface Plasmon Resonance Devices for Acoustic Wave Detection in Liquid. *Optics Express*, **15**, 6087-6095. <https://doi.org/10.1364/OE.15.006087>
- [17] Fan, Z., Li, S., Liu, Q., *et al.* (2015) High Sensitivity of Refractive Index Sensor Based on Analyte-Filled Photonic Crystal Fiber with Surface Plasmon Resonance. *IEEE Photonics Journal*, **7**, 1-9. <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2015.2432079>
- [18] Gandhi, M., Chu, S., Senthilnathan, K., *et al.* (2019) Recent Advances in Plasmonic Sensor-Based Fiber Optic Probes for Biological Applications. *Applied Sciences*, **9**, 949. <https://doi.org/10.3390/app9050949>
- [19] Deng, H.Y. (2019) A Universal Macroscopic Theory of Surface Plasma Waves and Their Losses. *New Journal of Physics*, **21**, Article ID: 043055. <https://doi.org/10.1088/1367-2630/ab13eb>
- [20] Homola, J., Yee, S.S. and Gauglitz, G. (1999) Surface Plasmon Resonance Sensors: Review. *Sensors and Actuators B: Chemical*, **54**, 3-15. [https://doi.org/10.1016/S0925-4005\(98\)00321-9](https://doi.org/10.1016/S0925-4005(98)00321-9)
- [21] Zalevsky, Z. and Abdulhalim, I. (2010) Plasmonics. In: Zalevsky, Z. and Abdulhalim, I., Eds., *Integrated Nanophotonic Devices*, Elsevier, Amsterdam, 175-240. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B978143778489000069>
<https://doi.org/10.1016/B978-1-4377-7848-9.00006-9>
- [22] Tokel, O., Inci, F. and Demirci, U. (2014) Advances in Plasmonic Technologies for Point of Care Applications. *Chemical Reviews*, **114**, 5728-5752. <https://doi.org/10.1021/cr4000623>
- [23] Barchiesi, D. and Otto, A. (2013) Excitations of Surface Plasmon Polaritons by Attenuated Total Reflection, Revisited. *La Rivista del Nuovo Cimento*, **36**, 173-209.