

基于表面等离子体共振的 4 杆悬浮芯 光纤折射率传感仿真分析

刘磊¹, 陈辉², 张彦军^{1*}

¹中北大学省部共建动态测试技术国家重点实验室, 山西 太原 030051;

²北京宇航系统工程研究所, 北京 100076

摘要 设计了一种小芯径的 4 杆悬浮芯光纤折射率检测传感器,并针对这种光纤模拟了三种不同的抛磨结构。通过在开放式的气孔中涂覆金膜来激发表面等离子体共振效应。采用有限元方法(FEM)分析了开放式悬浮芯光纤的表面等离子体传感特性,并研究了传感金属层和悬浮杆厚度对传感效果的影响。单孔抛磨结构和相对两孔抛磨结构的折射率检测范围为 1.31~1.42,最大灵敏度分别为 15000 nm/RIU(refractive index unit)和 16000 nm/RIU,分辨率分别为 6.7×10^{-6} RIU 和 6.25×10^{-6} RIU。相邻两孔抛磨结构的折射率检测范围为 1.31~1.40,最大灵敏度可达 20000 nm/RIU,分辨率可达 5.0×10^{-6} RIU。此传感器在测量高折射率物质方面具有很好的性能,便于制备,将来有广阔的市场应用前景。

关键词 光纤光学; 悬浮芯光纤; 折射率传感器; 有限元方法; 表面等离子体共振

中图分类号 TN253

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0806003

Refractive Index Sensing Simulation Analysis of Four-Pole Suspended Core Fiber Based on Surface Plasmon Resonance

Liu Lei¹, Chen Hui², Zhang Yanjun^{1*}

¹State Key Laboratory of Dynamic Testing Technology, North University of China, Taiyuan, Shanxi 030051, China;

²Beijing Institute of Aerospace Engineering, Beijing 100076, China

Abstract A refractive index detection sensor for four-pole suspended core fibers with a small core diameter is designed, and three different polishing structures are simulated for this fiber. The open air holes are coated with gold film to stimulate the surface plasmon resonance effect. The finite element method (FEM) is used to analyze the surface plasmon sensing characteristics of the open suspended core fiber, and the influences of the geometric parameters of the sensing metal layer and the thickness of the suspended poles on the sensing effect are studied. The single-hole polishing structure and the opposite two-hole polishing structure have a refractive index detection range of 1.31—1.42, the maximum sensitivities are 15000 nm/RIU (refractive index unit) and 16000 nm/RIU, and the resolutions are 6.7×10^{-6} RIU and 6.25×10^{-6} RIU, respectively. The refractive index detection range of the adjacent two-hole polishing structure is 1.31—1.40, the maximum sensitivity can reach 20000 nm/RIU, and the resolution can reach 5.0×10^{-6} RIU. This sensor has good performance in measuring high refractive index substances, is easy to prepare, and has broad market application prospects in the future.

Key words fiber optics; suspended core fiber; refractive index sensor; finite element method; surface plasmon resonance

收稿日期: 2021-10-15; 修回日期: 2021-11-01; 录用日期: 2021-11-08

基金项目: 国家自然科学基金(62075199)

通信作者: *zhangyanjun@nuc.edu.cn

1 引言

1993 年, Jorgenson 等^[1]报道了基于表面等离子体共振 (SPR) 的光子晶体光纤 (PCF) 折射率传感器, 自此以后, 越来越多的研究人员投入到了 PCF-SPR 传感器的研究中。随着光纤 SPR 传感器技术的不断成熟, 实际应用对传感器性能和实用性的要求也越来越高。封闭式的 PCF-SPR 折射率传感器^[2-4]不仅需要金属涂覆在光纤的内部气孔中, 还需将待测气体或液体填充在气孔中, 此类传感器虽然灵敏度较高, 但是其金属涂覆难度大、待测物质填充困难且流动性差, 进而对于实际传感意义不大。此外, 光纤外部涂覆金属的 PCF-SPR 折射率传感器^[5]虽然制作简单, 但是较低的灵敏度始终是传感器的一个制约因素。

An 等^[6]通过在具有矩形晶格的准 D 形光子晶体光纤表面涂覆金 (Au) 和石墨烯, 研制出一种折射率传感器, 其折射率测量范围为 1.33~1.42, 最大波长灵敏度为 3877 nm/RIU (refractive index unit)。Meng 等^[7]设计了一种具有双重损耗峰的表面等离子体共振的新型 D 形光子晶体光纤传感器, 其折射率测量范围为 1.34~1.38, 初级损耗峰和次级损耗峰的平均波长灵敏度分别为 18900 nm/RIU 和 17500 nm/RIU, 对应的分辨率为 5.291×10^{-6} RIU 和 5.714×10^{-6} RIU。Yang 等^[8]提出了一种基于暴露纤芯的柚子型光纤折射率检测传感器, 其包层具有 6 个大空气孔, 且纤芯有一个小空气孔, 外部涂覆双层金属, 该传感器的折射率测量范围为 1.33~1.42, 最大波长灵敏度为 16400 nm/RIU。Du 等^[9]提出了一种 4 孔葡萄柚光纤折射率检测传感器, 其在 4 个空气孔内壁涂覆金膜, 折射率测量范围为 1.33~1.43。当填充分析物的折射率为 1.43 时, 所提传感器的灵敏度可达到 19000 nm/RIU。然而, 在现实中, 在其封闭式的气孔内部涂覆金属有很大的难度, 且无法保证所涂覆金属的均匀性, 虽然可通过在其内部填充液体来测量折射率, 但是其光纤内部结构过于中空, 十分容易塌陷, 进而会影响传感性能。

本文中设计了一种小芯径的 4 杆悬浮芯光纤折射率检测传感器, 内部同样有 4 个空气孔, 但均具有较小的孔径, 从而保证了光纤整体结构的稳定性。针对此光纤, 模拟了三种不同的抛磨方式, 分别通过在开放式的气孔中涂覆金膜来激发 SPR 效应。这样既降低了涂覆金属的难度, 又能使传感器获得很高的灵敏度。仿真结果表明, 三种结构中的折射率

最大检测范围为 1.31~1.42, 其中一种结构的最大灵敏度可达 20000 nm/RIU, 分辨率可达 5.0×10^{-6} RIU。除此之外, 还探究了金膜厚度和悬浮杆厚度对传感性能的影响。将来在传感器的制造过程中, 可以通过飞秒激光加工技术来保证光纤的抛磨精度, 利用磁控溅射技术来精确控制金膜的沉积厚度。所提出的传感器具有测量范围广、灵敏度高等优点, 在测量高折射率物质方面具有广阔的应用前景。

2 结构与理论分析

2.1 结构设计

图 1(a) 为本文所设计的 4 杆悬浮芯光纤的横截面示意图, 使用多物理场建模软件 COMSOL Multiphysics 来进行仿真。光纤内部有 4 个半径为 $8 \mu\text{m}$ 的扇形大空气孔, 纤芯半径为 $2 \mu\text{m}$, 悬浮支撑杆的厚度为 $2 \mu\text{m}$ 。本文探究了三种不同的抛磨方式对传感器检测性能的影响。将其中一个空气孔抛磨为开放式用于涂覆金属层, 在其他三个气孔中填充空气, 如图 1(b) 所示。如图 1(c) 所示, 将相对的两个空气孔抛磨为开放式用于涂覆金属层, 在另外两个气孔中填充空气, 在抛磨气孔的内壁涂覆一层厚度为 60 nm 的金层以激发 SPR 效应。模型中考虑到气孔的坡度以及重力的影响, 特将气孔两侧的金膜厚度设置为略小于气孔底部金膜厚度。如图 1(d) 所示, 将相邻的两个气孔抛磨用于涂覆金属, 在另外两个气孔中填充空气。通过飞秒加工技术可以实现上述三种抛磨结构。为了确保仿真结果的精确度, 在模型的最外层添加一个厚度为 $3 \mu\text{m}$ 的完美匹配层 (PML) 并附加散射边界条件^[10]。

2.2 理论分析

光纤的背景材料为纯二氧化硅, 其折射率可由 Sellmeier 方程^[11]计算得出, 方程形式为

$$n^2 = 1 + \frac{0.6961663\lambda^2}{\lambda^2 - 0.0684043^2} + \frac{0.4079426\lambda^2}{\lambda^2 - 0.1162414^2} + \frac{0.897479\lambda^2}{\lambda^2 - 9.896161^2}, \quad (1)$$

式中: n 为 SiO_2 的折射率; λ 为真空中光的波长。

开放性气孔的内壁可以采用磁控溅射技术来沉积一层金属膜以激发 SPR 效应, 用于涂覆的金属通常为金、银和铜等。由于金的化学性能稳定, 具有极高的抗化学腐蚀和耐高温能力^[12], 故在本结构中选择在通道表面沉积金层, 其厚度用 t 表示。金的相对介电常数由 Drude-Lorentz 模型^[13]定义, 该模型的表达式为

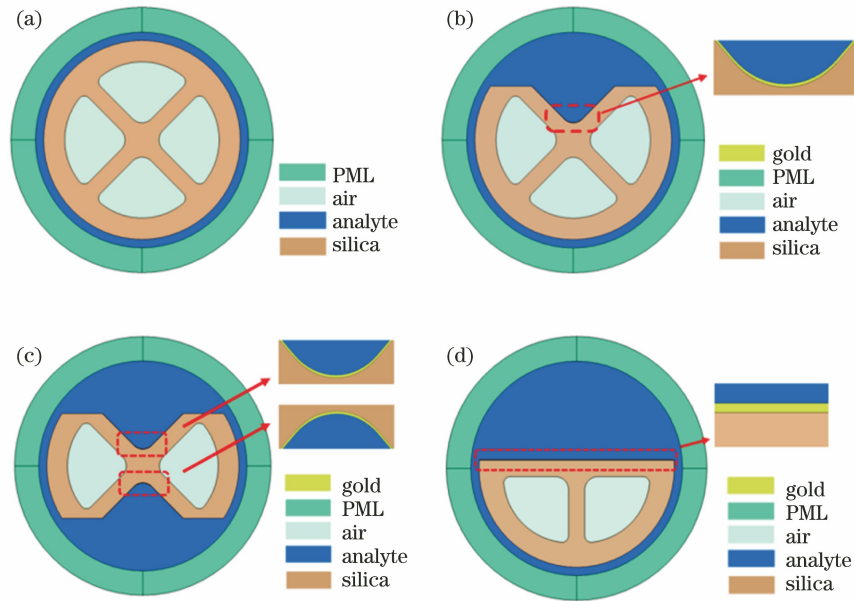


图 1 4 杆悬浮芯光纤结构及抛磨截面示意图。(a) 光纤完整结构;(b) 抛磨一孔截面;

(c) 抛磨相对两孔截面;(d) 抛磨相邻两孔截面

Fig. 1 Schematic diagrams of structure and polishing cross-section of four-pole suspended core fiber. (a) Complete structure of fiber; (b) polishing cross section of one hole; (c) polishing cross section of two opposite holes; (d) polishing cross section of two adjacent holes

$$\epsilon_{Au} = \epsilon_{\infty} - \frac{\omega_D^2}{\omega(\omega + j\gamma_D)} - \frac{\Delta\epsilon\Omega_L^2}{\omega^2 - \Omega_L^2 + j\Gamma_L\omega}, \quad (2)$$

式中: ϵ_{Au} 为金的相对介电常数; ϵ_{∞} 为高频时金属的介电常数; $\omega = 2\pi c/\lambda$ 为入射光频率,其中 c 为真空中的光速; ω_D 为金的等离子体频率; γ_D 为金的阻尼频率; Ω_L 为洛伦兹振荡的光谱宽度; Γ_L 为洛伦兹振荡的强度; $\Delta\epsilon$ 是 Lorentz 项的加权因子。以上各参数的对应值见表 1。

表 1 Drude-Lorentz 模型中各参数值的定义
Table 1 Definition of each parameter value in Drude-Lorentz model

Parameter	Value	Parameter	Value
ϵ_{∞}	5.9673	Ω_L/THz	$2\pi \times 650.07$
ω_D/THz	$2\pi \times 2113.6$	Γ_L/THz	$2\pi \times 104.86$
γ_D/THz	$2\pi \times 15.92$	$\Delta\epsilon$	1.09

本文提出的这种基于 SPR 的折射率检测传感器的基本原理是:当光纤的纤芯模式与金膜产生的等离子体模式的相位匹配时,金层表面会产生倏逝波激发的表面等离子元(SPP)模式,倏逝波激发的倏逝场会随着外界环境折射率等因素的变化而发生改变,从而在传感区中引起不同的能量损耗^[14]。

当纤芯导模沿金属表面的波矢分量大小 k_x 与金属-待测物表面的 SPP 本征波数 k_{spp} 满足波矢匹配时^[15],有

$$k_x = \frac{\omega}{c} \sqrt{\epsilon_0(\omega)} \sin \theta = k_{spp} = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\epsilon_1 \epsilon_2(\omega)}{\epsilon_1 + \epsilon_2(\omega)}}, \quad (3)$$

式中: $\epsilon_0(\omega)$ 为纤芯介电常数; θ 为光入射到金属-待测物表面的角度; ϵ_1 为待测物的介电常数; $\epsilon_2(\omega)$ 为镀层金属的介电常数。

传输损耗^[16]的表达式为

$$L_c = \frac{40\pi \text{Im}(n_{\text{eff}})}{\lambda \ln 10} \approx 8.686 \times 10^4 \times k_0 \text{Im}(n_{\text{eff}}) \text{ dB/cm}, \quad (4)$$

式中: L_c 为传输损耗,单位是 dB/cm; n_{eff} 为纤芯模式的有效折射率; $k_0 = 2\pi/\lambda$ 为自由空间的波数; $\text{Im}(\cdot)$ 为取虚部函数。

图 2 为外部待测液体折射率为 1.39 时,光纤在不同波段的两种纤芯偏振模式,即 x 偏振模式和 y 偏振模式。其中:图 2(a)~(c) 分别为光纤在 650, 720, 800 nm 时的 x 偏振态光场;图 2(d)~(f) 分别为光纤在 650, 720, 800 nm 时的 y 偏振态光场。由图 2 可知:当光纤在 x 偏振模式时,随着波长的增加,光场能量先明显升高后又下降;当光纤在 y 偏振模式时,随着波长的增加,光场能量基本不变。

图 3 展示了当外部待测液体折射率为 1.39 时,纤芯模式的损耗光谱、纤芯模式有效折射率与 SPP 模式有效折射率的关系。从图 3 中可以看出:当谐振波长较低时,没有发生 SPR 效应;随着谐振波长

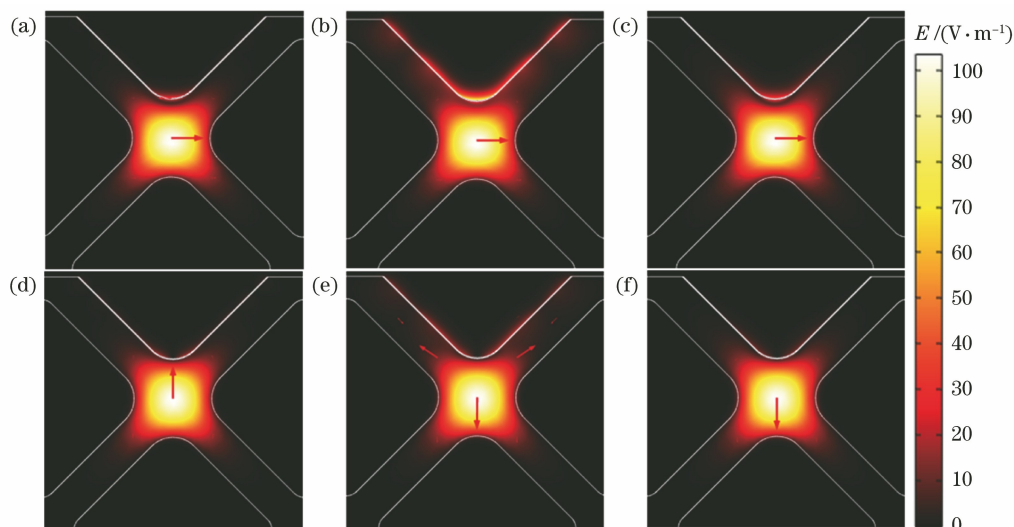


图 2 液体折射率为 1.39 时的光场 E 的分布。(a) x 偏振(650 nm);(b) x 偏振(720 nm);(c) x 偏振(800 nm);
(d) y 偏振(650 nm);(e) y 偏振(720 nm);(f) y 偏振(800 nm)

Fig. 2 Distributions of optical field E when liquid refractive index is 1.39. (a) x polarization (650 nm); (b) x polarization (720 nm);
(c) x polarization (800 nm); (d) y polarization (650 nm); (e) y polarization (720nm); (f) y polarization (800 nm)

的增加,纤芯模式的有效折射率下降比较缓慢;SPP 模式的有效折射率下降较快;当谐振波长为 716 nm 时,二者交叉达到相位匹配条件,激发 SPR 效应,此时传输损耗达到最大值,能量从纤芯模式转移到 SPP 模式。此时便得到了特定折射率的液体分析物发生 SPR 效应时所对应的谐振波段以及光谱损耗峰值。其中, $\text{Re}(\cdot)$ 为取实部函数。

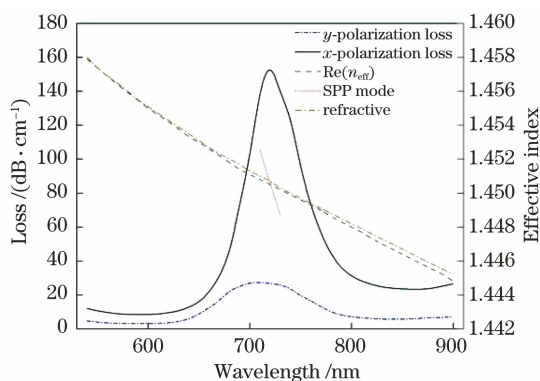


图 3 分析物折射率为 $n_{\text{eff}} = 1.39$ 时纤芯模式的损耗光谱、纤芯模式有效折射率和 SPP 模式有效折射率的关系

Fig. 3 When analyte refractive index n_{eff} is 1.39, relationship among loss spectrum of core mode, effective refractive index of core mode, and effective refractive index of SPP mode

从图 3 可知: x 偏振模式容易激发 SPR 效应,在传输过程中会出现一个明显的损耗峰; y 偏振模式对 SPR 效应不敏感,在传输过程中具有较低的损耗值,这不利于研究 SPR 效应对传输损耗的影响。

因此,只需研究 x 偏振模式在发生 SPR 效应时传输损耗的变化。另外,随着波长的增加, $\text{Re}(n_{\text{eff}})$ 逐渐降低并产生轻微 S 形扭曲,出现该现象的原因是电磁场渗透到更深的区域时,改变了光纤的模式相速度,此时波长短于共振波长的慢电磁场被共振加速,波长长于共振波长的快电磁场被减速。因此,共振波长周围的有效折射率的形状被扭曲成观察到的 S 形,共振越强烈,扭曲越明显^[17]。

3 分析与讨论

本节对三种结构所产生的 SPR 效应进行了理论分析,基于(4)式,可计算得到折射率不同的分析物在每种结构下的光谱损耗图。随着分析物折射率的增加,产生 SPR 效应的匹配条件将发生变化,下面对各传感器的灵敏度和分辨率进行分析。

灵敏度是检测传感器性能的一个重要指标,传感器的波长灵敏度^[18]可表示为

$$S_{\lambda} = \frac{\Delta\lambda_{\text{peak}}}{\Delta n_a}, \quad (5)$$

式中: Δn_a 是两个不同分析物折射率的差值; $\Delta\lambda_{\text{peak}}$ 是波长差。

若最小光谱分辨率为 $\Delta\lambda_{\text{min}} = 0.1 \text{ nm}$,则传感器的分辨率^[19]可表示为

$$R = \frac{\Delta n_a \times \Delta\lambda_{\text{min}}}{\Delta\lambda_{\text{peak}}}. \quad (6)$$

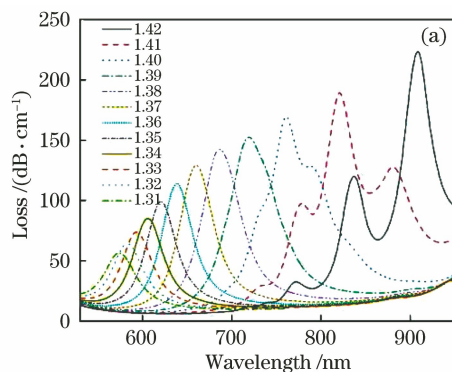
对抛磨型 SPR 传感器来说,虽然灵敏度越高越好,但是谐振峰的半峰全宽(FWHM)过大将导致分

分辨率的降低和谐振峰峰值的追踪难度加大,因此引入品质因数(FOM)来评估传感器的性能。FOM^[20]的定义为

$$f_{\text{FOM}} = \frac{S(\lambda)}{f_{\text{FWHM}}}, \quad (7)$$

式中: f_{FWHM} 为共振峰的 FWHM。

图 4(a)展示了只抛磨一个孔的传感器在不同分析物折射率下对应的光谱损耗图。可以发现,随着外界分析物折射率的增大,共振波长发生红移,损耗峰值也不断增大;当在外界折射率增大到 1.40 以上时,出现了高阶的 SPP 模式,光谱峰值的两侧出



现了较小的共振峰,但这并不影响以各光谱的最大峰值来作为参考峰所计算得到的灵敏度。图 4(b)为折射率与共振波长的变化关系曲线,曲线的斜率表示传感器在该折射率时的灵敏度。表 2 中给出了 SPR 传感器损耗峰及对应波长更详细的变化,通过计算得到了其对应的波长灵敏度和分辨率。当分析物折射率为 1.31 时,灵敏度较低,其值为 900 nm/RIU;当分析物的折射率逐渐从 1.31 增加到 1.42 时,传感器的灵敏度逐渐增大;当分析物折射率为 1.42 时,灵敏度达到最大值,其值为 15000 nm/RIU,最大分辨率达到 6.7×10^{-6} RIU。

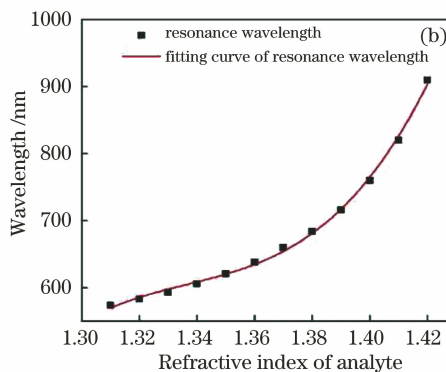


图 4 抛磨一个空气孔时的传感特性。(a)不同分析物折射率对应的光谱损耗;(b)折射率与共振波长的关系

Fig. 4 Sensing characteristics when polishing one air hole. (a) Spectral loss corresponding to refractive indexes of different analytes; (b) relationship between refractive index and resonance wavelength

表 2 抛磨一个空气孔时的数值分析结果

Table 2 Numerical analysis results when polishing one air hole

Refractive index	Wavelength /nm	Sensitivity / $(\text{nm} \cdot \text{RIU}^{-1})$	Resolution / (10^{-4} RIU)	Refractive index	Wavelength /nm	Sensitivity / $(\text{nm} \cdot \text{RIU}^{-1})$	Resolution / (10^{-5} RIU)
1.31	574	900	1.10	1.37	660	2400	4.20
1.32	583	1000	1.00	1.38	684	3200	3.10
1.33	593	1300	0.77	1.39	716	4400	2.30
1.34	606	1500	0.67	1.40	760	6000	1.70
1.35	621	1700	0.59	1.41	820	9000	1.10
1.36	638	2200	0.45	1.42	910	15000	0.67

图 5(a)展示了抛磨两个相对空气孔的传感器在不同分析物折射率下对应的光谱损耗图。可以发现,共振波长随着外界分析物折射率的增大而发生红移,损耗峰值不断增大;在外界折射率增大到 1.40 以上时,出现了高阶的 SPP 模式。图 5(b)为折射率与共振波长的变化关系曲线,曲线的斜率表示传感器在该折射率时的灵敏度。表 3 中给出了此结构的传感器损耗峰及对应波长更详细的变化,通过计算得到了其对应的波长灵敏度和分辨率。当分析物折射率为 1.31 时,灵敏度较低,其值为 1000 nm/RIU;当分析物的折射率逐渐从 1.31 增

加到 1.42 时,传感器的灵敏度逐渐增大;当分析物折射率为 1.42 时,灵敏度达到最大值,其值为 16000 nm/RIU,分辨率达到 6.25×10^{-6} RIU。

图 6(a)展示了抛磨两个相邻空气孔的传感器在不同分析物折射率下对应的光谱损耗图。可以发现,传感器的折射率检测范围为 1.31~1.40,共振波长随着外界分析物折射率的增大而发生红移;当折射率为 1.31~1.39 时,损耗峰逐渐增大;当折射率达到 1.40 时,共振峰的振幅开始下降;与前面两种结构不同的是,即使在外界分析物折射率达到 1.40 时,该结构的损耗谱仍然只具有一阶的 SPP 模

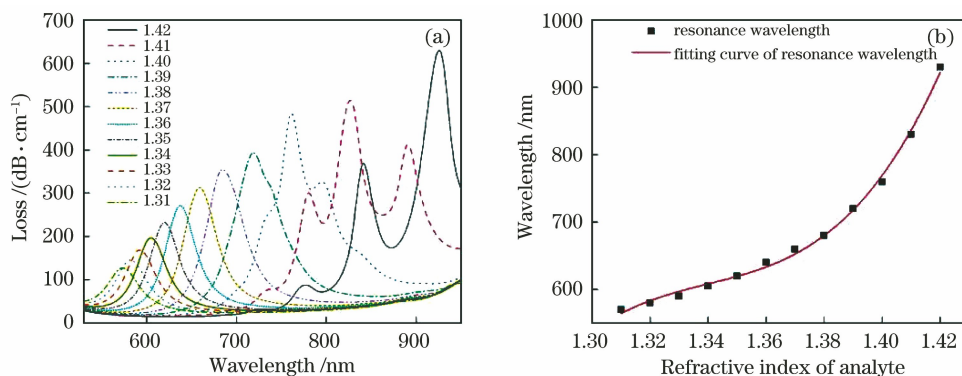


图 5 抛磨两个相对空气孔时的传感特性。(a)不同分析物折射率对应的光谱损耗;(b)折射率与共振波长的关系
Fig. 5 Sensing characteristics when polishing two opposite air holes. (a) Spectral loss corresponding to refractive indexes of different analytes; (b) relationship between refractive index and resonance wavelength

表 3 抛磨两个相对空气孔时的数值分析结果

Table 3 Numerical analysis results when polishing two opposite air holes

Refractive index	Wavelength /nm	Sensitivity / $(\text{nm}\cdot\text{RIU}^{-1})$	Resolution / (10^{-4} RIU)	Refractive index	Wavelength /nm	Sensitivity / $(\text{nm}\cdot\text{RIU}^{-1})$	Resolution / (10^{-5} RIU)
1.31	570	1000	1.00	1.37	660	2000	5.00
1.32	580	1000	1.00	1.38	680	4000	2.50
1.33	590	1500	0.67	1.39	720	4000	2.50
1.34	605	1500	0.67	1.40	760	7000	1.40
1.35	620	2000	0.50	1.41	830	10000	1.00
1.36	640	2000	0.50	1.42	930	16000	0.63

式,并没有出现高阶 SPP 模式。图 6(b)为折射率与共振波长的变化关系曲线,曲线的斜率表示传感器在该折射率时的灵敏度。表 4 中给出了此结构的传感器损耗峰及对应波长更详细的变化,通过计算得到了其对应的波长灵敏度和分辨率。当分析物折射率为 1.31 时,灵敏度较低,其值为 1000 nm/RIU;当分析物的折射率逐渐从 1.31 增加到 1.42 时,传感器的灵敏度逐渐增大;当分析物折射率为 1.40 时,

灵敏度达到最大值,其值为 20000 nm/RIU,分辨率达到 5.0×10^{-6} RIU。

接下来,进一步探究了不同结构参数对悬浮芯光纤 SPR 传感器的传感性能的影响。当将光纤中的空气孔抛磨为开放式时,可以将金层涂覆到离纤芯很近的位置,抛磨深度对此光纤的传感性能影响很小,因此只探究金属层厚度和悬浮杆厚度对传感性能的影响。

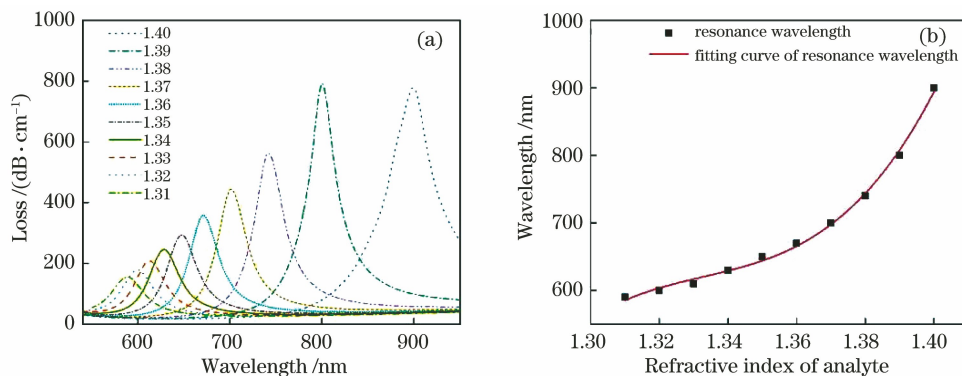


图 6 抛磨两个相邻空气孔时的传感特性。(a)不同分析物折射率对应的光谱损耗;(b)折射率与共振波长的关系
Fig. 6 Sensing characteristics when polishing two adjacent air holes. (a) Spectral loss corresponding to refractive indexes of different analytes; (b) relationship between refractive index and resonance wavelength

表 4 抛磨两个相邻空气孔的数值分析结果

Table 4 Numerical analysis results when polishing two adjacent air holes

Refractive index	Wavelength /nm	Sensitivity / $(\text{nm}\cdot\text{RIU}^{-1})$	Resolution / (10^{-4} RIU)	Refractive index	Wavelength /nm	Sensitivity / $(\text{nm}\cdot\text{RIU}^{-1})$	Resolution / (10^{-5} RIU)
1.31	590	1000	1.0	1.36	670	3000	3.30
1.32	600	1000	1.0	1.37	700	4000	2.50
1.33	610	2000	0.5	1.38	740	6000	1.70
1.34	630	2000	0.5	1.39	800	10000	1.00
1.35	650	2000	0.5	1.40	900	20000	0.50

金属层的厚度对传感器的传感性能有着至关重要的影响。图 7 对抛磨一个空气孔的传感器进行了分析。图 7(a) 为当分析物折射率为 1.38 时, 不同金膜厚度下传感器的损耗曲线。可以发现, 随着金膜厚度 t 的增加, 损耗峰发生红移, 损耗峰值逐渐降低。图 7(b) 中分析了悬浮杆厚度对传感性能的影响, 并绘制了当分析物折射率为 1.38 时传感器的损耗曲线。可以发现, 随着悬浮杆厚度 d 的增加, 损

耗峰发生轻微蓝移, 损耗峰值逐渐降低。

图 8 对抛磨相对两个空气孔的传感器进行了分析。图 8(a) 为当分析物折射率为 1.38 时, 不同金膜厚度下传感器的损耗曲线。可以发现, 随着金膜厚度 t 的增加, 损耗峰发生红移, 损耗峰值逐渐降低。图 8(b) 为当分析物折射率为 1.38 时悬浮杆厚度对传感器传感性能的影响。可以发现, 随着悬浮杆厚度 d 的增加, 损耗峰发生轻微蓝移, 损耗峰值逐渐降低。

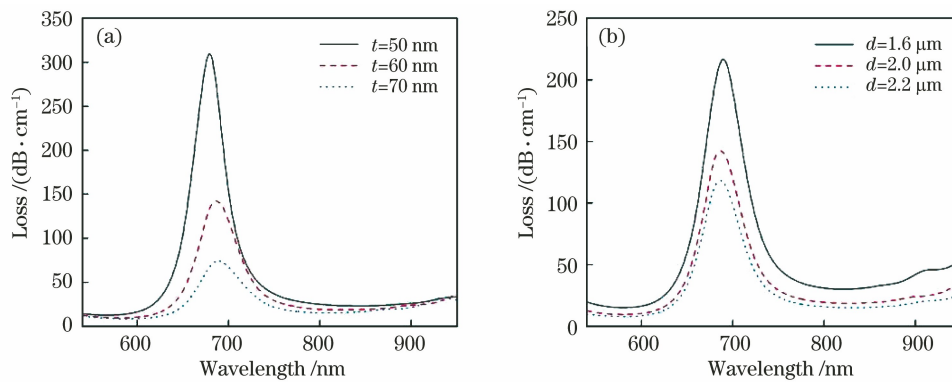


图 7 抛磨一个空气孔时结构参数对传感特性的影响。(a) 不同金膜厚度下的光谱损耗; (b) 不同悬浮杆厚度下的光谱损耗

Fig. 7 Influences of structural parameters on sensing characteristics when polishing one air hole. (a) Spectral loss under different gold film thicknesses; (b) spectral loss under different suspension pole thicknesses

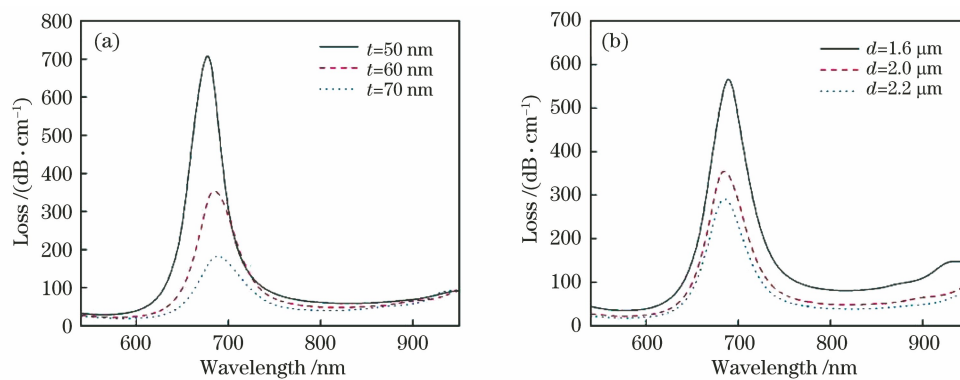


图 8 抛磨相对两个空气孔时结构参数对传感特性的影响。(a) 不同金膜厚度下的光谱损耗; (b) 不同悬浮杆厚度下的光谱损耗

Fig. 8 Influences of structural parameters on sensing characteristics when polishing two opposite air holes. (a) Spectral loss under different gold film thicknesses; (b) spectral loss under different suspension pole thicknesses

抛磨相邻两个空气孔的传感器的分析结果如图 9 所示。图 9(a)展示了当分析物折射率为 1.38 时,金膜厚度对传感器损耗的影响。可以发现,随着金膜厚度 t 的增加,损耗峰发生轻微红移,损耗峰值逐渐降低。图 9(b)展示了悬浮杆厚度对传感

器损耗的影响。可以发现,随着悬浮杆厚度 d 的增加,损耗峰发生蓝移,损耗峰值逐渐降低。当 $d=1.6 \mu\text{m}$ 时,损耗高达 1866.6 dB/cm,这是因为纤芯被抛磨了一部分,纤芯对光的束缚能力降低,大大增加了光的限制损耗。

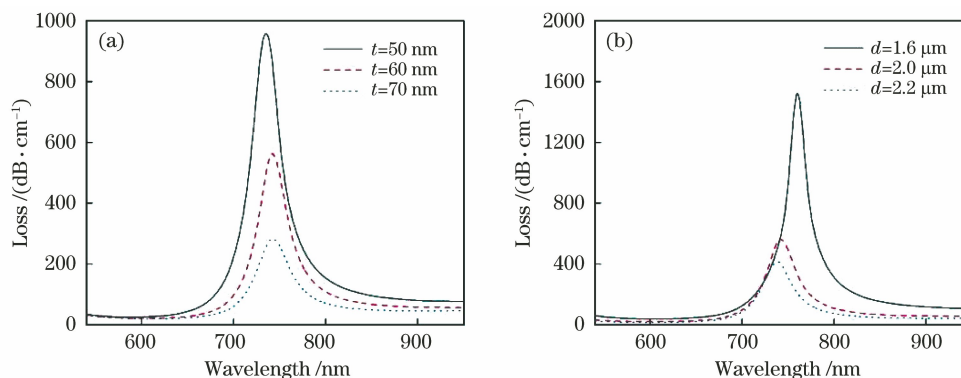


图 9 抛磨两个相邻空气孔时结构参数对传感特性的影响。(a)不同金膜厚度下的光谱损耗;
(b)不同悬浮杆厚度下的光谱损耗

Fig. 9 Influences of structural parameters on sensing characteristics when polishing two adjacent air holes.

(a) Spectral loss under different gold film thicknesses; (b) spectral loss under different suspension pole thicknesses

综上所述,三种结构的传感器参数对传感性能的影响相似。随着金膜厚度 t 的增加,损耗峰发生红移,损耗峰值逐渐降低,原因在于当金属层厚度显著大于金属趋肤深度时,光纤纤芯模式被明显地从等离子体模式中筛选出来,造成耦合效率降低,最终使得损耗及 FOM 降低^[21]。随着悬浮杆厚度 d 的增加,损耗峰发生轻微蓝移,损耗峰值逐渐降低。这

是因为悬浮杆厚度增大时,纤芯周围的空气孔面积减小,较低的空气比率会降低光纤中光的限制损耗。通过对以上参数的分析,综合考虑损耗值、灵敏度以及 FOM 等的影响,最终将设计的各传感器的金属层厚度确定为 60 nm,悬浮杆厚度确定为 $2 \mu\text{m}$ 。表 5 中展示了一些已经报道的基于 SPR 的折射率传感器的仿真数据。

表 5 已经报道的传感器的性能比较

Table 5 Performance comparison of sensors that have been reported

Characteristic	Wavelength / μm	Range of refractive index	Maximum spectral sensitivity / $(\text{nm}\cdot\text{RIU}^{-1})$	Maximum resolution /RIU
Quasi-D-shape ^[6]	550—740	1.33—1.42	3877	
Double loss peaks ^[7]		1.34—1.38	18900	5.291×10^{-6}
Exposed-core grapefruit fiber and Bimetallic structure ^[8]		1.33—1.42	16400	
Four-hole grapefruit fiber ^[9]	600—1200	1.33—1.43	19000	
Our work	570—930	1.31—1.42	20000	5.0×10^{-6}

4 结 论

设计了一种小芯径的 4 杆悬浮芯光纤折射率检测传感器,并针对此光纤模拟了三种不同的抛磨结构,通过在开放式的气孔中涂覆金膜来激发 SPR 效应。采用 FEM 方法分析了开放式悬浮芯光纤的 SPR 传感特性,研究了传感金属层和悬浮杆厚度对传感效果的影响。通过改变金膜和悬浮杆厚度,可以控制悬浮芯光纤的限制损耗。随着金膜厚度的增

加,损耗峰向长波方向移动,损耗峰值逐渐降低;随着悬浮杆厚度的增加,损耗峰向短波方向移动,损耗峰值逐渐降低。当金膜厚度为 60 nm、悬浮杆厚度为 $2 \mu\text{m}$ 时,三种结构均具有较好的传感性能。单孔抛磨结构和相对两孔抛磨结构的折射率检测范围为 1.31~1.42,最大灵敏度分别为 15000 nm/RIU 和 16000 nm/RIU,分辨率分别为 6.7×10^{-6} RIU 和 6.25×10^{-6} RIU。相邻两孔抛磨结构的折射率检测范围为 1.31~1.40,最大灵敏

度可达 20000 nm/RIU,分辨率可达 5.0×10^{-6} RIU。所提出的传感器结构简单,具有测量范围广、灵敏度高等优点,为 SPR 技术在高折射率检测传感器制造方面的应用提供了重要参考,将在光纤传感领域有广阔的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Jorgenson R C, Yee S S. A fiber-optic chemical sensor based on surface plasmon resonance[J]. *Sensors and Actuators B*, 1993, 12(3): 213-220.
- [2] Bing P B, Sui J L, Huang S C, et al. A novel photonic crystal fiber sensor with three D-shaped holes based on surface plasmon resonance [J]. *Current Optics and Photonics*, 2019, 3(6): 541-547.
- [3] Liao J F, Ding Z P, Xie Y M, et al. Ultra-broadband and highly sensitive surface plasmon resonance sensor based on four-core photonic crystal fibers[J]. *Optical Fiber Technology*, 2020, 60: 102316.
- [4] Selvendran S, Raja A S, Yogalakshmi S. A highly sensitive surface plasmon resonance biosensor using photonic crystal fiber filled with gold nanowire encircled by silicon lining[J]. *Optik*, 2018, 156: 112-120.
- [5] Li G M, Li Z Y, Li Z R, et al. High-sensitivity optical-fiber microfluidic chip based on surface plasmon resonance [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(1): 0106002.
李钢敏, 李致远, 李正冉, 等. 基于表面等离子体共振的高灵敏度光纤微流控芯片[J]. *中国激光*, 2021, 48(1): 0106002.
- [6] An G W, Li S G, Wang H Y, et al. Quasi-D-shaped optical fiber plasmonic refractive index sensor [J]. *Journal of Optics*, 2018, 20(3): 035403.
- [7] Meng X J, Li J S, Guo Y, et al. An optical-fiber sensor with double loss peaks based on surface plasmon resonance[J]. *Optik*, 2020, 216: 164938.
- [8] Yang X C, Lu Y, Wang M T, et al. SPR sensor based on exposed-core grapefruit fiber with bimetallic structure [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(6): 649-652.
- [9] Du C, Wang Q, Hu H F, et al. Highly sensitive refractive index sensor based on four-hole grapefruit microstructured fiber with surface plasmon resonance [J]. *Plasmonics*, 2017, 12(6): 1961-1965.
- [10] An G W, Li S G, Yan X, et al. Extra-broad photonic crystal fiber refractive index sensor based on surface plasmon resonance [J]. *Plasmonics*, 2017, 12(2): 465-471.
- [11] Malitson I H. Interspecimen comparison of the refractive index of fused silica[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1965, 55(10): 1205-1209.
- [12] Chen X L, Luo Y H, Xu M Y, et al. Refractive index and temperature sensing based on surface plasmon resonance fabricated on a side-polished fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(2): 0206005.
陈小龙, 罗云瀚, 徐梦云, 等. 基于侧边抛磨光纤表面等离子体共振的折射率和温度传感研究[J]. *光学学报*, 2014, 34(2): 0206005.
- [13] Vial A, Grimault A S, Macias D, et al. Improved analytical fit of gold dispersion: application to the modeling of extinction spectra with a finite-difference time-domain method[J]. *Physical Review B*, 2005, 71(8): 085416.
- [14] Hu T, Zhao Y, Song A N. Fiber optic SPR sensor for refractive index and temperature measurement based on MMF-FBG-MMF structure[J]. *Sensors and Actuators B*, 2016, 237: 521-525.
- [15] Liu H, Bai B B, Zhang Y Z, et al. High-sensitivity temperature measurement based on SPR in gold-PDMS-coated photonic crystal fiber [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(4): 0404003.
刘海, 白冰冰, 张砚曾, 等. 基于 SPR 效应的金-PDMS 涂覆光子晶体光纤高灵敏度温度测量[J]. *中国激光*, 2020, 47(4): 0404003.
- [16] Rifat A A, Mahdiraji G A, Shee Y G, et al. Anovel photonic crystal fiber biosensor using surface plasmon resonance[J]. *Procedia Engineering*, 2016, 140: 1-7.
- [17] Tan Z X, Hao X, Shao Y H, et al. Phase modulation and structural effects in a D-shaped all-solid photonic crystal fiber surface plasmon resonance sensor [J]. *Optics Express*, 2014, 22(12): 15049-15063.
- [18] Hasan M R, Akter S, Rifat A A, et al. A highly sensitive gold-coated photonic crystal fiber biosensor based on surface plasmon resonance [J]. *Photonics*, 2017, 4(4): 18.
- [19] Wang S, Li S G. Surface plasmon resonance sensor based on symmetrical side-polished dual-core photonic crystal fiber [J]. *Optical Fiber Technology*, 2019, 51: 96-100.
- [20] Vasić B, Isić G, Gajić R. Localized surface plasmon resonances in graphene ribbon arrays for sensing of dielectric environment at infrared frequencies [J]. *Journal of Applied Physics*, 2013, 113(1): 013110.
- [21] Xiao G L, Zhang K F, Yang H Y, et al. Refractive index sensor with double resonance peaks for D-type symmetric two-core photonic crystal fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(12): 1206001.
肖功利, 张开富, 杨宏艳, 等. D 型对称双芯光子晶体光纤双谐振峰折射率传感器[J]. *光学学报*, 2020, 40(12): 1206001.