

D 型对称双芯光子晶体光纤双谐振峰折射率传感器

肖功利¹, 张开富¹, 杨宏艳^{2,3,*}, 杨寓婷¹, 杨秀华¹, 窦婉滢¹, 曾丽珍⁴

¹ 桂林电子科技大学广西精密导航技术与应用重点实验室, 广西 桂林 541004;

² 桂林电子科技大学广西自动检测技术与仪器重点实验室, 广西 桂林 541004;

³ 桂林电子科技大学电子工程与自动化学院, 广西 桂林 541004;

⁴ 桂林电子科技大学研究生院, 广西 桂林 541004

摘要 设计了一种新颖的 D 型对称双芯光子晶体光纤表面等离子体共振折射率传感器。利用该结构中双芯与金属传感层界面处产生的表面等离子体共振效应, 结合不同的金属传感层, 在可见光与近红外波段获得显著的双谐振峰现象。采用有限元法分析了双谐振峰的相互独立性, 研究了该结构中空气孔间距、直径和金属传感层厚度、纳米柱半径及纳米柱间距对双峰的影响。结果表明, 在优化结构参数后, 双峰谐振使得传感器具有良好的传感性能, 在折射率为 1.32~1.43 内, 与双峰对应的平均灵敏度分别高达 6209.09 nm/RIU 和 8390.91 nm/RIU, 品质因数分别大于 19.64 RIU⁻¹ 和 27.06 RIU⁻¹。该研究结果为光子晶体光纤表面等离子体生物传感器的设计提供了理论参考。

关键词 光纤光学; 折射率传感器; 光子晶体光纤; 双谐振峰; 表面等离子体共振

中图分类号 TN253

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1206001

Refractive Index Sensor with Double Resonance Peaks for D-Type Symmetric Two-Core Photonic Crystal Fiber

Xiao Gongli¹, Zhang Kaifu¹, Yang Hongyan^{2,3,*}, Yang Yuting¹,
Yang Xiuhua¹, Dou Wanying¹, Zeng Lizhen⁴

¹ Guangxi Key Laboratory of Precision Navigation Technology and Application,
Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi 541004, China;

² Guangxi Key Laboratory of Automatic Detecting Technology and Instruments, Guilin University of
Electronic Technology, Guilin, Guangxi 541004, China;

³ School of Electronic Engineering and Automation, Guilin University of Electronic Technology,
Guilin, Guangxi 541004, China;

⁴ Graduate School, Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi 541004, China

Abstract Herein, we designed a novel D-type symmetric two-core photonic crystal fiber surface plasmon resonance refractive index sensor. A significant dual resonance peak phenomenon occurred in the visible and near-infrared bands when the surface plasmon resonance effect generated at the interface between two-core and metal-sensing layer in this structure is combined with different metal-sensing layers. The mutual independence of the dual resonance peaks was analyzed using the finite element method. Moreover, the effects of the spacing and diameter of air holes, the thickness of metal-sensing layers, and the radius and spacing of nanometer columns in the structure on the dual peaks were examined. Results demonstrate that after the structural parameters are optimized, double peak resonance facilitates the good sensing performance of the sensor. In the refractive index range of 1.32-1.43, the respective average sensitivities corresponding to the double resonance peaks are up to 6209.09 nm/RIU and 8390.91 nm/RIU, and the figures of merit are greater than 19.64 RIU⁻¹ and 27.06 RIU⁻¹. These results provide

收稿日期: 2020-01-13; 修回日期: 2020-02-21; 录用日期: 2020-03-16

基金项目: 国家自然科学基金(61765004, 61465004, 61874036)、广西自然科学基金(2017GXNSFAA198164, 2016GXNSFAA380006)、桂林电子科技大学研究生教育创新计划(2019YCXS028, 2017YJXC41, YCSW2018143)、广西精密导航技术与应用重点实验室基金(DH201907, DH201804)、广西自动检测技术与仪器重点实验室基金(YQ18110)

* E-mail: yhy.gl@126.com

a theoretical reference for the design of a photonic crystal fiber surface plasmon biosensor.

Key words fiber optics; refractive index sensor; photonic crystal fiber; double resonance peak; surface plasmon resonance

OCIS codes 060.2370; 060.5295; 240.6680; 160.3900

1 引 言

表面等离子体激元(SPP)是一种金属表面自由电子与入射光子相互作用所形成的电磁模式。若选择适当的入射光波长和入射角,当 SPP 与倏逝波的频率相等时,就会产生表面等离子体共振(SPR)效应^[1-4]。当 SPR 效应产生时,入射光被强烈吸收,反射光或透射光的能量急剧下降,并在反射光谱中出现相应的共振吸收峰。共振吸收峰的位置对金属表面附近的介质折射率变化异常敏感,因此基于 SPR 效应的传感技术在化学、生物医学及环境监测领域有发展前景^[5-9]。传统的 SPR 传感器一般采用 Kretschmann 结构^[10],即利用入射光在耦合棱镜边界全反射所产生的倏逝波激发金属膜和待测物界面的 SPP。具有棱镜结构的 SPR 传感器存在体积大、机械结构复杂及无法实现遥测功能等缺点,因此该结构的传感器正逐步被具有微纳光纤结构的 SPR 传感器所替代^[11]。光纤 SPR 传感器尽管具有结构简单、灵敏度高及抗干扰能力强等优点,但目前仍存在耦合损耗大、保偏性差等缺点,因此其性能的进一步提高受到限制。

光子晶体光纤(PCF)是近年来出现的一种新型光纤,这种光纤通常由单一电介质构成,其微结构包层由在二维方向上紧密排列而在轴向上结构不变的波长量级空气孔组成。从结构角度 PCF-SPR 传感器可分为选择性金属涂层结构^[12]、内部纳米线填充结构^[13]、微流槽结构^[14]、外部传感结构^[15]及 D 型结构^[16]等,由于其结构设计的高度灵活性,近年来基于 PCF 结构的 SPR 传感器引起了科研人员的极大关注,尤其是在 D 型 PCF 领域。2006 年, Wang 等^[17]首次将 D 型 PCF 和 SPR 技术相结合,提出了一种全新的传感方法。D 型 PCF 是指将 PCF 包层顶部抛光成平整的平面,使得其横截面形状类似于字母 D,金属层和待测分析物放置在平面部分的顶部,使纤芯的泄漏膜和金属膜附近的 SPP 模式相互耦合,从而实现 SPR。这种 D 型 PCF 因只需要在平面镀金属膜,加工工艺较为简单、易于实现,另外待测分析物可以放置在靠近纤芯位置,有利于纤芯与分析物发生强耦合,从而提高了传感性能^[18]。基于 D 型 PCF 结构的 SPR 折射率传感器可通过增加

抛光深度^[19]、采用高折射率液芯^[20]、采用石墨烯-银复合结构^[21-22]传感层等方式提高传感器性能。这些方式虽然在某种程度上有效提高了传感器的各项性能,但因都是利用单谐振峰进行传感,传感精度和可靠性还有进一步提升空间。

基于以上研究背景,本文提出了一种 D 型对称双芯的 PCF 结构,该结构中双芯分别与金薄膜和金纳米柱作用产生 SPR 效应,使损耗谱中出现双谐振峰现象。利用双峰谐振进行折射率传感,以期获得更好的灵敏度。采用有限元法(FEM),研究了该结构中 PCF 的空气孔间距、直径和金属传感层厚度、半径及间距对双谐振峰的影响。通过优化结构参数,该传感器的平均灵敏度达到了 8390.91 nm/RIU,品质因数大于 27.06 RIU⁻¹,其中 RIU 为折射率单位,平均灵敏度均高于文献[16, 19-21]中的理论值。该结构设计及数值仿真结果可为实现各种 PCF 传感器件提供新的思路。

2 结构与数值模拟

以 D 型对称双芯 PCF-SPR 传感器为研究对象,利用 COMSOL Multiphysics 软件对其模态特性进行有限元分析。图 1(a)为 D 型对称双芯 PCF-SPR 传感器的三维示意图,其传感区域长度 $L = 1 \text{ mm}$ 。图 1(b)为传感器的二维结构图及其 $y-z$ 截面放大图,其横截面形状与大写字母“D”相似,其直径 $D = 125 \text{ }\mu\text{m}$,具有三层空气孔,空气孔间距 $\Lambda = 16 \text{ }\mu\text{m}$,空气孔直径 $d = 0.42\Lambda$ 。

如图 1(b)所示,在 D 型对称双芯 PCF 侧抛光平台上,core 1 表面镀一层厚度为 $t = 50 \text{ nm}$ 的金纳米薄膜,core 2 表面排列着半径为 $r = 60 \text{ nm}$ 、间距为 $w = 100 \text{ nm}$ 的金纳米柱。光纤的 D 型表面及外部空间充满了折射率为 1.32~1.43 的分析物(水溶液),通过分别检测双芯所构成的双通道产生 SPR 波长的位置,获得分析物的折射率变化信息。由倏逝波理论可知,在发生全反射现象时,光波并非直接反射回光密媒质,而是渗透到光疏媒质,并激发出 SPP。当入射光波在 PCF 纤芯内以全反射的形式传输时,其全反射的倏逝波将穿透包层到达金属膜表面并激发出 SPP,当纤芯模式沿金属界面方向的波矢分量大小与 SPP 的波数相等时就会发生 SPR。

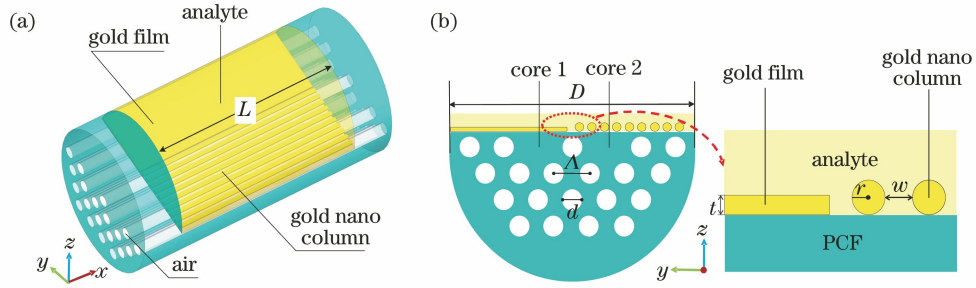


图 1 D型对称双芯 PCF 传感器示意图。(a)三维结构图;(b)二维结构图及其 $y-z$ 截面放大图
Fig. 1 Schematic of D-type symmetrical dual-core PCF sensor. (a) Drawing of three-dimensional structure;
(b) drawing of two-dimensional structure and enlargement of its $y-z$ section

当 PCF 中纤芯导模沿金属表面的波矢分量大小 k_x 与金属-电介质面的 SPP 本征波数 k_{spp} 满足波矢匹配^[22]时,有

$$k_x = \frac{\omega}{c} \sqrt{\epsilon_0(\omega)} \sin \theta = k_{spp} = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\epsilon_1 \epsilon_2(\omega)}{\epsilon_1 + \epsilon_2(\omega)}}, \quad (1)$$

式中: ω 为光波角频率; c 为光速; $\epsilon_0(\omega)$ 为纤芯介电常数; θ 为光波入射到金属-电介质界面的角度; ϵ_1 为待测介质的介电常数; $\epsilon_2(\omega)$ 为金属的介电常数。当满足波矢匹配条件时,有

$$\sin \theta_{res} = \sqrt{\frac{\epsilon_1 \epsilon_2(\omega)}{\epsilon_0(\omega) [\epsilon_1 + \epsilon_2(\omega)]}}, \quad (2)$$

式中: θ_{res} 为共振条件下入射光的角度。当发生 SPR 时,共振角度与纤芯模的介电常数、金属的介电常数、待测介质的介电常数有关,而纤芯导模和金属的介电常数与光波角频率有关,因此,当待测介质的介电常数 ϵ_1 改变时,共振条件下入射光的角度将改变,导致 SPR 的共振峰移动。因此,可基于待测介质的折射率与共振峰位置的关系进行模拟计算,并由共振峰的偏移量得到待测物折射率的大小。

光纤基底材料为二氧化硅(SiO_2),其折射率可根据 Sellmeier 方程^[23]算出,表达式为

$$n^2(\lambda) = 1 + \frac{0.6961663\lambda^2}{\lambda^2 - (0.0684043)^2} + \frac{0.4079426\lambda^2}{\lambda^2 - (0.1162414)^2} + \frac{0.8974794\lambda^2}{\lambda^2 - (9.896161)^2}, \quad (3)$$

式中: λ 为入射光波长。金作为常用的等离子体材料,其相对介电常数 ϵ_{Au} 可由 Drude 模型^[24-25]描述:

$$\epsilon_{Au} = \epsilon_\infty + \frac{\sigma/\epsilon'}{j\omega} + \sum_{p=1}^4 \frac{C_p}{\omega^2 + A_p j\omega + B_p}, \quad (4)$$

式中: ϵ_∞ 为无限频率下的介电常数; ϵ' 为真空介电常数; σ 为电导率; A_p 、 B_p 、 C_p 为色散系数,参数值如表 1 所示。

表 1 Au 介电常数的 Drude 模型拟合参数^[24]

Table 1 Parameters for Drude model fitting of Au dielectric permittivity^[24]

p	Au($\epsilon_\infty = 1.0, \sigma/\epsilon' = 1355.01$)		
	A_p/eV	B_p/eV^2	C_p/eV^2
1	-8.577×10^4	-1.156×10^4	5.557×10^7
2	-2.875	0	2.079×10^3
3	-997.600	-3090	6.921×10^3
4	-1.630	-4.409	26.150

当分析物折射率变化时,由于纤芯导模和等离子体模式的相位匹配条件改变,共振峰的波长会发生偏移。因此,可以通过跟踪共振峰的波长偏移来检测分析物的折射率变化,灵敏度 $S(\lambda)$ 是评价传感器性能的重要参数之一,其表达式^[26]为

$$S(\lambda) = \frac{\Delta\lambda_{res}}{\Delta n_s}, \quad (5)$$

式中: $\Delta\lambda_{res}$ 为 SPR 波长的偏移量; Δn_s 为分析物折射率的变化量。

对 SPR 传感器来说,虽然灵敏度越大越好,但是谐振峰的半峰全宽(FWHM)过大将导致分辨率的降低和追踪谐振峰峰值的难度加大,因此为了全面了解 SPR 传感器的性能,引入品质因数(FOM)。FOM 定义^[27]为

$$f_{FOM} = \frac{S(\lambda)}{f_{FWHM}}, \quad (6)$$

式中: f_{FWHM} 为共振峰的半峰全宽。

3 结果与讨论

所设计的双谐振峰折射率传感器的测量原理是通过建立分析物折射率与共振峰波长的关系,由共振峰波长的偏移量得到外界分析物折射率的大小。由 D 型 PCF 结构的 SPR 传感器模型可知,PCF 与金属传感层的结构参数将对传感性能产生影响。首先证明双峰谐振传感的独立性,然后分析 PCF 结构

和金属传感层结构参数对传感性能的影响,最后分析共振峰的偏移量与分析物折射率的关系。

3.1 双谐振峰相互独立性分析

图 2 为 D 型对称双芯 PCF 传感器在产生 SPR

效应时,光纤横截面的电场模分布,图 2(a)为镀金薄膜的 core 1 的模场分布,图 2(b)为镀金纳米柱的 core 2 的模场分布,传感分析时双芯光纤中的偏振模式为横磁(TM)模。

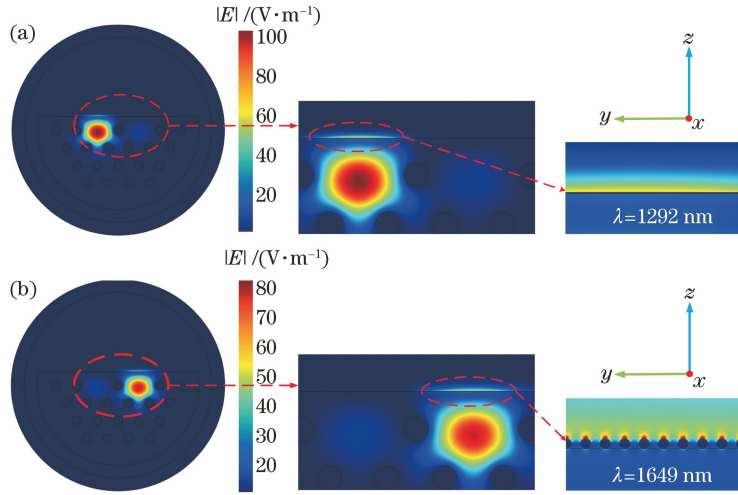


图 2 传感器产生 SPR 效应时 y - z 横截面的模场分布。(a) core 1; (b) core 2

Fig. 2 Distribution of y - z cross sectional mode field when SPR effect occurring in sensor. (a) core 1; (b) core 2

由图 2 可知,当外界分析物折射率 $n_s = 1.43$ 时,core 1 与 core 2 分别在波长为 1292 nm 和 1649 nm 处产生 SPR 效应,两者的共振波长相差 357 nm,理论上双芯传感通道相互独立。从图 2(a) 的模场分布可以看出,在 $\lambda = 1292$ nm, core 1 产生 SPR 时,core 2 的模场分布较弱,此时 core 2 对 core 1 的传感几乎没有影响。同理,从图 2(b)可知,在 $\lambda = 1649$ nm, core 2 产生 SPR 时,core 1 的影响可以忽略。因此,从产生 SPR 时的模场分布可初步推断出双芯传感通道是相互独立的。

进一步确定由对称双芯构成的传感通道的相互独立性。图 3(a)为分析物折射率 $n_s = 1.40$ 时,纤芯导模和 core 1、core 2 的 SPP 模的色散关系及损耗谱

曲线,其中 n_{eff} 为有效折射率,图 3(b)为其在不同波长处的电场强度分布图。由图 3(a)可知,在 800 ~ 1250 nm 内,当 core 1、core 2 的 SPP 模的波矢大小与纤芯导模的波矢大小相等时产生 SPR 效应,在光谱上表现为相应的共振损耗峰。定义 $\lambda_{core 1}$ 和 $\lambda_{core 2}$ 分别为 core 1 和 core 2 的共振损耗峰处的波长, $\alpha_{loss 1}$ 和 $\alpha_{loss 2}$ 分别为共振损耗峰的峰值,则当 $n_s = 1.40$ 时, $\lambda_{core 1} = 864$ nm, $\lambda_{core 2} = 1064$ nm, $\alpha_{loss 1} = 4.74$ dB/cm, $\alpha_{loss 2} = 5.85$ dB/cm,即 core 1 与 core 2 传感通道在损耗光谱上表现为双谐振峰。综上所述,该传感器的双芯传感通道在场分布和损耗谱曲线上都表现出相互独立的特性。与传统单芯光纤结构相比,该 D 型对称双芯 PCF 结构可呈现出良好的双谐振峰现象。

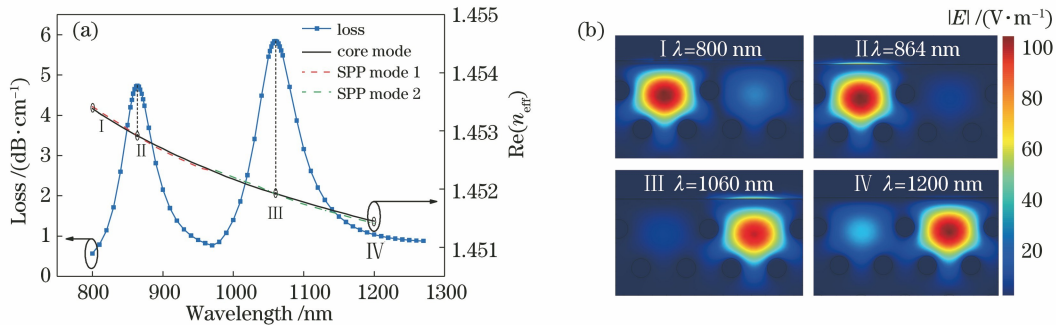


图 3 n_s 为 1.40 时光纤的相关参数。(a)色散关系及损耗谱曲线;(b)不同波长处的电场强度 $|E|$ 分布
Fig. 3 Relative parameters of fiber when n_s being 1.40. (a) Dispersion relation and loss spectral curve;
(b) electric field strength $|E|$ distributions under different wavelengths

3.2 结构参数对传感性能的影响

为了进一步探讨不同结构参数对 D 型对称双芯 PCF-SPR 传感器传感性能的影响,分别研究了 PCF 和金属传感层的结构参数。首先,分析 PCF 结构参数的影响。图 4 为不同 PCF 结构参数对限制损耗的影响,固定金属传感层的参数为 $t = 50 \text{ nm}$, $r = 60 \text{ nm}$, $w = 100 \text{ nm}$ 。

图 4(a)为在 PCF 的空气孔直径 $d = 0.42\Lambda$,分析物折射率 $n_s = 1.40$ 条件下,不同空气孔间距 Λ 对应的损耗谱曲线图,随着 Λ 增大, $\lambda_{\text{core}1}$ 和 $\lambda_{\text{core}2}$ 保持不变, $\alpha_{\text{loss}1}$ 和 $\alpha_{\text{loss}2}$ 降低。这是因为空气孔间距表征了光子晶体的晶格周期,增大的晶格周期会在不影

响 SPR 产生的条件下降低光在 PCF 中的限制损耗。图 4(b)为 $\Lambda = 16 \mu\text{m}$ 时,PCF 的不同空气孔直径 d 对应的损耗谱曲线图,随着 d 增大, $\lambda_{\text{core}1}$ 和 $\lambda_{\text{core}2}$ 保持不变, $\alpha_{\text{loss}1}$ 和 $\alpha_{\text{loss}2}$ 增大。这是因为,由 d 与 Λ 关系可知,空气孔直径表征了光子晶体的空气填充率,增大的空气填充率会在不影响 SPR 产生的条件下增大 PCF 中光的限制损耗。综上所述,在固定金属传感层参数的条件下,PCF 的 Λ 越小, d 越大,光纤的限制损耗越大,对应的 $\alpha_{\text{loss}1}$ 和 $\alpha_{\text{loss}2}$ 越大,即 PCF 的结构参数对传感器共振峰波长没有影响,只影响其限制损耗。考虑到损耗峰的 FOM 越大越好,本设计中 PCF 的结构参数取 $\Lambda = 16 \mu\text{m}$ 和 $d = 0.42\Lambda$ 。

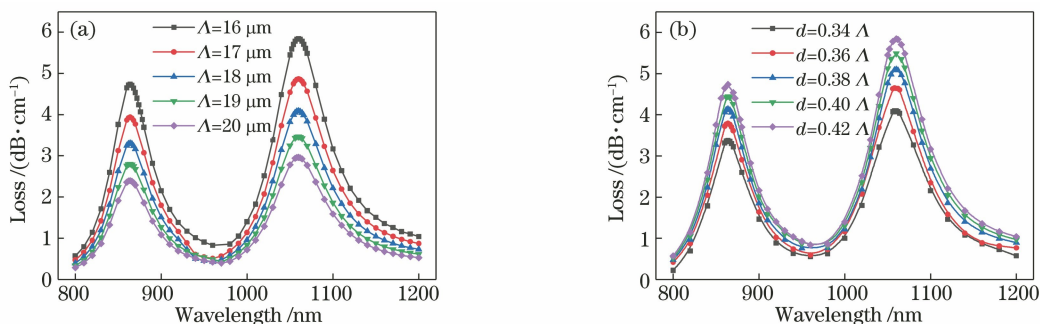


图 4 PCF 结构参数对损耗谱曲线的影响。(a) Λ ; (b) d

Fig. 4 Influence of PCF structure parameters on loss spectral curves. (a) Λ ; (b) d

随后,研究金纳米薄膜对 core 1 传感通道的影响。图 5 为金薄膜厚度 t 对 core 1 传感性能的影响,固定 core 2 的金纳米柱传感层的参数 ($r = 60 \text{ nm}$, $w = 100 \text{ nm}$)。图 5(a)为当分析物折射率 $n_s = 1.40$ 时,不同金薄膜厚度 t 对应的损耗谱曲线,随着 t 的增加, $\lambda_{\text{core}2}$ 和 $\alpha_{\text{loss}2}$ 保持不变,而 $\alpha_{\text{loss}1}$ 减小, $\lambda_{\text{core}1}$ 发生红移,相应的共振损耗峰的 FWHM 变宽。这是因为表面等离子体波对金属传感层的厚度变化非常敏感,随着金薄膜厚度的增加,相位匹配点向长波长方向移

动,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,导致耦合效率降低,最终使得损耗及 FOM 降低。图 5(b)为取不同 t 时,共振波长随分析物折射率变化的偏移曲线,上述 $\lambda_{\text{core}1}$ 随厚度增大而红移的变化规律在折射率为 $1.32 \sim 1.43$ 时同样适用。在该折射率范围内,通过(5)式可得:当 $t = 40 \text{ nm}$ 时, $S(\lambda) = 5800 \text{ nm}/\text{RIU}$; $t = 45 \text{ nm}$ 时, $S(\lambda) = 6045.45 \text{ nm}/\text{RIU}$; $t = 50 \text{ nm}$ 时, $S(\lambda) = 6209.09 \text{ nm}/\text{RIU}$; $t = 55 \text{ nm}$ 时, $S(\lambda) =$

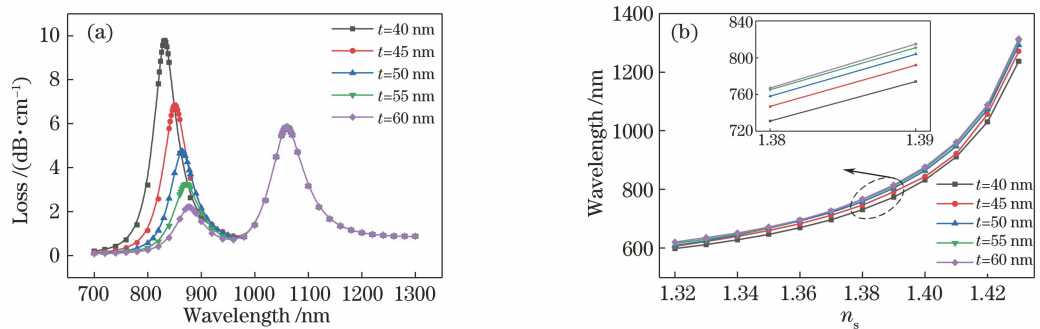


图 5 金薄膜厚度对 core 1 传感性能的影响。(a) 不同金薄膜厚度下的损耗谱曲线; (b) SPR 波长与分析物折射率的关系

Fig. 5 Influence of gold film thickness on sensing performance of core 1. (a) Loss spectra under different gold film thicknesses; (b) relation between SPR wavelength and refractive index of analyte

6263.64 nm/RIU; $t = 60$ nm 时, $S(\lambda) = 6290.91$ nm/RIU; 即 $S(\lambda)$ 随 t 的增大而增大。综合损耗、FOM 及灵敏度性能要求, 选择 $t = 50$ nm。

同样, 研究金纳米柱对 core 2 传感通道的影响。图 6 为取金纳米柱间距 $w = 100$ nm 时, 金纳米柱半径 r 对 core 2 传感性能的影响。图 6(a) 为当分析物折射率 $n_s = 1.40$ 时, 不同 r 对应的损耗谱曲线, 随着 r 的增大, $\lambda_{\text{core 1}}$ 和 $\alpha_{\text{loss 1}}$ 保持不变, $\alpha_{\text{loss 2}}$ 减小, $\lambda_{\text{core 2}}$ 发生红移, 相应的共振损耗峰的 FWHM 变宽。

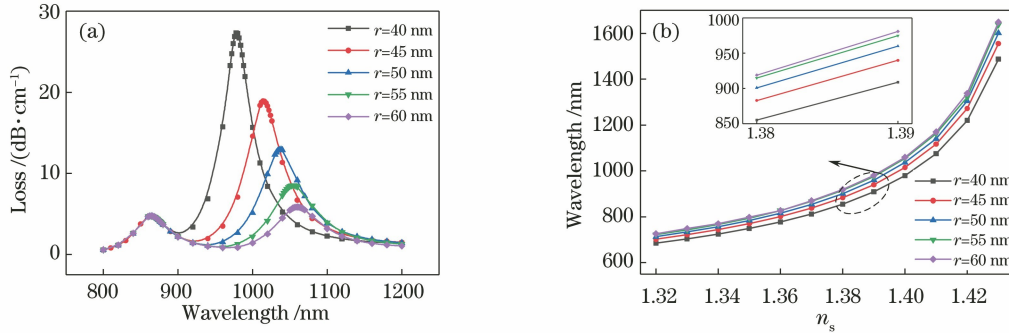


图 6 金纳米柱半径对 core 2 传感性能的影响。(a) 不同金纳米柱半径下的损耗谱曲线; (b) SPR 波长与分析物折射率的关系

Fig. 6 Influence of gold nanometer column radius on sensing performance of core 2. (a) Loss spectra under different gold nanometer column radii; (b) relation between SPR wavelength and refractive index of analyte

图 7 为不同金纳米柱间距对应的损耗谱曲线, 固定 $r = 60$ nm, $n_s = 1.40$, 随着间距的增大, $\alpha_{\text{loss 1}}$ 不变, $\alpha_{\text{loss 2}}$ 增大。这是因为金纳米柱间距越大, SPR 耦合效率越高, 因此损耗增大。在间距为 80~120 nm 时, $\lambda_{\text{core 1}}$ 不变, $\lambda_{\text{core 2}}$ 分别为 1053, 1057, 1060, 1061, 1059 nm, 即 $\lambda_{\text{core 2}}$ 也几乎保持不变。同样, 综合损耗、FOM 及灵敏度要求, 选择 $r = 60$ nm, $w = 100$ nm。

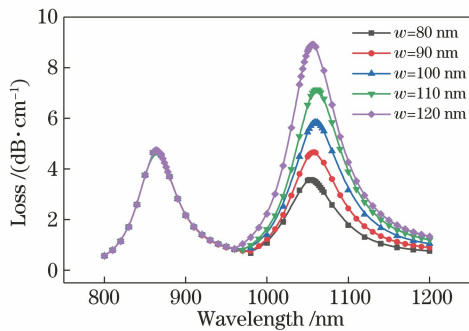


图 7 金纳米柱间距对损耗谱曲线的影响

Fig. 7 Influence of gold nanometer column spacing on loss spectral curve

为了验证双芯的双通道传感的独立性, 研究了 PCF 结构和金属传感层结构参数对 core 1 和 core 2 传感性能的影响, 结果发现, 金薄膜厚度和金纳米柱半径会影响 SPR 条件, PCF 几何参数和金纳米柱间

这是因为金薄膜是金纳米柱参数为 $t = 2r, w = 0$ 的特殊形式, 因此变化规律相同。图 6(b) 为取不同 r 时, 共振波长随分析物折射率变化的偏移曲线, 同理, 在折射率为 1.32~1.43 时, 通过 (5) 式得: 当 $r = 40$ nm 时, $S(\lambda) = 7281.82$ nm/RIU; $r = 45$ nm 时, $S(\lambda) = 7754.55$ nm/RIU; $r = 50$ nm 时, $S(\lambda) = 8072.73$ nm/RIU; $r = 55$ nm 时, $S(\lambda) = 8218.18$ nm/RIU; $r = 60$ nm 时, $S(\lambda) = 8390.91$ nm/RIU; $S(\lambda)$ 随 r 的增大而增大。

距会影响光纤的限制损耗。

3.3 谐振峰偏移与折射率的关系

经过以上分析, 能获得最优灵敏度且能将限制损耗控制在合理范围内的参数为: $\Lambda = 16 \mu\text{m}$, $d = 0.42\Lambda$, $t = 50$ nm, $r = 60$ nm 及 $w = 100$ nm。图 8(a)、(b) 为在上述参数条件下, n_s 为 1.32~1.43 的不同分析物对应的损耗谱曲线, $\lambda_{\text{core 1}}$ 从 609 nm 红移到 1292 nm, $\lambda_{\text{core 2}}$ 从 726 nm 红移到 1649 nm。图 8(c) 为分析物折射率与共振波长的关系, 根据 (5) 式可以计算出在折射率为 1.32~1.43 时, core 1 的平均灵敏度为 6209.09 nm/RIU, core 2 的平均灵敏度为 8390.91 nm/RIU, 且在 1.42~1.43 折射率区间分别具有 21900 nm/RIU 和 31100 nm/RIU 的最大灵敏度。图 8(d) 为分析物折射率 n_s 与 FWHM、FOM 的关系, 其中 FWHM1、FWHM2 分别为 core 1 和 core 2 共振损耗峰的半峰全宽, FOM1、FOM2 分别为 core 1 和 core 2 共振模式的品质因数, 由 (6) 式计算可得, 最小 FOM1 和最小 FOM2 都大于 19.64 RIU^{-1} 和 27.06 RIU^{-1} 。由上可见, 两个共振损耗峰均呈现较好的性能, 平均灵敏度相较于文献[16, 19-21]的结果也得到了较好的改善, 并且相较于文献[16, 19-21]中的单谐振峰传感, 双谐

振峰的单次检测可以同时获得两个测量结果,其可靠性得到较大提高,这表明该双谐振峰传感器设计

有望在新一代高性能光纤等离子体传感器中得到应用。

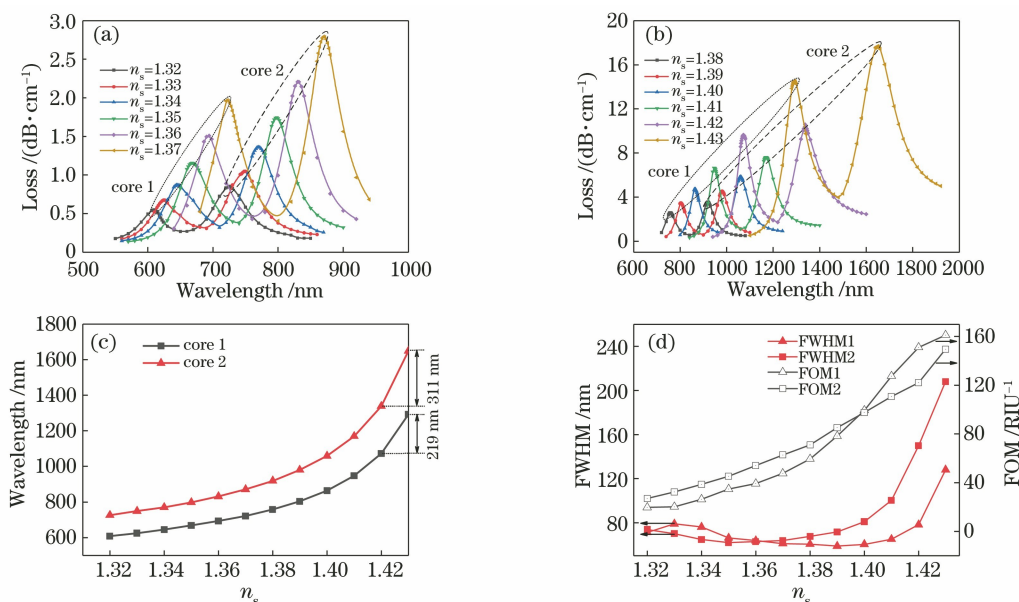


图 8 传感特性分析。(a)(b)不同分析物折射率对应的损耗谱曲线;(c)折射率与共振波长的关系;(d)折射率与 FWHM、FOM 的关系

Fig. 8 Analysis of sensor characteristics. (a)(b) Loss spectral curves corresponding to different refractive indexes of analyte; (c) relation between refractive index and resonance wavelength; (d) relation among refractive index, FWHM, and FOM

4 结 论

提出了一种基于双谐振峰传感特性的 D 型对称双芯 PCF 折射率传感器。采用 FEM 分析了双谐振峰的相互独立性,研究了 PCF 和传感金属层的几何参数对双峰传感特性的影响。通过改变 PCF 的空气孔间距和直径,可以控制 PCF 的限制损耗,随着 PCF 空气孔间距 Λ 的减小或空气孔直径 d 的增大, $\lambda_{\text{core 1}}$ 和 $\lambda_{\text{core 2}}$ 不变, $\alpha_{\text{loss 1}}$ 和 $\alpha_{\text{loss 2}}$ 增大;通过改变金属传感层的厚度和半径,可以实现双谐振峰的动态调制,随着金纳米薄膜厚度 t 与金纳米柱直径 r 的增加, $\lambda_{\text{core 1}}$ 和 $\lambda_{\text{core 2}}$ 红移, $\alpha_{\text{loss 1}}$ 和 $\alpha_{\text{loss 2}}$ 降低,波长灵敏度增大,随着金纳米柱间距 w 的增加, $\lambda_{\text{core 2}}$ 基本保持不变,损耗峰峰值增大;在 $\Lambda = 16 \mu\text{m}$, $d = 0.42\Lambda$, $t = 50 \text{ nm}$, $r = 60 \text{ nm}$, $w = 100 \text{ nm}$ 时,该结构具有较好的传感性能,在折射率为 1.32~1.43 时,两个谐振峰的平均灵敏度分别为 6209.09 nm/RIU 和 8390.91 nm/RIU,最小品质因数分别大于 19.64 RIU⁻¹ 和 27.06 RIU⁻¹。相对于传统的光纤传感器,D 型 PCF 传感器在结构和性能上均具有一定优势,且利用双谐振峰的相互独立性进行折射率传感可进一步提高灵敏度,减小误差,从而提高了检测精度和可靠性。这些研究结果为设计新一代高性能

能光纤等离子体生物传感器提供了理论参考。

参 考 文 献

- [1] Maier S A. Plasmonics: fundamentals and applications[M]. Zhang T, Wang Q L, Zhang X Y, et al, Transl. Nanjing: Southeast University Press, 2014: 26-35.
麦尔. 等离子体光学: 基础与应用[M]. 张彤, 王琦龙, 张晓阳, 等, 译. 南京: 东南大学出版社, 2014: 26-35.
- [2] Ritchie R H. Plasma losses by fast electrons in thin films[J]. Physical Review, 1957, 106(5): 874-881.
- [3] Powell C J, Swan J B. Effect of oxidation on the characteristic loss spectra of aluminum and magnesium [J]. Physical Review, 1960, 118(3): 640-643.
- [4] Stern E A, Ferrell R A. Surface plasma oscillations of a degenerate electron gas [J]. Physical Review, 1960, 120(1): 130-136.
- [5] Yanase Y, Hiragun T, Yanase T, et al. Application of SPR imaging sensor for detection of individual living cell reactions and clinical diagnosis of type I allergy[J]. Allergology International, 2013, 62(2): 163-169.
- [6] Fan X D, White I M, Shopova S I, et al. Sensitive optical biosensors for unlabeled targets: a review[J].

- Analytica Chimica Acta, 2008, 620(1/2): 8-26.
- [7] Lu J D, van Stappen T, Spasic D, et al. Fiber optic-SPR platform for fast and sensitive infliximab detection in serum of inflammatory bowel disease patients [J]. Biosensors and Bioelectronics, 2016, 79: 173-179.
- [8] Zhang L D, Fang M. Nanomaterials in pollution trace detection and environmental improvement [J]. Nano Today, 2010, 5(2): 128-142.
- [9] Krotkiewska B, Pasek M, Krotkiewski H. Interaction of glycophorin A with lectins as measured by surface plasmon resonance (SPR) [J]. Acta Biochimica Polonica, 2002, 49(2): 481-490.
- [10] Kretschmann E. The determination of the optical constants of metals by excitation of surface plasmons [J]. Zeitschrift Für Physik A Hadrons and Nuclei, 1971, 241(4): 313-324.
- [11] Jorgenson R C, Yee S S. A fiber-optic chemical sensor based on surface plasmon resonance [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 1993, 12(3): 213-220.
- [12] Dash J N, Jha R. SPR biosensor based on polymer PCF coated with conducting metal oxide [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26(6): 595-598.
- [13] Lu Y, Yao J Q, Yang X C, et al. Surface plasmon resonance sensor based on hollow-core PCFs filled with silver nanowires [J]. Electronics Letters, 2015, 51(21): 1675-1677.
- [14] Otupiri R, Akowuah E K, Haxha S, et al. A novel birefringent photonic crystal fiber surface plasmon resonance biosensor [J]. IEEE Photonics Journal, 2014, 6(4): 1-11.
- [15] Rifat A A, Mahdiraji G A, Shee Y G, et al. A novel photonic crystal fiber biosensor using surface plasmon resonance [J]. Procedia Engineering, 2016, 140: 1-7.
- [16] Luan N N, Wang R, Lv W, et al. Surface plasmon resonance sensor based on D-shaped microstructured optical fiber with hollow core [J]. Optics Express, 2015, 23(7): 8576-8582.
- [17] Wang S F, Chiu M H, Chang R S. Numerical simulation of a D-type optical fiber sensor based on the Kretschmann's configuration and heterodyne interferometry [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2006, 114(1): 120-126.
- [18] Rifat A A, Ahmed R, Yetisen A K, et al. Photonic crystal fiber based plasmonic sensors [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2017, 243: 311-325.
- [19] Tian M, Lu P, Chen L, et al. All-solid D-shaped photonic fiber sensor based on surface plasmon resonance [J]. Optics Communications, 2012, 285(6): 1550-1554.
- [20] Tan Z X, Li X J, Chen Y Z, et al. Improving the sensitivity of fiber surface plasmon resonance sensor by filling liquid in a hollow core photonic crystal fiber [J]. Plasmonics, 2014, 9(1): 167-173.
- [21] Dash J N, Jha R. On the performance of graphene-based D-shaped photonic crystal fibre biosensor using surface plasmon resonance [J]. Plasmonics, 2015, 10(5): 1123-1131.
- [22] Lü J T, Wang C M, Zhu C H, et al. Dual-core photonic crystal fiber transverse-stress sensor based on surface plasmon resonance [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(8): 0828002.
吕健滔, 王春明, 朱晟昇, 等. 基于表面等离子体共振的双芯光子晶体光纤横向应力传感器 [J]. 光学学报, 2017, 37(8): 0828002.
- [23] Guan C Y, Yuan L B, Shi J H. Microstructured-fiber surface plasmon resonance sensor [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(2): 0206003.
关春颖, 苑立波, 史金辉. 微孔光纤表面等离子体共振传感特性分析 [J]. 光学学报, 2011, 31(2): 0206003.
- [24] Hao F, Nordlander P. Efficient dielectric function for FDTD simulation of the optical properties of silver and gold nanoparticles [J]. Chemical Physics Letters, 2007, 446(1/2/3): 115-118.
- [25] Liu C, Su W Q, Liu Q, et al. Symmetrical dual D-shape photonic crystal fibers for surface plasmon resonance sensing [J]. Optics Express, 2018, 26(7): 9039.
- [26] 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.
- [27] Xiao G L, Yang X H, Yang H Y, et al. Plasma refractive index sensor with tunable cross Tie-shaped graphene array structure [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(7): 0728011.
肖功利, 杨秀华, 杨宏艳, 等. 可调谐交叉领结形石墨烯阵列结构等离子体折射率传感器 [J]. 光学学报, 2019, 39(7): 0728011.