

栅状膜双芯 D 型 PCF 折射率传感器

房黎明¹, 陈鹤鸣^{2*}

(1. 南京邮电大学 电子与光学工程学院、微电子学院, 南京 210023; 2. 南京邮电大学 贝尔英才学院, 南京 210023)

摘要: 为了提高光纤传感器线性探测范围以及灵敏度, 提出了一种双纤芯结构的基于表面等离子共振 (SPR) 原理的 D 型光纤折射率传感器, 采用栅状镀膜的光子晶体光纤 (PCF) 构成抛光面, 引入铜栅状膜可以调节共振波长, 提高传感器的灵敏度。在各向异性的完美匹配层边界条件下, 利用全矢量有限元法对传感器特性进行了数值仿真, 结果表明: 该传感器折射率测量范围为 1.31~1.35, 灵敏度最高可达 $9600 \text{ nm} \cdot \text{RIU}^{-1}$, 分辨率可达 $1.04 \times 10^{-5} \text{ RIU}$ 。

关键词: 表面等离子共振; 栅状镀膜双芯; 全矢量有限元法; 折射率; 传感器; 基模损耗

中图分类号: TN256 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-5561(2020)04-0033-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2020.04.008

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID): 

Grating membrane dual core D-type PCF refractive index sensor

FANG Liming¹, CHEN Heming^{2*}

(1. College of Electronic and Optical Engineering & College of Microelectronics, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China; 2. Bell Honors School, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

Abstract: In order to improve the linear detection range and sensitivity of fiber sensor, a dual core structure of D-type fiber refractive index sensor based on surface plasmon resonance (SPR) principle is proposed. The grating coated photonic crystal fiber (PCF) is used to form the polished surface. The resonant wavelength can be adjusted and sensitivity of the sensor can be improved by introducing a copper grating membrane. Under the anisotropic perfect matching layer boundary condition, the simulation is preformed through the full vector finite element method. The results show that the refractive index detection range of the sensor is from 1.31 to 1.35, the maximum sensitivity can reach $9600 \text{ nm} \cdot \text{RIU}^{-1}$, and the resolution can reach $1.04 \times 10^{-5} \text{ RIU}$.

Key words: surface plasmon resonance; grating membrane dual core; full vector finite element method; refractive index; sensor; fundamental mode loss

0 引言

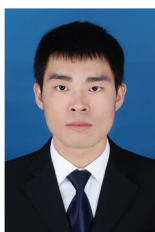
在光纤传感方面, 光子晶体光纤 (PCF) 凭借其无截止单模特性、大色散可调特性和良好的非线性等诸多特性, 为表面等离子体激元在高灵敏度光纤传感器的研究方面提供了新的方向。2009 年, DARRAN K C 等人^[1]设计了双通道空气孔内部选择性镀膜的基于表

收稿日期: 2019-11-25。

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 61571237) 资助; 江苏省自然科学基金 (No. BK20151509) 资助; 江苏省研究生创新项目 (Nos. KYXL15_0835, KYZZ16_0251) 资助。

作者简介: 房黎明 (1995—), 男, 硕士研究生, 现就读于南京邮电大学电子与光学工程学院、微电子学院物理电子学专业, 研究方向为光子学与光电技术, 主要从事 PCF 传感器的研究与仿真验证工作。

* 通信作者: 陈鹤鸣 (E-mail: chhm@njupt.edu.cn)。



面等离子体共振 PCF (SPR-PCF) 折射率传感器, 最高灵敏度可达 $3100 \text{ nm} \cdot \text{RIU}^{-1}$ 。2012 年, SHUAI B B 等人^[2]提出了一种基于 SPR 效应的封闭式多通道液芯 PCF 折射率传感器, 与在包层空气孔内部进行镀薄膜的传感器结构相比^[3], 这种优化方案大大减少了通道之间的串扰情况, 使得传感器灵敏度更高, 共振光谱更尖锐。SPR-PCF 传感器通常选择性地填充或涂覆金属薄膜在空气孔内壁^[4,5]。然而, 在实际应用中, 在 PCF 的气孔中填充或涂覆金属薄膜是具有挑战性的, 并且反复改变液体的折射率很麻烦。2015 年, DASH J N 等人^[6]分析研究了 D 型 PCF 生物传感器, 他们将银沉积在抛光面后, 再在银表面涂敷石墨烯, 以此来增大生物分子的吸附性, 提高传感器灵敏度。2017 年, GANGWA R K 等人^[7]提出在抛光面镀金膜的 D 型折射率 PCF, 折射率测量范围为 1.43~1.46, 平均灵敏度

为 $7700 \text{ nm} \cdot \text{RIU}^{-1}$ 。该传感器用矩形晶格和纳米金膜构成 D 型 PCF 传感器,最大灵敏度为 $8129 \text{ nm} \cdot \text{RIU}^{-1}$ 。但是,抛光面镀膜型灵敏度仍然不高。

本文提出一种新型结构的双纤芯 D 型 SPR-PCF 传感器。该结构光纤采用双纤芯结构而且抛光面采用栅状镀膜,可严格控制金属膜厚度。引入铜栅来调节共振波长,以提高折射率灵敏度。

1 结构设计与工作原理

本文设计的 D 型 SPR-PCF 折射率传感器截面如图 1 所示。由于双纤芯比单纤芯同类型结构传感器有更出色的性能^[8],因而本传感器设计采用双纤芯结构。D 型结构是由包含 3 层按六边形规则排列的空气孔的 PCF 上表面平整抛光而来的,抛光平面距纤芯中心的垂直距离,即抛光深度 $H=2.60 \mu\text{m}$,在抛光平面上镀着厚度 $t=40 \text{ nm}$ 的等间距铜栅薄膜,相邻铜栅间距 $L=2 \mu\text{m}$,铜栅占空比 $\eta=0.5$ 。该 PCF 包含 2 种类型的空气孔,相邻空气孔间距 $\Lambda=2 \mu\text{m}$,包层空气孔直径 $d=1.2 \mu\text{m}$,中心空气孔直径 $d_1=0.6 \mu\text{m}$ 。中心空气孔将纤芯隔离成 2 个纤芯。

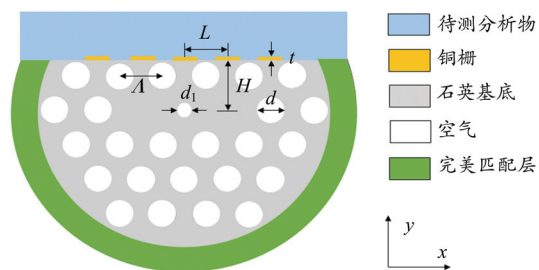


图 1 D 型 SPR-PCF 折射率传感器截面图

D 型 SPR-PCF 传感器的基体材料为石英玻璃,其折射率由 Sellmeier 方程给出^[9]:

$$n(\lambda) = \sqrt{1 + \frac{a_1 \lambda^2}{\lambda^2 - b_1} + \frac{a_2 \lambda^2}{\lambda^2 - b_2} + \frac{a_3 \lambda^2}{\lambda^2 - b_3}} \quad (1)$$

其中, a_1, a_2, a_3, b_1, b_2 和 b_3 是 Sellmeier 系数, 对应石英玻璃中的值分别为: $a_1=0.6961663, a_2=0.4079426, a_3=0.8974794, b_1=0.0684043, b_2=0.1162414, b_3=9.896161$ 。 λ 是入射光的波长。

在抛光平面上涂覆有铜栅膜, 使用 Drude 模型可获得铜材料的介电函数^[10]:

$$\epsilon_{cu} = 1 - \frac{\lambda^2 \lambda_c}{\lambda_p^2 (\lambda_c - i\lambda)} \quad (2)$$

其中, λ_p 为铜材料的等离子体波长, $\lambda_p=0.13617 \mu\text{m}$; λ_c 为碰撞波长, $\lambda_c=40.852 \mu\text{m}$; i 为虚部。

D 型 SPR-PCF 折射率传感器的工作原理如图 2 所示, 折射率引导型 PCF 材料特性决定了纤芯与包层会形成折射率差, 光线将被限制在纤芯中。入射光在纤芯与包层的界面处发生全反射时, 会形成倏逝波进入抛光平面, 进而渗透到金属薄膜内, 引发金属中的自由电子产生表面等离子体^[11]。当表面等离子体与倏逝波波长相等时, 两者会发生共振, 界面处的全反射条件将被破坏, 呈现衰减全反射现象。入射光被金属表面电子吸收, 使反射光能量急剧下降, 在共振波长处会形成明显的损耗峰。当抛光平面上的待测分析物折射率变化时, 共振波长会随之变化, 通过共振波长的变化量就可检测待测分析物折射率的变化值。

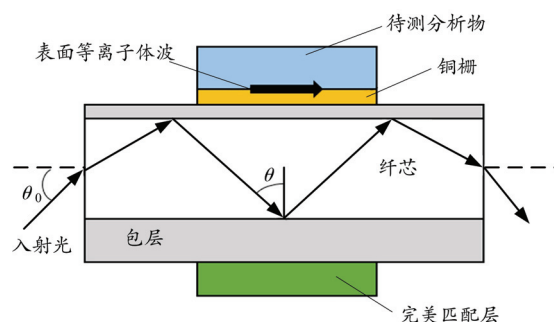


图 2 D 型 SPR-PCF 折射率传感器工作原理图

2 色散特性与结构参数分析

本文使用 Comsol Multiphysic 软件中的波动光学模块, 在各向异性的完美匹配层边界条件下, 以有限元法为基础, 对传感器色散特性进行数值仿真。传感器外部待测分析物折射率为 1.32 时, 传感器纤芯基模的色散曲线与损耗曲线以及表面等离子体模式的色散曲线如图 3 所示。在波长 $1.925 \mu\text{m}$ 处黑色实线与红色虚线相交, 说明此时基模与表面等离子体模的有效折射率实部相等, 满足相位匹配条件, 损耗谱曲线出现损耗峰。图 3 中, (a) 和 (b) 分别为纤芯基模与表面等离子体模的电场分布图。可以看出, 在纤芯基模模式

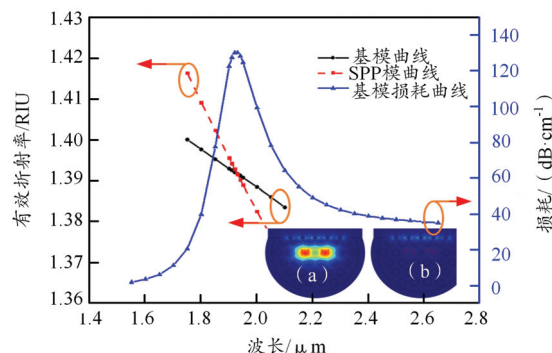


图 3 D 型 SPR-PCF 传感器传输模式的损耗曲线及色散曲线图

中能量主要集中在纤芯区域,而在表面等离子体模式中,能量集中在金属-分析物表面,纤芯基模的损耗可以用式(3)进行计算^[12]:

$$\alpha = 8.686 \times \frac{2\pi}{\lambda} \times \text{Im}(n_{\text{eff}}) \times 10^4 \quad (3)$$

其中, $\text{Im}(n_{\text{eff}})$ 为纤芯基模有效折射率虚部。

2.1 抛光平面深度对损耗谱的影响

图4为不同抛光平面深度下的基模损耗曲线图。随着抛光平面深度 H 的增加,相应的共振波长产生红移。当抛光平面深度 H 为 $2.55 \mu\text{m}$ 时,损耗谱的峰值很小,波峰较为平缓,因为此时纤芯基模与表面等离子体模耦合很弱,难以形成共振。当抛光平面深度 H 为 $2.65 \mu\text{m}$ 时,待测损耗峰急剧增到 $484.2 \text{ dB} \cdot \text{cm}^{-1}$ 。这是由于双纤芯基模发生双折射,模式耦合增强,导致传感器系统噪声增大。综上所述,本文选择抛光平面深度 H 为 $2.60 \mu\text{m}$ 。

2.2 中心空气孔直径对损耗谱的影响

在其它参量不变的情况下,不同中心空气孔直径 d_1 数值下的基模损耗曲线如图5所示。可以看出,当 d_1 分别取 $0.4 \mu\text{m}$ 、 $0.6 \mu\text{m}$ 和 $0.8 \mu\text{m}$ 时,随着 d_1 的增

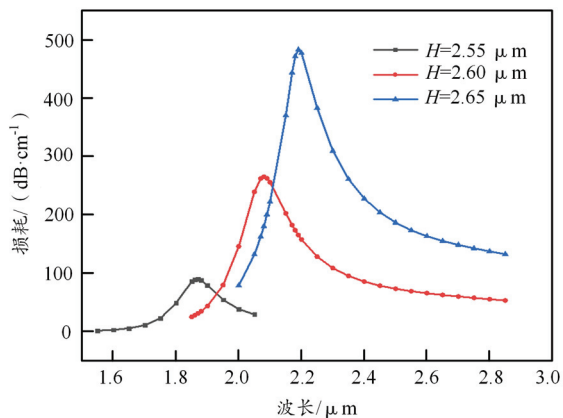


图4 不同抛光平面深度 H 下的基模损耗曲线

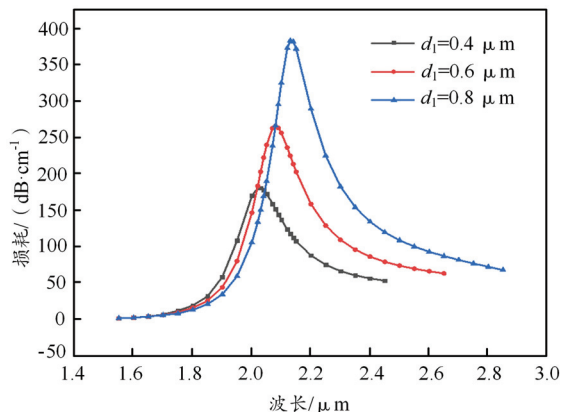


图5 不同中心空气孔直径 d_1 下的基模损耗曲线

加,共振波长向红外波段偏移,损耗值也随之增大。这是因为 d_1 增大时,纤芯与包层之间的有效折射率差值会变小,纤芯处的光能量更容易泄漏到包层区域,导致传感器损耗增大。2个纤芯间的中心空气孔可以灵活调节 SPR-PCF 折射率传感器的有效折射率,改变共振峰的对应波长,因而合理地选择中心空气孔 d_1 的大小,可以提高传感器的性能。

2.3 包层空气孔直径对损耗谱的影响

包层空气孔直径 d 变化对传感器性能的影响如图6所示。保持其它结构参量不变,分析物折射率为 1.34、包层空气孔直径 d 从 $1.1 \mu\text{m}$ 增加到 $1.3 \mu\text{m}$ 时,传感器基模损耗大幅度降低。这是因为当 d 增大时,包层区域的有效折射率减小,纤芯区域对入射光能量的束缚作用会增强,进入抛光平面的倏逝波越来越少,进而纤芯基模与表面等离子体模的耦合作用会减弱。当 d 为 $1.3 \mu\text{m}$ 时,损耗谱变化过于平缓,损耗峰难以准确判断。当 d 为 $1.1 \mu\text{m}$ 时,虽然损耗峰便于判断,但是传感器损耗过大,将会导致传输信号的信噪比降低,影响光谱检测仪器的性能^[13]。因此,本文采取折中处理, d 取 $1.2 \mu\text{m}$ 。

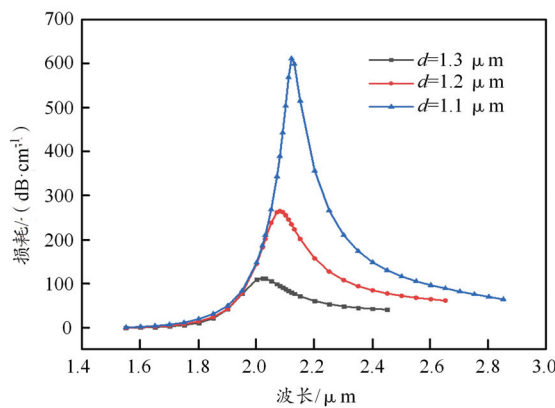


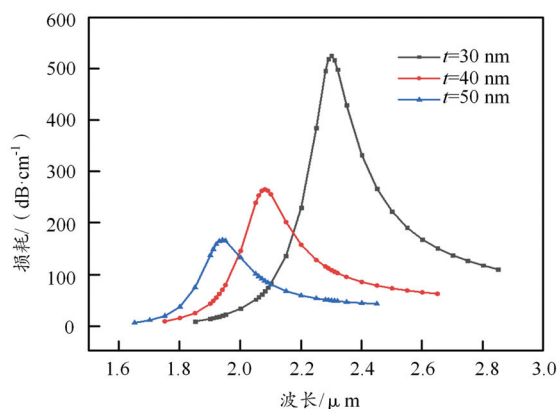
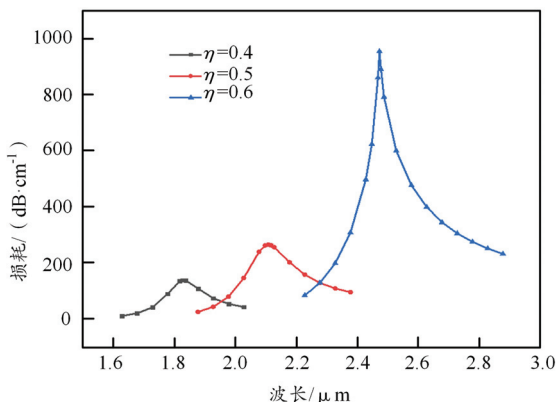
图6 不同包层空气孔直径 d 下的基模损耗曲线

2.4 铜栅厚度对损耗谱的影响

图7为待测分析物折射率为 1.34、铜栅厚度 t 为 30 nm 、 40 nm 和 50 nm 时基模共振损耗曲线图。铜栅作为 D 型 SPR-PCF 折射率传感器激发表面等离子体的介质,其厚度的变化会对传感器的性能产生重要的影响。随着铜栅厚度的增加,共振波长向低波段偏移,并且共振损耗急剧降低。这是因为铜栅薄膜厚度增加,倏逝波越来越难以渗透金属薄膜,导致 SPR 效应减弱。

2.5 铜栅占空比对损耗谱的影响

图8为待测分析物折射率为 1.34、铜栅占空比 η

图7 不同铜栅厚度 t 下的基模损耗曲线图8 不同铜栅占空比 η 下的基模损耗曲线

分别为 0.4、0.5 和 0.6 时的基模损耗曲线。可以看出,随着铜栅占空比增大,共振损耗值随之增大。这是因为铜栅与抛光平面接触面积增大,更多的倏逝波可渗透到铜栅内,产生更多的自由电子,导致入射光能量急剧下降,传感器整体损耗急剧增大。当铜栅占空比为 0.6 时,共振波长偏移到 $2.450 \mu\text{m}$ 且损耗峰值达到 $954.8 \text{ dB}\cdot\text{cm}^{-1}$,这将会导致传输信号的信噪比降低,影响折射率型传感器性能^[4]。当铜栅占空比为 0.4 时,共振损耗值较低,导致透射谱吸收峰深度降低。因此,本文选择 η 为 0.5 进行仿真分析。

3 传感器性能分析

传统的 D 型结构的整个抛光平面都涂敷金属薄膜,而本文设计的传感器抛光面采用等间距栅型镀膜。本文对这 2 种镀膜方式的传感器进行仿真优化分析,结果如图 9 所示。在传感器各项结构参数不变的情况下,随着待测分析物折射率 n_a 从 1.33 变化到 1.34,镀铜膜的传感器共振峰偏移量为 $0.068 \mu\text{m}$,而镀铜栅膜的传感器共振峰偏移量为 $0.093 \mu\text{m}$,于是,传感器灵敏度从 $6800 \text{ nm}\cdot\text{RIU}^{-1}$ 增大到 $9300 \text{ nm}\cdot\text{RIU}^{-1}$ 。

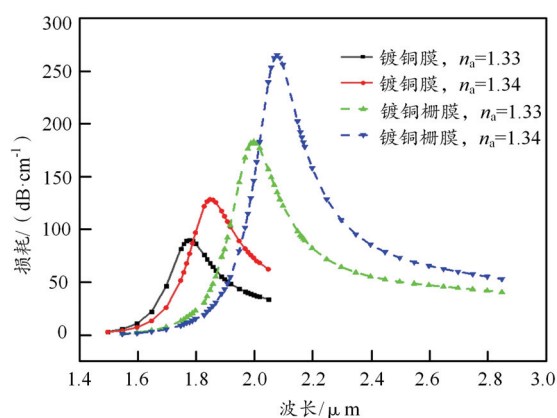


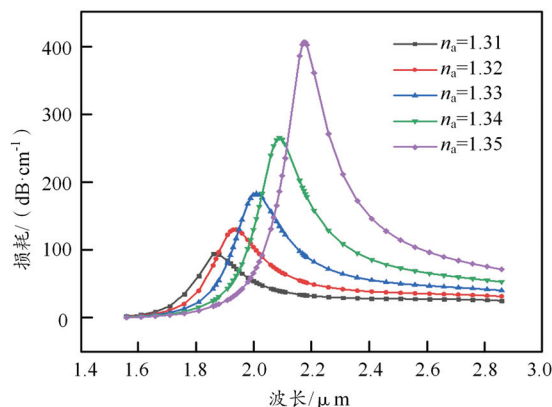
图9 镀铜膜与镀铜栅膜涂层对应的基模损耗曲线图

此外,在相同分析物折射率下,镀铜栅膜的传感器相比于镀铜膜的传感器,共振波长发生了红移,损耗峰相对尖锐,半峰全宽值较小。因此,镀铜栅膜的传感器表现出更好的性能。

SPR 模式的有效折射率实部随着待测分析物折射率的变化而变化。为了满足纤芯基模与表面等离子体模的相位匹配条件,两者的共振波长也会随之发生变化,从而使折射率传感器检测不同分析物时,输出光谱具有不同的吸收峰。对镀铜栅膜的传感器结构参数进行分析后,选取 $\Lambda=2 \mu\text{m}$ 、 $d_1=0.6 \mu\text{m}$ 、 $d=1.2 \mu\text{m}$ 、 $H=2.60 \mu\text{m}$ 、 $\eta=0.5$ 和 $t=40 \text{ nm}$ 进行数值仿真,所获得的传感器性能最佳。待测分析物折射率从 1.31~1.35 变化时,SPR 折射率传感器基模的共振曲线如图 10 所示。可以看出,待测分析物折射率的增加,使得表面等离子体模式的有效折射率增加,从而使共振波长向高波段偏移。

对不同分析物折射率对应的共振波长进行线性拟合,结果如图 11 所示。相应的拟合曲线方程可表示为:

$$\lambda = 8.9n_a - 9.029, 1.31 \leq n_a \leq 1.35 \quad (4)$$

图10 待测分析物折射率 $n_a=1.31\sim 1.35$ 时基模损耗曲线图

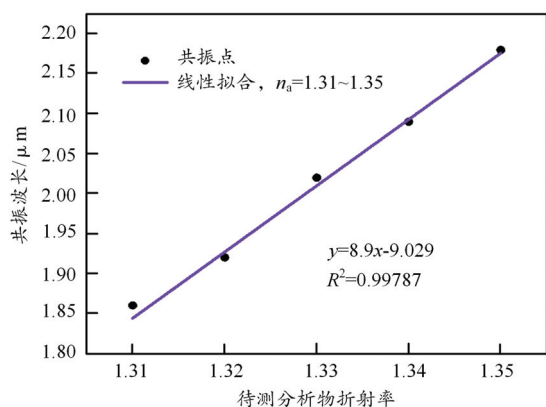


图 11 基模的共振波长与待测分析物折射率的线性拟合

其中, λ 为共振波长, n_a 为待测介质折射率。线性拟合方程的斜率代表 D 型 PCF 折射率传感器的平均灵敏度为 $8900 \text{ nm} \cdot \text{RIU}^{-1}$, 最大灵敏度为 $9600 \text{ nm} \cdot \text{RIU}^{-1}$, 线性相关度为 0.99787。

本文使用光谱检测法检测不同波长处对应的光强度, 传感器的灵敏度取决于共振损耗峰的偏移量, SPR-PCF 折射率传感器灵敏度可表示为^[15]:

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

其中, $\Delta\lambda_{\text{peak}}$ 是待测分析物折射率的变化所引起的峰值偏移量, Δn_a 是待测分析物折射率的变化量。当折射率从 1.31 变化到 1.35 时, 共振损耗峰的峰值偏移量分别为 80 nm、96 nm、93 nm 和 88 nm。根据式(5)可得传感器波长灵敏度分别为 $8000 \text{ nm} \cdot \text{RIU}^{-1}$ 、 $9600 \text{ nm} \cdot \text{RIU}^{-1}$ 、 $9300 \text{ nm} \cdot \text{RIU}^{-1}$ 和 $8800 \text{ nm} \cdot \text{RIU}^{-1}$ 。假设光谱检测仪器的最小分辨率 $\Delta\lambda_{\text{min}} = 0.1 \text{ nm}$, 根据分辨率计算公式^[16]:

$$S = \Delta n_a \times \Delta\lambda_{\text{min}} / \Delta\lambda_{\text{peak}} \quad (6)$$

由式(6)可得传感器分辨率为 $1.04 \times 10^{-5} \text{ RIU}$ 。

4 结束语

本文设计了一种双纤芯结构的基于 SPR 效应的 D 型 PCF 折射率传感器, 其抛光面采用栅状镀膜, 引入铜栅来调节共振波长, 提高折射率灵敏度。通过对光纤的截面结构进行优化设计, 分析了包层空气孔直径、中心空气孔直径、铜栅厚度以及占空比等参数对传感器性能的影响, 得到了最优结构参数。所设计的传感器在折射率为 1.31~1.35 的检测范围内, 灵敏度最高可达 $9600 \text{ nm} \cdot \text{RIU}^{-1}$ 。相比于在整个抛光平面涂敷金属薄膜的 D 型 PCF 折射率传感器, 本文设计的传感器灵敏度更高, 测量更精确, 可广泛应用于医药、生物和环境检测等领域。

参考文献:

- [1] DARRAN K C, BORIS T K, BENJAMIN J E. Ultrasensitive photonic crystal fiber refractive index sensor [J]. Optics Letters, 2019, 34 (3): 322–324.
- [2] SHUAI B B, XIA L, LIU D M. Coexistence of positive and negative refractive index sensitivity in the liquid-core photonic crystal fiber based plasmonic sensor[J]. Optical Express, 2012, 20(23): 25858–25866.
- [3] WANG A, DOCHERTY A, KUHLMLEY B T. Side-hole fiber sensor based on surface plasmon resonance [J]. Optics Letters, 2009, 34(24): 567–572.
- [4] POULTON C G, SCHMIDT M A, PEARCE G J, et al. Numerical study of guided modes in arrays of metallic nanowires[J]. Optics Letters, 2007, 32 (12): 1647–1649.
- [5] HOU J, BIRD D, GEORGE A, et al. Metallic mode confinement in microstructured fibres[J]. Optics Express, 2008, 16(9): 5983–5990.
- [6] 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.
- [7] GANGWA R K, SINGH V K. Highly sensitive surface plasmon resonance based D-shaped photonic crystal fiber refractive index sensor[J]. Plasmonics, 2017, 12(5): 1367–1372.
- [8] LIU Q, LI S G, LI J S, et al. Ultrashort and high-sensitivity refractive index sensor based on dual-core photonic crystal fiber [J]. Optical Engineering, 2017, 56(3): 037107-1–037107-6.
- [9] HASSANI A, SKOROBOGATYIY M. Design criteria for microstructured-optical-fiber-based surface-plasmon-resonance sensors [J]. Journal of the Optical Society of America B, 2007, 24(6): 1423–1429.
- [10] RIFAT A, MAHDIRAJI G, SUA Y, et al. Surface plasmon resonance photonic crystal fiber biosensor: A practical sensing approach [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(15): 1628–1631.
- [11] WANG G Y, LI S G, AN G W, et al. High sensitive D-shaped photonic crystal fiber biological sensors based on surface plasmon resonance [J]. Optical and Quantum Electronics, 2016, 48(1): 1–9.
- [12] SINGH S, GUPTA B. Simulation of a surface plasmon resonance based fiber optic sensor for gas sensing in visible range using films of nanocomposites [J]. Measurement Science and Technology, 2010, 21(11): 115–202.
- [13] SUN B, CHEN M Y, ZHANG Y K, et al. Microstructured-core photonic-crystal fiber for ultra-sensitive refractive index sensing[J]. Optical Express, 2011, 19(5): 4091–4100.
- [14] HASAN M, AKTER S, RIFAT A, et al. A highly sensitive gold-coated photonic crystal fiber biosensor based on surface plasmon resonance [J]. Photonics, 2017, 4(1): 213–220.
- [15] SHARMA A, JHA R, GUPTA B. Fiber-optic sensors based on surface plasmon resonance: a comprehensive review [J]. IEEE Sensors Journal, 2007, 7(8): 1118–1129.
- [16] RIFAT A, MAHDIRAJI G, R AHMED, et al. Copper-graphene-based photonic crystal fiber plasmonic biosensor [J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 8(1): 1–8.