

文章编号: 1672-8785(2022)01-0017-09

基于氧化锡铟纳米薄膜的圆形晶格 光子晶体光纤折射率传感器

杨佳欢 王道斌* 张 硕 元丽华 李晓晓

(兰州理工大学理学院, 甘肃 兰州 730050)

摘 要: 为了实现近红外波段的高灵敏度传感, 设计并研究了一种基于表面等离子体共振的光子晶体光纤(Surface Plasmon Resonance Photonic Crystal Fiber, SPR-PCF)折射率传感器。该光纤横截面的空气孔排列方式是圆形晶格, 呈现出向日葵形状。光纤包层的外壁沉积了氧化锡铟(Indium Tin Oxide, ITO)纳米薄膜, 通过圆形光子晶格的缺陷模与表面等离子体模的耦合感知周围环境折射率的变化。利用有限元数值仿真对这种传感器的光学性质和传感性能进行了详细研究。结果表明, 该传感器同时具有较大的折射率感知范围和较高的灵敏度; 折射率测量范围可达 1.29~1.39, 最大波长灵敏度为 19659 nm/RIU, 折射率测量精度为 2.92×10^{-5} RIU。

关键词: 光子晶体光纤; 表面等离子共振; 折射率传感器; 光纤传感器

中图分类号: O43 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2022.01.004

Circular Lattice Photonic Crystal Fiber Refractive Index Sensor Based on Tin Indium Oxide Nano-film

YANG Jia-huan, WANG Dao-bin*, ZHANG Shuo, YUAN Li-hua, LI Xiao-xiao

(Faculty of Science, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: In order to achieve high sensitivity sensing in the near-infrared band, a photonic crystal fiber refractive index sensor based on surface plasmon resonance is designed and investigated in this paper. The air holes in the cross-section of this fiber are arranged in a circular lattice, which show the sunflower shape. The outer surface of the fiber cladding is deposited with a nano-film of indium tin oxide, and the change of refractive index of the surrounding environment is sensed by the coupling of the defect mode and the surface plasmon mode. The optical properties and sensing performance of this sensor are studied in detail by finite element numerical simulations. The results show that the sensor has a large refractive index sensing range and a high sensitivity. The refractive index measurement range is 1.29~1.39, the maximum wavelength sensitivity is 19659 nm/RIU, and the refractive index measurement accuracy is 2.92×10^{-5} RIU.

Key words: photonic crystal fiber; surface plasmon resonance; refractive index sensor; fiber optic sensor

收稿日期: 2021-08-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(61367007); 甘肃省自然科学基金项目(20JR10RA154)

作者简介: 杨佳欢(1996-), 男, 河北唐山人, 硕士研究生, 主要研究方向为基于表面等离子体共振的光纤传感器。

*通讯作者: E-mail: photonics_wang@yahoo.com

0 引言

随着科技的进步与时代的发展,人们在生物、化学、医学等领域对传感器的要求越来越高。由于表面等离子体共振效应^[1-3]对周围环境的折射率变化十分敏感,因此它已经成为了高灵敏度传感器领域的研究热点。基于表面等离子体共振的传感器实际上经历了棱镜传感器、光栅传感器和光纤传感器三个阶段^[4-5]。表面等离子体共振光纤传感器具有灵敏度高、响应时间短、抗电磁干扰能力强、结构简单、可弯曲等特性,因此具有很高的研究价值^[7-8]。光子晶体光纤传感器是一类特殊的光纤传感器,又称为微结构光纤传感器。它的横截面上有周期性的空气孔结构。这些气孔的直径大小与光波长位于同一个数量级,并且贯穿传感器的整个长度。与传统光纤传感器相比,光子晶体光纤传感器在交叉敏感、耦合损耗以及保偏特性等方面有突出优势,并且具有工作波长范围较宽、模场面积较大以及多参数测量等一系列特点^[9-11]。

经过十几年的发展,各国研究人员已经开发出多种优良的光子晶体光纤传感器。例如,Hassani A 等人在 2007 年创新性地将光子晶体光纤与表面等离子体共振技术相结合,通过理论模拟的方式提出了首个在光子晶体光纤包层空气孔内涂覆金膜的表面等离子体共振传感器,并对其传感特性进行了较为详细的研究^[12]。2016 年,Gangwar R K 等人^[13]设计了一种简单的带有两层空气孔的 D 型光子晶体光纤传感器。该传感器的平均波长灵敏度达到 7700 nm/RIU,最大波长灵敏度达到 9000 nm/RIU。

通常,光子晶体光纤传感器的空气孔排列方式是六角晶格或正方晶格,而圆形晶格光子晶体光纤传感器则鲜有报道,其包层的气孔晶格具有圆形周期性和旋转对称性,呈现出向日葵的形状。这种晶格结构能够产生各向同性的光子带隙,引入缺陷后形成的光波导和微型谐振腔具有优良的光约束能力和很高的品质因数

(Figure Of Merit, FOM)。基于该结构设计的光学透镜具有很好的聚焦特性,因此它正受到越来越多的关注。

2013 年,孙小红等人^[14]利用圆形晶格的梯度光子晶体设计了可用于横电场和横磁场偏振的 Luneburg 透镜。该器件具有良好的聚焦特性以及更宽的工作带宽。2015 年,Asaduzzaman S 等人^[15]在圆形晶格光子晶体中引入了可提供回音壁模的圆盘微腔。由于圆形晶格的拓扑结构与回音壁模的光强分布非常相似,因此可以有效地消除辐射损耗。研究表明,品质因数可高达 7.4×10^5 。2016 年,王帅等人^[16]使用圆形晶格光子晶体设计和研究了不同种类的多信道功率分束器和弯曲波导。他们发现,在特定波长范围内“C”型功率分束器具有较为均匀的信道间功率分割比例。2018 年,刘建军等人^[17]提出了一种基于向日葵光子晶体光纤的新型偏振滤波器。该器件利用了芯模和表面等离子体模的相互耦合,能够在可见光波段有效生成偏振光;工作波长可通过改变金膜的厚度进行调整,所以它能够用在窄带滤波装置中。2019 年,Lou J 等人^[18]设计了一种双芯光子晶体光纤折射率传感器。该器件的气孔排列方式是圆形晶格,传感机理是两个芯模之间的定向耦合,而没有借助于表面等离子体共振模式。研究表明,经过结构优化后,该传感器具有较高的灵敏度,然而折射率感知范围却局限在 1.33~1.41 之间。

为了开发高灵敏度的圆形晶格光子晶体光纤传感器,并进一步扩展折射率的检测范围,本文提出了一种外层包覆 ITO 纳米薄膜的圆形晶格光子晶体光纤传感器。与文献^[18]不同,该器件的折射率传感机理是表面等离子体共振模式与缺陷模的相互耦合。借助于有限元方法,我们仔细研究了它的光学特性和折射率传感特性。研究表明,折射率测量范围可达 1.29~1.39,最大波长灵敏度为 19659 nm/RIU,折射率分辨精度为 2.92×10^{-5} RIU。我们提出的方案在生物化学传感、公共安全、环

境污染监测等领域具有广阔的应用前景。

1 器件结构与传感机理

基于圆形晶格光子晶体光纤的表面等离子体共振传感器如图 1 所示。该传感器的基底材料为石英, 光纤包层的外壁淀积了 ITO 纳米薄膜, 最外层蓝色环形部分是待测分析物。在利用有限元法分析传感器的光学性质时, 我们使用了完美匹配层 (Perfectly Matched Layer, PML) 边界条件, 如图 1(a) 中的灰色部分所示。PML 具有很好的出射波吸收效果, 所以能够模拟电磁波在自由空间内的传播情况。纤芯区域的空气孔排列方式为圆形晶格, 呈现向日葵形状。空气孔的直径为 d , 相邻空气孔的间距为 Δ 。圆形晶格光子晶体光纤对光波具有很强的束缚能力。为了使光波的能量更容易地耦合

到表面等离子体模式中, 我们将第二排气孔中的一个用石英材料填充, 引入了点缺陷模, 如图 1(b) 所示。

这种传感器利用缺陷模和表面等离子体模的耦合来感知周围环境折射率的变化, 其传感机理如图 1(b) 所示。当光波入射到 ITO 薄膜与石英交界面时, ITO 表面的自由电子在缺陷模电场的作用下发生相干振荡, 产生表面等离子体激元 (Surface Plasmon Polaritons, SPPs), 即表面等离子体激元与入射光发生共振。此时, 入射光的一部分能量会转移到 SPPs 中。这部分能量沿着石英与 ITO 界面纵向传播形成表面等离子体波。ITO 薄膜的厚度通常只有几十纳米。表面等离子体模的一部分光场分布在待测分析物内, 因此它的光学特性对待测分析物的折射率变化非常敏感。

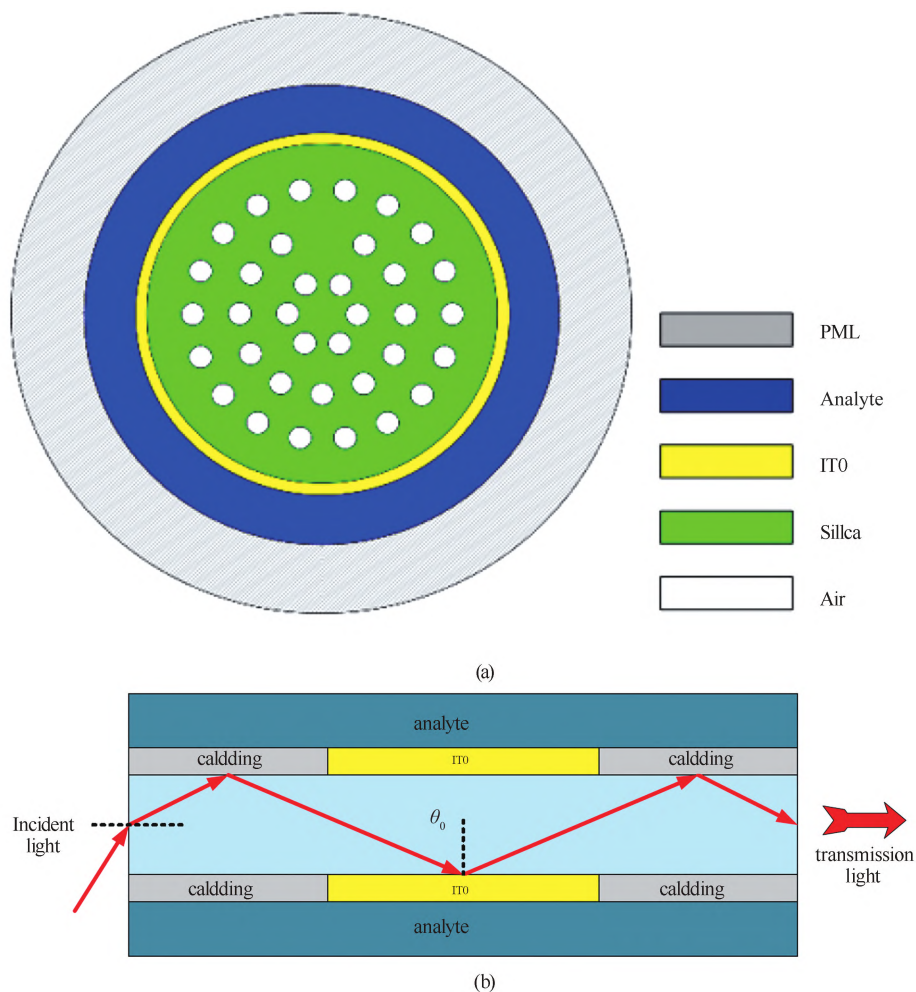


图 1 本文研究的光纤传感器的设计方案(a)和传感机理(b)

根据麦克斯韦方程组, 可将表面等离子体波的传播常数 k_{sp} 表示为

$$k_{sp} = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\epsilon_m \epsilon_a}{\epsilon_m + \epsilon_a}} \quad (1)$$

式中, ω 为入射光的角频率; c 为真空中的光速; ϵ_m 和 ϵ_a 分别为 ITO 薄膜和待测分析物的介电常数。入射光的波矢水平分量 k_x 为

$$k_x = \frac{\omega}{c} \sqrt{\epsilon_p} \sin \theta_0 \quad (2)$$

式中, θ_0 为入射角; ϵ_p 为纤芯材料的介电常数。只有在特定的 θ_0 或 λ 条件下, 缺陷模和表面等离子体波才能发生相位匹配, 引发表面等离子体共振现象。相位匹配条件可表示为

$$\frac{\omega}{c} \sqrt{\epsilon_p} \sin \theta_0 = k_x = k_{sp} = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\epsilon_m \epsilon_a}{\epsilon_m + \epsilon_a}} \quad (3)$$

当处在非共振波长时, 缺陷模和表面等离子体模各自约束在纤芯区域和 ITO 薄膜通道中; 当波长接近相位匹配条件时, 缺陷模与表面等离子体模发生强烈耦合, 形成共振效应, 导致光场重新分布。由于一部分能量耦合至 ITO 薄膜中传输, 缺陷模的传输损耗急剧增大。在相位匹配波长处, 损耗谱出现共振峰。当待测分析物的折射率发生改变时, 表面等离子体模的有效折射率会随之变化, 损耗谱的共振峰发生偏移。这种机制可将 ITO 薄膜周围环境的微小折射率变化转换成可测量的共振峰波长偏移, 从而实现高灵敏度传感。假设缺陷模的有效折射率为 n_{eff} , 则缺陷模的功率损耗可写为

$$\alpha = \frac{20}{\ln 10} \frac{2\pi}{\lambda} \text{Im}(n_{eff}) \times 10^4 \text{ (dB/cm)} \quad (4)$$

式中, $\text{Im}(n_{eff})$ 为模式有效折射率的虚部; λ 为自由空间波长(单位为 nm)。

石英是一种色散材料, 其折射率与波长之间的关系可以用 Sellmeier 方程描述:

$$n_{\text{SiO}_2}(\lambda) = \sqrt{1 + \frac{A_1 \lambda^2}{\lambda^2 - B_1} + \frac{A_2 \lambda^2}{\lambda^2 - B_2} + \frac{A_3 \lambda^2}{\lambda^2 - B_3}} \quad (5)$$

式中, n_{SiO_2} 为熔融石英的折射率; λ 为输入光的波长; A_1 、 A_2 、 A_3 、 B_1 、 B_2 和 B_3 是 Sellmeier 常数, $A_1 = 0.691663$, $A_2 = 0.4079426$, $A_3 = 0.8974794$, $B_1 = 4.6791482 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, $B_2 = 1.35120631 \times 10^{-2} \mu\text{m}^2$, $B_3 = 97.9340025 \mu\text{m}^2$ 。ITO 纳米薄膜的光学性质与金属导体类似, 其介电常数由 Drude 模型给出:

$$\epsilon_{\text{ITO}}(\lambda) = \epsilon_\infty - \frac{\lambda^2 \lambda_c}{\lambda_p^2 (\lambda_c + i\lambda)} \quad (6)$$

式中, ϵ_∞ 为频率无限大时 ITO 的介电常数; λ_p 和 λ_c 分别为 ITO 的等离子体波长和电子碰撞波长; $\lambda_p = 5.6497 \times 10^{-7} \text{ m}$, $\lambda_c = 1.121076 \times 10^{-5} \text{ m}$, $\epsilon_\infty = 3.80$ 。

图 2 所示为本文传感器的表面等离子体模与缺陷模。其中, 图 2(a)和图 2(c)是 x 偏振态的结果, 而图 2(b)和图 2(d)是 y 偏振态的结果。从图中可以看出, 点缺陷的引入破坏了圆形晶格光子晶体光纤的结构对称性, 使得 x、y 两种不同偏振态的模式分布出现差异。为了研究该器件的传感机理, 我们计算了不同模式的有效折射率和功率损耗, 如图 3 所示。随着入射光波长逐渐增大, 表面等离子体模和缺陷模的有效折射率实部(由图 3 中虚线表示)均逐渐下降, 但表面等离子体模的下降趋势更加明显。当两种模式的有效折射率实部相等(即满足相位匹配条件)时, 发生表面等离子体共振效应, 缺陷模的损耗(由图 3 中实线表示)达到最大值。随着入射光波长继续增大, 不再满足

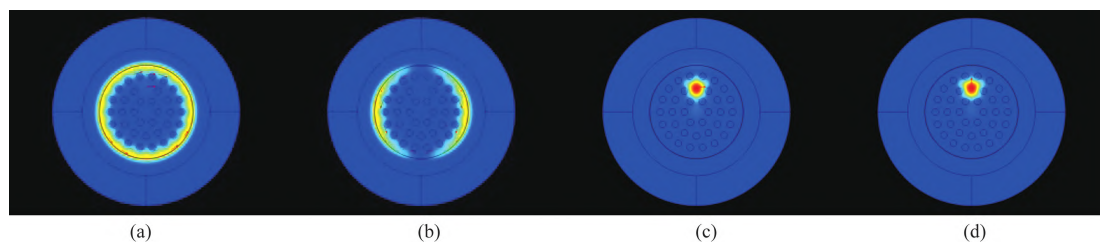


图 2 缺陷模和表面等离子体模的磁场分布图: (a) x 偏振态的表面等离子体模; (b) y 偏振态的表面等离子体模; (c) x 偏振态的缺陷模; (d) y 偏振态的缺陷模

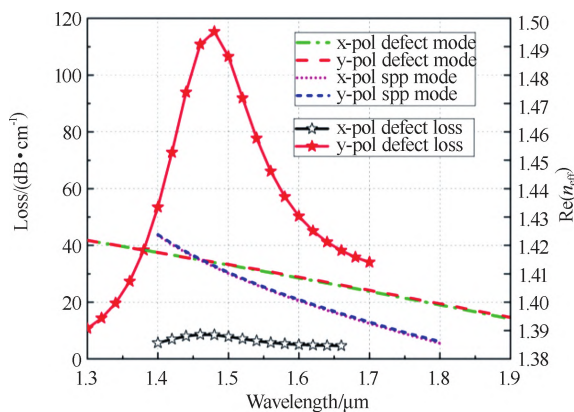


图 3 本文传感器的损耗谱和有效折射率实部
(实线为损耗谱, 其它线型为有效折射率实部)

相位匹配条件, 缺陷模的损耗开始逐渐降低。我们在研究过程中发现, y 偏振态缺陷模的损耗(红色实线)明显高于 x 偏振态缺陷模的损耗(黑色实线)。这是因为 y 偏振态缺陷模和表面等离子体模的场分布图样更加匹配, 能量耦合更加有效。因此, 我们将 y 偏振态的缺陷模选为该传感器的工作模式。

2 传感性能分析及优化

敏感材料的厚度变化对表面等离子体传感器的传感特性影响十分明显, 因此我们首先对 ITO 纳米薄膜的厚度进行优化。选取 ITO 纳米薄膜的厚度分别为 35 nm、40 nm、45 nm、50 nm 和 55 nm。在不同膜厚下对该器件的折射率传感性能进行了测试(结果见图 4)。为了获得这些结果, 我们将待测分析物的折射率变化范围设定为 1.33~1.39(步长为 0.01), 针对每种待测分析物计算传感器的损耗谱。当 ITO 纳米薄膜的厚度固定时, 随着待测分析物的折射率增大, 缺陷模的损耗逐渐增大, 共振波长逐渐向长波长方向移动。当待测分析物的折射率固定时, 随着 ITO 纳米薄膜的厚度增加, 缺陷模的损耗亦逐渐增大, 共振波长发生“红移”现象。然而当 ITO 的厚度从 50 nm 增大到 55 nm 时, 待测分析物折射率 $n_a = 1.39$ 对应的损耗反而减小了, 且损耗谱的形状明显改变。考虑到实际监测环境的需要, 我们将 ITO 纳米薄膜的优化厚度选取为 45 nm。

空气孔直径 d 对光子晶体光纤传感器的传感性能也有十分重要的影响。接下来我们对其进行优化。空气孔的几何尺度决定了缺陷模的场分布形状, 对缺陷模和表面等离子体模的耦合有直接影响。在优化过程中, 空气孔直径 d 在 0.9~1.3 μm 之间变化, 步长为 0.1 μm 。ITO 纳米薄膜的厚度固定为 45 nm, 气孔层间距 Λ 为 2.0 μm , 待测分析物的折射率取为 1.33。图 5 所示为不同气孔直径下算得的缺陷模损耗谱。可以看出, 随着空气孔直径 d 的增大, 缺陷模的损耗逐渐降低, 共振波长产生“蓝移”现象。这是因为空气孔直径的增大压缩了缺陷模的分布面积, 减弱了缺陷模和表面等离子体模的耦合强度, 导致泄漏到表面等离子体模的能量变少, 缺陷模的损耗降低。考虑到过小的空气孔直径会加大器件的制造难度, 我们将空气孔直径 d 的优化值选取为 1.0 μm 。

最后, 我们对气孔层间距 Λ 进行优化。它对传感器的传感性能同样具有重要影响。在优化过程中, 我们选取了五种气孔层间距 Λ ——1.80 μm 、1.85 μm 、1.90 μm 、1.95 μm 和 2.0 μm 。ITO 纳米薄膜的厚度固定为 45 nm, 气孔直径 d 为 1.0 μm , 待测分析物的折射率取为 1.33。图 6 所示为不同气孔层间距下算得的缺陷模损耗谱。可以看出, 随着气孔层间距的增大, 缺陷模的损耗逐渐降低, 共振波长有明显的“蓝移”现象。这是因为增大气孔层间距导致缺陷模和 ITO 纳米薄膜的间隔距离变大, 表面等离子体模式的激发难度增大, 可泄漏到 ITO 薄膜的能量减少, 所以缺陷模的损耗变小。尽管 $\Lambda = 1.8 \mu\text{m}$ 时缺陷模的损耗较大, 但损耗谱的波形不对称, 频谱宽度也较大。 $\Lambda = 2.0 \mu\text{m}$ 时缺陷模的损耗较小, 而且损耗谱的波形是对称的, 频谱宽度较小。考虑到以上因素, 我们将气孔层间距 Λ 的优化值选取为 2 μm 。

经过以上优化过程, 我们确定了本文传感器的最佳结构参数: ITO 纳米薄膜的厚度 t_{ITO} 为 45 nm, 气孔直径 d 为 1.0 μm , 气孔层间距

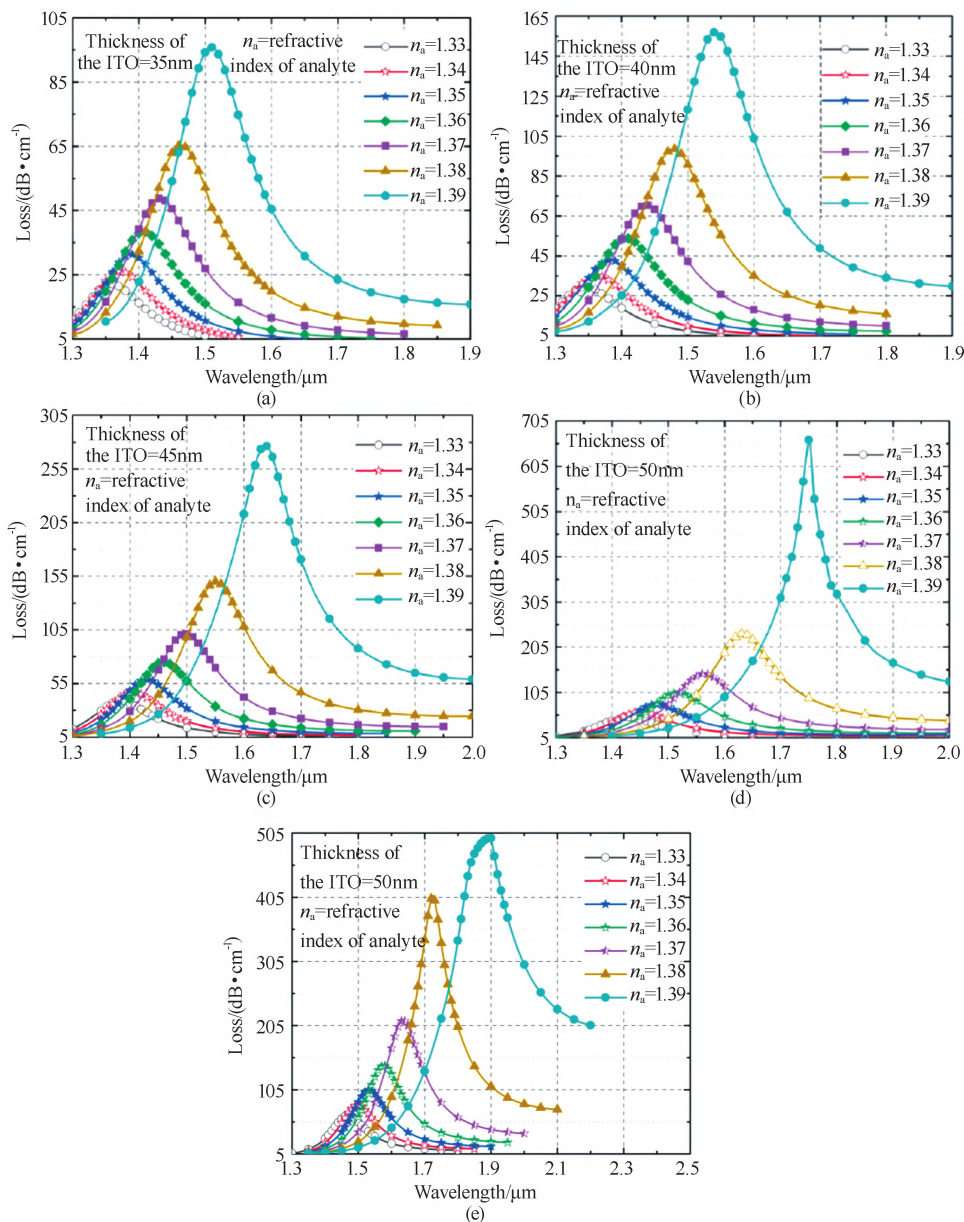


图4 ITO薄膜厚度和待测分析物折射率不同值时缺陷模的损耗谱(空气孔直径固定为 $d=1.2\ \mu\text{m}$, 气孔层间距固定为 $\Delta=2.0\ \mu\text{m}$):(a) $t_{\text{ITO}}=35\ \text{nm}$; (b) $t_{\text{ITO}}=40\ \text{nm}$; (c) $t_{\text{ITO}}=45\ \text{nm}$; (d) $t_{\text{ITO}}=50\ \text{nm}$; (e) $t_{\text{ITO}}=55\ \text{nm}$

Δ 为 $2.0\ \mu\text{m}$ 。在此基础上, 我们对该传感器的传感性能进行了测试和研究。为达到这个目的, 我们改变了待测分析物的折射率(变化范围为 $1.29\sim 1.39$, 步长为 0.01)。图7所示为在不同待测分析物折射率下得到的缺陷模损耗谱。可以看出, 该传感器对折射率在 $1.29\sim 1.39$ 范围内的待测分析物都具有较好的识别能力。图8中的蓝色实线所示为不同待测分析物对应的损耗谱共振波长。传感器的波长灵敏

度定义为

$$S_{\lambda}(\lambda) = \frac{\Delta\lambda_{\text{peak}}}{\Delta n_a} \quad (7)$$

式中, $\Delta\lambda_{\text{peak}}$ 是待测分析物折射率改变 Δn_a 时损耗谱峰值波长的变化量。图8中的红色实线所示为根据式(7)算得的波长灵敏度。从图中可以看出, 最高灵敏度可达到 $19659\ \text{nm}/\text{RIU}$ 。传感器的分辨率定义为

$$R = \frac{\Delta n_a \Delta\lambda_{\text{min}}}{\Delta\lambda_{\text{peak}}} \quad (8)$$

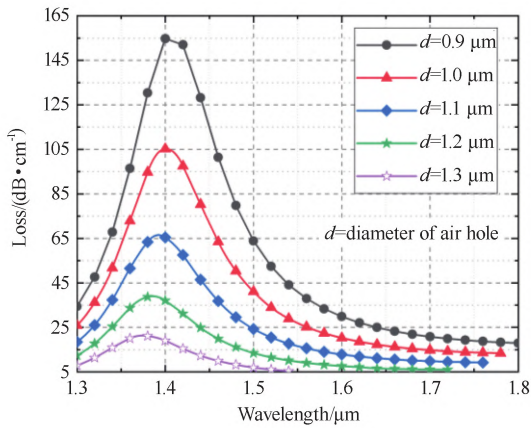


图 5 空气孔直径取不同值时缺陷模的损耗谱

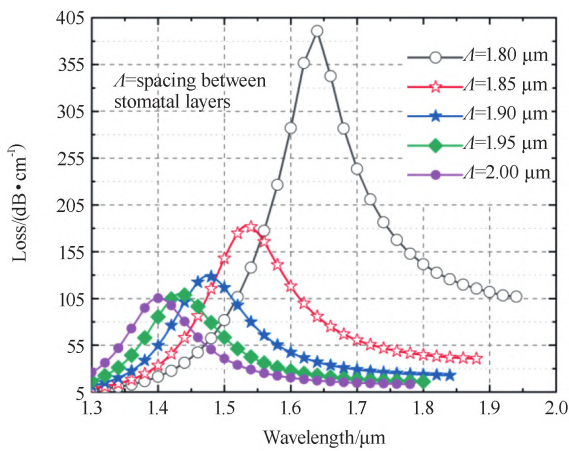


图 6 空气孔间距取不同值时缺陷模的损耗谱

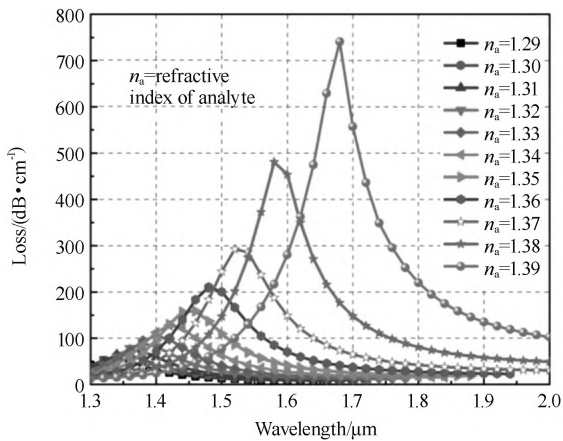


图 7 经过优化后本文光纤传感器的传感性能

式中, $\Delta\lambda_{min}$ 是光谱仪的最小波长分辨率, 取值为 0.1 nm; $\Delta\lambda_{peak}$ 是待测分析物折射率改变 Δn_a 时损耗谱峰值波长变化量的平均值, 取值为 34.2 nm。由式(8)可以得到该传感器的分辨率为 2.92×10^{-5} RIU。

折射率传感器的另一个重要指标是品质因数, 其定义式为

$$FOM = \frac{S}{FWHM} \quad (9)$$

式中, S 为传感器的波长灵敏度, $FWHM$ 为缺陷模损耗谱的半峰宽度。图 9 中的黑色实线代表不同待测分析物对应的 $FWHM$, 红色实线是根据式(9)得到的传感器品质因数。式(9)说明品质因数的大小与灵敏度成正比, 与损耗谱的半峰宽度成反比。该传感器的最大品质因数为 137。

表 1 列出了各种光子晶体光纤传感器的传感性能参数。其它已发表文献中的传感器都是基于六角晶格或正方晶格, 而我们设计的传感器则基于圆形晶格。与其它传感器相比, 该传感器不仅具有很宽的折射率监测范围, 而且还具有很高的灵敏度。本文的研究工作能够为圆形晶格光子晶体光纤在高性能传感器领域的应用提供有益的支撑。

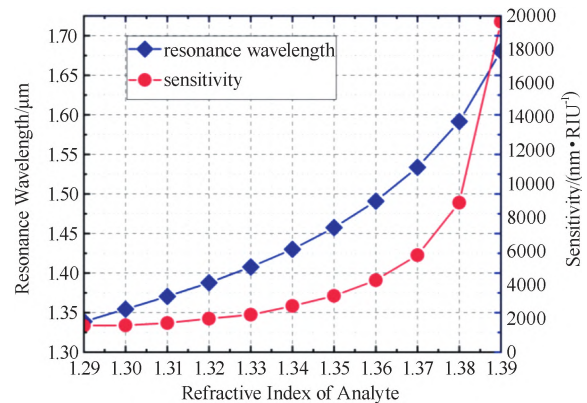


图 8 待测分析物折射率变化时传感器的共振波长与灵敏度

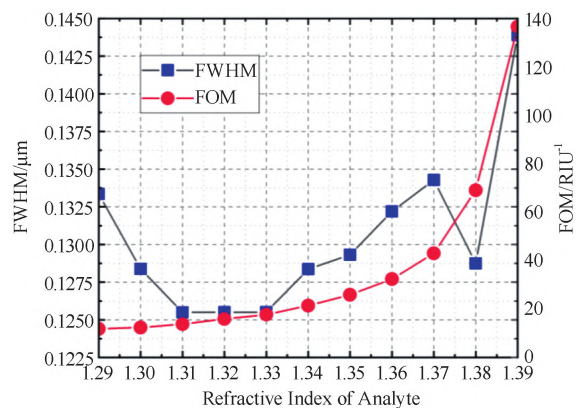


图 9 待测分析物折射率变化时传感器的 FWHM 与 FOM

表 1 本文传感器与其它 SPR-PCF 传感器的传感性能参数

| 参考文献 | 结构类型 | 有效折射率范围 | 最大损耗 (dB/cm) | 波长灵敏度 (nm/RIU) | 折射率测量精度/RIU |
|------|-------------------|-----------|--------------|----------------|-----------------------|
| [19] | D-shaped | 1.36~1.38 | 160 | 3340 | 5.98×10^{-6} |
| [20] | Twin core | 1.33~1.40 | 535 | 9000 | 11.1×10^{-6} |
| [21] | Microchannel | 1.32~1.34 | 125 | 5000 | 20×10^{-6} |
| [22] | Hexagonal lattice | 1.40~1.43 | 110 | 15180 | 5.68×10^{-6} |
| [23] | D-shaped | 1.27~1.32 | 210 | 10493 | 9.53×10^{-6} |
| [24] | Dual D-shaped | 1.33~1.38 | 280 | 13500 | 7.41×10^{-6} |
| [25] | Dual microchannel | 1.23~1.29 | 405 | 13000 | 7.69×10^{-6} |
| 本文 | Sun-flower | 1.29~1.39 | 742 | 19659 | 29.2×10^{-6} |

3 结论

本文提出了一种基于 ITO 纳米薄膜的圆形晶格光子晶体光纤表面等离子体共振传感器, 并对其进行了系统研究。它的折射率传感机理是缺陷模与表面等离子体模之间的耦合, 其工作波长位于近红外波段。通过分析各种结构参数对传感器性能的影响, 我们对该传感器的设计方案进行了优化。与已有传感器相比, 本文传感器不仅具有很宽的折射率监测范围, 而且还有很高的灵敏度。研究表明, 该传感器可以检测到折射率在 1.29~1.39 范围内的待测分析物, 平均波长灵敏度为 4893 nm/RIU, 最大波长灵敏度可以达到 19659 nm/RIU, 折射率分辨率为 2.92×10^{-5} RIU, 最大品质因数为 137/RIU。另外, 这种传感器的设计方案简单, 制造过程容易, 并且具有较高的机械强度。该传感器在医疗诊断、食品安全和化学物质检测等领域具有较大的应用潜力。下一步的工作重点是在保持传感器高灵敏度与分辨率的前提下由单一参量传感转变为多参量传感, 并对多参量传感器的性能进行详细的分析与研究。

参考文献

- [1] Paul B K, Haque M A, Ahmed K, et al. A Novel Hexahedron Photonic Crystal Fiber in Terahertz Propagation: Design and Analysis [J]. *Photonics*, 2019, 6(1): 32.
- [2] Haque E, Hossain M A, Ahmed F, et al. Surface Plasmon Resonance Sensor Based on Modified D-Shaped Photonic Crystal Fiber for Wider Range of Refractive Index Detection [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 18(20): 8287-8293.
- [3] Liu Q, Sun J, Sun Y, et al. Surface plasmon resonance sensor based on eccentric core photonic quasi-crystal fiber with indium tin oxide [J]. *Applied optics*, 2019, 58(25): 6848-6853.
- [4] Zhou C, Zhang Y, Xia L, et al. Photonic crystal fiber sensor based on hybrid mechanisms: Plasmonic and directional resonance coupling [J]. *Optics Communications*, 2012, 285(9): 2466-2471.
- [5] Jing J Y, Wang Q, Wang B T. Refractive index sensing characteristics of carbon nanotube-deposited photonic crystal fiber SPR sensor [J]. *Optical Fiber Technology*, 2018, 43: 137-144.
- [6] Lou J, Cheng T, Li S. High sensitivity photonic crystal fiber sensor based on dual-core coupling with circular lattice [J]. *Optical Fiber Technology*, 2019, 48: 110-116.
- [7] Chen Y, Xie Q, Li X, et al. Experimental realization of D-shaped photonic crystal fiber SPR sensor [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2016, 50(2): 025101.
- [8] Yan B, Wang A, Liu E, et al. Polarization filtering in the visible wavelength range using surface plasmon resonance and a sunflower-type photonic quasi-crystal fiber [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2018, 51(15): 155105.
- [9] Haque E, Hossain M A, Namihira Y, et al. Microchannel-based plasmonic refractive index sensor for low refractive index detection [J]. *Applied*

- Optics, 2019, **58**(6): 1547–1554.
- [10] Danlard I, Akowuah E K. Assaying with PCF-based SPR refractive index biosensors: From recent configurations to outstanding detection limits [J]. *Optical Fiber Technology*, 2020, **54**: 102083.
- [11] Li L, Xiao L. Plasmonic nodeless hollow-core photonic crystal fibers for in-fiber polarizers [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, **37**(20): 5199–5211.
- [12] Hassani A, Skorobogatiy M. Design criteria for microstructured-optical-fiber-based surface-plasmon-resonance sensors [J]. *JOSA B*, 2007, **24**(6): 1423–1429.
- [13] Gangwar 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.
- [14] Sun X H, Wu Y L, Liu W, et al. Luneburg lens composed of sunflower-type graded photonic crystals [J]. *Optics Communications*, 2014, **315**: 367–373.
- [15] Asaduzzaman S, Arif M F H, Ahmed K, et al. Highly sensitive simple structure circular photonic crystal fiber based chemical sensor [C]. Dhaka: IEEE international WIE conference on electrical and computer engineering, 2015.
- [16] Liu W, Sun X H, Fan Q B, et al. The investigation of multi-channel splitters and big-bend waveguides based on 2D sunflower-typed photonic crystals [J]. *Superlattices and Microstructures*, 2016, **100**: 1291–1295.
- [17] Yan B, Wang A, Liu E, et al. Polarization filtering in the visible wavelength range using surface plasmon resonance and a sunflower-type photonic quasi-crystal fiber [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2018, **51**(15): 155105.
- [18] Lou J, Cheng T, Li S. High sensitivity photonic crystal fiber sensor based on dual-core coupling with circular lattice [J]. *Optical Fiber Technology*, 2019, **48**: 110–116.
- [19] Lu J, Li Y, Han Y, et al. D-shaped photonic crystal fiber plasmonic refractive index sensor based on gold grating [J]. *Applied optics*, 2018, **57**(19): 5268–5272.
- [20] Paul A K, Sarkar A K, Rahman A B S, et al. Twin core photonic crystal fiber plasmonic refractive index sensor [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, **18**(14): 5761–5769.
- [21] Dash J N, Das R, Jha R. AZO coated microchannel incorporated PCF-based SPR sensor: a numerical analysis [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2018, **30**(11): 1032–1035.
- [22] Liu M, Yang X, Shum P, et al. High-sensitivity birefringent and single-layer coating photonic crystal fiber biosensor based on surface plasmon resonance [J]. *Applied optics*, 2018, **57**(8): 1883–1886.
- [23] Wei H S, Cheng J Y, Jing W. D-shaped photonic crystal fiber refractive index and temperature sensor based on surface plasmon resonance and directional coupling [J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, **64**(22): 224221.
- [24] Zhu T, Rao Y J, Song Y, et al. Highly sensitive temperature-independent strain sensor based on a long-period fiber grating with a CO₂-laser engraved rotary structure [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2009, **21**(8): 543–545.
- [25] Liu C, Yang L, Lu X, et al. Mid-infrared surface plasmon resonance sensor based on photonic crystal fibers [J]. *Optics express*, 2017, **25**(13): 14227–14237.