

# 光子晶体光纤表面等离子体共振传感特性

董 莉<sup>1</sup> 任广军<sup>1</sup> 胡海燕<sup>1</sup> 吴玉登<sup>1</sup> 姚建铨<sup>2</sup>

<sup>1</sup>天津理工大学电子信息工程学院, 薄膜电子与通信器件天津市重点实验室, 通信器件与技术教育部工程研究中心, 天津 300384

<sup>2</sup>天津大学精密仪器与光电子工程学院, 激光与光电子研究所, 光电信息科学技术教育部重点实验室, 天津 300072

**摘要** 采用包层中设计 6 个大空气孔的光子晶体光纤(PCF)简单模型,通过在纤芯的中心位置引入一个小空气孔,可以降低芯模的有效折射率,从而解决了表面等离子体共振(SPR)传感器的芯模与等离子体模相位匹配难以实现的问题。与此同时,利用损耗谱分析方法研究了光子晶体光纤 SPR 传感器参数的变化对传感的影响,优化了这些参数并且得到了最佳的光子晶体光纤 SPR 传感器的结构,同时计算了其灵敏度和分辨率。计算表明,所设计的折射率传感器最大光谱灵敏度为  $0.075 \mu\text{m}$ ,若光谱仪的分辨率为 1%,则折射率传感器的分辨率可以达到  $1.33 \times 10^{-4}$ ,与现有的传感器分辨率相当,但结构更加简单化。

**关键词** 光纤光学;光子晶体光纤;表面等离子体共振;光纤传感;折射率

**中图分类号** TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.s205003

## Surface Plasmon Resonance Sensing Characteristics Based on Photonic Crystal Fiber

Dong Li<sup>1</sup> Ren Guangjun<sup>1</sup> Hu Haiyan<sup>1</sup> Wu Yudeng<sup>1</sup> Yao Jianquan<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Electronics Information Engineering, Tianjin Key Laboratory of Film Electronic & Communication Devices, Engineering Research Center of Communication Devices and Technology, Ministry of Education, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China

<sup>2</sup>College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Institute of Laser and Optoelectronics, Key Laboratory of Opto-Electronics Information Science and Technology, Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China

**Abstract** A simple photonic crystal fiber (PCF) model containing six large air holes in cladding is used. By introducing a small air hole in the core center, the effective index of the core mode is lowered. Therefore the tough problem of phase matching between core and plasmon modes in the surface plasmon resonance (SPR) sensor is resolved. At the same time, the analysis method based on loss spectrum is used to research the sensing effects of the parameters variation in the PCF SPR sensor. These parameters are optimized and the best structure of PCF SPR sensor is acquired. The sensitivity and resolution are also given. The maximum spectral sensitivity of the refractive index sensor is  $0.075 \mu\text{m}$ . Its resolution reaches  $1.33 \times 10^{-4}$  if the spectrometer has a demodulation resolution of 1%. This sensor has a comparable resolution with other existing sensors, but it has much simpler structure.

**Key words** fiber optics; photonic crystal fiber; surface plasmon resonance; optical fiber sensor; refractive index

**OCIS codes** 060.5295; 060.2370; 240.6680

## 1 引 言

表面等离子体共振(SPR)传感器能激励非常强

的本地电磁振荡,因此可利用它完成高灵敏度的探测<sup>[1]</sup>。光纤 SPR 传感器是将高灵敏度的表面等离

收稿日期: 2012-05-24; 收到修改稿日期: 2012-07-01

基金项目: 国家 973 计划(2010CB327801)和国家博士后基金(20090460691)资助课题。

作者简介: 董 莉(1987—),女,硕士研究生,主要从事光纤通信与传感技术等方面的研究。E-mail: donglijob@163.com

导师简介: 任广军(1963—),男,博士,教授,主要从事物理电子学、光电子器件、光纤通信与传感技术等方面的研究。

E-mail: rgjl@163.com(通信联系人)

子体传感技术与低能量消耗的光纤传输技术有机结合的产物<sup>[2,3]</sup>。然而采用普通光纤作为敏感元件的光纤 SPR 传感器在芯模和等离子体模相位匹配的实现方面存在着一定的困难<sup>[3~5]</sup>,因此限制了传感器性能的进一步提高。

1992 年, P. Russell 等提出了光子晶体光纤(PCF)的概念,它与传统光纤相比有许多“奇异”特性,如无休止的单模传输特性,极低损耗、可控的色散、高非线性特性、高双折射特性以及可进行微结构设计改造等<sup>[6~10]</sup>,因此受到极大重视,并且随着 PCF 拉制工艺的不断成熟,PCF 已广泛应用于光纤传感领域<sup>[11]</sup>。采用 PCF 制作的光纤 SPR 传感器拥有很多的优势,其中最重要的是它解决了基于传统光纤 SPR 传感器的芯模与等离子体模相位匹配难实现的问题。传统光纤 SPR 传感器必须在高频区(波长  $\lambda < 700 \text{ nm}$ )才能引起 SPR,然而这样会限制等离子体波进入待测样品的趋肤深度,降低了传感器的灵敏度。PCF 具有周期性的包层结构,可以在纤芯中引入小气孔降低芯模的有效折射率,就能在所需要的任意波长下实现芯模与等离子体模的相位匹配<sup>[3~5]</sup>。

2006 年, A. Hassani 等<sup>[5]</sup>利用 PCF 制作光纤 SPR 传感器,其芯区有一个小空气孔来降低芯模的有效折射率。该传感器很好地解决了相位匹配问题,但其结构设计相对复杂。2011 年,关春颖等<sup>[11]</sup>利用结构比较简单的光子晶体光纤实现了 SPR 传感,但是该传感器必须在高频区才能使芯模和等离子体模相位匹配,然而在高频区会降低传感器的灵敏度。

本文设计了一种结构简单又容易实现芯模与等离子体模相位匹配的 PCF SPR 传感模型,利用损耗谱分析方法研究了 PCF SPR 传感器参数的变化对传感的影响,最后计算了其灵敏度和分辨率。

## 2 主要研究内容与结果

### 2.1 理论基础和几何建模

#### 2.1.1 SPR 基本原理

SPR 现象主要是特定的电磁波与金属表面的自由电子相互作用的结果<sup>[12]</sup>。PCF SPR 传感器是指在 PCF 空气孔内壁沉积金属纳米薄膜,当发生全发射时,入射光的倏逝波中的 TM 波(即 p 偏振分量)会激发金属薄膜表面的自由电子,产生振荡电荷,这些振荡电荷以纵波的形式在金属薄层表面振荡传播,形成表面等离子体波。当入射的 TM 波与

表面等离子体波具有相同的波矢,也就是芯模与表面等离子体模相位匹配时,二者将在界面处发生耦合,从而引起 SPR。由于金属薄膜表面产生的等离子体共振对周围的介质环境十分敏感,当待测液体的折射率发生变化时,损耗吸收峰的位置也会发生变化,因此可以将金属薄膜表面临近物质折射率的微小变化转换成可测量的吸收峰的位移,从而达到传感的目的。

#### 2.1.2 几何建模

PCF SPR 传感模型结构如图 1 所示。采用简单的在包层中仅有 6 个大空气孔的 PCF 模型,包层空气孔间距  $\Lambda = 6 \mu\text{m}$ ,在纤芯的中心位置引入一个小空气孔 1,其直径为  $d_1$ ,包层中空气孔 2,3 的直径  $d_2 = 5.4 \mu\text{m}$ ,对具有中心对称位置的这两个空气孔内表面进行镀膜,所选用的镀膜材料为金,它的材料属性用介电常数指定,其表达式由 Drude 模型给出<sup>[13]</sup>,所镀膜层的厚度为  $d$ ,在镀有金属薄膜的这两个空气孔中装入待测样品,其折射率为  $n$ ,另外 4 个空气孔 4,5,6,7 的直径  $d_3 = 5.4 \mu\text{m}$ ,该模型选用的背景材料为石英玻璃,其折射率可以根据 Sellmeier 方程计算出来<sup>[11]</sup>。

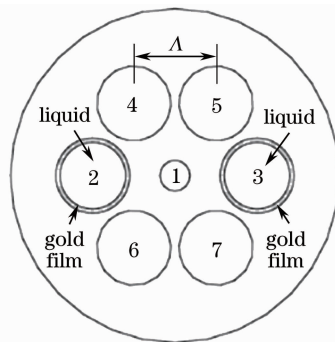


图 1 传感模型的结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the sensing model

### 2.2 数值结果与分析

采用波长调制法,利用基于全矢量有限元法(FEM)的 COMSOL Multiphysics 计算软件对所设计的实验模型进行数值仿真,在各向异性完美匹配层(PML)边界条件的配合下,模场的有效折射率可以在复数域中求解。复数形式的模式有效折射率  $n_{\text{eff}} = \text{Re}(n_{\text{eff}}) + j \text{Im}(n_{\text{eff}})$ ,其中实部为通常意义上的折射率概念,而虚部则描述了模式的损耗情况,对于限制损耗,可以理解为是因为芯模激发等离子体模而自身产生的损耗,可以表示为

$$\alpha = 40\pi \text{Im}(n_{\text{eff}}) / [\ln 10 \lambda], \quad (1)$$

式中  $\lambda$  表示波长<sup>[7,14]</sup>。利用(1)式可以绘出该传感

模型的损耗谱,进而分析模型参数的变化对传感的影响。

### 2.2.1 纤芯小空气孔 1 对传感的影响

基于所设计的传感模型,假设  $d=40$  nm,待测液体的折射率  $n=1.33$ ,图 2 给出了纤芯小空气孔 1 的直径  $d_1$  分别为 1.4,1.8,2.2  $\mu\text{m}$  时的 PCF 损耗谱。可以看出随着  $d_1$  增大,共振峰强度增强并且共振波长向长波方向移动。在  $d_1=2.2$   $\mu\text{m}$  的 PCF SPR 传感模型中,当达到第二个共振峰时,共振波长为 730 nm,突破了高频区,这就意味着在纤芯的中心位置引入一个小空气孔,可以使共振峰的位置发生改变,并且共振峰会随着  $d_1$  增大而向长波方向移动。通过改变纤芯小空气孔 1 的尺寸,就可以获得在任意所需要波长下的共振峰,避免了共振波长在高频区会降低传感器灵敏度的风险,因此在纤芯的中心位置引入小空气孔的设计有效解决了 PCF SPR 传感器芯模与等离子体模相位匹配难实现的问题。从图 2 还可以看出,当  $d_1$  分别为 1.4  $\mu\text{m}$  和 1.8  $\mu\text{m}$  时,共振峰均产生了次峰,而  $d_1$  为 2.2  $\mu\text{m}$  时,共振峰没有次峰并且在 0.6~0.9  $\mu\text{m}$  这个波段范围内峰值最高,所激发的表面等离子体强度最强。因此在研究其他参数的变化对传感的影响时,只在 0.6~0.9  $\mu\text{m}$  这个波段范围对传感模型进行数值仿真,同时传感模型的空气孔 1 的直径  $d_1$  取为 2.2  $\mu\text{m}$ 。

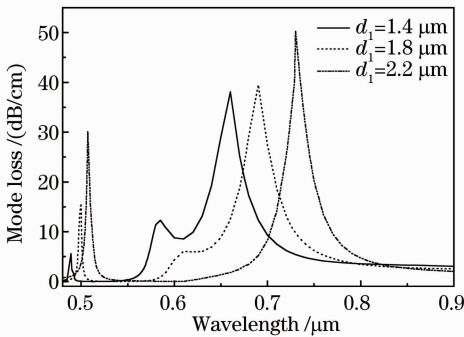


图 2  $d_1$  不同时光子晶体光纤的损耗谱

Fig. 2 Loss spectra of PCF with different  $d_1$

### 2.2.2 金膜厚度对传感的影响

基于所设计的传感模型, $d_1=2.2$   $\mu\text{m}$ ,假设待测液体的折射率  $n=1.33$ ,图 3 给出了金膜厚度  $d$  分别为 30,40,50 nm 时的 PCF 损耗谱。可以看出随着  $d$  增大,共振波长向长波方向移动但是共振峰的强度并没有呈现规律性地变化。当  $d$  分别为 30 nm 和 50 nm 时,激发的表面等离子体强度均比  $d=40$  nm 时的弱,因此镀的金属薄膜过薄或过厚都不利于传感,而在本实验方案中金膜的最佳厚度  $d$

取为 40 nm。

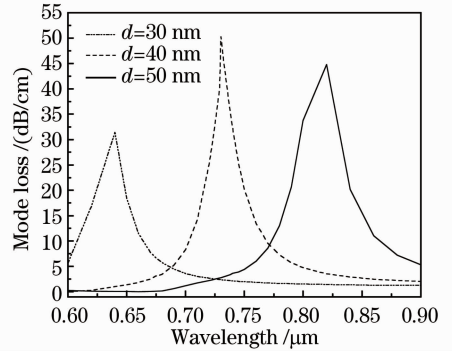


图 3  $d$  不同时光子晶体光纤的损耗谱

Fig. 3 Loss spectra of PCF with different  $d$

### 2.2.3 待测液体折射率对传感的影响

基于所设计的传感模型, $d_1=2.2$   $\mu\text{m}$ , $d=40$  nm,图 4 给出了待测液体折射率  $n$  分别为 1.33,1.35,1.37,1.39 时的 PCF 损耗谱。由于曲线的变化很微小,因此图 4 是进行放大之后的图。如图 4 所示,当  $n$  分别为 1.33,1.35,1.37,1.39 时,所对应的共振波长分别为 0.7300,0.7305,0.7315,0.7330  $\mu\text{m}$ 。可以看出随着  $n$  增大,共振波长向长波方向移动。基于此,可以将金属薄膜表面临近待测液体折射率的微小变化转换成可测量的共振峰的位移,从而达到传感的目的。

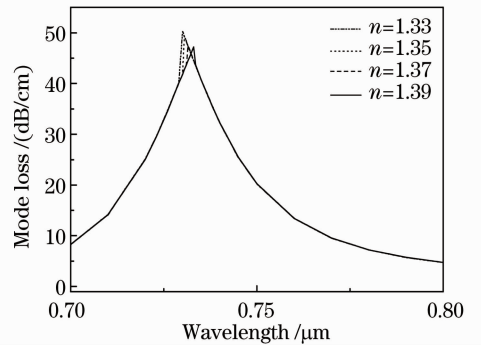


图 4  $n$  不同时光子晶体光纤的损耗谱

Fig. 4 Loss spectra of PCF with different  $n$

通过测量当待测液体的折射率改变  $\Delta n$  时共振峰的偏移量  $\Delta\lambda_p$ ,可以计算出传感器的灵敏度  $S_\lambda = \Delta\lambda_p / \Delta n$ 。由于当待测液体的折射率以相同的  $\Delta n$  增大时,共振峰的偏移量  $\Delta\lambda_p$  也变大了,故传感器的灵敏度也相应地变大。因此当  $n$  从 1.37 变为 1.39 ( $\Delta n=0.02$ ) 时,共振峰的位置  $\lambda_p$  从 0.7315  $\mu\text{m}$  变为 0.7330  $\mu\text{m}$  ( $\Delta\lambda_p=0.0015$   $\mu\text{m}$ ),可以得到传感器最大光谱灵敏度为 0.075  $\mu\text{m}$ ,若光谱仪的分辨率能够达到 1%,则此时传感器的分辨率为  $1.33 \times 10^{-4}$ ,与现有的传感器分辨率相当,但是结构更加简单化。

## 3 结 论

设计了一种在包层中仅有 6 个大空气孔的光子晶体光纤简单模型,通过在纤芯的中心位置引入小空气孔,解决了芯模与等离子体模相位匹配难实现的问题。使用损耗谱分析方法研究了基于该模型的 SPR 传感器参数变化对传感的影响,优化了这些参数并得到最佳结构,其结构参数分别为  $d_1 = 2.2 \mu\text{m}$ ,  $d_2 = d_3 = 5.4 \mu\text{m}$ ,  $\Lambda = 6 \mu\text{m}$ , 金膜厚度  $d = 40 \text{ nm}$ 。同时计算了传感器的灵敏度和分辨率,计算表明,所设计的折射率传感器最大光谱灵敏度达到  $0.075 \mu\text{m}$ ,若光谱仪的分辨率为  $1\%$ ,则此时折射率传感器的分辨率可以达到  $1.33 \times 10^{-4}$ ,与现有的传感器分辨率相当,但结构更加简单化。

## 参 考 文 献

- Zhao Dong'e, Zhao Yushu. Research on SPR sensors using theoretical simulation [J]. *Journal of Test and Measurement Technology*, 2008, **22**(3): 265~268  
赵冬娥, 赵豫妹. 表面等离子体共振理论仿真研究[J]. 测试技术学报, 2008, **22**(3): 265~268
- Jiang Xiuming, Chen Zhichun, Yang Shaoming *et al.*. Progress of fiber optic sensor based on surface plasmon resonance [J]. *Journal of Transduction Technology*, 2003, **1**: 74~77  
江秀明, 陈志春, 杨绍明等. 光纤表面等离子体共振传感器研究进展[J]. 传感技术学报, 2003, **1**: 74~77
- Zhang Jiangtao. Principle and study progress of fiber optic chemical sensor based on surface plasmon resonance [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, **45**(10): 24~31  
张江涛. 光纤表面等离子体共振光化学传感器的原理及进展 [J]. 激光与光电子学进展, 2008, **45**(10): 24~31
- Yan Peiguang, Xing Fengfei, Ruan Shuangchen *et al.*. Microstructured optical fiber surface plasmon resonance sensor [J]. *Journal of Shenzhen University Science and Engineering*, 2009, **26**(1): 16~19  
闫培光, 邢凤飞, 阮双琛等. 微结构光纤表面等离子体共振传感器研究[J]. 深圳大学学报(理工版), 2009, **26**(1): 16~19
- A. Hassani, M. Skorobogatiy. Practical design of microstructured optical fibers for surface plasmon resonance sensing [C]. *Optical Fiber Communication and the National Fiber Optic Engineers Conference*, 2007. 1~3
- P. Russell, J. C. Knight, T. A. Birks *et al.*. Recent progress in photonic crystal fibers [C]. *Optical Fiber Communication Conference*, 2000. ThG1
- Bing Pibin, Yao Jianquan, Huang Xiaohui *et al.*. Surface plasmon resonance sensor based on near-panda cladding photonic crystal fiber [J]. *Laser and Infrared*, 2011, **41**(7): 784~787  
邴丕彬, 姚建铨, 黄晓慧等. 表面等离子体共振类熊猫型光子晶体光纤传感器[J]. 激光与红外, 2011, **41**(7): 784~787
- Chi Hao, Zeng Qingqi, Jiang Chun. Photonic crystal fiber: theory, applications and recent progress [J]. *Journal of Optoelectronics & Laser*, 2002, **13**(5): 534~537  
池 灏, 曾庆济, 姜 淳. 光子晶体光纤的原理、应用和研究进展 [J]. 光电子·激光, 2002, **13**(5): 534~537
- He Li, Yang Bojun, Zhang Xiaoguang *et al.*. Characteristics of photonic crystal fiber and its application in optical communication [J]. *Acta Sinica Quantum Optica*, 2006, **12**(4): 225~230  
何 理, 杨伯君, 张晓光等. 光子晶体光纤特性及光通信中的应用 [J]. 量子光学学报, 2006, **12**(4): 225~230
- Yu Chongxiu, Yuan Jinhui, Shen Xiangwei. Recent progress of study on photonic crystal fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(9): 0900139  
余重秀, 苑金辉, 申向伟. 光子晶体光纤的研究新进展 [J]. 光学学报, 2011, **31**(9): 0900139
- Guan Chunying, Yuan Libo, Shi Jinhui. 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
- Alireza Hassani, Maksim Skorobogatiy. Photonic crystal fiber-based plasmonic sensors for the detection of biolayer thickness [J]. *J. Opt. Soc. Am. B: Opt. Phys.*, 2009, **26**(8): 1550~1557
- Zheng Long, Zhang Xia, Shi Lei *et al.*. Surface plasmon resonance sensors based on Au-metalized nanolayer in microstructured optical fibers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(1): 012401  
郑 龙, 张 霞, 施 雷等. 基于金纳米层的微结构光纤表面等离子体共振传感器 [J]. 激光与光电子学进展, 2011, **48**(1): 012401
- X. Yu, S. Y. Zhang, Y. Zhang *et al.*. An efficient approach for investigating surface plasmon resonance in asymmetric optical fibers based on birefringence analysis [J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(17): 17950~17957

栏目编辑: 王晓琪