

# 微孔光纤表面等离子体共振传感特性分析

关春颖 苑立波 史金辉

(哈尔滨工程大学理学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要** 设计了纤芯周围具有 6 个大空气孔的微孔光纤用于表面等离子体共振 (SPR) 传感器。利用有限元方法研究金属膜厚、微孔间距、微孔尺寸及外界环境折射率对表面等离子体共振峰所处波长的影响及传感器的灵敏度。结果显示, 金属膜厚及外界环境折射率对共振峰的位置都比较敏感, 而空气孔的直径和孔间距在小范围变化时谐振峰的位置基本保持不变。该传感器的灵敏度也可以达到  $10^{-4}$ 。为了降低传感器的整体损耗, 可以进行选择性的对空气孔沉积金属膜, 而其灵敏度并不受很大的影响。

**关键词** 光纤光学; 微孔光纤; 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/AOS201131.0206003

## Microstructured-Fiber Surface Plasmon Resonance Sensor

Guan Chunying Yuan Libo Shi Jinhui

(College of Science, Harbin Engineering University, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

**Abstract** A microstructured-fiber containing six large air holes is proposed to achieve surface plasmon resonance (SPR) sensor. The finite element method is used to analyze characteristics of the SPR sensor. The effects of the thickness of metal films, pitch between air holes, diameter of air holes and refractive index of liquid on the resonance wavelength are elucidated. The sensitivity of sensor is also given. The result shows that the resonance wavelength is sensitive to the thickness of metal film and refractive index of environment, while the resonance wavelength does not change basically when the pitch between air holes and diameter of air holes varies. The proposed SPR sensor exhibits high sensitivity up to  $10^{-4}$ .

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

**OCIS codes** 060.4005; 060.2370; 240.6680

## 1 引 言

表面等离子体共振 (SPR) 生物传感器是近代物理学与生物学相互结合的产物。光纤表面等离子体波共振传感器是今后 SPR 传感技术发展和系统微型化要求的自然延伸。光纤 SPR 传感器的研究与应用较棱镜型 SPR 传感器要晚得多, 但由于光纤 SPR 传感器采用光纤作为传输介质, 使得这种传感器具有以下优点: 使被测空间缩小到光纤直径尺寸的数量级, 因此可以很方便的探测一些用其它类型传感器难于进入或有害的地方; 它可以通过光纤对信号进行传输, 实现长距离的实时检测; 易于实现仪器的微型化等, 因而近期也成为了 SPR 传感器研究

领域的新热点<sup>[1~4]</sup>。同时采用光纤也使 SPR 传感器的分析方法和测量手段有了很大的改观, 光纤 SPR 传感通过检测输出信号谐振波长的偏移、共振波长附近固定波长处能量的大小和半功率点宽度来检测被测对象的内部信息, 是一种在线实时检测, 并且可以实现远距离、多通道的检测。随着微结构光纤和光子晶体光纤拉制工艺的不断成熟, 微结构光纤已广泛应用于光纤传感和光纤通信领域<sup>[5~8]</sup>。自 2006 年 Sazio 等<sup>[9]</sup>提出利用高压化学沉积技术可以在微结构光纤空气孔内表面制作均匀的金属薄膜, 80 nm 厚光滑的金膜已经实现, 该制备方法可以用于纤维集成光电器件中, 也使微孔光纤利用空气孔作为

**收稿日期**: 2010-07-09; **收到修改稿日期**: 2010-09-14

**基金项目**: 国家自然科学基金(60877046)、哈尔滨市青年科技创新人员专项基金(2008RFQXG031)和哈尔滨工程大学基础科研业务费专项基金(HEUCF20101102, HEUCF20101113)资助课题。

**作者简介**: 关春颖(1979—), 女, 博士, 副教授, 主要从事微结构光纤、光纤传感及光子晶体等方面的研究。

E-mail: cyguan@163.com

SPR 传感器成为可能<sup>[10~12]</sup>。M. Hautakorpi 等<sup>[11]</sup>利用三个大尺寸空气孔光纤可以实现  $10^{-4}$ /RIU 的灵敏度,该光纤为了将光更好的束缚在纤芯中,在芯纤的周围有一层低折射率介质。而 A. Hassani 等<sup>[12]</sup>利用光子晶体光纤用作光纤 SPR 传感器,该光纤的芯区有两层小空气孔来降低芯模折射率实现芯模和等离子体模的耦合。

本文设计了简单的 6 孔微结构光纤来实现 SPR 传感,利用有限元法分析了各种参数对 SPR 传感性能的影响。

## 2 传感器结构

因在高频区芯模折射率较低可以满足芯模和等离子体模的耦合,结构简单的微孔光纤也可以实现 SPR 传感,利用类似于文献[13]中的光纤结构,设计的光纤传感器如图 1 所示,实心光纤芯由 6 个大尺寸空气孔包围,空气孔直径为  $d$ ,两个空气孔的间距为  $\Lambda$ ,空气孔的内表面有一层厚度为  $d_m$  的均匀金属膜,下面分析时利用金膜,待分析的液体注入空气孔,其折射率为  $n$ 。

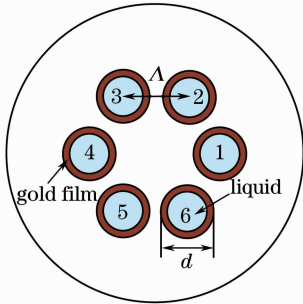


图 1 设计的传感光纤结构

Fig. 1 Structure of microstructure fiber

## 3 数值结果及分析

各种数值方法已被广泛用于研究光纤及光纤器件的特性,其中有限元法可以计算任意结构的光纤特性,且其功能强大,故采用有限元法分析所设计的传感器的各种特性。模拟过程中金属的介电常数利用文献[14]中所列数值进行插值处理后得到,而石英折射率的变化利用 Sellmeier 方程进行计算<sup>[15]</sup>,如下式:

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

首先考虑金膜厚度对 SPR 谐振峰值的影响,设

待分析液体的折射率为 1.33,两个空气孔的间距  $\Lambda=5 \mu\text{m}$ ,空气孔直径  $d=4.3 \mu\text{m}$ ,图 2 给出了金膜厚度分别为 30,40 和 50 nm 时的光纤基模损耗谱。从图中可以看出光纤损耗谱具有多个峰值,这是因为金属薄膜相对于纤芯是非对称的,这与文献[16]的结论相一致,随着金属膜厚的增加,可见光波段的谐振峰向长波方向移动,而长波段的谐振峰向短波方向移动,虽然长波段也具有谐振峰,但可以看出非谐振峰处该波段的损耗也比较大,在实际的应用中很难监测到,在下面的讨论中,将集中讨论可见光波段的特性。而没有金属膜存在时,其损耗曲线如图 3 所示。可以看出在整个波段其损耗都非常小,光被纤芯束缚得很好。图 4 给出了金膜厚为 50 nm,谐振峰波长处  $0.59 \mu\text{m}$  时的光场分布,在金膜与待测液体的分界面,随着离金属膜距离的增加,场被逐渐衰减,靠近液体一侧与靠近纤芯一侧的场相比因表面等离子体共振的发生而被明显放大。

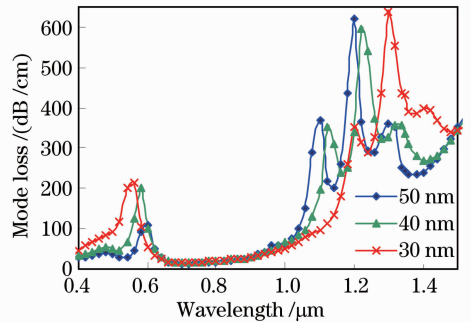


图 2 不同厚度金膜时基模的损耗谱

Fig. 2 Loss spectra of the fundamental mode with different gold layer thickness

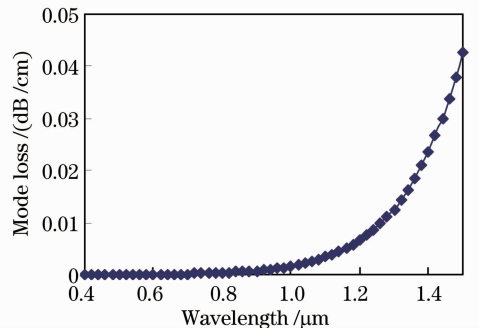


图 3 没有金膜时的光纤损耗

Fig. 3 Loss spectra of the fundamental mode for the fiber without gold film

现在考虑不同待测物质对共振峰位置的影响,图 5 给出金膜厚度为 50 nm,  $\Lambda=5 \mu\text{m}$ ,  $d=4.3 \mu\text{m}$  时,不同折射率情况下的基模损耗谱线。可以看出随着折射率的增加谐振峰波长也增加,且峰值处的

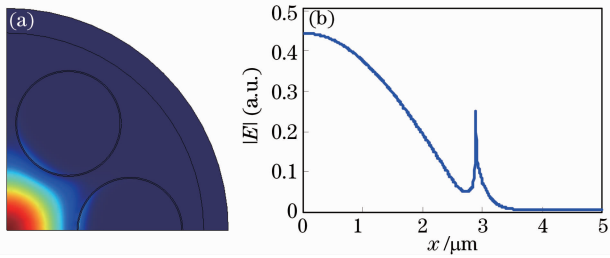


图4 谐振峰处的电场分布图(a)和  $x$  轴方向的电场(b)  
Fig. 4 Mode profile at  $0.59 \mu\text{m}$  wavelength (a) and  $|E|$  on the  $x$ -axis (b)

光纤损耗值也增加,损耗峰的谱宽也随之略有增加。这是因为孔中环境折射率的增加相当于芯与外界环境折射率差值变小,致使芯模有效折射率增加,从而使芯模与等离子体模谐振峰向长波移动。因此可以通过监测谐振波长附近固定波长处的功率变化和和谐振峰值波长的变化来测量外界折射率的变化。

空气孔尺寸及空气孔间距对共振峰的影响也进

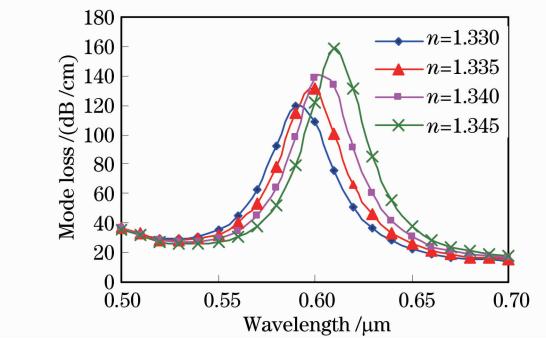
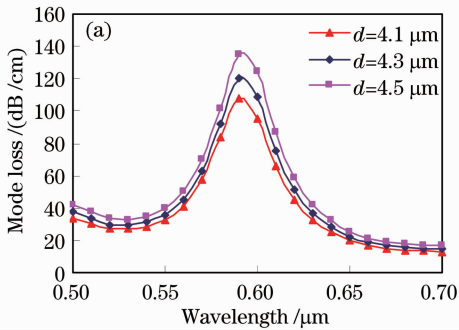


图5 不同折射率物质填充空气孔时光纤的损耗谱  
Fig. 5 Loss spectra of the fundamental mode for different liquid refractive indices

行了分析,计算结果如图6和图7所示。计算时金膜厚度仍为  $50 \text{ nm}$ ,外界折射率为  $1.33$ 。可以看出当其它参量不变,空气孔直径越大谱宽越宽,峰值处损耗越大,但谐振峰的位置基本保持不变。孔间距对共振峰的影响与空气孔直径类似,孔间距增加,谐振峰的位置也保持不变,只是峰值损耗在降低。

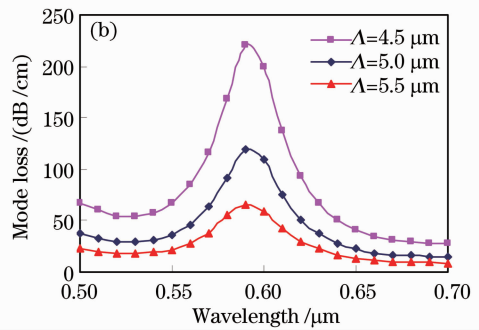


图6 空气孔尺寸(a)和孔间距(b)对共振峰的影响

Fig. 6 Effects of diameter of air holes (a) and pitch between air holes (b) on resonant peak

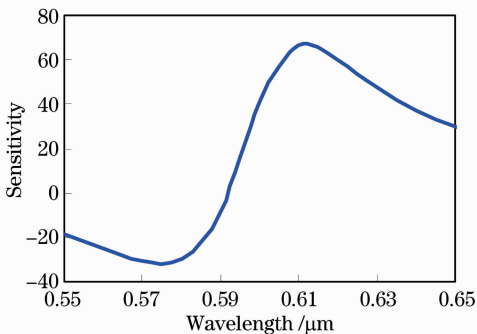


图7 灵敏度与波长的关系

Fig. 7 Relation of sensitivity versus wavelength

SPR传感器的一个重要参数是传感器的灵敏度,当通过监测固定波长传输功率来评价传感器灵敏度时,灵敏度参数可以表示为<sup>[12]</sup>

$$S = (\Delta\alpha/\Delta n)/\alpha_n, \quad (2)$$

式中  $\alpha_n$  代表孔中物质折射率为  $n = a$  时的光纤损

耗。对于传感器长度为  $1/\alpha_n$  数量级,孔中物质折射率改变较小时该式是很好的近似。对于折射率为  $n = a = 1.33$  时的计算结果如图7所示,从图中可以看出,若传输功率改变  $1\%$  可以被检测到,则折射率改变  $1.4 \times 10^{-4}$  时 ( $S=70$ ),传感器可以检测到该量的变化,与现有 SPR 传感器的灵敏度相当。

由上述分析发现当6个空气孔均镀金属膜时,传感器的损耗较大,对探测器的性能要求较高,为了降低损耗值,可以将其中一些空气孔密封,选择性地对空气孔内表面的镀膜,金膜厚度  $50 \text{ nm}$ ,外界折射率为  $1.33$ ,当有1个(空气孔1),2个(空气孔1和4)和3个空气孔(空气孔1,3和5)选择性镀金膜时的结果如图8所示。可以看出镀金属孔数量的减少可以使损耗大大降低,当仅有一个孔镀膜时峰值不是很显。而2个或3个孔镀膜时效果较好,以两个空气孔镀膜为例,谐振峰损耗为  $8 \text{ dB/cm}$ ,对于大

多数探测器均可检测,外界折射率的响应曲线如图9所示,此时传感器的灵敏度并没有发生很大改变,灵敏度参数  $S$  仍可达到 60 左右,此时折射率改变  $1.6 \times 10^{-4}$  时,传感器即可检测到。

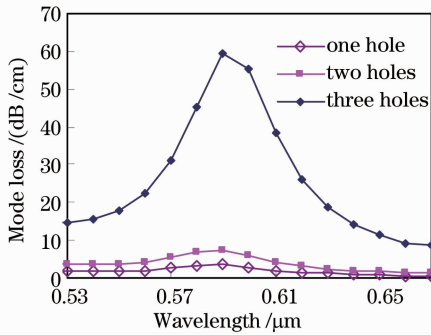


图 8 不同孔数镀膜对谐振损耗的影响

Fig. 8 Effects of number of air holes with gold film on resonant loss

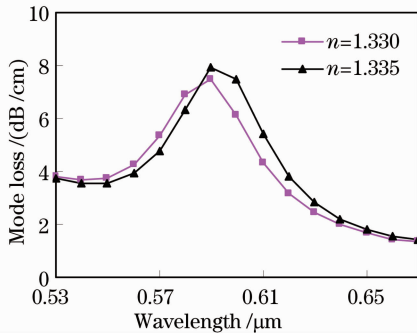


图 9 有两个空气孔镀膜时不同物质填充空气孔时的损耗谱

Fig. 9 Loss spectra of the fundamental mode for two gold-coated air holes filled with different material

## 4 结 论

本文利用具有 6 个空气孔的简单结构微孔光纤构建表面等离子体共振传感器。该种结构的 SPR 光纤传感器,简化了传感光纤的结构,易于实际光纤拉制,空气孔数量较少也便于金属膜的沉积。利用有限元方法讨论了各种参数对表面等离子体共振峰所处波长的影响,结果显示,金属膜厚及外界环境折射率对共振峰的位置都比较敏感,而空气孔的直径和孔间距在小范围变化时谐振峰的中心波长保持不变。因此可以设计的传感器,通过监测谐振波长附近固定波长传感器的功率变化和共振峰值波长的变化来测量外界物质的折射率。最后给出该传感器的灵敏度可以达到  $10^{-4}$ 。

## 参 考 文 献

- R. C. Jorgenson, S. S. Yee. A fiber-optic chemical sensor based on surface plasmon resonance [J]. *Sensors and Actuators B*, 1993, **12**(3): 213~220
- Y. Kim, W. Peng, S. Banerji *et al.*. Tapered fiber optic surface plasmon resonance sensor for analyses of vapor and liquid phases [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(17): 2218~2220
- Zeng Jie, Liang Dakai, Zeng Zhenwu *et al.*. Reflective optical fiber surface plasma resonance sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(3): 404~409  
曾捷, 梁大开, 曾振武等. 反射式光纤表面等离子体共振传感器特性研究[J]. *光学学报*, 2007, **27**(3): 404~409
- Zeng Jie, Liang Dakai, Du Yan *et al.*. Quasi-distributed optical fiber sensor based on surface plasmon resonance[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(2): 243~248  
曾捷, 梁大开, 杜艳等. 准分布式光纤表面等离子体波传感器[J]. *中国激光*, 2007, **34**(2): 243~248
- J. K. Ranka, R. S. Windeler, A. J. Stentz. Visible continuum generation in air-silica microstructure optical fibers with anomalous dispersion at 800 nm [J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(1): 25~27
- Deng Hongyou, Rao Yunjiang, Ran Zengling *et al.*. Photonic crystal fiber based Fabry-Pérot sensor fabricated by using 157 nm laser micromachining [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(2): 255~258  
邓洪有, 饶云江, 冉曾令等. 用 157 nm 激光制作的光子晶体光纤法布里-珀罗传感器 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(2): 255~258
- Wei Yanfen, Zhang Xia, Xu Yongzhao *et al.*. All-optical regeneration based on highly nonlinear microstructured fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(3): 414~418  
卫艳芬, 张霞, 徐永钊等. 基于高非线性微结构光纤的全光再生研究[J]. *光学学报*, 2007, **27**(3): 414~418
- Wang Zhi, Zhang Limei, Wang Jing *et al.*. Dual resonance interference of cascaded lpg inscribed in photonic crystal fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(10): 2909~2913  
王智, 张丽梅, 王晶等. 光子晶体光纤中级联长周期光栅双谐振波长干涉的研究 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(10): 2909~2913
- Pier J. A. Sazio, Adrian Amezcua-corred, chris E. finlayson *et al.*. Microstructured optical fibers as high-pressure microfluidic reactors [J]. *Science*, 2006, **311**(5767): 1583~1586
- X. Zhang, R. Wang, F. Cox F *et al.*. Selective coating of holes in microstructured optical fiber and its application to in-fiber absorptive polarizers [J]. *Opt. Express*, 2006, **15**(24): 16270~16278
- M. Hautakorpi, M. Mattinen, H. Ludvigsen. Surface-plasmon-resonance sensor based on three-hole microstructured optical fiber [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(12): 8427~8432
- A. Hassani, M. Skorobogatiy. Design of the microstructured optical fiber-based surface plasmon resonance sensor with enhanced microfluidics [J]. *Opt. Express*, 2006, **24**(14): 11616~11621
- J. K. Ranka, R. S. Windeler, A. J. Stentz. Optical properties of high-delta air silica microstructure optical fibers [J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(11): 796~798
- P. B. Johnson, R. W. Christy. Optical constants of Noble metal [J]. *Physical Review B*, 1972, **6**(12): 4370~4379
- C. Z. Tan. Determination of refractive index of silica glass for infrared wavelengths by IR spectroscopy [J]. *J. Non-Cryst Solids*, 1998, **223**: 158~163
- David Monzbn-Hernandez, Joel Villatoro. High-resolution refractive index sensing by means of a multiple-peak surface plasmon resonance optical fiber sensor [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2006, **115**(1): 227~231