

表面等离子体共振类熊猫型光子晶体光纤传感器

邴丕彬^{1,2}, 姚建铨¹, 黄晓慧¹, 陆颖¹, 邸志刚^{1,3}, 杨鹏飞¹

(1. 天津大学精密仪器与光电子工程学院激光与光电子研究院, 光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072;

2. 华北水利水电学院电力学院, 河南 郑州 450008; 3. 河北联合大学电气工程学院, 河北 唐山 063009)

摘要:分析了基于表面等离子体共振类熊猫型的光子晶体光纤传感器,采用基于全矢量有限元法(FEM)对光纤模式进行了数值计算,在各向异性完美匹配层(PML)边界条件下,求解模场的有效折射率。讨论了各个参量的尺寸对传感的影响。计算表明,激发的等离子体对环境介质折射率的变化非常敏感,所设计传感器最大光谱灵敏度达到 $2 \mu\text{m}/\text{RIU}$,若光谱仪的分辨率为 10 pm ,则传感器的分辨率可以达到 $5 \times 10^{-6} \text{ RIU}$ 。

关键词:表面等离子体共振;光子晶体光纤;传感器;折射率

中图分类号: TN212.4⁺⁴ **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2011.07.016

Surface plasmon resonance sensor based on near-panda cladding photonic crystal fiber

BING Pi-bin^{1,2}, YAO Jian-quan¹, HUANG Xiao-hui¹, LU Ying¹, DI Zhi-gang^{1,3}, YANG Peng-fei¹

(1. The Institute of Laser and Optoelectronics, College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Key Laboratory of Optoelectronics Information and Technical Science (Ministry of Education), Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Institute of Electric Power, North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Zhengzhou 450008, China; 3. College of Electrical Engineering, Hebei United University, Tangshan 063009, China)

Abstract: A near-panda cladding photonic crystal fiber (NPC PCF) based surface plasmon resonance (SPR) sensor is analyzed. Under the boundary condition of anisotropic perfectly matched layer (PML), a full-vector finite element method (FEM) is used to calculate the fiber model. The effective refractive index of the mode field is finally obtained. The sizes of the various parameters in the sensor are discussed. Numerical results indicate that the excitation of the plasmon mode is sensitive to the change of the refractive index of adjacent analyte. The maximum spectral sensitivity of the sensor can be about $2 \mu\text{m}/\text{RIU}$. Its resolution can reach $5 \times 10^{-6} \text{ RIU}$ if the spectrometer has a demodulation resolution of 10 pm .

Key words: surface plasmon resonance (SPR); photonic crystal fiber (PCF); sensor; index of refraction

1 引言

光纤传感器具有灵敏度高、抗干扰、结构简单、光路可弯曲、方便携带等优点,有着非常广泛的应用前景^[1-2]。然而,采用普通光纤作为敏感元件的光纤传感器存在耦合损耗大、保偏性差和存在交叉敏感问题等若干难以克服的缺点,限制了传感器性能的进一步提高。

光子晶体光纤 (photonic-crystal-fiber, PCF) 又称

微结构光纤,有很多奇特的性质,如宽的单模传输特性、高双折射系数、可控色散、高非线性系数以及可进行微结构设计改造等,因此在新型光纤器件的研制方面受到重视^[3]。采用光子晶体光纤制作的微

基金项目: 国家重点基础研究发展计划“973”项目 (No. 2010CB327801) 资助。

作者简介: 邴丕彬 (1982 -), 男, 博士研究生, 主要研究方向为光子晶体光纤传感器。E-mail: bing463233@163.com

收稿日期: 2011-03-02; **修订日期:** 2011-03-22

结构光纤传感器具有多维结构、调谐范围宽、模场面积大、可实现多参数测量等一系列优良特性。另外,光子晶体光纤可由单一的二氧化硅材料制成,有其他光纤所不能比拟的温度稳定性,用于传感可以降低环境温度的不利影响,提高测量精度;其包层区的空气孔作为微样品池,可进行气体、液体材料的传感测量,利用填充的被测材料的折射率变化或吸收对其光传输特性的影响,获得被测材料的信息^[4-6]。此外,还可以将光栅结构写入在该光纤上,利用其反射或透射功能进行传感测量^[7]。

基于表面等离子体共振效应的光子晶体光纤传感器,是指在光子晶体光纤的空气孔壁上沉积金属纳米颗粒或纳米薄膜,增强其表面等离子体共振效应。本文采用基于全矢量有限元法(FEM)对基于表面等离子体共振类熊猫型的光子晶体光纤传感器进行了数值计算,在各向异性完美匹配层(PML)边界条件的配合下,求解模场的有效折射率。计算发现激发的等离子体对环境介质折射率的变化非常敏感,因此基于表面等离子体共振类熊猫型的光子晶体光纤传感器在高精度传感测量方面^[8-9]有着重要的应用前景。

2 理论模型

我们知道,金属与介质的分界面上会存在自由传导电子,这些电子能形成一种沿着金属表面传播的电荷密度波,这种波动与电磁波的传播形式一致,且在垂直于分界面方向上场是衰减的(垂直于界面方向上的倏逝波)。

根据麦克斯韦方程组可以得知表面等离子体共振波是一种横磁波,只有水平方向分量起作用,且光波波矢 \mathbf{k} 在 x 轴方向的分量为:

$$k_x = \frac{\omega}{c} n_0 \sin\theta \quad (1)$$

式中, ω 为入射光频率; c 为真空中光速; n_0 为纤芯折射率; θ 为入射角。

而此时,在金属与样品的界面处,金属表面会激发形成表面等离子体激元,其波矢为:

$$\mathbf{k}_{sp} = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\varepsilon_m n_1^2}{\omega_m + n_1^2}} \quad (2)$$

式中, n_1 为样品折射率; ω_m 为金属复介电常数。

当产生等离子体激元与入射光发生共振时,有:

$$\mathbf{k}_x = \mathbf{k}_{sp} \quad (3)$$

此时,产生表面等离子体共振效应时的共振角

度为:

$$\sin\theta_{sp} = \sin\theta = f(\varepsilon_m, n_0, n_1) \quad (4)$$

另外我们知道,金属的复介电常数以及纤芯的折射率都与入射光波长有关系,而光子晶体光纤纤芯的折射率与其结构密不可分。从上面的关系式中可以看出,金属表面等离子体共振产生的条件与很多因素有关。当宽带光源以一定角度入射时,金属的介电常数,光子晶体光纤纤芯的折射率以及待测样品的折射率都会对产生等离子体共振而表现出来的吸收光谱有影响。因此,利用金属纳米层表面产生的等离子体共振对周围的介质环境十分敏感的特性,可以将金属表面临近物质的折射率的微小变化转换成可测量的吸收峰的位移,能够设计实现高灵敏度的光子晶体光纤传感器。

基于表面等离子体共振效应的光子晶体光纤传感器结构如图1所示,均匀六边形包层空气孔间距 $\Lambda = 2 \mu\text{m}$, 直径 $d_1 = 0.6 \Lambda$, 熊猫眼的两个空气孔作为待测液体通道直径为 d_2 , 内侧镀有金属层。另外中心上下分布的两个小空气孔可以调节纤芯模式, 直径为 d_3 , 间距 $d_0 = \Lambda = 2 \mu\text{m}$ 。最外层是带有各向异性完美匹配层作为吸收边界条件^[10]。设计所用镀膜材料为金, 折射率可以由 Drude 模型给出, 厚度为 40 nm; 背景材料为石英玻璃, 折射率可以根据 Sellmeier 方程计算出。

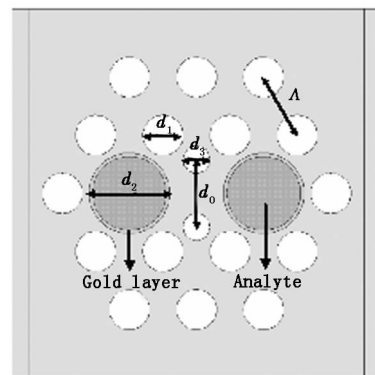


图1 传感器的结构示意图

Fig. 1 schematic diagram of the sensor

3 计算结果及其讨论

目前,一般采用基于全矢量有限元法(FEM)数值计算进行光纤模式分析。我们使用专业的有限元计算软件 COMSOL MultiphysicsTM来分析结构设计,进而得到每个模式的模场分布及其有效折射率值(n_{eff})。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,其实部即为通常意义上的折射率概念,而虚部则描述了该模式的损耗情况。对于限制损耗,可以理解为主要是因为芯导模激发等离子体模式而自身产生的损耗,可以表示为:

$\alpha(\text{dB/m}) = 40\pi \text{Im}(n_{\text{eff}}) / (\ln(10)\lambda)$, λ 表示波长。图2为 d_2 分别为 1.2Λ , 1.0Λ , 0.8Λ 时损耗随波长变化的关系,即 d_2 不同时不同波长的光入射所激发的表面等离子体的强度关系。从图中可以看出,不同尺寸的 d_2 在特定波长下都可以产生强烈的吸收峰,尤其在 $d_2 = 1.2 \Lambda$ 时产生的吸收峰最为强烈,可以达到 6700 dB/cm ,此时的共振波长为 $0.565 \mu\text{m}$ 。随着 d_2 的减小,吸收峰变弱,且产生次峰。然而当 d_2 增加时,与包层空气孔距离变小,计算量将显著增加,且当 $d_2 = 1.4 \Lambda$ 时与包层空气孔相切,因此 d_2 取值不宜过大。

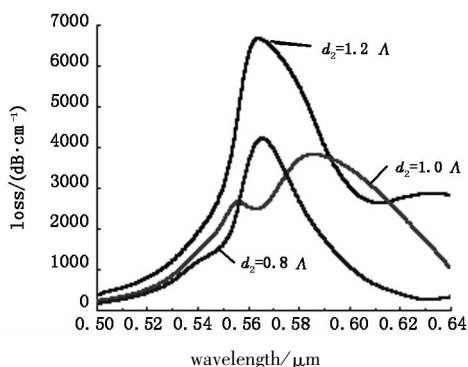


图2 d_2 不同时的损耗随波长变化的关系

Fig.2 loss spectra with different d_2

光子晶体光纤中心上下分布的两个小空气孔直径为 d_3 ,作用是限制纤芯的能量耦合进包层中产生损耗。图3为 d_3 分别为 0.4Λ , 0.5Λ , 0.6Λ 时损耗随波长变化的关系。从图中可以看出, d_3 变大时损耗变小,即激发的等离子体的强度变弱,吸收峰向长波方向偏移。

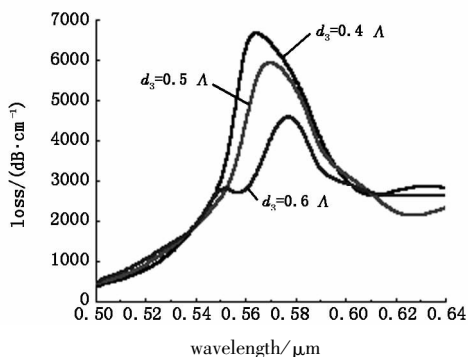


图3 d_3 不同时的损耗随波长变化的关系

Fig.3 loss spectra with different d_3

对于折射率不同的物质而言,其激发等离子体的吸收谱线也不同,如图4所示,当分析物的折射率从1.33逐渐增大到1.39时,吸收峰向长波方向移动,且吸收峰的强度变弱,另外,会出现多个振荡峰的现象。

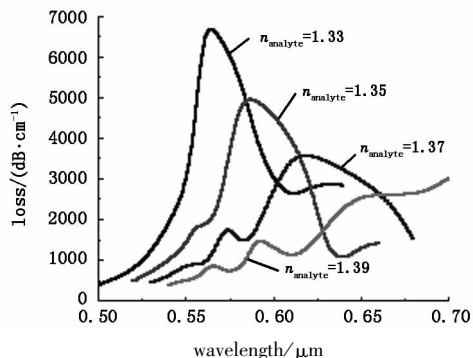


图4 分析物折射率不同时损耗随波长变化的关系

Fig.4 loss spectra with different refractive index of the analyte

一般来说,当样品性质发生改变,即样品的折射率发生改变时,通过观察吸收谱线的变化可以得到样品折射率变化的数据。一种方法是利用单一波长的光入射,不同折射率的样品在此波长损耗不同,进而可以探测出对应的样品,但是这种方法因为不同折射率物质的吸收损耗谱线有交点而容易混淆,不易探测。我们更倾向于用波长扫描的方法进行探测。一束宽带光入射到光子晶体光纤传感器,在另一端观察出射光的光谱变化,会更加直观的探测出样品。通过测量当折射率改变 Δn_a 时共振峰的偏移 $\Delta \lambda_p$,可以计算出传感器的灵敏度 $S_\lambda (\text{RIU}^{-1}) = \Delta \lambda_p / \Delta n_a$ 。由图4可知,当待测物质折射率以相同的 Δn_a 增大,共振峰的偏移 $\Delta \lambda_p$ 也变大了,因此传感器的灵敏度也相应地变大,在共振峰较明显的 $n = 1.35$ 与 $n = 1.37$ 之间的最大光谱灵敏度为 $2 \mu\text{m}/\text{RIU}$,若光谱仪的分辨率能够达到 10 pm ,则此时传感器的分辨率为 $5 \times 10^{-6} \text{ RIU}$ 。

4 小结

论文采用基于全矢量有限元法(FEM)对基于表面等离子体共振类熊猫型的光子晶体光纤传感器进行了数值计算,在各向异性完美匹配层(PML)边界条件的配合下,求解模场的有效折射率。通过合理设计结构中各个参数的大小,可以计算出传感器最大光谱灵敏度能够达到 $2 \mu\text{m}/\text{RIU}$,若光谱仪的分辨率为 10 pm ,则传感器的分辨率为 $5 \times 10^{-6} \text{ RIU}$ 。由此可见,激发的等离子体对环境介质折射率的变化非常敏感,基于表面等离子体共振类熊猫型的光

子晶体光纤传感器在高精度传感测量方面有着光明的应用前景。随着光纤制造技术的不断发展,各种新型的光子晶体光纤将会不断地在传感技术中得到开发、应用。

参考文献:

- [1] Byoung-ho Lee. Review of the present status of optical fiber sensors[J]. *Optical Fiber Technology*, 2003, 9: 57 – 59.
- [2] Byoung-ho Lee, Sookyoung Roh, Junghyun Park. Current status of micro- and nano-structured optical fiber sensors [J]. *Optical Fiber Technology*, 2009, 15: 209 – 221.
- [3] Darran K C Wu, Boris T Kuhlmeier, Benjamin J Eggleton. Ultrasensitive photonic crystal fiber refractive index sensor [J]. *Optics Letters*, 2009, 34: 322 – 324.
- [4] A Hassani, M Skorobogatiy. Design of the microstructured optical fiber-based surface plasmon resonance sensors with enhanced microfluidics [J]. *Optics Express*, 2006, 14(24): 11616 – 11621.
- [5] Alireza Hassani, Maksim Skorobogatiy. 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.
- [6] Xia Yu, Ying Zhang, Shanshan Pan, et al. A selectively coated photonic crystal fiber based surface plasmon resonance sensor[J]. *Journal of Optics*, 2010, 12: 015005.
- [7] Lars Rindorf, Ole Bang. Sensitivity of photonic crystal fiber grating sensors: Biosensing, refractive index, strain, and temperature sensing[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2008, 25(3): 310 – 324.
- [8] Radan Slavik, Jiri Homola, Jiri Ctyroky. Miniaturization of fiber optic surface plasmon resonance sensor [J]. *Sensors and Actuators B*, 1998, 51: 311 – 315.
- [9] M A Schmidt, L N Prill Sempere, H K Tyagi, et al. Waveguiding and plasmon resonances in two-dimensional photonic lattices of gold and silver nanowires [J]. *Phys. Rev. B*, 2008, 77: 033417.
- [10] Chinp ing Yu, Hungchun Chang. Yee-mesh-based finite difference eigenmode solver with PML absorbing boundary conditions for optical waveguides and photonic crystal fibers [J]. *Optics Express*, 2004, 12(25): 6165 – 6177.