

基于表面等离子体共振和定向耦合的光子晶体光纤 传感器

施伟华 吴 静

南京邮电大学光电工程学院, 江苏 南京 210023

摘要 设计了一种具有较大动态检测范围的新型光子晶体光纤折射率传感器。光子晶体光纤中一个空气孔镀上金纳米薄膜作为表面等离子体共振传感通道用来检测低于石英基底材料的液体折射率,一个空气孔填充待测液体作为定向耦合器通道用于检测高于石英基底材料的折射率。该传感器可以实现折射率为1.32~1.52范围内的检测,且具有较高的传感灵敏度。在各向异性的完美匹配层(PML)下利用全矢量有限元法(FEM)对该传感器特性进行了数值研究,结果表明:在1.32~1.44和1.46~1.52的折射率范围该折射率传感器灵敏度最高分别可达13500 nm/RIU和28700 nm/RIU,RIU为折射率单位。

关键词 传感器;光子晶体光纤;表面等离子体共振;定向谐振耦合;折射率

中图分类号 TN253 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201535.0206002

Photonic Crystal Fiber Sensor Based on Surface Plasmonic and Directional Resonance Coupling

Shi Weihua Wu Jing

College of Optoelectronic Engineering, Nanjing Post and Communications University, Nanjing, Jiangsu 210023, China

Abstract A novel photonic crystal fiber refractive index sensor with a large dynamic detection range is proposed. Two air holes are used as analyte channels. One coated with gold layer is used as surface plasmon resonance to measure the liquid index below that of the quartz substrate and the other filled with the test liquid is used as the directional resonance coupling to measure the index that of above the quartz substrate. A broad index range of analyte from 1.33 to 1.52 with high sensitivity can be achieved. The properties of the index sensor are analyzed by finite element method (FEM) with the boundary condition of anisotropic perfectly matched layer (PML). The results show that the maximal sensitivities reach 13500 nm/RIU and 28700 nm/RIU when refractive index is in the range of 1.32 to 1.44 and 1.46 to 1.52 respectively, where RIU is refractive index unit.

Key words sensors; photonic crystal fiber; surface plasmon resonance; directional resonance coupling; refractive index

OCIS codes 060.2370; 060.5295; 240.6680; 280.5715

1 引 言

折射率作为基本的光学参数,是物理变化和生化反应过程中的重要特性,因此对折射率的检测受到人们的重视^[1]。测量液体折射率的传统方法主要有利用分光仪、阿贝折射仪和电荷耦合元件(CCD)测量等^[2],其测量精度虽然高,但对待测样品和仪器的机械结构精度要求较高,体积偏大,在恶劣条件下远程实时监控和智能化等方面也很难实现。随着光纤传感技术的快速发展,光子晶体光纤(PCF)因具有可灵活设计的结构、无截止单模传输、调谐范围宽、温度稳定性好、体积小等优点被广泛应用到折射率传感中。目前,常见的

收稿日期: 2014-07-21; 收到修改稿日期: 2014-09-11

基金项目: 国家自然科学基金(61275067)

作者简介: 施伟华(1969—),女,副教授,研究生导师,主要从事光通信方面的研究。E-mail: njupt_shiwh@126.com

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

光子晶体光纤折射率传感器有干涉型折射率传感器^[3-4]、光栅型折射率传感器^[5-6]、表面等离子体共振(SPR)折射率传感器^[7-9]以及各种基于定向耦合的折射率传感器^[10-11]。其中基于SPR和定向耦合的光子晶体光纤折射率传感器因其对折射率变化异常敏感而受到广泛的关注。

如何提高光子晶体光纤折射率传感器的动态检测范围和灵敏度,是折射率传感器的重要研究点。基于定向耦合的折射率传感器虽然具有很高的灵敏度(30100 nm/RIU, RIU为折射率单位^[10]),但其检测范围较小(只能测量折射率高于光纤基底材料的液体),因此限制了其在低折射率检测上的发展;而基于SPR的折射率传感器因其对周围环境异常敏感的特性常被用来检测低折射率液体^[7-8]。因此本文提出了一种基于SPR效应和定向耦合的光子晶体光纤折射率传感方案。该传感器通过将两种不同的传感机制进行组合,不仅扩大了动态检测范围,而且提高了检测灵敏度。

2 理论模型与数值分析

基于SPR和定向耦合的光子晶体光纤传感器基本结构如图1所示。均匀六边形包层空气孔间距 $\Lambda=8\ \mu\text{m}$,空气孔直径 d 与 Λ 的比值为0.42。空气孔A和B作为液体通道,通道A外侧镀有一层厚度 $t=40\ \text{nm}$ 的金纳米薄膜,其制备过程可利用高压微流化学沉积法^[12]实现,折射率由Drude^[13]模型给出;光纤基底为石英玻璃,其折射率可根据Sellmeier^[9]方程算出。

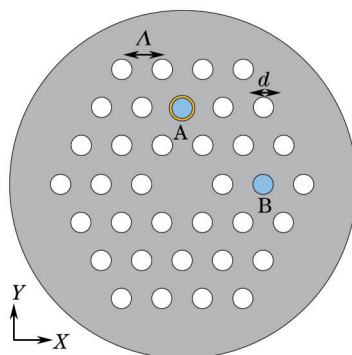


图1 基于光子晶体光纤的传感器结构剖面图

Fig.1 Cross section of the PCF-based sensor

采用专业的有限元(FEM)计算软件COMSOL Multiphysics对基于表面等离子体共振和定向耦合的光子晶体光纤传感器进行数值模拟,利用24588个三角形单元对图1结构计算区域进行网格划分,在各向异性的完美匹配层(PML)边界条件下,对模场的有效折射率在复数域进行求解。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限制损耗。

2.1 基于表面等离子体共振效应的数值分析

讨论微流体通道A在低折射率液体区(1.32~1.44)基于SPR效应的传感特性。图2为液体折射率 $n_s=1.42$ 时,纤芯导模和等离子体基模的色散关系。其中黑色实线和红色实线分别为纤芯导模有效折射率 n_{eff} 的实部 $\text{Re}(n_{\text{eff}})$ 和虚部 $\text{Im}(n_{\text{eff}})$ 随波长的变化关系,黑色虚线是激发的等离子体模的有效折射率的实部。可以发现在相位匹配点C纤芯导模和等离子体模的有效折射率实部相等,纤芯能量大部分转移到金属薄膜层,表现为纤芯导模的损耗增大(如点C处红色实线)。因此可以通过寻找纤芯导模损耗曲线的极大值来定位共振波长。

图3为液体折射率分别为1.41和1.42时纤芯导模的损耗 α 随波长变化的关系。可以发现纤芯导模损耗谱出现多峰的现象,这是因为在次峰(peak 2)处激发了高阶表面等离子体模。当液体折射率增大时,损耗吸收峰发生移动,由于纤芯导模和等离子体基模之间强烈的共振耦合,主峰(peak 1)相对次峰(peak 2)对折射率更加的灵敏,损耗吸收峰随折射率的增大向长波方向移动,且吸收峰的程度增强。因此选择主峰(peak 1)来进行折射率检测。

图4为微流体通道A发生SPR效应时的共振波长与液体折射率的关系。当液体折射率 n_s 低于基底材料折射率 n_{bg} 时,传感器在1.32~1.44的折射率范围灵敏度 S 最高可达13500 nm/RIU。

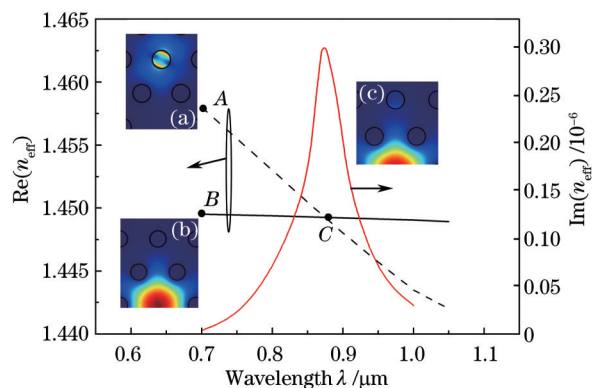


图2 液体折射率 $n_a=1.42$ 时,纤芯导模的色散特性(黑色实线)和损耗特性(红色实线)以及等离子体模的色散特性(黑色虚线)随波长的关系。其中插图A、B、C为每个点的电场分布

Fig.2 Dispersion (black solid line) and loss(red solid line) of core guided mode and dispersion of the plasmonic mode (black dashed line) as a function of wavelength when $n_a=1.42$. Insets A, B and C show the electric field distributions of the points A, B and C

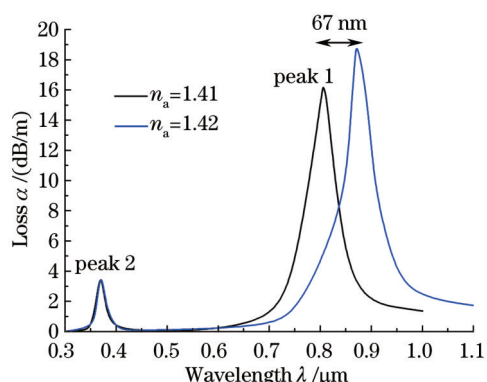


图3 液体折射率为1.41和1.42时纤芯导模随波长的变化规律

Fig.3 Loss of core guided mode as a function of wavelength when the refractive indexes of analyte are 1.41 and 1.42

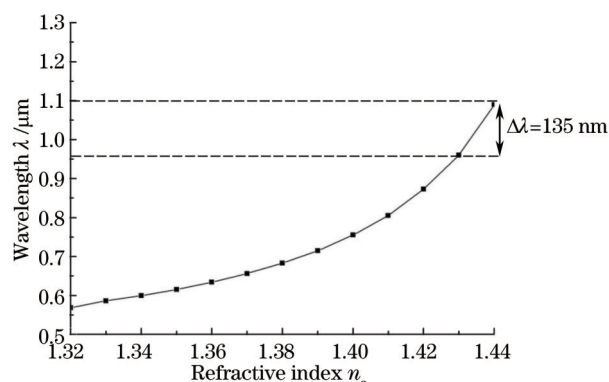


图4 $n_a < n_{bg}$ 时基于SPR的共振波长与液体折射率的关系

Fig.4 Curve of the response wavelength versus the refractive index of analyte based on SPR when $n_a < n_{bg}$

2.2 基于定向耦合效应的数值分析

当微流体通道B中液体折射率大于光纤基底($n_a > n_{bg}$)时,通道B形成另一个高折射率的波导纤芯,整个传感器形成一个定向耦合器。当纤芯导模和波导B中模式相匹配(即有效折射率实部相等)时,纤芯中的能量会强烈地耦合到波导B中,表现为狭窄的损耗峰,如图5红色实线所示。其中黑色实线和黑色虚线分别表示纤芯导模和波导B中模式的有效折射率(即 n_{eff}^{co} , n_{eff}^B)实部随波长的变化关系。由图1结构可以看到,波导B可以看出由两层低折射率包层组成,内层为石英基底材料,外层为空气孔。在短波长处,模场能被很好地限制在高折射率波导芯B中,如图5(a)所示,此时 $n_{eff}^B > n_{bg} > n_{eff}^{co}$,无法满足相位匹配条件。当波长逐渐增大,以石英基底为包层的高折射率波导B的模式最终截止,模场将扩散到石英包层并被空气孔包层限制,成为高阶模,如图5(c)所示,此时 $n_{eff}^B < n_{eff}^{co}$ 。因此在A、C之间某个波长 λ_c 处将有 $n_{eff}^B = n_{eff}^{co}$,此时纤芯导模和波导B中模式的传播常数相等,纤芯能量将强烈耦合到波导B中,如图5插图(b)所示。由于液体折射率 n_a 的大小对 λ_c 的影响非常大^[10],因此可以通过观察 λ_c 的移动来判断液体折射率的微小变化。

图6是微流体通道B在液体折射率大于光纤基底折射率时共振波长与折射率的关系。可以发现基于定向耦合效应的折射率传感器有较好的线性度和灵敏度,在1.46~1.52的折射率范围灵敏度S最高可达28700 nm/RIU。

从以上讨论知道,通道B中基于定向耦合效应的液体折射率传感主要在 $n_a > n_{bg}$ 时起作用。而基于SPR效应的通道A折射率传感则可以在 $n_a < n_{bg}$ 时作为补偿,这样就可以有效增加折射率传感器的动态检测范围。值得注意的是,定向耦合引起的吸收峰相较SPR效应引起的吸收峰,除了吸收强度更大之外,定向耦合引起的

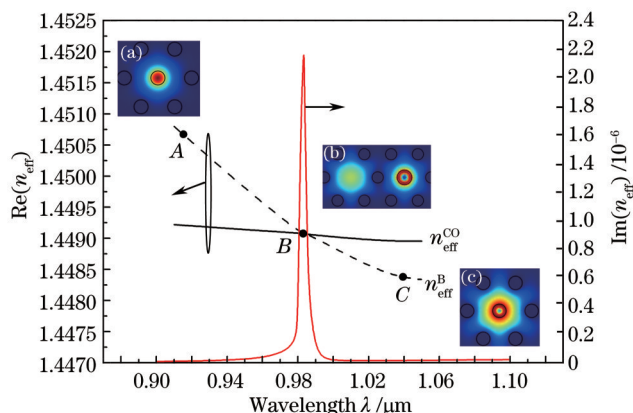


图5 $n_a=1.465$ 时,纤芯导模的色散特性(黑色实线)和损耗特性(红色实线)以及波导B的色散特性(黑色虚线)随波长的关系。

其中插图(a)、(c)分别为波导B在短波和长波处的模场分布;插图B为纤芯导模与波导模耦合时的模场分布

Fig.5 Dispersion (black solid line) and loss(red solid line) of core guided mode and dispersion of waveguide mode (black dashed line) as a function of wavelength when $n_a=1.465$. Insets (a) and (c) show the mode field distributions of waveguide mode B at short wavelengths and long wavelengths respectively; Insets (b) is corresponding to intensity distribution of the coupled mode

吸收峰更窄(谱宽 λ_{FWHM} 是SPR引起的吸收峰谱宽的几十分之一^{[14])}。

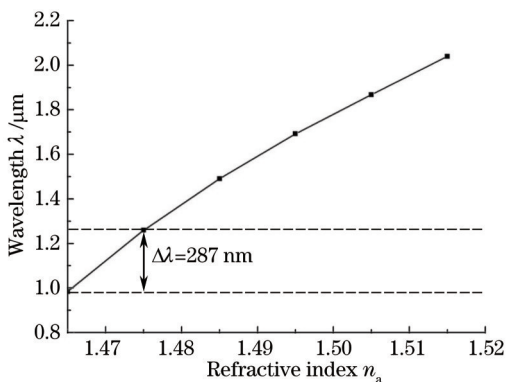


图6 $n_a>n_{bg}$ 时基于定向耦合效应的共振波长与液体折射率的关系

Fig.6 Curve of the response wavelength versus the refractive index of analyte based on directional resonance coupling when $n_a>n_{bg}$

3 结 论

设计了一种具有较大动态检测范围的光子晶体光纤折射率传感器。光子晶体光纤中水平方向和垂直方向上各有一个空气孔填充液体作为微流体通道,其中将垂直方向的空气孔镀上金纳米薄膜作为SPR传感通道,水平方向上的空气孔则直接作为定向耦合器通道。采用全矢量有限元法对该传感器进行数值模拟,结果显示:定向耦合引起的损耗吸收峰相较SPR引起的吸收峰吸收强度更强且吸收峰极窄。在低折射率区($n_a<n_{bg}$)即1.32~1.44,折射率灵敏度最高可达13500 nm/RIU,高折射率区($n_a>n_{bg}$)即1.46~1.52时折射率灵敏度可达28700 nm/RIU。由此可见,基于SPR和定向耦合机制的光子晶体光纤折射率传感器不仅有较大的动态检测范围,也具有较高的灵敏度,在浓度测量、环境检测、生化反应检测等领域具有较大的潜在应用价值。

参 考 文 献

- 1 An Jiali, Jin Yongxing, Sun Mingming, *et al.*. Refractive index sensor based on waist-enlarged tapers and singlemode-multimode-singlemode fiber structure [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(s1): s105013.
安佳丽, 金永兴, 孙明明, 等. 基于腰椎放大单模-多模-单模光纤结构的折射率传感器[J]. 中国激光, 2014, 41(s1): s105013.
- 2 Yu Shigang. Analysis on measurement of liquid refractive index [J]. Optical Instruments, 2007, 29(4): 1-6.
俞世钢. 液体折射率测定方法分析[J]. 光学仪器, 2007, 29(4): 1-6.
- 3 Bi Weihong, Shen Yuan, Liu Qiang, *et al.*. Refractive index sensing characteristics of a Mach-Zehnder interferometer based on

- directly photonic crystal fiber [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(5): 0505008
- 毕卫红, 申 远, 刘 强, 等. 直接熔融塌陷光子晶体光纤马赫曾德尔干涉仪的折射率传感特性[J]. 中国激光, 2014, 41(5): 0505008 .
- 4 Ji Yushen, Fu Guangwei, Fu Xinghu, *et al.*. Sensing characteristics of Mach-Zehnder interferometer based on the fused tapered photonic crystal fiber sensor [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(10): 1006005.
- 纪玉申, 付广伟, 付兴虎, 等. 熔融拉锥型光子晶体光纤马赫-曾德尔干涉仪传感特性[J]. 光学学报, 2013, 33(10): 1006005.
- 5 Huang Tubin, Shi Jielong, Pu Junhui, *et al.*. Long period gratings fabrication by arc discharge in photonic crystal fibers [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(6): 0605002.
- 黄图斌, 施解龙, 浦珺慧, 等. 电弧法刻写长周期光子晶体光纤光栅的研究[J]. 光学学报, 2014, 34(6): 0605002.
- 6 L Rindorf, J B Jensen. Photonic crystal fiber long period gratings for biochemical sensing [J]. Opt Express, 2006, 14(18): 8224-8231.
- 7 Jitendra Narayan Dash, Rajan Jha. SPR biosensor based on polymer PCF coated with conducting metal oxide [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2014, 26(6): 595-598.
- 8 Tan Zhixin, Li Xuejin, Chen Yuzhi, *et al.*. Improving the sensitivity of fiber surface plasmon resonance sensor by filling liquid in a hollow core photonic crystal fiber [J]. Plasmonics, 2014, 13(9): 167-173.
- 9 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.
- 10 D K C Wu, B T Kuhlmeier, B J Eggleton. Ultrasensitive photonic crystal fiber refractive index sensor [J]. Chin Opt Lett, 2009, 34(3): 322-324.
- 11 D K C Wu, K J Lee, V Pureur, *et al.*. Performance of refractive index sensors based on directional couplers in photonic crystal fibers [J]. J Lightwave Technol, 2013, 31(22): 3500-3510.
- 12 P J A Sazio, A Amezcua-Correa, C E Finlayson, *et al.*. Microstructured optical fibers as high-pressure microfluidic reactors [J]. Science, 2006, 311(5767): 1583-1586.
- 13 Chen Xiaolong, Luo Yunhan, Xu Mengyun, *et al.*. Refractive index and temperature sensing based on surface plasmon resonance fabricated on a side-polished fiber [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(2): 0206005.
- 陈小龙, 罗云瀚, 徐梦云, 等. 基于侧边抛磨光纤表面等离子体共振的折射率和温度传感研究[J]. 光学学报, 2014, 34(2): 0206005.
- 14 Zhou Chi, Zhang Yating, Xia Li. Photonic crystal fiber sensor based on hybrid mechanisms: Plasmonic and directional resonance coupling [J]. Opt Commun, 2012, 285(9): 2466-2471.

栏目编辑: 王晓琰