

准晶体结构光纤表面等离子体共振传感器特性研究

廖文英 范万德 李海鹏 隋佳男 曹学伟

Quasi-crystal photonic fiber surface plasmon resonance sensor

Liao Wen-Ying Fan Wan-De Li Hai-Peng Sui Jia-Nan Cao Xue-Wei

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 064213 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.064213

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.064213>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I6>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

一种基于微波谐振测量 Sagnac 效应的新方案

A new scheme of measuring Sagnac effect based on microwave resonant

物理学报.2015, 64(4): 044205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.044205>

基于辅助电介质层的棱镜表面等离子体共振效应研究

Study of prism surface plasmon resonance effect based on dielectric-aided layer

物理学报.2014, 63(3): 034207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.034207>

仅用一根局部微结构长周期光纤光栅实现温度与弯曲曲率的同时测量

Simultaneous measurement of temperature and bending-curvature using a single local micro-structured longperiod fiber grating

物理学报.2014, 63(2): 024206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.024206>

基于光纤气泡和纤芯失配的 Mach-Zehnder 干涉液体折射率传感器

In-fiber Mach-Zehnder interferometer based on fiber core etched air-bubble and core diameter mismatch for liquid refractive index sensing

物理学报.2013, 62(21): 214209 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.214209>

基于侧漏型光子晶体光纤高灵敏度宽线性范围弯曲传感器的研究

Curvature sensor based on side-leakage photonic crystal fiber with high sensitivity and broad linear measurement range

物理学报.2013, 62(19): 194209 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.194209>

准晶体结构光纤表面等离子体共振传感器特性研究*

廖文英 范万德[†] 李海鹏 隋佳男 曹学伟

(南开大学物理科学学院, 天津 300071)

(2014年8月2日收到; 2014年9月4日收到修改稿)

光纤表面等离子体共振传感器在高灵敏度传感和在线实时监测等领域具有重要意义. 设计了一种六重准晶体结构环形通道光纤表面等离子体共振传感器, 基于有限元法对该传感器的传感特性进行了数值模拟. 研究了光纤各结构参量对传感器特性的影响规律. 研究表明: 待测液折射率的有效监测范围为1.25—1.331, 最高灵敏度可达26400 nm·RIU⁻¹, 传感器具有损耗谱杂峰少、探测范围广、灵敏度高、设计灵活性高和光路可弯曲等特点, 在生化检测、公共安全、环境污染监测以及高灵敏度传感等领域具有广泛的应用前景.

关键词: 准晶体结构光纤, 表面等离子体共振, 传感器, 灵敏度

PACS: 42.81.Pa, 07.60.-j, 73.20.Mf, 42.82.Et

DOI: 10.7498/aps.64.064213

1 引言

随着军事、化学、医学、科研等领域对高灵敏度传感器的要求不断增加, 表面等离子体共振 (surface plasmon resonance, SPR) 以其对周围介质折射率变化的极高敏感度成为高灵敏度传感器领域的研究热点^[1,2]. 光纤表面等离子体共振传感器具有灵敏度高、响应时间短、抗电磁干扰、结构简单、电绝缘、携带方便、光路可弯曲等优点, 具有非常广泛的应用价值^[3,4].

光子晶体光纤具有众多的优良特性, 如色散可控、无截止单模传输、实现大模场面积、非线性特性等. 光子晶体光纤表面等离子体共振传感器以其灵活的结构设计, 成为高灵敏度传感器领域的研究热点. 2006年, Hassani 和 Skorobogatiy 等^[5]提出两种基于光子晶体光纤表面等离子体共振传感器设计构型, 在500—1300 nm波段内灵敏度分别为800 nm·RIU⁻¹和3000 nm·RIU⁻¹. 2008年, Hautakorpi 等^[6]在金属膜上覆盖一层辅助介电

层, 提出了一种三孔微结构光纤表面等离子体共振传感器, 最大灵敏度可达1000 nm·RIU⁻¹. 2011年, Bing 等^[7]人设计出一种基于类熊猫型光子晶体光纤表面等离子体共振传感器, 以熊猫眼空气孔作为待测液通道, 灵敏度达到2000 nm·RIU⁻¹.

准晶体结构^[8]在对称性上具有独特结构, 其格点不存在平移对称性, 但是长程有序排列, 具有五次甚至更高的旋转对称性. 准晶体具有光子带隙不依赖入射光方向、格点有序度降低、大模场面积、无须缺陷和无序即可产生局域态、损耗特性灵活可控等特点, 在光子光纤器件、局域态和光子带隙等领域具有非常大的应用前景^[9-12].

为了提高传感器的灵敏度和折射率监测范围, 本文提出一种六重准晶体结构环形通道的光纤表面等离子体共振传感器, 其基模损耗谱杂峰少、测量范围较大、灵敏度较高. 待测液折射率的有效监测范围是1.25—1.331, 最高灵敏度可达26400 nm·RIU⁻¹, 在生物化学传感、公共安全、环境污染监测等领域具有广泛的应用前景.

* 国家自然科学基金 (批准号: 11174154, 11074131) 和国家基础科学人才培养基金 (批准号: J1103208) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: wdfan@nankai.edu.cn

2 结构设计和基本理论

基于六重准晶体结构环形通道光纤表面等离子共振传感器如图1所示. 准晶体结构单元由相邻的三角形和正方形构成, 相邻空气孔的距离 Λ 相同, 如图1(a)所示. 准晶体结构环形通道光纤的表面等离子共振传感器以石英为基底, 最外层环形通道为待测液通道, 通道内壁上红色层为金属膜层. 纤芯区域的空气孔排列呈六重准晶体结构, 空气孔直径为 d , 中心引入缺陷, 使其保持单模传输条件, 芯内基模孔间距 $\Lambda = 0.72 \mu\text{m}$ 、孔径比 $d/\Lambda = 0.50$, 金属镀层为 20 nm 厚的镀金膜层, 待测液环形通道宽为 $1.8 \mu\text{m}$, 如图1(b)所示.

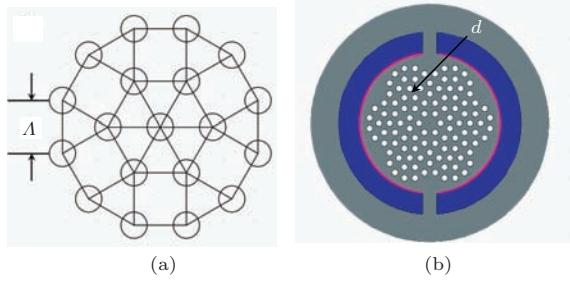


图1 (网刊彩色) 传感器结构示意图 (a) 准晶体结构单元; (b) 六重准晶体结构光纤表面等离子体共振传感器端面图

石英的折射率与入射波长相关, 用 Sellmeier 方程表示:

$$n_{\text{SiO}_2} = \left(1 + \sum_{i=1}^3 \frac{a_i \lambda^2}{\lambda^2 - b_i^2} \right)^{1/2}, \quad (1)$$

式中 a_i , b_i 为材料的折射率系数, λ 为自由空间波长. 金膜层折射率由修正的 Drude 模型决定:

$$n_{\text{Au}} = \left(\varepsilon_\infty - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + j\omega\omega_m} \right)^{1/2}, \quad (2)$$

式中 ε_∞ 是高频极限时金属的介电常量, ω_p 是电子的散射(或碰撞)频率, ω 为入射光频率, ω_m 为金属材料的等离子体频率.

当连续光波入射到平坦的金属/电介质交界面时, 金属表面的自由电子在电场分量的作用下形成纵向连续耦合振荡, 被“局域”在交界面处并可沿交界面传播的电磁模式, 称为表面等离子体激元. 表面等离子体共振波为横磁波, 电磁场沿着金属/介质交界面传播, 其能量在纵向呈指数衰减分布, 在交界表面处达到最大值, 该机理导致表面等离子体共振对金属表层介质的物理特性变化具有很高的

敏感性和动态响应性. 根据麦克斯韦方程组可将表面等离子体波的传播常数 k 表示为

$$k = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\varepsilon_m \varepsilon_s}{\varepsilon_m + \varepsilon_s}}, \quad (3)$$

其中, ω 为入射光频率; c 为真空中光速; ε_m , ε_s 分别为金属膜层和待测液的介电常量.

入射光与表面等离子体波的传播特点相同, 两者容易发生相互作用. 入射光光波波矢的水平分量 k_x 为

$$k_x = \frac{\omega}{c} \varepsilon_0 \sin \theta, \quad (4)$$

其中, θ 为入射角, ε_0 为纤芯介质的介电常量.

当表面等离子体波与入射光发生共振时: $k_x = k$, 假设此时的共振角度为 θ_{res} , 则有

$$\frac{\omega}{c} \varepsilon_0 \sin \theta_{\text{res}} = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\varepsilon_m \varepsilon_s}{\varepsilon_m + \varepsilon_s}}, \quad (5)$$

$$\sin \theta_{\text{res}} = f(\varepsilon_0(\lambda), \varepsilon_m(\lambda), \varepsilon_s(\lambda)). \quad (6)$$

由于准晶体结构光纤包层空气孔层数有限, 芯内模式的能量容易从纤芯泄露到包层造成光纤损耗, 称为限制性损耗. 通过有效折射率 n_{eff} 虚部可以得到芯内模式的限制性损耗 L_c (单位为 $\text{dB} \cdot \text{km}^{-1}$)

$$L_c = \frac{20}{\ln 10} \frac{2\pi}{\lambda} \text{Im}[n_{\text{eff}}] \times 10^{12}, \quad (7)$$

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

当利用通过监测连续入射光波的传输功率受到待测液的影响来评价传感器的灵敏度时, 灵敏度 S 的表达式为^[13](单位为 $\text{nm} \cdot \text{RIU}^{-1}$)

$$S = \frac{d\lambda_R}{dn_a}, \quad (8)$$

其中 n_a 为待测液通道中液体的折射率, λ_R 为共振峰对应的表面等离子体共振波长(单位为 nm), $d\lambda_R$ 和 dn_a 分别为共振波长的变化量和待测液的折射率变化量.

对于准晶体结构光纤表面等离子体共振传感器, 其传感原理如图2所示. 蓝色实线和蓝色虚线分别代表芯内基模和等离子体模的有效折射率实部 $\text{Re}[n_{\text{eff}}]$, 红色实线为芯内基模有效折射率的虚部 $\text{Im}[n_{\text{eff}}]$.

当处于短波长时, 芯内基模与等离子体模均约束在纤芯区域和金膜层通道中(图1(a), (b)), 当波长增大至接近相位匹配波长 c 时, 芯内基模与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, 芯内基模的部分能量耦合至金膜层中传

输, 芯内基模的限制性损耗急剧增大, 在相位匹配波长 c 处, 损耗谱出现共振峰, 此时模场分布如插图 1(c) 所示. 当待测液折射率发生改变时, 等离子体模的有效折射率会被影响, 即蓝色虚线发生偏移, 损耗谱的共振峰发生偏移, 可将金膜层表面临近物质的折射率的微小变化转换成可测量的共振峰的偏移, 实现高灵敏度传感.

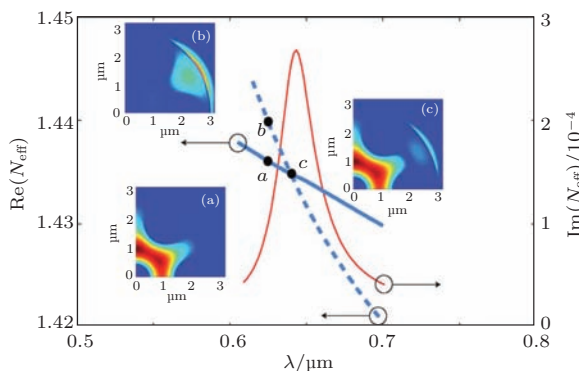


图2 (网刊彩色) 准晶体结构光纤表面等离子体共振传感器原理图 插图(a)和(b)分别为 a 处芯内基模和 b 等离子体模的模场分布, 插图(c)为芯内基模和等离子体模在相位匹配波长 c 处发生共振时的模场分布

由于纤芯的折射率和金属的复介电常量都与入射光波长和光纤结构有关, 所以表面等离子体共振效应与入射光波长、光纤结构参量以及折射率分布等因素相关. 通过对新型表面等离子体共振传感器进行合适的结构设计, 可以对共振角、共振波长以及灵敏度进行调节, 实现高灵敏度光纤传感器的设计.

3 传感器结构及特性研究

利用有限元法^[14]对准晶体结构光纤表面等离子体共振传感器传感特性进行研究, 基于离散逼近的思想, 对光纤端面进行离散区域化, 同时利用 Dirichlet 和 Neumann 边界条件对矢量波动方程进行本征值求解, 本征值为模式的有效折射率 n_{eff} , 通过有效折射率虚部可得到模式的限制性损耗, 进而研究准晶体结构光纤的表面等离子体共振传感器的传感特性.

准晶体结构光纤表面等离子体共振传感器芯内基模的损耗谱如图3所示, 入射光处于 800—1500 nm 波段, 待测液折射率 n_a 变化范围为 1.25—1.335. 当 $n_a < 1.325$ 时, 随着待测液折射率的增加, 共振峰对应的限制性损耗逐渐变大, 共振

峰红移. 当 $1.325 \leq n_a \leq 1.335$ 时, 随着待测液折射率的增加, 共振峰对应的限制性损耗逐渐变小, 共振波长不发生偏移. 当 $n_a \geq 1.335$ 时, 不发生表面等离子体共振现象. 待测液折射率在 1.25—1.315 以及 1.315—1.3325 范围内, 表面等离子体共振波长均随待测液折射率的变化呈线性增长, 如图4所示.

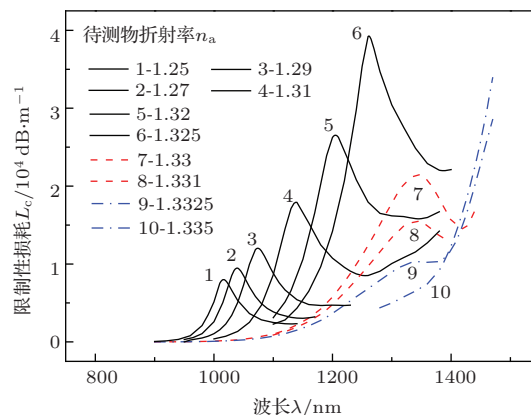


图3 (网刊彩色) 待测液折射率不同时芯内基模的损耗谱

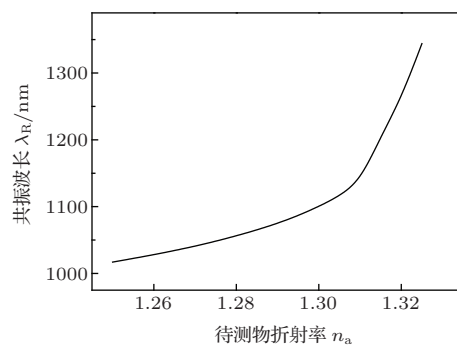


图4 表面等离子体共振波长随待测液折射率的变化

随着待测液折射率增加, 包层等效折射率变大, 光纤对芯内基模能量的约束能力减弱, 导致泄漏到包层的能量增多, 表面等离子体模式与芯内基模的耦合加强, 表面等离子体共振效应增强, 芯内基模的限制性损耗逐渐增大. 当待测液折射率增大, 等离子体模的等效折射率变大, 模式耦合原理图2中蓝色虚线向上偏移, 相位匹配波长向长波长方向移动, 表现为共振波长红移.

对于六重准晶体结构环形通道光纤表面等离子体共振传感器, 不同折射率待测液的共振波长、损耗谱共振峰峰值以及灵敏度等传感特性如表1所示. 待测液折射率在 1.33 附近时, 传感器的

表1 准晶体结构光纤表面等离子体共振传感器传感特性

待测液折射率 n_a	1.27	1.29	1.31	1.315	1.32	1.325	1.33	1.3325
共振波长 λ_R/nm	1050	1084	1143	1168	1199	1248	1319	1385
限制性损耗 $L_c/\text{dB}\cdot\text{m}^{-1}$	4156	5466	8461	9994	12308	16831	28703	32115
灵敏度 $S/\text{nm}\cdot\text{RIU}^{-1}$	1700	2950	5000	6200	9800	14200	26400	3200

灵敏度达到最大值 $26400 \text{ nm}\cdot\text{RIU}^{-1}$, 此时共振波长为 1319 nm , 该传感器能够使待测液折射率在分段范围内灵敏度保持稳定, 待测液的折射率可监测范围为 $1.25\text{—}1.331$.

对于准晶体结构光纤表面等离子体共振传感器, 其模式损耗谱和传感特性受光纤的折射率分布和模式耦合能力影响, 而光纤的折射率分布和耦合能力由金膜层厚度 l_{Au} 、孔间距 Λ 和孔径比 d/Λ 等结构参量共同决定.

固定孔间距 $\Lambda = 0.72 \mu\text{m}$, 孔径比 $d/\Lambda = 0.50$, 待测液的折射率 $n_a = 1.33$. 当金膜层厚度由 10 nm 变为 20 nm 时, 共振峰的损耗值变大, 共振波长红移. 当金膜层厚度为 25 nm 时, 对应的共振峰的损耗值变小, 共振程度达到最大值, 如图5所示. 这主要是因为金膜层厚度增加, 包层有效折射率增加, 纤芯与包层的折射率差减小, 光纤波导对芯内基模的约束能力减弱, 芯内基模的能量容易耦合至等离子体模式中, 共振效应增强, 芯内基模限制性损耗增加. 当金膜层厚度过大时, 由于倏逝波透射深度限制以及等离子体模的模场集中分布于靠近待测液通道的金膜层表面, 芯内基模与等离子体模的耦合难度增加, 导致表面等离子体共振效应急剧减弱, 使得共振峰的限制性损耗值减小. 金膜层厚度增加, 等离子体模有效折射率增加, 模式耦合原理图2中蓝色虚线向上偏移, 芯内基模与等离子体模发生耦合效应的相位匹配波长向长波长方向移动, 导致共振波长红移.

固定孔径比为 $d/\Lambda = 0.50$, 金膜层厚度 l_{Au} 为 20 nm , 待测液折射率 $n_a = 1.33$ 时, 孔间距 Λ 分别取值 $0.72, 0.77, 0.82 \mu\text{m}$. 随着孔间距的增大, 基模的共振峰的损耗不断增加, 损耗谱谱型亦出现较大变化, 如图6所示. 这主要是随着孔间距 Λ 的增大, 等离子体模的模场分布逐渐向纤芯包层区域扩散, 在靠近纤芯的金膜层表面形成更强的模式, 芯内基模与等离子体模的耦合效应增强, 芯内基模耦合至等离子体模的能量增加, 导致限制性损耗增加. 当孔间距较小时, 芯内基模有效折射率随孔间

距增加的增长幅度大于等离子体模, 原理图2中蓝色实线的上移幅度大于蓝色虚线, 相位匹配波长向短波长方向移动, 导致共振波长蓝移; 随着孔间距逐渐增大, 芯内基模有效折射率的增长幅度小于等离子体模, 原理图2中蓝色实线上移幅度小于蓝色虚线, 相位匹配波长向长波长方向移动, 导致共振波长红移.

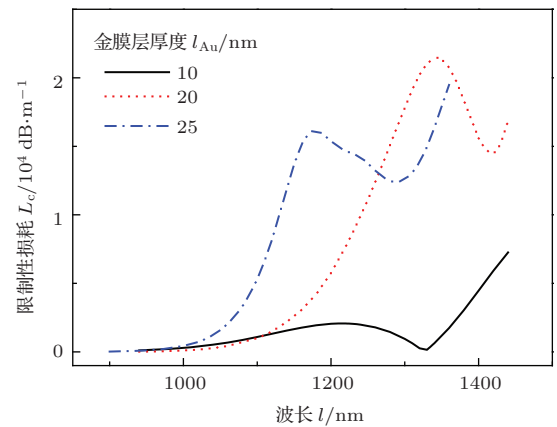


图5 (网刊彩色) 金膜层厚度 l_{Au} 不同时芯内基模的损耗谱

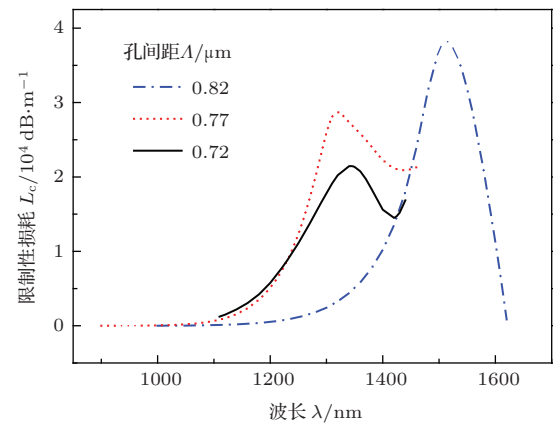


图6 (网刊彩色) 孔间距 Λ 不同时芯内基模的损耗谱

固定孔间距 $\Lambda = 0.77 \mu\text{m}$, 金膜层厚度 l_{Au} 为 20 nm , 待测液折射率 $n_a = 1.33$ 时, 在 $1000\text{—}1800 \text{ nm}$ 光波段内, 随着孔径比 d/Λ 的增大, 芯内基模的限制性损耗谱整体红移, 峰型发生变化, 出现杂峰, 如图7所示. 这主要是随着孔径

比 d/A 增大,包层有效折射率降低,包层与纤芯的折射率差增加,光纤波导对芯内模式的束缚能力增强,芯内基模的模场集中分布于纤芯区域,导致芯内基模能量耦合至等离子体模的难度增加,表面等离子体共振效应减弱,限制性损耗逐渐降低.芯内基模的有效折射率随着孔径比增大而减小,原理图2中的蓝色实线向下偏移,相位匹配波长向长波长方向移动,导致表面等离子体共振波长和整体损耗谱出现红移现象.

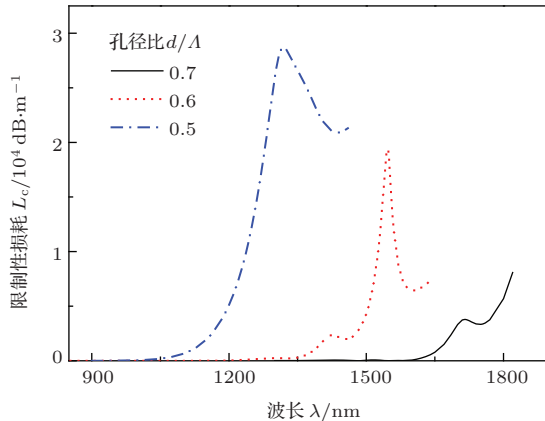


图7 (网刊彩色) 孔径比 d/A 不同时芯内基模的损耗谱

通过研究光纤结构参量对基模的损耗谱共振峰的影响规律发现,六重准晶体结构光纤表面等离子体共振传感器的光纤结构参量对损耗谱的共振峰、共振波长以及谱型影响较大.基于新型传感器中损耗谱共振峰对金膜层厚度变化敏感的传导机理,可对光力学治疗法中金属纳米浓度进行监测以及研究传感器金属表面金属纳米粒子的约束行为^[15,16].新型准晶体结构光纤表面等离子体共振传感器的结构和性能优化应综合考虑探测范围、灵敏度大小以及谱型整洁度、杂峰峰值量级是否会对监测峰造成干扰等因素.

4 结 论

提出了一种六重准晶体结构环形通道的光纤等离子体共振传感器,基于有限元法研究了金膜层

厚度、孔间距、孔径比等结构参量对光纤传感特性的影响.研究表明:该光纤具有模式损耗谱杂峰少、折射率测量范围大、灵敏度高和灵活可控性强以及光路可弯曲等特点,待测液折射率的有效监测范围为1.25—1.331,待测液有效折射率处于1.33附近时,表面等离子体共振波长为1319 nm,灵敏度可达26400 nm·RIU⁻¹,在生化检测、公共安全、环境污染监测以及高灵敏度传感等领域具有广泛的应用前景.

参考文献

- [1] Gupta B D, Sharma A K 2005 *Sens. Actuat. B* **107** 40
- [2] Zhao H J 2012 *Chin. Phys. B* **21** 087104
- [3] Jia Z X, Duan X, Lü T T, Guo Y N, Xue W R 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 057301 (in Chinese) [贾智鑫, 段欣, 吕婷婷, 郭亚楠, 薛文瑞 2011 物理学报 **60** 057301]
- [4] Feng L H, Zeng J, Liang D K, Zhang W G 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 124207 (in Chinese) [冯李航, 曾捷, 梁大开, 张为公 2013 物理学报 **62** 124207]
- [5] Hassani A, Skorobogatiy M 2007 *J. Opt. Soc. Am. B* **24** 1423
- [6] Hautakorpi M, Mattinen M, Ludvigsen H 2008 *Opt. Express* **16** 8427
- [7] Bing P B, Yao J Q, Huang X H 2011 *Laser Infrar.* **07** 016
- [8] Shechtman D, Blech I, Gratias D 1984 *Phys. Rev. Lett.* **53** 1951
- [9] Kim S, Kee C S, Lee J 2007 *Opt. Express* **15** 13221
- [10] Liao W Y, Fan W D, Li Y, Chen J, Bu F H, Li H P, Wang X Y, Huang D M 2013 *Acta Phys. Sin.* **63** 034206 (in Chinese) [廖文英, 范万德, 李园, 陈君, 卜凡华, 李海鹏, 王新亚, 黄鼎铭 2013 物理学报 **63** 034206]
- [11] Notomi M, Suzuki H, Tamamura T, Edagawa K 2004 *Phys. Rev. Lett.* **92** 123906
- [12] Rochstuhl C, Lederer F 2006 *New J. Phys.* **206** 233390
- [13] Zhou C, Zhang Y T, Li X, Liu D M 2012 *Opt. Commun.* **10** 1016
- [14] Grosjes T, Vial A, Barchiesi D 2005 *Opt. Express* **13** 8483
- [15] Cinteza L O, Ohulchanshyy T Y, Sahoo Y, Bergey E J, Pandey R K, Prasad P N 2006 *Mol. Pharmacol* **3** 415
- [16] Patkovsky S, Kabashin A, Meunier M 2005 *Opt. Mater.* **27** 1093

Quasi-crystal photonic fiber surface plasmon resonance sensor*

Liao Wen-Ying Fan Wan-De[†] Li Hai-Peng Sui Jia-Nan Cao Xue-Wei

(School of Physics, Nankai University, Tianjin 300071, China)

(Received 2 August 2014; revised manuscript received 4 September 2014)

Abstract

Fiber-optic surface plasmon resonance sensor (SPR) plays an important role in the fields of high sensitivity sensor and online real time monitor. We propose a novel six-fold symmetric photonic quasi-crystal fiber SPR sensor with two large semi circular channels. Its sensing properties and influence of fiber structure are simulated numerically by the finite element method. Numerical results demonstrate that its highest sensitivity can reach up to $26400 \text{ nm}\cdot\text{RIU}^{-1}$, and the measuring range is 1.25–1.331. The novel quasi-crystal fiber SPR sensor, which has characteristics of large measuring range, high sensitivity, mode loss spectrum with less interference peak, design and optical path flexibility, are used widely for biochemical detection, public safety, environmental pollution monitoring and high sensitivity sensor.

Keywords: photonic quasi-crystal fiber, surface plasmon resonance, sensor, sensitivity

PACS: 42.81.Pa, 07.60.-j, 73.20.Mf, 42.82.Et

DOI: [10.7498/aps.64.064213](https://doi.org/10.7498/aps.64.064213)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11174154, 11074131) and the Fund for Fostering Talents in Basic Science of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. J1103208).

[†] Corresponding author. E-mail: wdfan@nankai.edu.cn