

基于表面等离子体共振和定向耦合的D形光子晶体光纤折射率和温度传感器

施伟华 尤承杰 吴静

D-shaped photonic crystal fiber refractive index and temperature sensor based on surface plasmon resonance and directional coupling

Shi Wei-Hua You Cheng-Jie Wu Jing

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 224221 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.224221

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.224221>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I22>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

低差分模式时延少模光纤的有限元分析及设计

Finite element analysis and design of few mode fiber with low differential mode delay

物理学报.2015, 64(6): 064212 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.064212>

拉锥型啁啾光纤光栅滤波器的研究

Study on tapered chirped fiber grating filter

物理学报.2013, 62(21): 214213 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.214213>

V型高双折射光子晶体光纤超连续谱产生的实验研究

Supercontinuum experimental study of V-type photonic crystal fiber with high birefringence

物理学报.2013, 62(21): 214212 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.214212>

微结构芯大模场平顶光纤及其传输特性分析

Investigation on large-mode-area flat-topped optical fiber with microstructured core and its transmission characteristics

物理学报.2013, 62(17): 174211 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.174211>

微纳光纤端面反射特性的实验测量方法

Measurement of end-face reflection property of micro-nano fibers

物理学报.2013, 62(14): 144216 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.144216>

基于表面等离子体共振和定向耦合的D形光子晶体光纤折射率和温度传感器*

施伟华[†] 尤承杰 吴静

(南京邮电大学光电工程学院, 南京 210023)

(2015年4月21日收到; 2015年7月13日收到修改稿)

利用光子晶体光纤结构的灵活性和性能的优越性, 设计了一种基于D形光子晶体光纤的折射率和温度传感器. 在D形光子晶体光纤表面抛磨并镀上金纳米薄膜, 作为表面等离子体共振传感通道用来测量液体折射率; 在包层的一个空气孔中填充温敏液体甲苯, 作为定向耦合通道实现对温度的测量. 进一步的数值计算发现, 基于定向耦合效应的温度传感和基于表面等离子体共振的折射率传感相互独立, D形光子晶体光纤同时进行折射率和温度传感检测. 在各向异性的完美匹配层边界条件下利用全矢量有限元法对该传感器特性进行了数值研究, 发现D形光子晶体光纤的空气孔直径决定了定向耦合吸收峰的中心波长和温度传感的灵敏度, 金薄膜的厚度和D形结构的抛磨深度仅影响表面等离子体共振峰的相对强度. 结果表明: 该传感器在 $-10\sim 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内具有 $11.6\text{ nm}/^{\circ}\text{C}$ 的温度灵敏度, 在 $1.34\sim 1.44$ 折射率范围内折射率灵敏度最高可达 $26000\text{ nm}/\text{RIU}$.

关键词: 光子晶体光纤传感器, 表面等离子体共振, 定向耦合, 双参量

PACS: 42.81.-i, 42.81.Qb, 42.81.Pa, 78.20.Ci

DOI: 10.7498/aps.64.224221

1 引言

折射率作为物质的基本属性, 在水质监测、浓度测量、食品质量控制和工业生产等方面有众多的应用^[1]. 而对折射率的测量容易受到温度的影响, 因此实现折射率和温度的同时传感就不可避免. 目前, 研究折射率和温度测量的方法较多, 例如使用光纤法布里-珀罗结构^[2]的方法或光子晶体光纤 (photonic crystal fiber, PCF) 模间干涉^[3]的方法实现对折射率的检测; 使用保偏PCF的高双折射率效应^[4]或布拉格光栅的方法^[5]实现对温度的检测; 使用级联的长周期光栅^[6]、基于布拉格光栅^[7]的马赫-曾德尔干涉仪方案、基于保偏PCF的法布里-珀罗/迈克耳孙混合干涉仪方案^[8]以及将长周期光纤光栅与液体填充的PCF级联的方法等^[9]实现折射率和温度的同时测量.

为提高折射率和温度传感器的灵敏度并简化其结构, 本文提出了一种填充温敏液体的镀膜D形PCF传感结构, 利用表面等离子体共振 (surface plasmon resonance, SPR) 效应和定向耦合效应分别实现对液体折射率和环境温度的检测, 不仅可以实现折射率和温度的同时传感, 而且简化了传感结构并提高了检测灵敏度.

2 几何模型

基于SPR和定向耦合的D形PCF传感结构剖面如图1所示, 该结构通过平整抛磨掉PCF侧边的部分包层而构成, 其形状与大写英文字母D相似, 因此称为D形PCF. 其中空气孔间距 $\Lambda = 8\text{ }\mu\text{m}$, 空气孔直径 $d = 0.42\Lambda$, 光纤基底为石英玻璃, 其折射率可根据Sellmeier方程算出. 抛磨平面距纤芯中心垂直距离, 即抛磨深度 $d_1 = 11\text{ }\mu\text{m}$, 在抛磨平面

* 国家自然科学基金 (批准号: 61275067) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: njupt_shiwh@126.com

上镀一层厚度 $t = 40$ nm 的金纳米薄膜, 其折射率由 Drude 模型^[10] 给出, 金膜上方有待测的液体作为 SPR 折射率传感通道. 在空气孔 A 中填充折射率高于光纤基底的高折射率温敏液体甲苯, 作为温度传感通道.

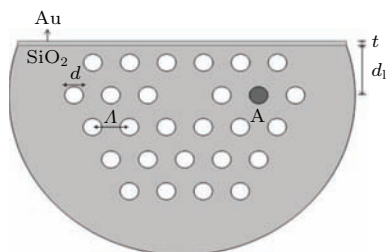


图 1 D 形 PCF 传感结构剖面图

Fig. 1. Cross section of the D-shaped PCF based sensor.

图 1 中, 深灰区域 A 空气孔中填充温敏液体甲苯, 由于其折射率高于光纤基底折射率, 通道 A 形成另一个高折射率的波导纤芯, 在特定波长下纤芯会与波导 A 发生定向耦合, 表现为狭窄的损耗峰. 由于定向耦合损耗峰位置与通道 A 中液体折射率值相关^[11], 而在一定波长下的温敏液体甲苯, 其折射率又受温度影响. 因此可以通过测量损耗峰值位置的移动来间接测量温度的变化.

甲苯的折射率可以由 Sellmeier 方程^[12] 和折射率温度线性关系得到

$$n(\lambda) = 1.474775 + 6990.31/\lambda^2 + 2.1776 \times 10^8/\lambda^4 - \alpha(T - 20.15),$$

其中, λ 为入射波长, T 为环境温度, 单位为 $^{\circ}\text{C}$. 甲苯温敏系数 $\alpha = 5.273 \times 10^{-4}/^{\circ}\text{C}$. 由于石英的温敏系数^[13] 比甲苯小两个量级, 由此可以近似认为其折射率不受温度影响. 石英^[14] 和甲苯膨胀系数^[15] 分别为 $5.5 \times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$, $1.1 \times 10^{-3}/^{\circ}\text{C}$. 经仿真计算, 甲苯膨胀带来的压力对 PCF 折射率分布的影响可忽略.

3 理论模型与数值模拟

使用 COMSOL Multiphysics 有限元软件配合各向异性的完美匹配 (PML) 层边界条件对该 D 形 PCF 的传感特性进行数值模拟. 图 2 为常温 20°C 下, 金纳米薄膜表面待测液体折射率为 1.41 时 D 形 PCF 基于 SPR 和定向耦合效应的传感特性曲线. 图中虚线 B 和虚线 C 分别表示激发的等离子体模

和波导 A 中模式的有效折射率实部 $\text{Re}(n_{\text{eff}})$, 实线 A 和实线 D 则分别表示纤芯导模有效折射率的实部 $\text{Re}(n_{\text{eff}})$ 和虚部 $\text{Im}(n_{\text{eff}})$ 随波长的变化. 可以发现当纤芯导模和等离子体模满足相位匹配条件即有效折射率实部相等时, 将发生 SPR 效应, 此时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, 如图 2 实线 D 的峰值 peak 1 所示. 波峰 peak 2 是填充甲苯的波导 A 与纤芯发生定向耦合引起的吸收峰, 当纤芯导模和波导 A 中模式相匹配时, 纤芯中的能量会强烈地耦合到波导 A 中, 表现为狭窄的损耗峰, 由于甲苯液体本身的光吸收损耗远小于损耗峰值, 可忽略其对损耗峰的影响. 此外, 由图 2 可知, 相较于 SPR 效应引起的吸收峰 peak 1, 定向耦合引起的吸收峰 peak 2 不仅吸收强度更大且波峰更窄. 据此我们可以很好地区分这两种传感机理, 通过组合 SPR 效应和定向耦合效应实现对折射率和温度的同时传感.

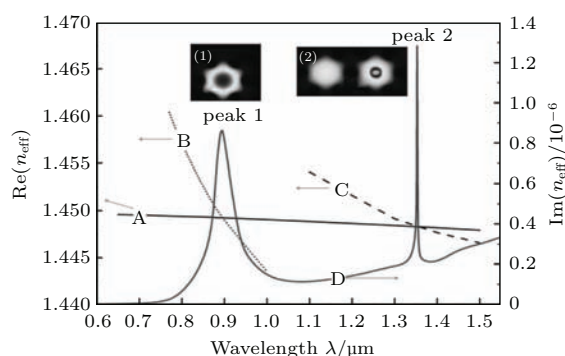


图 2 $T = 20^{\circ}\text{C}$, $n_a = 1.41$ 时, 纤芯导模的色散特性 (实线 A) 和损耗特性 (实线 D) 以及等离子体模 (虚线 B) 和波导 A (虚线 C) 的色散特性随波长的变化. 其中内插图 (1), (2) 为峰值 1 和峰值 2 的模场分布图

Fig. 2. Dispersion (line A), loss (line D) of core guide mode and dispersion of the plasmonic mode (dashed line B), waveguide (dashed line C) as a function of wavelength when $T = 20^{\circ}\text{C}$, $n_a = 1.41$. Insets (1), (2) show the mode field distributions for peak 1 and peak 2.

如图 3(a) 所示, 当温度为 20°C 时, 基于 SPR 效应的共振曲线 peak 1 会随着待测液体折射率的增大而向长波方向移动, 而基于定向耦合效应的耦合峰 peak 2 位置不变, 这是因为金膜附近液体折射率的改变会影响激发的表面等离子体波的有效折射率. 而当液体折射率不变, 仅改变温度时可以发现: SPR 峰位置不变, 而基于定向耦合的 peak 2 位置会随着温度的增加向短波方向移动, 如图 3(b) 所示. 这是因为温度的改变会影响甲苯的折射率,

从而定向耦合波导模式的有效折射率. 综上所述可知, 基于SPR的折射率传感不受温度影响, 基于定向耦合的温度传感不受待测液体折射率的影响, 即这两种传感机理可以相互独立工作.

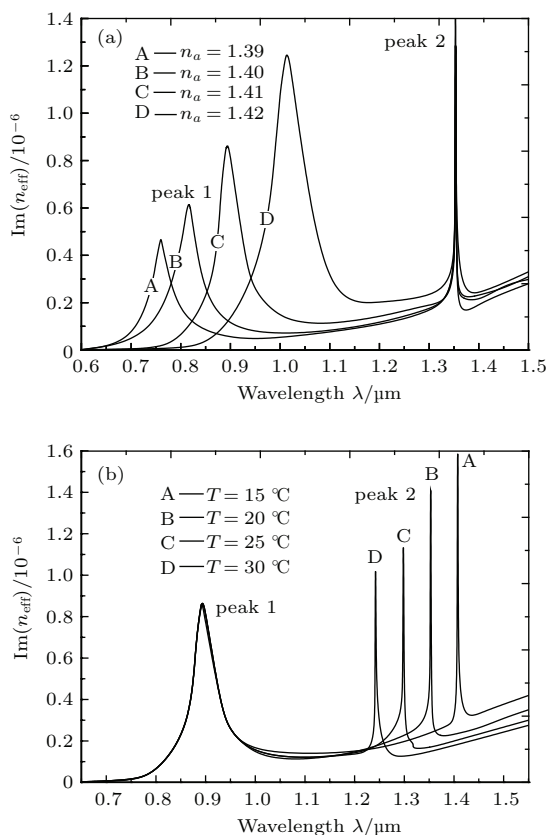


图3 D-PCF的纤芯损耗特性 (a) 不同液体折射率 ($T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$); (b) 不同温度 ($n_a = 1.41$)

Fig. 3. Loss of core guide mode in D-PCF: (a) Different refractive indexes of analyte ($T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$); (b) different temperature ($n_a = 1.41$).

对于D形PCF折射率和温度传感器, 其定向耦合波长与温度的关系以及SPR波长随折射率的变化如图4所示. 可以发现在 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ — $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内, 基于定向耦合的温度传感具有较好的线性度和灵敏度, 其温度与耦合波长满足: $\lambda = -11.6T + 1561$ (λ 单位, nm; T 单位, $^{\circ}\text{C}$), 即温度灵敏度为 $11.6\text{ nm}/^{\circ}\text{C}$. 而基于SPR的折射率传感在 $1.34\text{—}1.44$ 折射率范围内灵敏度最大可达 $S = \partial\lambda/\partial n_a = 26000\text{ nm}/\text{RIU}$. 其中内插图为D-PCF传感结构在温度传感曲线与折射率传感曲线交点A处的芯模损耗, 由此可知, 虽然温度传感与折射率传感的共振波长值有重叠部分, 但由于定向耦合的耦合峰相较SPR的共振峰更加尖锐, 且峰值更大, 所以并不影响这两种传感机理的辨别.

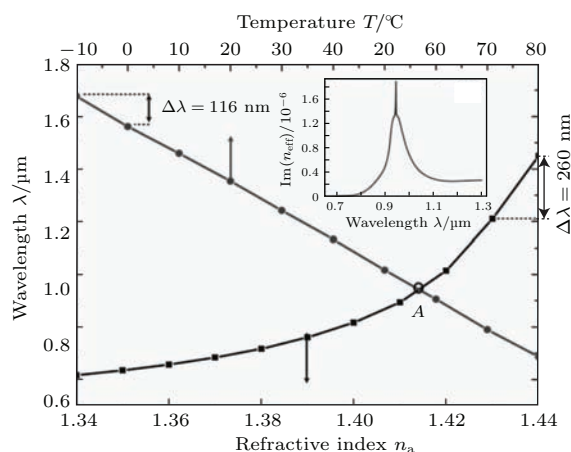


图4 D-PCF折射率和温度传感的灵敏度

Fig. 4. D-PCF refractive index and temperature sensing sensitivity.

4 D-PCF参量对传感特性的影响

对基于SPR和定向耦合的折射率和温度传感器, 其传输损耗谱和传感特性会受D-PCF的折射率分布以及模式耦合能力的影响, 而D-PCF中主要影响折射率分布和模式耦合能力的参量包括金膜厚度 t 、光纤抛磨深度 d_1 和空气孔直径 d .

当 $d = 0.42\Lambda$ ($\Lambda = 8\text{ }\mu\text{m}$), $d_1 = 11\text{ }\mu\text{m}$, $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $n_a = 1.41$ 时, 随着金膜厚度增加, SPR峰红移, 共振峰损耗减小且整个吸收峰的半高全宽值变大. 图5(b)为SPR波长随待测液体折射率的变化, 可以发现当金膜厚度分别为35, 40, 45和50 nm时, 四条曲线基本平行, 曲线的斜率代表折射率传感灵敏度, 不同金膜厚度下该D-PCF关于折射率传感的灵敏度相差比较小, 所以金膜厚度的改变除了对SPR峰尖锐程度、峰值位置 and 高度有影响外, 对折射率传感的灵敏度影响不大.

图6为不同抛磨深度 d_1 下基于SPR效应的芯模损耗曲线, 可以发现当温度为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, 待测液体折射率为1.41时, 其他参量不变, 抛磨深度 d_1 值的改变对SPR波长基本没有影响, 但随着 d_1 值的逐渐变大, SPR峰吸收强度变弱且半高全宽变宽. 这是因为抛磨深度 d_1 的增加使到达金属表面的纤芯倏逝波能量减小, 产生的SPR效应变弱. 但抛磨深度 d_1 的增加不会改变金属表面等离子体模的色散曲线, 对纤芯有效折射率的影响也微乎其微, 所以等离子体模和芯模的相位匹配点不会发生漂移.

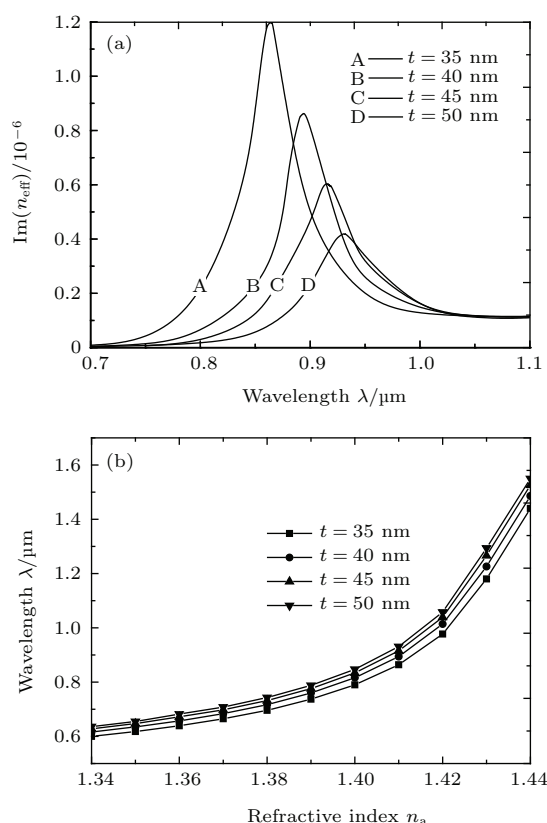


图5 不同金膜厚度下, (a) 基于SPR效应的PCF芯模损耗曲线; (b) 共振波长随液体折射率的变化

Fig. 5. (a) Curve of loss in PCF based on SPR and (b) curve of the response wavelength versus the refractive index of analyte at different gold layer thicknesses.

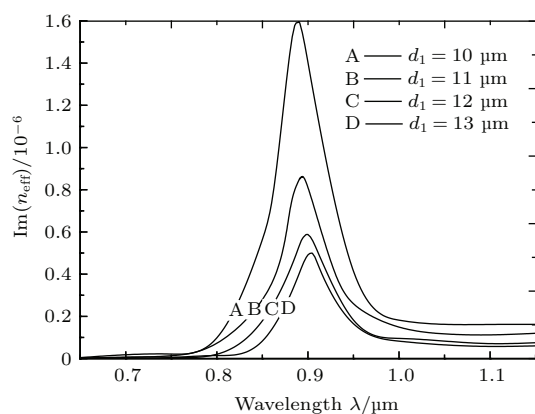


图6 不同抛磨深度 d_1 下基于SPR效应的芯模损耗

Fig. 6. Loss of core guide mode based on SPR at different polishing depth d_1 values.

图7是在固定D-PCF其他参量的情况下, 不同空气孔直径下D-PCF传感结构的损耗. 如图7(a)所示, D-PCF导模的损耗随着空气孔直径的增加而减小, 这是因为空气孔尺寸的增大将导致包层的等效折射率减小, 从而纤芯与包层的折射率差增加, 纤芯区域对能量的限制能力变强, 最终降低了纤芯导模的损耗. 此外可以发现, 空气孔直径

的改变对SPR波长位置影响不大, 而定向耦合的耦合波长随着空气孔直径的增加向长波方向移动, 这是因为空气孔直径的改变对D-PCF纤芯模式的色散曲线影响很小, 因此基本不影响芯模与SPR的相位匹配条件. 而填充高折射率甲苯液体的空气孔A的增大会使波导A中模式的有效折射率实部变大, 从而导致芯模与波导模的波矢匹配点向长波方向移动. 由此, 可以根据需要来调整空气孔直径的大小从而改变发生定向耦合时的波长位置.

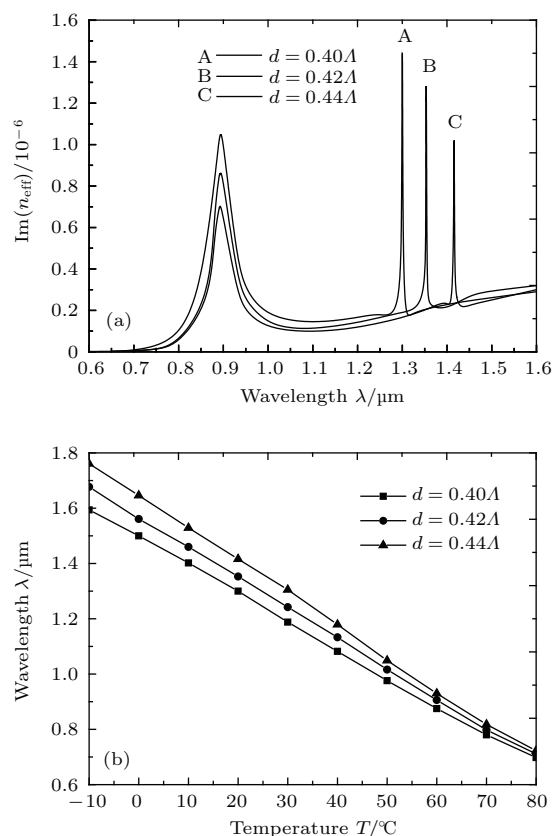


图7 不同空气孔直径下, (a) D-PCF的损耗曲线以及 (b) 温度与耦合波长的关系 ($\Lambda = 8 \mu\text{m}$)

Fig. 7. (a) Curve of loss in D-PCF and (b) curve of the temperature versus the coupling wavelength ($\Lambda = 8 \mu\text{m}$) at different diameters of air hole.

图7(b)为不同空气孔直径下, 基于定向耦合效应的D-PCF温度传感的耦合波长与温度的关系, 曲线的斜率代表温度传感灵敏度, 当空气孔直径分别为 0.40Λ , 0.42Λ 和 0.44Λ ($\Lambda = 8 \mu\text{m}$) 时, 耦合波长与温度基本呈线性关系, 灵敏度分别为 9.96 , 11.6 和 $12.4 \text{ nm}/^\circ\text{C}$. 可以发现, 随着空气孔直径的增大, D-PCF的温度传感灵敏度变高. 然而由图7(a)可知, 空气孔直径越小, SPR峰越尖锐, 发生的定性耦合和SPR效应更明显, 所以当空气孔直径越小时测量获得的信噪比越高. 综合上述考虑, 我们在结构设计时选取的空气孔直径为 0.42Λ .

5 结 论

基于 SPR 和定性耦合两种传感机理, 提出了一种 D 形 PCF 折射率和温度双参量传感器. 该传感单元通过抛磨掉 PCF 的部分包层并在抛磨平面镀上金膜来实现对待测液体的折射率传感; PCF 包层中一个空气孔中通过填充高折射率温敏液体甲苯形成定向耦合通道, 从而实现对环境温度的检测. 该传感器在 $-10\sim 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内具有 $11.6\text{ nm}/^{\circ}\text{C}$ 的温度灵敏度, 在 $1.34\sim 1.44$ 折射率范围内折射率灵敏度最高可达 $26000\text{ nm}/\text{RIU}$. 该 D 形 PCF 双参量传感器不仅具有简单的传感结构, 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] Liang R B, Sun Q Z, Wo J H, Liu D M 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 104221 (in Chinese) [梁瑞冰, 孙琪真, 沃江海, 刘德明 2011 物理学报 **60** 104221]
- [2] Wang T T, Ge Y X, Chang J H, Ke W, Wang M 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 240701 (in Chinese) [王婷婷, 葛益娴, 常建华, 柯炜 2014 物理学报 **63** 240701]
- [3] Hou J P, Ning T, Gai S L, Li P, Hao J P, Zhao J L 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 4732 (in Chinese) [侯建平, 宁韬, 盖双龙, 李鹏, 郝建革, 赵建林 2010 物理学报 **59** 4732]
- [4] Zhao H, Chen M, Li G 2012 *Chin. Phys. B* **21** 068404
- [5] Jin J, Lin S, Song N F 2012 *Chin. Phys. B* **21** 064221
- [6] Zhang A P, Shao L Y, Ding J F, Sailing H 2005 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **17** 2397
- [7] Liao C R, Wang Y, Wang D N, Yang M W 2010 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **22** 1686
- [8] Hao S, Jing Z, R Q Z, Feng D Y 2013 *Sen. J.* **13** 2039
- [9] Yin G, Wang Y, Liao C, Sun B, Liu Y, Liu S, Wang Q, Yang K, Tang J, Zhong X 2015 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **27** 375
- [10] Chen X L, Luo Y H, Xu M Y, Zhang Y L, He Y H, Tang J Y, Yu J H, Zhang J, Chen Z 2014 *Acta Opt. Sin.* **34** 0206005 (in Chinese) [陈小龙, 罗云瀚, 徐梦云, 张怡龙, 何永红, 唐洁媛, 余健辉, 张军, 陈哲 2014 光学学报 **34** 0206005]
- [11] Shi W H, Wu J 2015 *Acta Opt. Sin.* **35** 0206002 (in Chinese) [施伟华, 吴静 2015 光学学报 **35** 0206002]
- [12] Anna S 2008 *J. Appl. Phys.* **94** 6167
- [13] Yu Y Q, Li X J, Hong X M, Deng Y L, Song K Y, Geng Y F, Wei H F, Tong W J 2010 *Opt. Express* **18** 15383
- [14] Liu G Q, Ma L X, Liu J 2002 *Data Handbook of Material Properties in Chemistry and Chemical Engineering (Vol. Inorganic)* (Beijing: Chemical Industry Press) p275 (in Chinese) [刘光启, 马连湘, 刘杰 2002 化学化工物性数据手册 (无机卷) (北京: 化学工业出版社) 第 275 页]
- [15] Liu G Q, Ma L X, Liu J 2002 *Data Handbook of Material Properties in Chemistry and Chemical Engineering (Vol. Organic)* (Beijing: Chemical Industry Press) p283 (in Chinese) [刘光启, 马连湘, 刘杰 2002 化学化工物性数据手册 (有机卷) (北京: 化学工业出版社) 第 283 页]

D-shaped photonic crystal fiber refractive index and temperature sensor based on surface plasmon resonance and directional coupling*

Shi Wei-Hua[†] You Cheng-Jie Wu Jing

(School of Optoelectronic Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

(Received 21 April 2015; revised manuscript received 13 July 2015)

Abstract

The photonic crystal fiber has received the widespread attention in the sensing field because of its flexible structure and unique features. A refractive index and temperature sensor based on the D-shaped photonic crystal fiber is designed and analyzed. In the side section of the D-shaped photonic crystal fiber, a coat with a gold film is used as a surface plasmon resonance (SPR) sensing channel for measuring the refractive index of liquid determinand. Temperature sensitive liquid-toluene is filled in an air hole A as a directional coupling sensing channel to realize the temperature measurement. When the SPR mode and guided mode satisfy the phase matching condition, the SPR effect is produced. Most of the core energy is transferred to the metal film layer in the surface, and then the loss of guided mode in the fiber core will grow. Therefore, the shift of the SPR peak position can be used to measure the refractive index of the determinand indirectly. When the wave mode in the thermosensitive liquid-toluene can achieve phase matching with the guided mode, the directional coupling effect occurs, and then the wavelength of the absorption peak position can be used to measure the change of temperature indirectly. Based on further numerical simulation, the peak position of directional coupling is not changed by the refractive index of the determinand, and the SPR peak position is not shifted by the temperature change either. As these two sensing mechanisms can be distinguished easily, the refractive index and temperature sensing are simultaneously realized. The characteristics of the sensor are simulated numerically by using a full vector finite element method under the boundary condition of anisotropic perfectly matched layer. From the analysis of the D-shaped photonic crystal fiber structure parameters, we find that the diameter d of air hole plays an important role in the directional coupling absorption peak position and temperature sensitivity. For the SPR peak, its position is only affected by the thickness t of gold film, and its relative intensity is changed with the diameter d of air hole and grinding depth d_1 . The results show that when the temperature ranges from $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $80\text{ }^{\circ}\text{C}$, the temperature sensitivity reaches $11.6\text{ nm}/^{\circ}\text{C}$, and when the refractive index is in a range from 1.32 to 1.44, its sensitivity reaches $26000\text{ nm}/\text{RIU}$.

Keywords: photonic crystal fiber sensor, surface plasmon resonance, directional coupling, dual-parameter

PACS: 42.81.-i, 42.81.Qb, 42.81.Pa, 78.20.Ci

DOI: 10.7498/aps.64.224221

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61275067).

[†] Corresponding author. E-mail: njupt_shiwh@126.com