

基于定向耦合的光子晶体光纤高灵敏度磁场和温度传感器

施伟华 尤承杰

南京邮电大学光电工程学院, 江苏 南京 210023

摘要 设计了一种新型光子晶体光纤(PCF)磁场和温度传感结构。在光子晶体光纤包层的一个空气孔中填充磁流体,形成定向耦合结构,检测结构的磁场和温度变化。利用全矢量有限元法(FEM)对该传感器特性进行了仿真研究。结果表明,该传感结构可以实现磁场范围为100~250 Oe(1 Oe=79.58 A/m),温度范围为10~60 °C的检测,在该范围内磁场和温度的灵敏度最高可达1.10 nm/Oe和-3.86 nm/°C。

关键词 光纤光学; 光子晶体光纤传感器; 定向耦合; 磁场; 温度

中图分类号 TN253 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.0706004

High Sensitivity Magnetic Field and Temperature Sensor of Photonic Crystal Fiber Based on Directional Coupling

Shi Weihua You Chengjie

*School of Optoelectronic Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications,
Nanjing, Jiangsu 210023, China*

Abstract A high sensitivity magnetic field and temperature sensing structure based on photonic crystal fiber(PCF) is designed. Magnetic liquid is filled in an air hole of PCF cladding to form the directional coupling structure. The magnetic field and temperature variations of the structure are measured. The characteristics of the sensor are studied simulatively by using a full vector finite element method (FEM). The results show that the sensing structure can realize measurement within the magnetic field range of 100~250 Oe(1 Oe=79.58 A/m) and the temperature range of 10~60 °C. The magnetic field and temperature sensitivities can reach 1.10 nm/Oe and -3.86 nm/°C within the range.

Key words fiber optics; photonic crystal fiber sensor; directional coupling; magnetic field; temperature

OCIS codes 060.2370; 060.5295

1 引 言

磁场、温度传感器涉及光学、电磁学和微电子学等多个学科,目前被广泛应用于探测采集、环境监测等多个领域。在研究初期,光纤磁场传感器是利用光纤光栅的法拉第效应^[1]来测量磁场强度,但法拉第效应很弱并且解调相对复杂。因此较为常见的测量磁场的传感方式是利用干涉效应,诸如法布里-珀罗(F-P)干涉^[2]和马赫-曾德尔(M-Z)干涉^[3]等,然而这些方式易受外界环境、光源波动等因素的影响。近年来光子晶体光纤(PCF)在传感领域被广泛研究^[4-6],在PCF填充磁流体,通过测量磁流体的磁光效应可以间接实现待测环境、物体的磁场、温度等多种信息的检测,磁流体作为磁光传感器中的敏感材料,在外加磁场作用下,具有折射率可控的特性、独特的磁光效应、较好的温敏特性,因此具有良好的传感特性,研究人员已尝试将磁流体填充在PCF中,进行磁场、温度传感的研究。2011年,Miao等^[7]在PCF中填充磁流体后实现了温度传感测量,其灵敏度达0.045 dB/°C;2012年,Zhao等^[8]利用F-P干涉在空心PCF中实现了磁场传感,其灵敏度达33 pm/Oe(1 Oe=79.58 A/m);2014年,Zhao等^[9]在PCF中填充磁流体后通过检测传输损耗来实

收稿日期: 2016-02-29; 收到修改稿日期: 2016-03-28

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,硕士生导师,主要从事光通信方面的研究。E-mail: njupt_shiwh@126.com

现磁场和温度的检测,其灵敏度分别达到 0.042 dB/Oe 和 0.167 dB/°C;同年 Li 等^[10]将磁流体填充到双芯 PCF 的 2 个空气孔中,通过检测共振波长的变化从而得出磁场的改变,结果表明该传感方式的磁场灵敏度可达 4.8 pm/Oe;2015 年,Zhao 等^[11]在锥形 PCF 中涂敷磁流体,得到的磁场灵敏度达 16.04 pm/Oe。总体来看,PCF 温度传感的研究工作主要是基于在 PCF 的空气孔中注满磁流体,检测机制主要为光强损耗检测和干涉频谱波长检测。然而,光强损耗检测影响因素多,相对精度较高的干涉频谱检测则存在设备复杂等问题。本文提出了一种基于定向耦合效应的光子晶体光纤磁场、温度传感方案,利用磁流体的磁光效应以及定向耦合效应,有效地提高了检测精度和传感灵敏度,并通过结构参数优化进一步实现高灵敏度传感。

2 磁流体磁光效应和数值计算方法

当在 PCF 空气孔 A 中填充高折射率液体(折射率大于光纤基底)后,形成一个高折射率的波导纤芯 A,整个光纤形成一个定向耦合器^[12-13]。

基于磁流体的磁光效应^[14],其折射率与磁流体中磁性粒子的分布状态密切相关。影响磁流体中磁性粒子分布的因素主要有:与温度密切相关的粒子的布朗运动、粒子间的磁偶极相互作用、外加磁场、光捕获等。Chen 等^[15]用朗之万函数来描述折射率与温度和外磁场的关系:

$$n_{MF}(H, T) = (n_s - n_o) \left[\cosh\left(\alpha \frac{H - H_{cn}}{T}\right) - \frac{T}{H - H_{cn}} \right] + n_o, \quad (1)$$

式中 n_o 为临界磁场时的折射率, n_s 为饱和磁场时的折射率, H_{cn} 为临界磁场,其中 $H > H_{cn}$, T 为热力学温度, α 为拟合参数。选取 Fe_3O_4 作为磁介质,此时磁流体的温敏系数^[16]为 $-2.4 \times 10^{-4} K^{-1}$,而二氧化硅的温敏系数^[17]为 $8.6 \times 10^{-6} K^{-1}$,比磁流体的温敏系数小 2 个数量级,因此温度引起的光纤基底折射率变化可以忽略不计。

根据磁流体折射率可控的特性,结合本文设定的磁流体特性,当外部磁场强度低于 80 Oe 时,磁流体折射率为 1.462;当磁场强度高于 80 Oe 时,磁流体折射率开始变化;而当磁场强度高于 300 Oe 时,折射率达到饱和值 1.469,此后折射率几乎不再变化^[15]。因此在仿真计算时选取外界磁场强度在 100~250 Oe 范围内,温度在 10~60 °C 范围内,此时磁流体的有效折射率的变化范围为 1.4624~1.4684,其有效折射率高于基底材料二氧化硅的有效折射率。

当空气孔 A 中填充磁流体后,由于磁流体的折射率大于光纤基底,并且随外界磁场、温度的改变而变化,因此当纤芯导模和波导 A 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 A 中,测量结果表现为狭窄的损耗峰,其对应的共振波长为 λ_r ^[18]。由于磁流体折射率的变化对 λ_r 的影响非常大,因此可以通过观察 λ_r 的移动来判断磁流体折射率的微小变化,从而检测外界磁场或温度的变化。

本文采用全矢量有限元法(FEM)对基于定向耦合的光子晶体光纤传感器进行数值模拟,在各向异性的完美匹配层(PML)边界条件下,在复数域对模场的有效折射率进行求解。

3 基于磁流体的传感特性分析

3.1 定向耦合传感特性

基于定向耦合的 PCF 传感器结构如图 1 所示。均匀六边形包层空气孔间距 $\Lambda = 8 \mu m$,空气孔占空比 $d/\Lambda = 0.4$ 。空气孔 A 为磁流体通道,光纤基底为石英玻璃,其折射率可根据 Sellmeier 方程^[19]算出。根据朗之万曲线,当外界磁场强度在 100~250 Oe 范围内,温度在 10~60 °C 范围内时,磁流体的有效折射率从 1.4624 变化至 1.4684。

在空气孔 A 中填充磁流体后,因其有效折射率大于光纤基底的有效折射率,于是通道 A 成为另一个高折射率波导纤芯。从图 1 可以看出,波导 A 内层为石英,外层为空气孔,空气孔 A 由这 2 层低折射率包层组成。根据仿真得出波导 A 模式和纤芯导模的有效折射率的实部随入射波长的变化关系曲线如图 2 所示,图中实线表示纤芯导模,虚线表示波导 A。如图 2 插图(A)所示,在短波长处 $n_{eff}^{\Delta} > n_s > n_{eff}^{\circ}$ (n_s 为石英基底的折

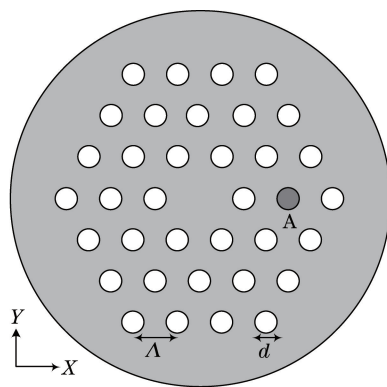


图 1 基于光子晶体光纤的传感器结构剖面图

Fig. 1 Cross section of the PCF-based sensor structure

射率),无法满足波矢匹配条件。当波长逐渐变大时,如图 2 插图(C)所示,此时 $n_{\text{eff}}^A < n_{\text{eff}}^{\text{co}}$,波导 A 的模式最终截止,模场能量将扩散到石英包层然后被空气孔包层限定,演化成高阶模式。因此在插图(A)与(C)之间的某个波长 λ_r 处将存在 $n_{\text{eff}}^A = n_{\text{eff}}^{\text{co}}$,此时波导 A 中的模式和纤芯导模的传播常数相等,纤芯中的光能则会强烈耦合至波导 A 中,表现为狭窄的损耗峰,如图 2 插图(B)所示,对应的共振波长为 λ_r 。由于 λ_r 对磁流体折射率的变化较为敏感,因此可以通过检测 λ_r 的漂移来判断磁流体折射率的细小变化,进而检测外界磁场或温度的变化。

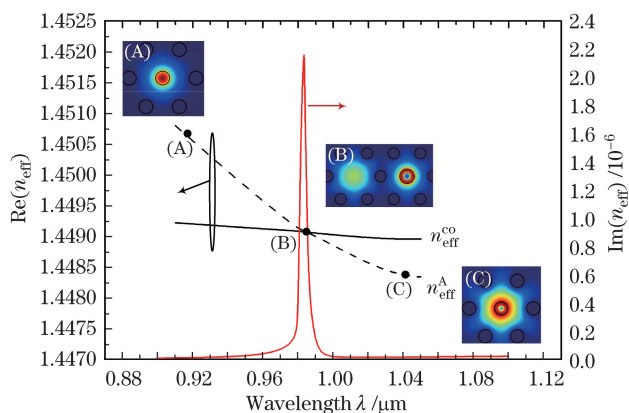


图 2 纤芯导模与波导模耦合时的模场分布,其中插图(A)、(B)、(C)为每个点的电场分布

Fig. 2 Mode field distributions for the coupling of core guide mode and waveguide mode, the inserts (A), (B) and (C) show the electric field distributions of each point

3.2 磁场和温度传感特性分析

由定向耦合原理可知,通道 A 中待测磁流体的有效折射率改变对 λ_r 的影响非常大。当外界温度为 25 °C,磁场强度分别为 100 Oe 和 150 Oe,磁流体折射率分别对应 1.4638 和 1.4654 时,纤芯导模的损耗随波长的变化关系如图 3 所示。

当外界温度为 25 °C,磁场强度在 100~250 Oe 范围内,磁流体有效折射率在 1.4635~1.467(高于基底材料)范围内时,通道 A 发生定向耦合时的磁场与共振波长强度的关系如图 4 所示,该 PCF 磁场灵敏度最高可达 1.10 nm/Oe。

当外界磁场强度为 150 Oe,温度在 10~60 °C 范围内,磁流体有效折射率在 1.466~1.4629(高于基底材料)范围内时,通道 A 发生定向耦合时的温度与共振波长的变化关系如图 5 所示,该 PCF 温度灵敏度最高可达 -3.86 nm/°C。

在以上仿真中,从图 4 和图 5 关于磁场、温度的两条共振曲线可以发现,磁场强度在 100~200 Oe 范围内,温度在 10~30 °C 范围内时,该传感结构的灵敏度相对较高,分别达到 1.10 nm/Oe 和 -3.86 nm/°C。这是因为根据朗之万曲线,在低磁场和低温度时磁流体的有效折射率变化率更大,另外在低磁场均匀变化时磁

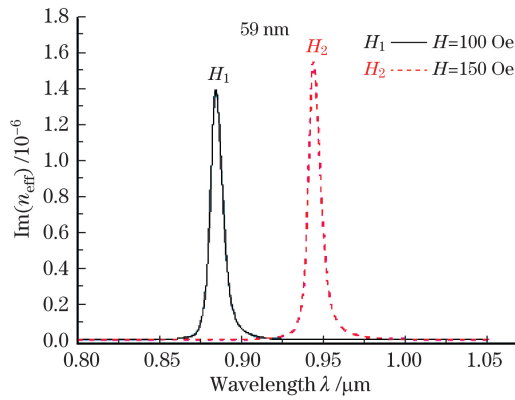


图 3 不同磁场强度下纤芯导模随波长的变化规律

Fig. 3 Core guided mode as a function of wavelength at different magnetic field intensities

流体的有效折射率更接近光纤基底(石英)的有效折射率,较低的折射率差会引起纤芯导模与流体通道模式更加强烈的共振耦合。

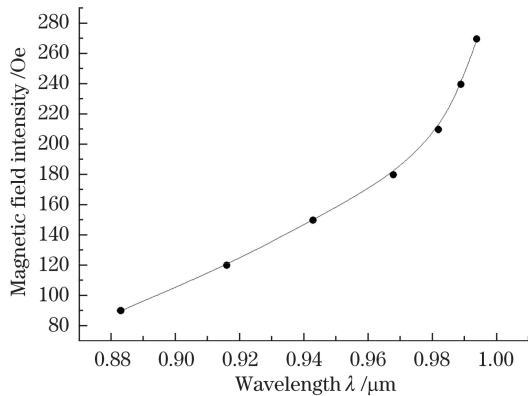


图 4 磁场强度与共振波长的变化关系图

Fig. 4 Variation of magnetic field intensity and resonance wavelength

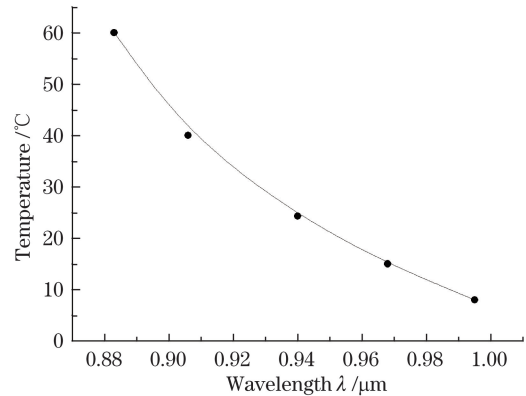


图 5 温度与共振波长的变化关系图

Fig. 5 Variation of temperature and resonance wavelength

3.3 结构参量对传感特性的影响

为了掌握结构参数对基于定向耦合效应的 PCF 传感器特性的影响规律,分别对影响 PCF 磁场、温度传感灵敏度的各个参量进行分析。

1) 空气孔层数对传感特性的影响。在保持空气孔间距 $\Lambda = 8 \mu\text{m}$,空气填充率 $d/\Lambda = 0.4$ 的前提下,模拟仿真 2 层、3 层、5 层空气孔的 PCF 来进行讨论分析,其中磁流体均填充在第 2 层空气孔中。当外界温度为 $25 \text{ }^\circ\text{C}$,磁场强度为 150 Oe 时,纤芯导模在不同空气孔层数下基于定向耦合效应的损耗曲线如图 6 所示。观察可见,当空气孔取 5 层时,基于定向耦合效应的吸收峰峰值比较小,不利于检查;而当空气孔取 2 层时,虽然共振损耗峰值最大,但由于 PCF 的限制损耗过大,不利于以后的整体传感系统设计。因此通过模拟仿真得出结论:PCF 的空气孔层数选取 3 层,此时共振峰值、限制损耗等各因素都能达到最优化。

2) 不同空气填充率下定向耦合效应的传感特性。在保持 PCF 空气孔层数为 3 层,空气孔间距 $\Lambda = 8 \mu\text{m}$ 的前提下,当外界温度为 $25 \text{ }^\circ\text{C}$,磁场强度为 150 Oe 时,纤芯导模在不同空气填充率下基于定向耦合效应的损耗曲线如图 7 所示。观察可见,随着空气孔直径的增大,波导 A 和纤芯导模中模式的耦合波长向长波方向进行漂移,并且耦合峰值随之减小。这是因为填充了磁流体的空气孔 A 的增大会使波导 A 中模式的有效折射率实部变大,另外包层空气孔的增大引起纤芯模有效折射率减小,所以导致纤芯模与波导模的相位匹配点向长波长方向漂移。此外,较大的包层空气孔会增强纤芯区域对能量的限制能力,从而导致纤芯导模与波导 A 中模式的耦合作用减弱,耦合峰值随之减小。通过上述分析可知,可以根据实际需求来调整包层空气孔直径的大小从而改变共振波长的位置。

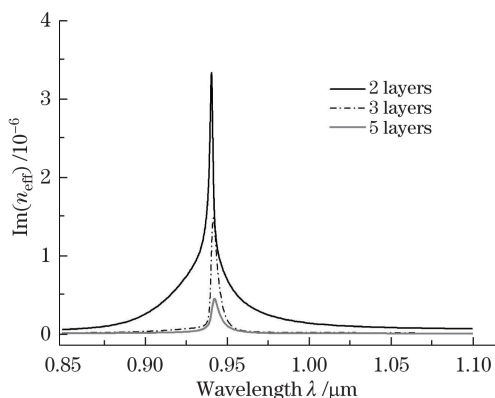


图 6 不同空气孔层数时纤芯导模的损耗曲线
Fig. 6 Loss curves of core guide mode with different air hole layers

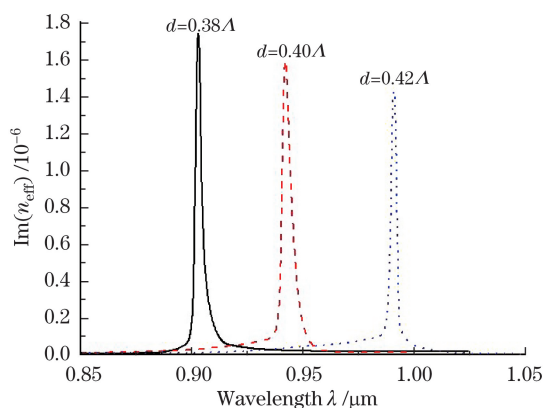


图 7 不同空气孔直径时纤芯导模的损耗曲线
Fig. 7 Loss curves of core guide mode with different air hole diameters

图 8、9 为不同空气孔直径下,基于定向耦合效应的 PCF 磁场和温度随耦合波长的变化曲线,图中曲线斜率代表该传感的灵敏度。当空气孔直径分别为 0.38Λ 、 0.40Λ 、 0.42Λ ($\Lambda = 8 \mu\text{m}$) 时,磁场的最大灵敏度分别为 1 nm/Oe 、 1.1 nm/Oe 、 1.17 nm/Oe ,温度的最大灵敏度分别为 $-3.428 \text{ nm/}^\circ\text{C}$ 、 $-3.857 \text{ nm/}^\circ\text{C}$ 、 $-4.286 \text{ nm/}^\circ\text{C}$,可见空气填充率越大,基于定向耦合的折射率传感器灵敏度越高。但是从图 7 可知,空气填充率越小,共振峰越尖锐,与非共振波长处的差值越大,所以当空气填充率越小时测量获得的信噪比越高。综合上述考虑,在结构设计时选取的空气孔直径为 0.4Λ 。

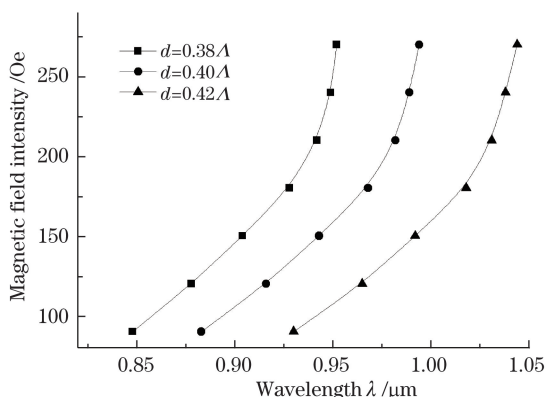


图 8 不同空气孔直径时磁场与耦合波长的关系曲线
Fig. 8 Curves of magnetic field intensity versus coupling wavelength with different air hole diameters

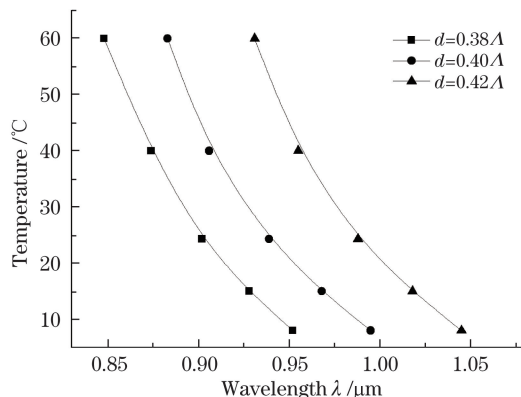


图 9 不同空气孔直径时温度与耦合波长的关系曲线
Fig. 9 Curves of temperature versus coupling wavelength with different air hole diameters

3) 不同晶格周期下定向耦合效应的传感特性,在保持 PCF 空气孔层数为 3 层,空气填充率 $d/\Lambda = 0.4$ 的前提下,当外界温度为 $25 \text{ }^\circ\text{C}$,磁场强度为 150 Oe 时,纤芯导模在不同晶格周期下基于定向耦合效应的损耗曲线如图 10 所示。仿真结果可得,在晶格周期为 $6, 8, 10 \mu\text{m}$ 时,共振波长分布在 $0.7 \sim 1.18 \mu\text{m}$ 内,是一个很宽的波长段范围。随着晶格周期的增大,波导 A 中模式和纤芯导模的耦合波长向长波方向漂移,并且伴随着耦合峰值的减小。这是因为晶格周期的增大导致填充有磁流体的空气孔 A 的有效折射率实部随之变大,这种有效折射率增加的趋势造成纤芯模与波导模的相位匹配点向长波方向漂移。另外,较大的空气孔会增强纤芯区域对光能量的限定能力,因此 PCF 晶格周期的增大会导致纤芯导模与波导 A 中模式的耦合作用减弱,耦合峰值随之减小。通过上述分析可知,在确保共振强度的前提下,可以根据实际需求来调整晶格周期的大小进而改变共振波长的位置。

不同晶格周期下,基于定向耦合效应的 PCF 传感器的耦合波长与磁场、温度的关系曲线分别如图 11 和图 12 所示。当晶格周期分别为 $6, 8, 10 \mu\text{m}$ ($d/\Lambda = 0.4$) 时,磁场的最大灵敏度分别为 $0.9, 1.1, 1.4 \text{ nm/Oe}$,温度的最大灵敏度分别为 $-2.82, -3.857, -4.613 \text{ nm/}^\circ\text{C}$,可见晶格周期越大,基于定向耦合的折射率传感器

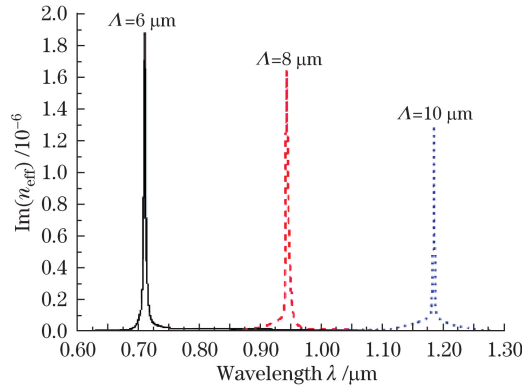


图 10 不同晶格周期时纤芯导模的损耗曲线

Fig. 10 Loss curves of core guide mode with different lattice periods

灵敏度越高。但是从图 10 可知,晶格周期越小,共振峰越尖锐,与非共振波长处的差值越大,所以当晶格周期越小时测量获得的信噪比越高。综合上述考虑,并结合目前的实物 PCF,在结构设计时选取的晶格周期为 $8 \mu\text{m}$ 。

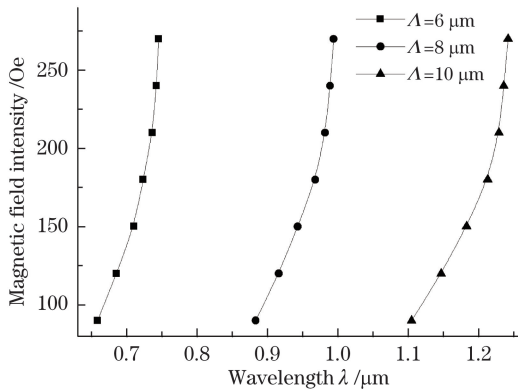


图 11 不同晶格周期时磁场与共振波长的关系曲线

Fig. 11 Curves of magnetic field intensity versus resonance wavelength with different lattice periods

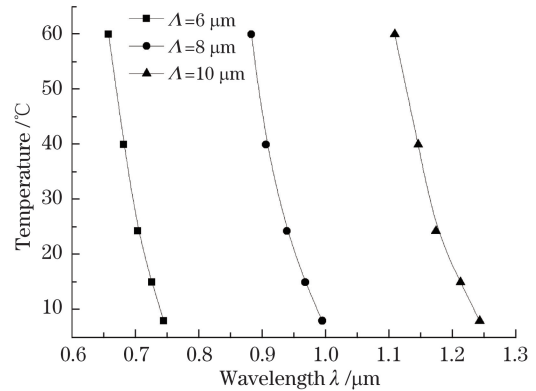


图 12 不同晶格周期时温度与共振波长的关系曲线

Fig. 12 Curves of temperature versus resonance wavelength with different lattice periods

4 结 论

设计了一种高灵敏度的 PCF 磁场、温度传感结构。采用全矢量有限元法对 PCF 的磁场、温度传感特性进行计算和分析。当空气孔中有磁流体填充时,该空气孔可作为定向耦合通道,通过测量共振造成的损耗峰值 λ_r 的移动来检测外界物理量(如磁场强度、温度)的变化。通过仿真发现,空气填充率和晶格周期的增加会使 λ_r 红移,灵敏度变高,但同时损耗峰值却会钝化。综合考虑,选取 3 层空气孔、空气填充率为 0.4Λ 、晶格周期为 $8 \mu\text{m}$,在定向耦合检测机制下,此时传感器的磁场、温度灵敏度可分别达到 1.10 nm/Oe 和 $-3.86 \text{ nm/}^\circ\text{C}$,具有较高的灵敏度。

参 考 文 献

- 1 Lim C S, Oh K, Kim D, *et al.* Hybrid fiber-optic current sensor using two faraday glass-slab magnetic field[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2004, 43(5A): 2737-2741.
- 2 Chen F F, Yi J, Gao H C, *et al.* A high-finesse fiber optic Fabry-Perot interferometer based magnetic-field sensor[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2015, 71: 62-65.
- 3 Li Z Z, Zhang X L, Meng Z, *et al.* Experimental research on magnetic field sensing based on polarization maintaining fiber M-Z interferometer[J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2004, 15(10): 1158-1161.
- 4 Fu Xinghu, Xie Haiyang, Zhu Hongbin, *et al.* Experimental research of curvature sensor based on tapered photonic

- crystal fiber Mach-Zehnder interferometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(5): 0506002.
付兴虎, 谢海洋, 朱洪彬, 等. 基于锥形光子晶体光纤马赫-曾德尔干涉的曲率传感器实验研究[J]. *光学学报*, 2015, 35(5): 0506002.
- 5 Lu Lin, Yang Yuanhong, Li Hongying. Study of polarization-maintaining photonic crystal fibers with zero birefringent temperature sensitive coefficient[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(10): 1006006.
陆 林, 杨远洪, 李红颖. 零双折射温度敏感系数保偏光子晶体光纤研究[J]. *光学学报*, 2015, 35(10): 1006006.
- 6 Liu Feng, Feng Xiaolong, Guo Xuan, *et al.* Research on the bending sensing characteristics of PM-PCF based on intermodal interference[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(9): 0905005.
刘 丰, 冯晓龙, 郭 璇, 等. 基于模间干涉的保偏光子晶体光纤弯曲传感特性研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(9): 0905005.
- 7 Miao Y P, Liu B, Zhang K L, *et al.* Temperature tunability of photonic crystal fiber filled with Fe_3O_4 nanoparticle fluid [J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 98: 021103.
- 8 Zhao Y, Lv R Q, Ying Y, *et al.* Hollow-core photonic crystal fiber Fabry-Perot sensor for magnetic field measurement based on magnetic fluid[J]. *Optics and Laser Technology*, 2012, 44(4): 899-902.
- 9 Zhao Y, Zhang Y Y, Wang Q, *et al.* Optical sensing characteristics of the photonic crystal fiber filled with magnetic fluid [J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2014, 125(7): 1829-1832.
- 10 Li J H, Wang R, Wang J Y, *et al.* Novel magnetic field sensor based on magnetic fluids infiltrated dual-core photonic crystal fibers[J]. *Optical Fiber Technology*, 2014, 20(2): 100-105.
- 11 Zhao Y, Zhang Y Y. Research on temperature and magnetic field sensing characteristics of photonic crystal fiber filled with magnetic fluid[J]. *Microwave and Optical Technology letters*, 2014, 56(4): 831-834.
- 12 Li Yuquan, Cui Min. Optical waveguide theory and technology[M]. Beijing: Post & Telecom Press, 2002.
李玉权, 崔 敏. 光波导理论与技术[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2002.
- 13 Shi Weihua, You Chengjie, Wu Jing. D-shaped photonic crystal fiber refractive index and temperature sensor based on surface plasmon resonance and directional coupling[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(22): 224221.
施伟华, 尤承杰, 吴 静. 基于表面等离子体共振和定向耦合的 D 型光子晶体光纤折射率和温度传感器[J]. *物理学报*, 2015, 64(22): 224221.
- 14 Qiu Z Q, Bader S D. Surface magneto-optic Kerr effect[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2000, 71(3): 1243-1255.
- 15 Chen Y F, Yang S Y, Tse W S, *et al.* Thermal effect on the field-dependent refractive index of the magnetic[J]. *Applied Physics Letters*, 2003, 82(20): 3481-3483.
- 16 Miao Y P, Liu Y, Liu B, *et al.* Intensity-modulated temperature sensor based on the photonic crystal fibers filled with magnetic fluid[C]. 21st International Conference on Optical Fiber Sensor, 2011, 775347: 1-4.
- 17 Yu Y Q, Li X J, Hong X M, *et al.* Some features of the photonic crystal fiber temperature sensor with liquid ethanol filling[J]. *Optics Express*, 2010, 18(15): 15383-15388.
- 18 Shi Weihua, Wu Jing. Photonic crystal fiber sensor based on surface plasmonic and directional resonance coupling[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(2): 0206002.
施伟华, 吴 静. 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[J]. *光学学报*, 2015, 35(2): 0206002.
- 19 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.