

文章编号: 1001-3806(2021)03-0326-05

基于双芯光子晶体光纤耦合微扰传感器

蔡俊, 陈旻文, 董超, 高翔*, 王语章
(西南科技大学理学院, 绵阳 621010)

摘要: 为了实现高精度温度传感的目的,设计了一种新型双芯光子晶体光纤耦合微扰传感结构,采用有限差分光束传播法对该结构的传感特性进行了分析。利用RSOFT软件的Beamprnp模块对该传感器特性进行了仿真研究。结果表明,在满足双芯耦合条件下,折射率灵敏度可达7000nm/RUI;耦合间距灵敏度可达2;在填充液体为乙醇时,该传感结构可实现温度范围为278K~338K的检测,在该范围内的灵敏度可达4nm/K。该传感器检测线性度高、工艺简单,对其它相关传感器的研究有一定帮助和意义。

关键词: 光纤光学;传感器;有限差分光束传播法;双芯光子晶体光纤;耦合微扰;体积膨胀

中图分类号: TN253;TP212.4⁺4 **文献标志码:** A **doi:**10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2021.03.011

Dual-core photonic crystal fiber sensor based on coupling perturbation

CAI Jun, CHEN Huanwen, DONG Chao, GAO Xiang, WANG Yuzhang

(School of Science, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China)

Abstract: In order to achieve the purpose of high-precision temperature sensing, a novel dual-core photonic crystal fiber coupled perturbation structure was designed. The finite-difference beam propagation method was used to analyze the sensing characteristics of the structure. The Beamprnp module of RSOFT software was used to simulate the characteristics of the sensor. The results show that the refractive index sensitivity can reach 7000nm/RUI under the condition of dual core coupling (RUI is the refractive index unit), the coupling spacing sensitivity can reach 2. When the liquid is filled with ethanol, the sensing structure can realize the detection in the temperature range of 278K~338K, and the sensitivity in this range can be up to 4nm/K. The sensor has the characteristics of high linearity and simple process, and the structure is helpful and meaningful to the research of other related sensors.

Key words: fiber optics; sensor; finite-difference beam propagation method; dual-core photonic crystal fiber; coupling perturbation; volume expansion

引言

光子晶体光纤(photonic crystal fiber, PCF)作为一种新型光纤,具有独特的结构和传输特性,近年来一直成为人们关注的焦点。PCF具有大模场面积、单模传输、高非线性、高双折射和超低损耗等特性^[1-3],可广泛应用于多种设计和各个领域,实现高效传输和高精度测量等目的。随着PCF研究的不断深入,逐渐出现各类PCF结构,而双芯光子晶体光纤(dual-core photonic crystal fiber, DCPCF)作为一重要分支^[4],被重点关注。对于DCPCF的传感研究,可根据PCF结构设计的多

变性,以及双芯结构的耦合特性^[5],实现高精度传感器件的设计。光纤传感器件出现的种类多样,如光纤光栅传感器^[6]、光子晶体光纤传感器^[7]、光子晶体填充式传感器^[8]、定向耦合型传感器^[9]以及光纤表面等离子体传感^[10-11]等等,但大多传感器件都存在着传感精度不高、监测范围小或者制作工艺艰难和昂贵等问题,难以达到实际需求。

对于DCPCF,根据其光场在波导中的耦合传输特性,可以应用于不同环境的检测,实现高精度和宽范围测量的目的。目前对于双芯耦合传感技术的研究主要局限于一般的纤芯耦合和孔隙填充,并没有较为全面的利用PCF的结构优势和填充材料的物理特性。

作者则提出一种基于结构上的新型DCPCF耦合微扰传感器,主要通过RSOFT中Beamprnp模块的有限差分光束传播法(finite-difference beam propagation

作者简介:蔡俊(1998-),男,大学本科生,现主要从事光子晶体光纤传感器的研究。

* 通讯联系人。E-mail: gaoxiang6969@163.com

收稿日期:2020-05-05;收到修改稿日期:2020-07-10

method, FD-BPM) 对该结构的波导传输进行检测分析。该设计根据 PCF 的结构特点——孔隙多样性, 引入耦合微扰填充缺陷并结合填充技术, 利用结构优势和填充材料的物理特性, 进一步提升光子晶体光纤传感性能。根据 PCF 的耦合传输特性, 所提出的一种 DCPCF 高灵敏温度传感器, 其结构小巧、轻便, 在传感精度上有很大提升, 同时具有加工工艺简单、成本较低等优势, 可广泛应用于各大领域, 具有一定的实用和参考价值。

1 理论模型

基于 DCPCF 耦合微扰传感器的结构如图 1 所示。其包层为均匀六边形空气孔结构, 空气孔直径 $d = 1.6125 \mu\text{m}$, 空气孔间距 $\Lambda = 4.3 \mu\text{m}$, 空气孔直径与空气孔间距之比 $d/\Lambda = 0.375$, 根据 PCF 的等效归一化频率表达式^[12]:

$$V_{\text{eff}} = \frac{2\pi\Lambda}{\lambda} \sqrt{n_{\text{core}}^2 - n_{\text{clad}}^2} \quad (1)$$

式中, Λ 为空气孔间距, λ 为波长, n_{core} 和 n_{clad} 分别为纤芯折射率和包层折射率。当 $V_{\text{eff}} < 0.45$ 时, 满足无截至单模传输条件。PCF 中心两侧引入双纤芯波导结构, 双纤芯呈水平轴对称, 为光波耦合传输路径; 周围引入两个填充大孔缺陷, 直径 $D = 12.9 \mu\text{m}$, 距离中心点距离 $l = 10 \mu\text{m}$; 填充大孔缺陷通过竖直双曲线型缺陷层连通, 曲率半径 $R_q = 7.5 \mu\text{m}$, 其腰间距离 $L_w = 1.6025 \mu\text{m}$, 形成耦合微扰层。大孔缺陷及耦合微扰层构成“哑铃”型折射率液体填充区域。其中填充区域两大孔有利于快速受热, 耦合微扰层与双纤芯结构能对折射率和耦合间距的变化做出敏感反映。对折射率液体填充区域, 本研究中选择乙醇为填充材料, 实现高精度温度传感。

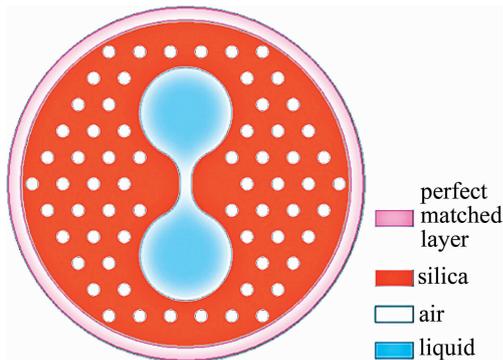


Fig. 1 Cross section of photonic crystal fiber with dual-core coupling perturbation structure

结构中, 光纤基底材料采用石英玻璃, 其折射率可

根据 Sellmeier 方程算出^[13]:

$$n_s^2 = 1 + \frac{A_1\lambda^2}{\lambda^2 - B_1} + \frac{A_2\lambda^2}{\lambda^2 - B_2} + \frac{A_3\lambda^2}{\lambda^2 - B_3} \quad (2)$$

式中, n_s 为石英玻璃折射率; B 与 C 为 Sellmeier 方程系数, 不同材料各系数不同, 可在光学手册中查询相关系数。此处依次为 $A_1 = 0.6961663$, $A_2 = 0.4079426$, $A_3 = 0.8974794$; $B_1 = 4.67914826 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, $B_2 = 1.35120631 \times 10^{-2} \mu\text{m}^2$, $B_3 = 97.9340025 \mu\text{m}^2$, 代入各系数即可确定光纤基底材料随波长变化的折射率关系。

该设计对温度的高精度检测, 主要根据外界环境温度温度的改变, 影响耦合微扰层中填充液体的折射率和体积, 使纤芯有效折射率和耦合间距发生变化, 让光场在双芯耦合波导中传输时, 输出不同透射谱, 实现温度的高精度检测。根据耦合理论, 在双芯耦合分析时, 由温度造成的液体折射率变化和体积膨胀, 可进行单独分析, 不仅能实现两变量的单独检测, 还能结合两变量对温度的高精度传感进行全面分析。

液体填充区可根据使用条件, 选择性填充不同物理性质的检测液体。乙醇具有较好的热光效应, 其折射率和温度在一定温度范围具有较好的线性变化关系, 且成本低廉、易填充。乙醇的热光系数 $\alpha = 3.94 \times 10^{-4}/\text{K}$, 热膨胀系数 $\beta = 1.09 \times 10^{-3}/\text{K}$, 随着温度 T 的变化, 其折射率变化关系为^[14]:

$$n = n_0 - \alpha(T - T_0) \quad (3)$$

式中, n 为不同温度 T 下的乙醇折射率; n_0 为温度 $T_0 = 293.15\text{K}$ 时的乙醇折射率, $n_0 = 1.36048$; T_0 为初始温度。

在环境温度变化过程中, 除造成填充液体折射率变化外, 还会导致乙醇受热膨胀, 增大双芯耦合间距, 乙醇受热膨胀与耦合距离的变化关系可以表示为^[15]:

$$L = L_0 + L_0\beta(T - T_0) \quad (4)$$

式中, L 为不同温度 T 下的耦合间距, L_0 为初始间距, $L_0 = 1.6025 \mu\text{m}$ 。由于石英玻璃的热光系数 $\alpha = 8.60 \times 10^{-6}/\text{K}$, 热膨胀系数 $\beta = 5.5 \times 10^{-7}/\text{K}$, 与填充材料相差两个量级以上, 因此忽略温度对石英折射率和热膨胀的影响, 而只考虑温度对填充材料折射率变化及液体热膨胀对耦合间距的影响。

2 特性分析

2.1 DCPCF 的耦合传输特性

根据耦合理论, 在 DCPCF 耦合传输时, 仅在耦合介质和耦合间距达到一定条件时, 光场才能在两纤芯发生稳定耦合。该结构在入射波长为 $1.550 \mu\text{m}$ 时, 分

别选择折射率区间为 $1.30 \sim 1.40$, 耦合间距区间为 $1.4 \mu\text{m} \sim 2.0 \mu\text{m}$ 进行分析。对于该折射率区间, 两纤芯功率稳定耦合, 端口透射率与折射率之间的关系如图 2a 所示, 该波长下的端口透射率随折射率的增加逐渐变得敏感。端口透射率与耦合间距之间的关系如图 2b 所示, 在该波长下耦合间距在 $1.48 \mu\text{m} \sim 1.76 \mu\text{m}$ 左右时, 两纤芯功率才能稳定耦合。

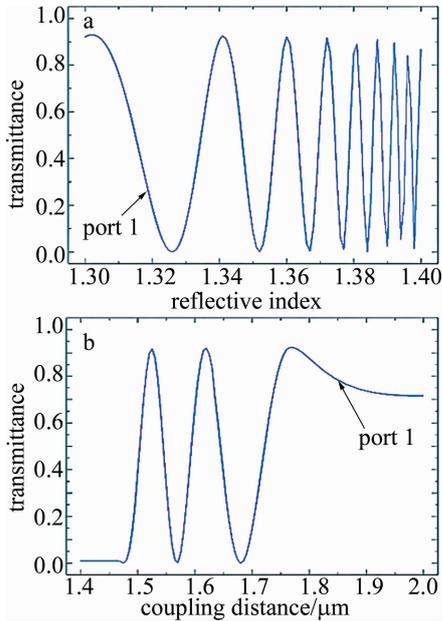


Fig. 2 a—relationship between the refractive index of the filled area and port transmittance when wavelength is $1.550 \mu\text{m}$ b—relationship between the coupling distance and port transmittance when wavelength is $1.550 \mu\text{m}$

根据微扰层填充材料折射率、耦合间距与功率耦合的关系, 在以下研究中, 将选择合适的折射率和耦合间距, 分析光子晶体光纤双芯耦合的传输特性和传感性能。在波长为 $1.550 \mu\text{m}$ 、折射率为 1.361 时, 满足双芯耦合微扰结构实现光功率的稳定耦合传输条件。仿真分析得到双芯耦合传输过程如图 3 所示。

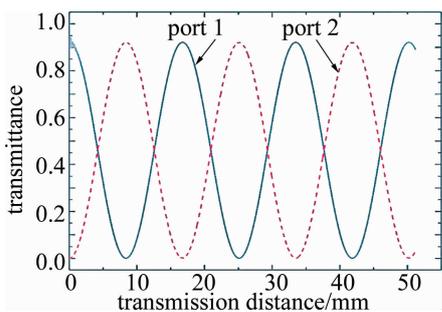


Fig. 3 When the wavelength is $1.550 \mu\text{m}$, the optical power periodically couples with increasing transmission distance

功率在两纤芯波导中耦合传输时, 完全符合耦合理论公式所推导的结论。在入射波长为 $1.550 \mu\text{m}$ 时,

随着传输距离的增加, 双芯波导中的功率发生周期性耦合, 耦合长度 $L_c = 8367 \mu\text{m}$, 具有很好的稳定性和周期性。在改变波长时, 根据双芯耦合理论, 耦合长度将发生变化, 结果如图 4 所示。

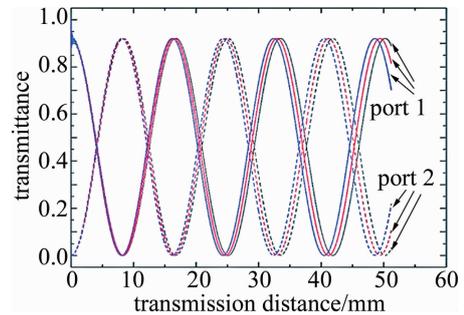


Fig. 4 When the wavelengths are $1.550 \mu\text{m}$, $1.555 \mu\text{m}$ and $1.560 \mu\text{m}$, the power in the two waveguides periodically couples with the transmission distance

在入射波长依次为 $1.550 \mu\text{m}$, $1.555 \mu\text{m}$, $1.560 \mu\text{m}$ 时, 对应耦合长度分别为 $8367 \mu\text{m}$, $8234 \mu\text{m}$, $8099 \mu\text{m}$, 耦合长度随波长增加逐渐变短。由于 DCPCF 长度确定, 对不同的入射波长将在端口对应不同透射率。因此可通过在端口输入一段波长的光源, 就能够得到不同波长下的透射率, 最终形成端口输出谱线。为得到波段在 $1.3 \mu\text{m} \sim 1.6 \mu\text{m}$ 左右的透射峰, 在相关参量不变的情况下, 通过仿真分析, 发现在波段为 $1.47 \mu\text{m} \sim 1.57 \mu\text{m}$, 填充区折射率 n 为 1.364 时, 该波段下能够输出完整的透射峰, 如图 5 所示。

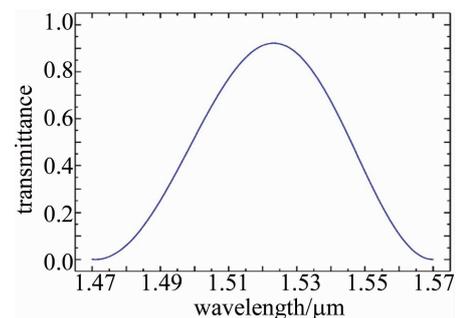


Fig. 5 The incident waveband is $1.47 \mu\text{m} \sim 1.57 \mu\text{m}$, when the filled area is refracted $n = 1.364$, the transmission spectrum of the output port

该条件下的透射峰值在 $1.523 \mu\text{m}$, 半峰全宽 (full width at half maximum, FWHM) 为 51nm 。根据各参量对双芯耦合传输的影响, 通过改变微扰层填充区的折射率, 得到不同的透射谱线, 最终根据透射谱的峰值移动来反映折射率的变化。

2.2 DCPCF 的折射率检测特性

在相关参量不变的情况下, 微扰层填充区折射率 n 依次为 1.361 , 1.362 , 1.363 , 1.364 , 1.365 时, 仿真得到的透射谱如图 6 所示。

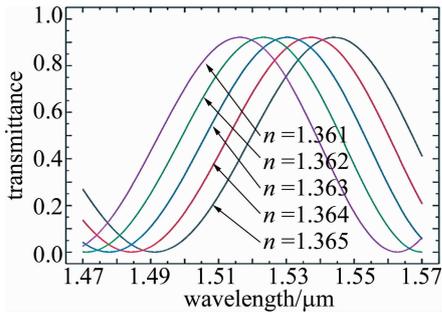


Fig. 6 The filled area of the perturbation layer is the transmission spectrum at different refractive indices

在折射率发生变化时,透射谱峰值发生了明显的移动,随着折射率的增加,透射峰发生蓝移。根据不同折射率液体的透射谱线,以 1.361 为基础,其峰值在 1.544 μm ,半峰全宽为 51nm,随折射率的增加,对应透射峰的峰值依次为 1.537 μm ,1.530 μm ,1.523 μm ,1.516 μm ,半峰全宽恒定为 51nm。透射峰值和折射率的变化灵敏度可用以下表达式确定^[16]:

$$S_n = \frac{\Delta\lambda_{\text{peak}}}{\Delta n} \quad (5)$$

式中, $\Delta\lambda_{\text{peak}}$ 表示两个透射峰值的移动量, Δn 表示折射率差。计算可得折射率检测灵敏度 $S_n = 7000\text{nm}/\text{RUI}$,可用于实现对折射率变化相关的高精度检测技术。

2.3 DCPCF 耦合间距检测特性

同理,根据耦合间距与双芯功率耦合的关系,耦合间距发生变化时,也会影响光传输时的耦合长度,最终在端口输出不同透射率的透射谱线。在微扰区折射率为 1.364、耦合间距 L 依次为 1.5985 μm ,1.6005 μm ,1.6025 μm ,1.6045 μm ,1.6065 μm 时,其输出端口的透射谱如图 7 所示。

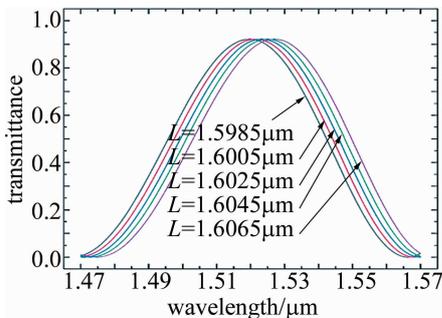


Fig. 7 Output transmission spectrum at different coupling intervals

在 DCPCF 微扰区的耦合间距发生变化时,透射峰发生移动,随耦合间距的逐渐增大,透射峰发生红移。在该波段下,各耦合间距所对应的透射峰值坐标分别为 1.520 μm ,1.521 μm ,1.523 μm ,1.525 μm ,1.527 μm ,半峰全宽恒定为 51nm。在该耦合间距范围内,由(5)

式,将 Δn 替换为 ΔL ,可确定耦合间距变化的灵敏度 S_L ,计算得出其耦合间距的检测精度为 $S_L = 2$ (无量纲单位),可用于实现改变耦合间距相关的高精度压力检测。

2.4 DCPCF 的温度传感分析

通过前面对耦合微扰填充区的折射率变化和耦合间距的单独分析,依次得到该结构下的传感特性,实现耦合微扰填充区中折射率和耦合间距的同时监测,可很好地用于实现高精度温度传感设计。对于填充式温度传感器而言,除温度对材料折射率的影响外,填充液体的热膨胀对传感精度也有所提升,而在大多研究中都忽略了对填充液体热膨胀特性的利用。对于该新型双芯耦合微扰型 PCF,充分利用了填充材料的物理性质,在环境温度变化时,改变填充材料折射率和体积,影响纤芯有效折射率和耦合间距,实现高精度的温度传感。

根据耦合理论,折射率和耦合间距对输出功率的影响为简单的线性叠加,根据前面对折射率和耦合间距的单独分析,由(3)式和(4)式关于温度的变化关系,得知两影响因素对传感精度产生同步提升的作用。为控制检测波段在 1.30 μm ~ 1.60 μm 左右,在温度 T 依次为 303K,304K 和 305K 时,入射波段为 1.40 μm ~ 1.54 μm 左右,其透射谱线如图 8 所示。

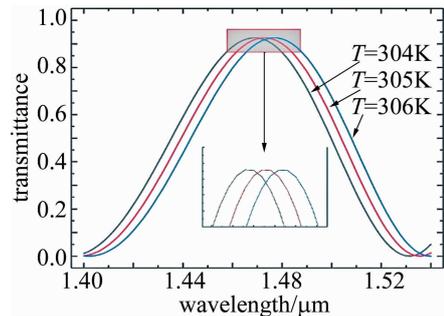


Fig. 8 Transmission spectra at different temperatures

随着温度的变化,透射峰向长波长方向移动,透射峰值依次为 1.468 μm ,1.472 μm 和 1.476 μm ,其半峰全宽恒定为 31nm。根据图形中的峰值移动规律,在温度较大值的增加时,该检测波段将不包含完整透射峰,且透射峰会逐渐移出该波段范围。因此,为得到最佳检测波段,实现高精度温度检测,做出如下分析。

经查阅相关实验数据,得知乙醇填充液体的温度变化范围在 278K ~ 338K 左右时,具有较好的线性变化关系。由(3)式和(4)式计算可知,折射率和耦合间距满足图 2 所示的稳定耦合条件。通过进一步仿真分析,得到峰值移动与温度变化关系如图 9 所示。

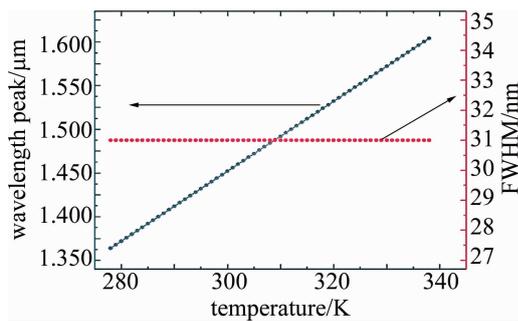


Fig. 9 The relationship between transmission peak and FWHM at different temperatures

温度的变化与透射峰的移动具有很好的线性关系,对温度 T (K) 和透射峰值 S (nm) 的变化关系进行数据拟合分析,函数关系表达式 S (nm) = $4T$ (K) + 256 (nm),其斜率即为温度灵敏度,可达到 4nm/K。半峰全宽与温度的变化关系如图 9 所示。根据透射峰的峰值位置和半峰全宽宽度,即可确定各温度下的输出完整透射峰所对应的检测波段,实现精准和宽温度检测的效果。

3 结论

根据耦合理论,依次分析微扰区折射率和耦合间距对 DCPCF 耦合传输的影响,得出该模型能够很好地实现折射率的检测与耦合间距变化相关的内膨胀或外应力传感。根据该结构下的传输特性,针对高精度温度传感进行分析,充分利用 PCF 的结构特点和填充材料的物理性质,进一步提升光子晶体光纤的传感精度,实现高精度温度传感。当填充液体为乙醇时,检测温度范围为 278K ~ 338K,传感器灵敏度达 4nm/K。该 DCPCF 传感器,根据检测环境的不同温度范围,控制波长区间出现温度细微变化的透射峰,有效分析环境温度,达到对温度的高精度实时检测的目的。该设计具有灵活性高、稳定性好和精度高等优点,同时该新型结构也有待进一步研究的价值,对实现光纤传感具有重要作用和意义。

参 考 文 献

- [1] ADEMGIL H, HAXHA S. Endlessly single mode photonic crystal fiber with improved effective mode area[J]. Optics Communications, 2012, 285(6): 1514-1518.
- [2] LIAO J, SUN J, QIN Y, *et al.* Ultra-flattened chromatic dispersion and highly nonlinear photonic crystal fibers with ultralow confinement loss employing hybrid cladding[J]. Optical Fiber Technology, 2013, 19(5): 468-475.
- [3] LI D, LIU M, JIAN D, *et al.* High birefringence dual-core photonic crystal fiber characteristics [J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(4): 0405005 (in Chinese).
- [4] LOU J, CHENG T, LI S. High sensitivity photonic crystal fiber sensor based on dual-core coupling with circular lattice[J]. Optical Fiber Technology, 2019, 48(5): 110-116.
- [5] CHEN D, HU G, CHEN L. Pressure/temperature sensor based on a dual-core photonic crystal fiber[C]//Passive Components and Fiber-Based Devices VIII, International Society for Optics and Photonics. New York, USA:IEEE, 2011: 1-10.
- [6] MA X C, ZHOU Z A, LIU A C, *et al.* A high-sensitivity and stable fiber Bragg grating temperature sensor[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2013, 24(7): 1245-1250 (in Chinese).
- [7] ZHU H X, YE T, ZHANG K F. Study on high sensitivity pressure sensing characteristics of photonic crystal fiber[J]. Laser Technology, 2019, 43(4): 511-516 (in Chinese).
- [8] ABBASI M, SOROOSH M, NAMJOO E. Polarization-insensitive temperature sensor based on liquid filled photonic crystal fiber[J]. Optik, 2018, 168: 342-347.
- [9] SHI W H, YOU Ch J. High sensitivity magnetic field and temperature sensor of photonic crystal fiber based on directional coupling[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(7): 0706004 (in Chinese).
- [10] ZHU Ch H, TAN C, WANG Y, *et al.* Photonic crystal fiber high sensitivity magnetic field and temperature sensor based on surface plasma resonance effect and defect coupling[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(3): 3100001 (in Chinese).
- [11] YING Y, HU N, SI G, *et al.* Magnetic field and temperature sensor based on D-shaped photonic crystal fiber[J]. Optik, 2019, 176(1): 309-314.
- [12] NI Y, PENG J D, KE Y J, *et al.* Single-mode photonic crystal fiber with a large core[J]. Chinese Journal of Lasers, 2003, 30(10): 901-903 (in Chinese).
- [13] LIU X A, CHENG H P, JIAO Zh. Properties of regular-lattice photonic crystal fiber based on a double-hole unit[J]. Laser Technology, 2019, 43(1): 52-56 (in Chinese).
- [14] LI X J, YU Y Q, HONG X M, *et al.* Analysis on temperature sensing properties of photonic crystal fiber based on liquid filling[J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(5): 1110-1114 (in Chinese).
- [15] LI L T, ZHANG D Sh, WEN X Y, *et al.* Micro fiber F-P sensor used in the measurement of thermal expansion coefficient[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2014, 25(11): 2130-2135 (in Chinese).
- [16] YANG Z, XIA L, LI C, *et al.* A surface plasmon resonance sensor based on concave-shaped photonic crystal fiber for low refractive index detection[J]. Optics Communications, 2019, 430(1): 195-203.