

分光比可调的光子晶体光纤耦合器

王兆芳¹, 卜胜利^{1,2}, 苏德龙¹, 毛连敏¹

¹上海理工大学理学院, 上海 200093;

²上海理工大学上海市现代光学重点实验室, 上海 200093

摘要 实验研究了一种磁流体包覆的光子晶体光纤耦合器,其分光比可由磁场在线调节。实验结果表明,耦合器耦合区的尺寸越小,其分光比随磁场的变化越敏感。在外磁场强度为 0~14 mT 时,耦合区尺寸为 27 μm 的耦合器分光比随磁场强度线性变化的灵敏度为 0.0289 mT^{-1} 。耦合器耦合区尺寸越小,环境温度对分光比的影响越强。对于实际应用的耦合器,应综合考虑分光比的磁场调谐特性及温度响应特性,选择合适参数的光子晶体光纤耦合器。

关键词 光纤光学; 光纤耦合器; 熔融拉锥; 磁流体; 光子晶体光纤; 磁场

中图分类号 O436 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201737.0306003

Coupling-Ratio-Tunable Photonic Crystal Fiber Coupler

Wang Zhaofang¹, Pu Shengli^{1,2}, Su Delong¹, Mao Lianmin¹

¹College of Science, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

²Shanghai Key Laboratory of Modern Optical System, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China

Abstract A kind of magnetic-fluid-cladded photonic crystal fiber coupler is designed and investigated experimentally. The coupling ratio of the coupler can be adjusted online by magnetic field. Experimental results indicate that the smaller the coupling area size of the as-fabricated coupler is, the higher the sensitivity of the coupler with respect to magnetic field is. The coupling ratio of the as-fabricated coupler with coupling area size of 27 μm changes linearly with the external magnetic field within the range of 0-14 mT. The achieved sensitivity is 0.0289 mT^{-1} . But the influence of ambient temperature on the coupling ratio will increase when the coupling area size of the as-fabricated coupler decreases. For practical applications, the trade-off between the magnetic tunability of the coupling ratio and the temperature response should be considered comprehensively and the photonic crystal fiber coupler with appropriate parameters should be chosen.

Key words fiber optics; fiber coupler; fused biconical taper; magnetic fluid; photonic crystal fiber; magnetic field

OCIS codes 060.1810;060.5295;23.7370;230.1150

1 引 言

磁流体是一种由表面活性剂处理的纳米级磁性微粒稳定地分散在基液中而形成的磁性胶体溶液^[1-5]。它兼有磁性材料的强磁性和液体的流动性,因而具有磁致旋光、可调折射率、磁致双折射等诸多磁光特性^[6-10],受到了相关学者的高度重视。目前,基于磁流体的新型光子器件及应用已被广泛提出^[11-21],和传统的器件相比,其具有灵敏度高、体积小等优点,在光子学和传感领域有着广泛的应用前景^[22-27]。

光子晶体光纤是近年来出现的一种新型光纤,其结构可调、导光机制特殊,具有奇异的光学特性,如:无

收稿日期: 2016-09-26; 收到修改稿日期: 2016-11-08

基金项目: 国家自然科学基金(61675132)、上海市“曙光计划”(16SG40)、上海市人才发展基金(201529)、上海市自然科学基金(13ZR1427400)、上海市特种光纤与光接入网重点实验室开放课题(SKLSFO2014-05)、沪江基金(B14004)

作者简介: 王兆芳(1987—),男,硕士研究生,主要从事新型光子学材料与器件方面的研究。

E-mail: wangzhaofang1989@163.com

导师简介: 卜胜利(1978—),男,博士,教授,主要从事纳米光子学,光电子器件,光学材料,磁光效应,导波光学,光纤技术与传感方面的研究。E-mail: shipu@usst.edu.cn

截止单模传输、色散可调、高双折射率、大模场面积和高非线性等^[28]。因此,光子晶体光纤的研究一直是光通信和光电子领域的热点。光纤耦合器是光纤系统中极其重要的无源器件之一,其在光纤通信和光纤传感领域应用广泛^[29-31],分光比可调的耦合器在滤波、调制和开关等诸多方面亦有很好的应用前景。

本文研究了一种分光比可在线调节的耦合器,该耦合器利用磁流体包覆在光子晶体光纤耦合结构的外围,通过磁场调节分光比。实验具体研究了所制作耦合器的磁场调谐特性和温度敏感性。

2 耦合器的制作与工作原理

2.1 耦合器的制作

实验用光子晶体光纤为武汉安扬激光技术有限公司提供的 SM-7.0-PCF 型光子晶体光纤,纤芯直径为 $7\ \mu\text{m}$ 、包层直径为 $125\ \mu\text{m}$ 、空气孔直径约为 $4\ \mu\text{m}$ 、孔间距约为 $6\ \mu\text{m}$,其横截面如图 1(a)所示。将光子晶体光纤中间部分的涂覆层剥去约 2 cm,清洗干净后将剥去涂覆层的裸光纤通过气泵固定在光纤拉锥系统上,设定好拉锥参数后进行熔融拉锥,拉锥后的光纤结构在紫外灯辅助下用 UV 胶和 U 型玻璃槽封装固定。图 1(b)和图 1(c)分别为制作的耦合结构实物图及示意图。 P_1 为入射端 P_1 的输入光功率, P_3 和 P_4 为直通端 P_3 和耦合端 P_4 的输出光功率。

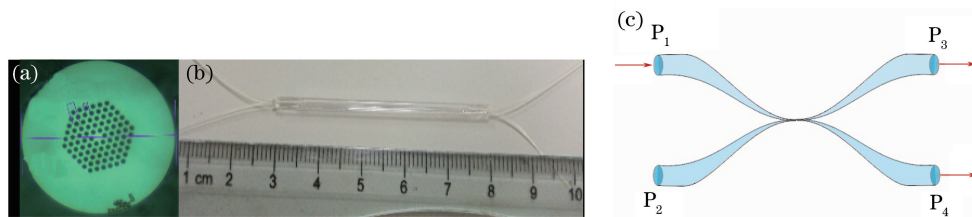


图 1 (a) 光子晶体光纤的横截面;光子晶体光纤耦合结构 (b) 实物图和 (c) 示意图

Fig. 1 (a) Cross-section of photonic crystal fiber; (b) picture and

(c) schematic of the as-fabricated photonic crystal fiber coupling structure

普通单模光纤耦合器的制作主要通过熔融拉伸工艺,当拉伸长度足够长时,耦合器腰区直径很小,产生倏逝波,对周围环境敏感。而光子晶体光纤耦合器的制作不仅可以利用熔融拉伸,还可以依靠火焰控制空气孔塌陷程度,可操作性强。为了比较,实验采用高温慢拉和低温快拉法分别制作了空气孔完全塌陷[图 2(a)、2(c)]和空气孔部分塌陷[图 2(b)、2(d)]两种不同类型的光子晶体光纤耦合结构,耦合区尺寸均为 $37\ \mu\text{m}$ 。

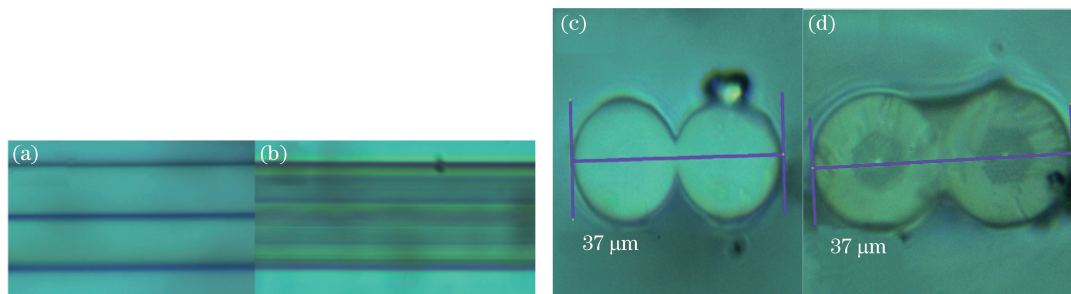


图 2 (a)、(c) 空气孔完全塌陷(b)、(d) 空气孔部分塌陷光子晶体耦合结构的耦合区显微照片

Fig. 2 Micrographs of coupling regions for photonic crystal coupler with (a)、(c) completely collapsed air hole and (b)、(d) partially collapsed air hole

将制作好的光纤耦合结构插入内径为 3 mm 的四氟管中,用注射器将磁流体缓慢注入管内,磁流体逐渐充满管内并包覆在光纤耦合结构周围,最后用 UV 胶将毛细管的两端密封,以防止磁流体受污染或溶剂挥发。实验中使用的是北京市神然磁性流体技术有限公司提供的水基磁流体,其纳米磁性颗粒的直径约为 10 nm,在 $25\ ^\circ\text{C}$ 时的密度为 $1.18\ \text{g}/\text{cm}^3$,饱和磁化强度约为 20 mT。制作耦合器所用的磁流体为原磁流体和载液按 1:10 稀释而得,磁流体稀释后,饱和磁化强度将减小,与磁流体的磁性颗粒的浓度近似呈线性正比关系。图 3 为实验制作的磁流体包覆光子晶体光纤耦合器实物图。

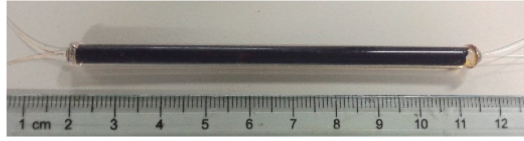


图 3 磁流体包覆的光子晶体光纤耦合器

Fig. 3 As-fabricated photonic crystal coupler cladded with magnetic fluid

2.2 耦合器的工作原理

根据耦合理论,耦合器耦合端的输出功率可表示为^[32]

$$P_4 = P_1 \sin^2(CL), \quad (1)$$

式中 L 为耦合结构的耦合长度, $C = 3\pi\lambda / [(32n_1a^2)(1 + 1/V)^2]$ 为整个耦合区域的耦合系数。 $V = [(2\pi a) / \lambda] (n_1^2 - n_0^2)^{1/2}$, λ 为入射光波长, a 为耦合区其中一根光纤的直径, n_0 和 n_1 分别为外界环境和光纤的折射率。由(1)式,耦合器的耦合系数 C 与外界环境折射率 n_0 、耦合长度 L 、耦合区径向尺寸 $2a$ 和入射光波长 λ 有关。当将磁流体包覆在耦合区时,由于磁流体的折射率 n_0 随外界磁场强度的变化而变化,耦合系数 C 也将随外界磁场强度的变化而变化,从而导致耦合器的直通端和耦合端的输出功率比随磁场强度的变化而变化,即可实现分光比可调的光子晶体光纤耦合器。将耦合器的输出分光比定义为 $P_4 / (P_3 + P_4)$ 。

3 实验结果与讨论

3.1 耦合器的磁场特性

图 4 为耦合器耦合特性的实验装置示意图。实验用的磁场产生装置为北京东方晨景科技有限公司生产的亥姆霍兹线圈,匀强磁场的方向垂直于耦合结构的轴线,磁场强度可通过调节供电电流连续调节。光源发出光的波长为 1550 nm,其最大输出功率为 1 mW,耦合器的输出信号可以被正常探测到。入射光进入耦合器的 P_1 端,直通端和耦合端的输出功率 P_3 和 P_4 由光电探测器监测和记录。

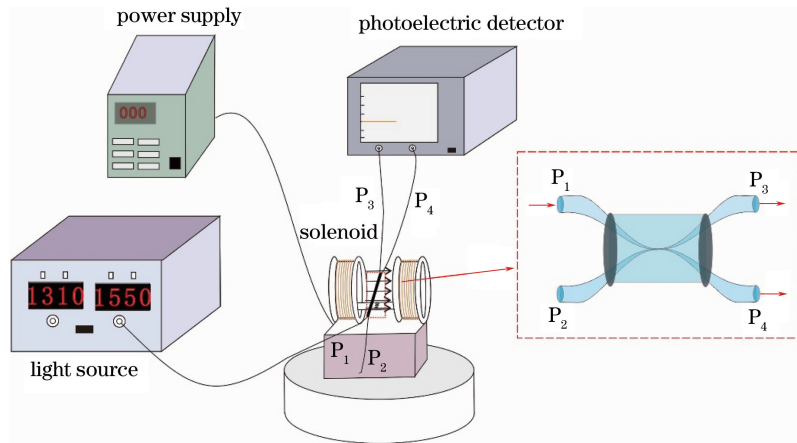


图 4 研究耦合器耦合特性的实验装置示意图

Fig. 4 Schematic of experimental setup for investigating the coupling characteristic of the as-fabricated coupler

图 5 为耦合区空气孔完全塌陷和耦合区空气孔部分塌陷的光子晶体光纤耦合器的分光比随磁场的变化关系。图 5 表明,空气孔完全塌陷的光子晶体光纤耦合器的分光比随磁场变化较显著,这是因为空气孔完全塌陷的光子晶体光纤与空气孔部分塌陷的结构相比,其对光的束缚能力减弱。为了进一步验证光子晶体光纤空气孔塌陷程度对光的约束能力的影响,使用全矢量有限差分法进行了数值模拟^[33]。图 6 为光子晶体光纤空气孔半径分别塌陷到 0.4, 0.2, 0.1, 0 μm (即完全塌陷)时,其传播模式的模场分布, x 和 y 分别表示空间位置坐标。图 6 表明,随着光子晶体光纤空气孔半径的减小,其传播模式的模场直径逐渐增大,纤芯能量逐渐减弱,包层能量逐渐增加。这是由于空气孔半径减少导致光子晶体光纤包层的有效折射率增大,进而对光的束缚能力减小。当空气孔半径塌陷到 0 时,光子晶体光纤的包层和纤芯有效折射率相同,纤芯能量将强烈

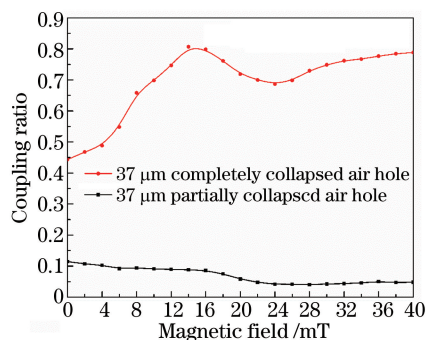


图 5 磁流体包覆的空气孔完全塌陷和部分塌陷光子晶体光纤耦合器的磁场响应特性

Fig. 5 Coupling characteristic of magnetic-fluid cladded photonic crystal fiber couplers with completely collapsed and partially collapsed air hole in different magnetic fields

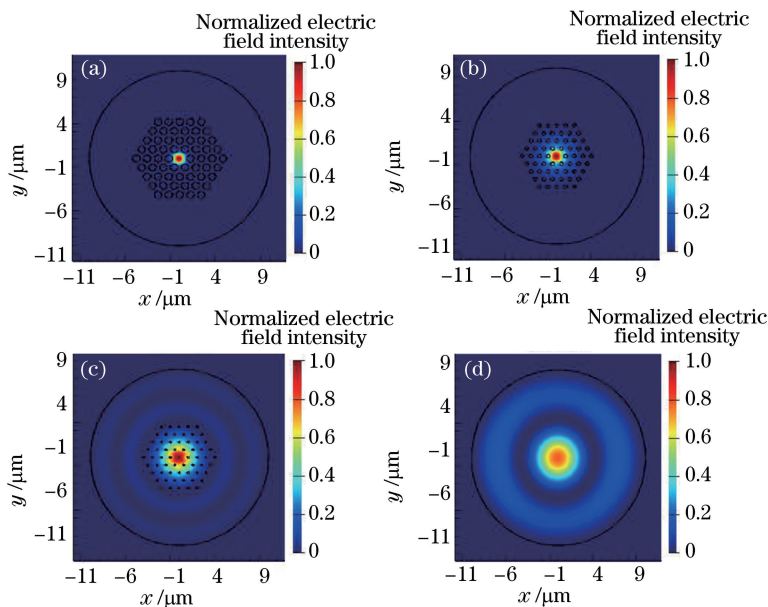


图 6 光子晶体光纤空气孔半径塌陷到(a) 0.4 μm , (b) 0.2 μm , (c) 0.1 μm 和 (d) 0 μm 时的模式电场分布

Fig. 6 Electric field distribution of the propagating mode within the photonic crystal fiber with different collapse degrees of the air hole. Air hole radius equals (a) 0.4 μm , (b) 0.2 μm , (c) 0.1 μm and (d) 0 μm , respectively

耦合到包层中。据此选择对磁场敏感的空气孔完全塌陷光子晶体光纤耦合器进行进一步的详细研究。

实验进一步制作了耦合区尺寸分别为 17, 27, 47 μm 的空气孔完全塌陷光子晶体光纤耦合器。实验研究发现,耦合区尺寸为 17 μm 的光子晶体光纤耦合器包覆磁流体后,光的传输损耗非常大,器件的透射光非常弱。因此仅比较耦合区尺寸为 27, 37, 47 μm 的空气孔完全塌陷光子晶体光纤耦合器的分光比随磁场的调谐特性,实验结果如图 7 所示。图 7 表明,空气孔完全塌陷光子晶体光纤耦合器的耦合区尺寸越小,其分光比随磁场的变化就越敏感。对图 7 中的线性部分进行拟合,可得耦合区尺寸为 27 μm 和 37 μm 的耦合器在 0~14 mT 磁场范围内,分光比随磁场变化的灵敏度分别为 0.0289 mT^{-1} 和 0.0275 mT^{-1} ;耦合区尺寸为 47 μm 的耦合器,在 0~26 mT 磁场范围内,其分光比随磁场变化的灵敏度为 0.0110 mT^{-1} 。通过优化耦合结构等相关参数(如增加耦合区的长度、选取合适浓度的磁流体等),耦合器分光比的可调范围和磁场调谐灵敏度将会得到进一步提高。图 7 还表明,当磁场强度大于 26 mT 时,耦合器的分光比随磁场的变化甚微,这是由于在高磁场区域,磁流体的内部结构随磁场的变化趋于饱和,因此其折射率等光学特性随磁场的进一步增大变化甚微。熔融拉锥光纤耦合器的分光比与耦合器的结构尺寸有很强的依赖关系,且与外界折射率呈正弦关系变化,因此,27 μm 耦合器的分光比变化趋势与 37 μm 和 47 μm 耦合器的响应趋势不一致。另外,光纤周围的磁流体在磁场作用下是非均匀对称分布的,且与磁场方向有关,因此耦合器的分光比与磁场方向也将有一定的关系。

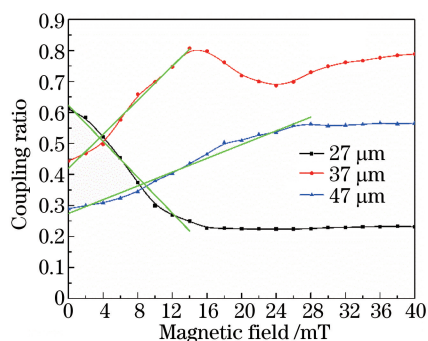


图 7 磁流体包覆的空气孔完全塌陷光子晶体光纤耦合器的耦合特性随磁场的变化关系

Fig. 7 Coupling characteristic of different magnetic-fluid cladde photonic crystal fiber couplers with completely collapsed air hole in different magnetic fields

3.2 耦合器的温度特性

光子晶体光纤通常具有较好的温度稳定性^[34],实验进一步研究了制作的光子晶体光纤耦合器的温度响应特性,其结果如图 8 所示。图 8 表明,耦合区的尺寸较大时,相应耦合器的分光比几乎不随温度变化。当耦合区尺寸非常小时,相应耦合器分光比显示出一定的温度依赖性。耦合区尺寸为 $27 \mu\text{m}$ 的耦合器,在 $25 \sim 65 \text{ }^\circ\text{C}$ 范围内的分光比相对变化率约为 29.6%。因此,在实际应用中,应综合考虑耦合器分光比的磁场调谐特性及温度响应特性,选择耦合区尺寸合适的空气孔完全塌陷光子晶体光纤耦合结构来制作分光比可调的耦合器。

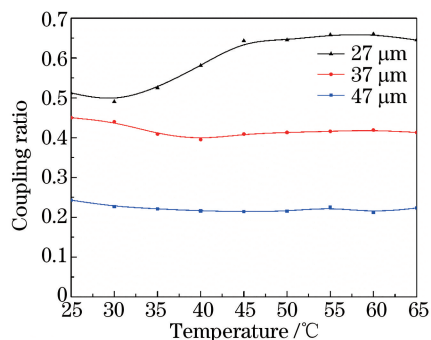


图 8 磁流体包覆的空气孔完全塌陷光子晶体光纤耦合器的温度响应特性

Fig. 8 Temperature response of different magnetic-fluid cladde photonic crystal fiber couplers with completely collapsed air hole

温度特性和尺寸关系的机理包括温度对磁流体折射率影响及温度热效应对耦合器本身材料和封装材料的影响。磁流体的热光系数约为 $10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$,远高于封装所用的四氟管和紫外固化胶的热光系数。初步实验发现,完全塌陷光子晶体光纤耦合器消除温度交叉敏感方面好于单模光纤耦合器。单模光纤的纤芯和包层的材料不同使得温度对耦合器分光比的影响较大;完全塌陷光子晶体光纤腰区材料完全相同,使得温度对耦合器分光比的影响相对较小。由于塌陷光子晶体光纤耦合器具有较好的稳健性,在 $20 \sim 70 \text{ }^\circ\text{C}$ 温度范围内,四氟管的热膨胀产生的应力等对耦合器的影响甚微。因此,相对于温度对磁流体折射率的影响来说,其他的影响相对较小。

4 结 论

实验研究了一种磁流体包覆的光子晶体光纤耦合器,其分光比可由磁场在线实时调节。实验结果表明,耦合区尺寸为 $27 \mu\text{m}$ 的空气孔完全塌陷光子晶体光纤耦合器,在 $0 \sim 14 \text{ mT}$ 磁场强度范围内,其分光比的磁场调谐灵敏度为 0.0289 mT^{-1} ,在 $25 \sim 65 \text{ }^\circ\text{C}$ 范围内的分光比随温度的相对变化率约为 29.6%。

参 考 文 献

- [1] 齐凤春. 磁性液体[J]. 材料导报, 1998, 12(2): 17-19.
- [2] Rosensweig R E. Ferrohydrodynamics[M]//Buschow K H J, Cahn R W, Flemings M C. Encyclopedia of materials: science and technology. 2nd ed. New York: Cambridge University Press, 2001: 3116-3127.
- [3] Pu Shengli. Influence of Brownian motion on the electrical properties of a nanostructured magnetic fluid[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology. 2009, 31(6): 517-520.
卜胜利. 布朗运动对纳米磁流体电学特性的影响[J]. 上海理工大学学报, 2009, 31(6): 517-520.
- [4] Hong C Y, Horng H E, Yang S Y. Tunable refractive index of magnetic fluids and its applications[J]. Physica Status Solidi C, 2004, 1(7): 1604-1609.
- [5] Pu Shengli, Chen Xianfeng. Dispersion stability requirements of the nanostructured magnetic liquid[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2008, 30(4): 335-338.
卜胜利, 陈险峰. 纳米磁性液体的分散稳定性分析[J]. 上海理工大学学报, 2008, 30(4): 335-338.
- [6] Chen Y F, Yang S Y, Tse W S, *et al.* Thermal effect on the field-dependent refractive index of the magnetic fluid film[J]. Applied Physics Letter, 2003, 82(20): 3481-3483.
- [7] Fan F, Chen S, Lin W, *et al.* Magnetically tunable terahertz magnetoplasmons in ferrofluid-filled photonic crystals[J]. Applied Physics Letters, 2013, 103(16): 161115.
- [8] Chen S, Fan F, Chang S, *et al.* Tunable optical and magneto-optical properties of ferrofluid in the terahertz regime[J]. Optics Express, 2014, 22(6): 6313-6321.
- [9] Horng H E, Hong C Y, Yang H C, *et al.* Magnetic field dependence of Cotton-Mouton rotation for magnetic fluid films[J]. Journal of Magnetism & Magnetic Materials, 1999, 201(1): 215-217.
- [10] Lv R Q, Zhao Y, Li H, *et al.* Theoretical analysis and experimental measurement of birefringence properties in magnetic fluid subjected to magnetic field[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2015, 51(7): 6600105.
- [11] Chen Y F, Han Q, Liu T G. All-fiber optical modulator based on no-core fiber and magnetic fluid as cladding[J]. Chinese Physics B, 2015, 24(1): 014214.
- [12] Candiani A, Argyros A, Leon-Saval S G, *et al.* A loss-based, magnetic field sensor implemented in a ferrofluid infiltrated microstructured polymer optical fiber[J]. Applied Physics Letters, 2014, 104(11): 111106.
- [13] Wu J, Miao Y, Song B, *et al.* Low temperature sensitive intensity-interrogated magnetic field sensor based on modal interference in thin-core fiber and magnetic fluid[J]. Applied Physics Letters, 2014, 104(25): 252402.
- [14] Luo J, Zhang G, Xie N, *et al.* A magnetic sensor based on a hybrid long-period fiber grating and a magnetic fluid[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(9): 998-1001.
- [15] Wang Q, Xia J, Liu X, *et al.* A novel current sensor based on magnetic fluid and fiber loop cavity ring-down technology[J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 15(11): 6192-6198.
- [16] Gao R, Lu D F, Cheng J, *et al.* Magnetic fluid-infiltrated anti-resonant reflecting optical waveguide for magnetic field sensing based on leaky modes[J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(15): 3490-3495.
- [17] Lei X Q, Peng B J, Chen D R, *et al.* An all-fiber magnetic field sensor based on dual-S-shaped optic fiber integrated with magnetic fluid[J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(4): 958-964.
- [18] Zhang R, Liu T, Han Q, *et al.* U-bent single-mode multimode-single-mode fiber optic magnetic field sensor based on magnetic fluid[J]. Applied Physics Express, 2014, 7(7): 072501.
- [19] Deng M, Liu D, Li D. Magnetic field sensor based on asymmetric optical fiber taper and magnetic fluid[J]. Sensors and Actuators A, 2014, 211: 55-59.
- [20] Yang D, Du L, Xu Z, *et al.* Magnetic field sensing based on tilted fiber Bragg grating coated with nanoparticle magnetic fluid[J]. Applied Physics Letters, 2014, 104(6): 061903.
- [21] Xia S H, Wang J, Lu Z X, *et al.* Birefringence and magneto-optical properties in oleic acid coated Fe₃O₄ nanoparticles: application for optical switch[J]. International Journal of Nanoscience, 2011, 10(3): 515-520.
- [22] Layeghi A, Latifi H, Frazao O. Magnetic field sensor based on nonadiabatic tapered optical fiber with magnetic fluid[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26(19): 1904-1907.
- [23] Zhao Y, Wu D, Lv R Q, *et al.* Magnetic field measurement based on the Sagnac interferometer with a ferrofluid-filled high-birefringence photonic crystal fiber[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2016, 65(6): 1503-1507.
- [24] Wang Q, Liu X, Xia J, *et al.* A novel long-tail fiber current sensor based on fiber loop ring-down spectroscopy and

- Fabry-Perot cavity filled with magnetic fluid[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2015, 64(7): 2005-2011.
- [25] Yang J, Dong X, Zheng Y, *et al.* Magnetic field sensing with reflectivity ratio measurement of fiber Bragg grating[J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 15(3): 1372-1376.
- [26] Luo L, Pu S, Tang J, *et al.* Highly sensitive magnetic field sensor based on microfiber coupler with magnetic fluid[J]. Applied Physics Letters, 2015, 106(19): 193507.
- [27] Chen S, Fan F, He X, *et al.* Multifunctional magneto-metasurface for terahertz one-way transmission and magnetic field sensing[J]. Applied Optics, 2015, 54(31): 9177-9182.
- [28] Russell P S J. Photonic crystal fibers[J]. IEEE Journal of Lightwave Technology, 2006, 24(12): 4729-4746.
- [29] Wang X, Thomas F, Wang Z. Semi-reciprocal polarization maintaining fibre coupler with distinctive transmission characteristics[J]. Scientific Reports, 2015, 5: 17268.
- [30] Shi Weihua, You Chengjie. High sensitivity magnetic field and temperature sensor of photonic crystal fiber based on directional coupling[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(7): 0706004.
施伟华, 尤承杰. 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[J]. 光学学报, 2016, 36(7): 0706004.
- [31] Chen Huifang, Yan Huimin, Shan Guofeng. Design of two-dimensional bending vector sensor based on selective infiltration of photonic crystal fiber[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(1): 0105003.
陈慧芳, 严惠民, 单国峰. 基于选择填充光子晶体光纤的二维弯曲矢量传感器设计[J]. 中国激光, 2016, 43(1): 0105003.
- [32] Payne F P, Hussey C D, Yataki M S. Modelling fused single-mode-fibre couplers[J]. Electronics Letters, 1985, 21(11): 461-462.
- [33] Zhu Z, Brown T G. Full-vectorial finite-difference analysis of microstructured optical fibers[J]. Optics Express, 2002, 10(17): 853-864.
- [34] Wei Yan, Chang Deyuan, Zheng Kai, *et al.* Numerical simulation of temperature properties of photonic crystal fibers[J]. Chinese J Lasers, 2007, 34(7): 945-951.
卫 延, 常德远, 郑 凯, 等. 光子晶体光纤的温度特性数值模拟[J]. 中国激光, 2007, 34(7): 945-951.