

保偏空芯带隙光子晶体光纤温度特性研究

李绪友¹ 许振龙^{1*} 杨汉瑞² 刘攀¹ 凌卫伟¹

¹哈尔滨工程大学自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001

²东北电力大学自动化工程学院, 吉林 吉林 132012

摘要 提出了一种具有良好保偏(PM)特性的空芯带隙光子晶体光纤(PBF)结构,利用全矢量有限元方法(FEM)对光纤有效折射率、拍长及限制损耗特性受温度波动的影响进行了研究。研究表明,在1.55 μm波长处,该PBF的双折射高达 6.19×10^{-3} ,拍长不超过0.25 mm;PBF拍长对温度波动不敏感,拍长温度敏感系数低于 2.86×10^{-8} m/°C,比常规的熊猫保偏光纤低两个数量级;光纤损耗对温度波动较为敏感,两正交偏振态限制损耗会随温度提高而增大。这种具有极低拍长温度敏感系数的PM-PBF可以有效降低谐振式光纤陀螺(RFOG)中热致偏振不稳定带来的误差,在RFOG、光纤通讯、光纤传感等领域具有重要的应用价值。

关键词 光纤光学;保偏空芯带隙光子晶体光纤;全矢量有限元法;热致偏振串扰;超低拍长温度敏感性

中图分类号 TN253 **文献标识码** A

doi: 10.3788/CJL201643.0405003

Analysis of Thermal Properties in a Polarization-Maintaining Air-Core Photonic Bandgap Fiber

Li Xuyou¹ Xu Zhenlong¹ Yang Hanrui² Liu Pan¹ Ling Weiwei¹

¹College of Automation, Harbin Engineering University, Harbin, Heilongjiang 150001, China

²School of Automation Engineering, Northeast Dianli University, Jilin, Jilin 132012, China

Abstract A kind of air-core photonic band gap fiber (PBF) with outstanding polarization-maintaining (PM) property is proposed. The effects of temperature variation on the effective index, beat-length and confinement loss are studied numerically based on full vector finite element method (FEM). It is found that the birefringence of the PBF is as high as 6.19×10^{-3} , and beat-length is as short as 0.25 mm at the wavelength of 1.55 μm. The beat-length of this PBF is insensitive to the temperature, and the temperature-dependent beat-length coefficient is as low as 2.86×10^{-8} m/°C, which is typically two orders of magnitude lower than those of conventional panda fibers. The loss of the PBF is sensitive to temperature, and the confinement loss of the two orthogonal polarized modes increases with the increasing temperature. The PM-PBF with ultra-low temperature-dependent beat-length coefficient can reduce errors induced by the thermal polarization crosstalk apparently in interferometric applications such as resonant fiber optic gyroscope (RFOG), which plays an important role in RFOG, optical communications, optical fiber sensors and so on.

Key words fiber optics; polarization-maintaining air-core photonic bandgap fiber; full vector finite element method; thermally induced polarization crosstalk; ultra-low beat-length thermal sensitivity

OCIS codes 060.5259; 060.2420; 060.2400; 060.2800

1 引言

谐振式光纤陀螺(RFOG)是一种基于光纤环形谐振腔中Sagnac效应发展起来的新一代光纤惯性器件^[1],

收稿日期: 2015-10-01; 收到修改稿日期: 2015-12-05

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项项目(2012YQ160185)、东北电力大学博士科研启动基金(BSJXM-201419)、吉林市科技发展计划资助项目(20156404)

作者简介: 李绪友(1964—),男,博士,教授,主要从事光纤陀螺、光纤传感技术方面的研究。E-mail: lixuyou@hrbeu.edu.cn

*通信联系人。E-mail: xzlsdlg@163.com

通过测量光纤环形谐振腔中沿顺时针、逆时针方向传播的光束的谐振频率差,实现对外界旋转角速率的测量。与干涉式光纤陀螺(IFOG)相比,RFOG所需的光纤长度要短的多,通常只有几米到几十米,在减小系统体积的同时也显著降低了谐振腔中因温度不均匀带来的热致非互异性噪声,并且,光纤环中骨架的影响也远远低于IFOG,还具有检测精度高、动态范围大、理论精度更高等优点^[2]。另外,由于RFOG采用窄线宽高相干光源,其波长稳定性要比IFOG所采用的低相干光源高得多。RFOG无论在结构上还是抗干扰性等方面都比IFOG更加具有优势。然而,谐振腔中偏振波动^[3-4]、光克尔效应^[5]、瑞利背向散射^[6]等噪声限制了RFOG的发展。其中,偏振波动噪声是影响RFOG长期稳定性的主要因素,也是限制RFOG性能的主要因素^[7]。目前为止,一般采用保偏光纤解决这一问题,常见方法为使用保偏光纤加偏振轴旋转熔接或在线起偏器;使用保偏光纤耦合器拼接单偏振光纤组成谐振腔^[8-11],从而增大两个本征偏振态(ESOP)谐振点的距离,减小次ESOP对谐振腔输出的影响。然而,无论通过何种熔接方案,普通保偏光纤的双折射总是不同程度地受到外界应力扰动、温度波动等因素的影响,温度波动引起的偏振串扰仍制约着RFOG的性能。而空芯带隙光子晶体光纤(PBF)^[12-14]的出现为解决这一问题提供了新的方法。与普通保偏光纤的应力双折射不同,保偏空心带隙光子晶体光纤(PM-PBF)的双折射是由结构不对称引起,对温度、磁场、辐射等敏感性较低,且设计自由度大。特别地,PBF将光局限在空气中,而非石英材料中进行传输,其弯曲损耗、光克尔效应、舒珀效应等比实芯光纤小得多^[15-17],这也有助于谐振腔尺寸的小型化。鉴于PM-PBF在RFOG偏振波动噪声抑制中的重要价值,有必要对其温度敏感特性进行研究。然而目前已有的报道主要集中在折射率引导性光子晶体光纤(PCF)方面^[18-21],有关PBF温度敏感特性的研究还很少。

本文提出了一种具有良好保偏特性的PBF,利用全矢量有限元分析法(FEM)研究了PBF的模场分布及保偏特性,并重点对光纤有效折射率、拍长及限制损耗受温度波动的影响进行了研究。研究表明:在1.55 μm波长处,该光纤的模式双折射高达 6.19×10^{-3} ,拍长不超过0.25 mm;光纤拍长对温度波动不敏感,拍长温度敏感系数低于 2.86×10^{-8} m/°C,比普通熊猫保偏光纤低2个数量级;光纤损耗对温度波动较为敏感,两正交偏振态限制损耗会随温度提高而增大。这种具有极低拍长温度敏感系数的PM-PBF可以有效降低保偏光纤应用中热致偏振串扰带来的影响,在RFOG等干涉应用、光纤通讯、光纤传感等领域具有重要的应用价值。

2 研究方法 with 结构模型

利用全矢量有限元方法(FEM)^[22]进行研究。全矢量有限元法的优点在于可以有效地识别光纤中的传输模式,对不同光子晶体光纤的模型进行网格化处理,求解精度高,适于研究各种复杂结构的光子晶体光纤。

所提出的PBF截面结构如图1所示。该结构由常见六边形PBF改进而来, Λ 为包层空气孔间距, d_1 、 d_2 、 d_3 分别为包层不同空气孔孔径, d_c 为纤芯空气孔孔径, d_1 位于 d_c 与 d_2 孔之间。光纤结构参数如下: $\Lambda=2.2 \mu\text{m}$, $d_1=0.7 \mu\text{m}$, $d_2=1.0 \mu\text{m}$, $d_3=2.0 \mu\text{m}$,基底材料为熔融石英,折射率为1.45(室温25 °C条件下),用 n_0 表示,空气折射率为1.0。为了研究光纤的损耗特性,采用了完美匹配层边界条件。

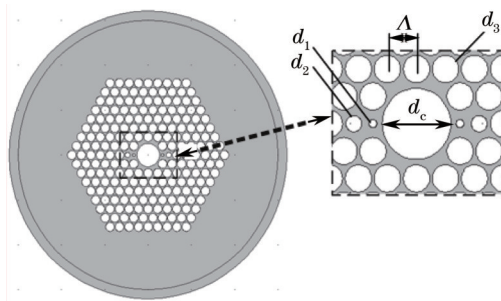


图1 PM-PBF截面结构

Fig.1 Cross section of the PM-PBF

一般而言,可以用模式双折射(B)或者拍长(L_b)来衡量光纤的保偏性能,而在实际应用中,一般通过测量保偏光纤的拍长获得光纤的保偏特性。为了与常见的保偏光纤进行比较研究,选择 L_b 作为衡量光纤保偏性能的指标。保偏光纤的 L_b 与 B 成反比,表示为^[23]

$$L_b = \frac{\lambda}{B} = \frac{\lambda}{|\text{Re}(n_{\text{eff}}^x - n_{\text{eff}}^y)|}, \quad (1)$$

式中 λ 为光波长, n_{eff}^x 、 n_{eff}^y 分别为 x 、 y 偏振方向基模的有效折射率, Re代表有效折射率实部。对保偏光纤而言, B 越高 L_b 越短, 保偏性能越好, 不同方向偏振态之间的串扰越少。

PBF的另外一个重要特性是损耗特性, 较大的损耗是基于PBF的光纤谐振腔面临的首要问题^[24], 在此处, 对PBF的限制损耗 L_c 进行研究。限制损耗即泄漏损耗, 是指部分传导光在传输过程中由包层泄漏出去而产生的光功率损耗。研究表明, PBF的包层空气孔层数每增加一层, 限制损耗就可以降低大约一个数量级^[25], 从理论上来说, 只有当包层空气孔层数达到无穷多时, 才能够确保完全没有光泄漏。限制损耗可表示为

$$L_c = 8.686 \frac{2\pi}{\lambda} \text{Im}(n_{\text{eff}}^i), \quad (2)$$

式中 $i=x, y$, Im代表有效折射率的虚部。

当环境温度发生波动时, PBF基模有效折射率会随温度变化, 一般而言, 折射率变化是由以下三个因素造成^[26]: 1) 热膨胀作用引起的光纤截面结构参数变化; 2) 热光效应引起的光纤材料折射率变化; 3) 不同材料热膨胀系数不匹配引起的热应力作用。本文PM-PBF基底材质为纯石英, 无其他材料掺杂, 热应力作用引起的折射率变化可以忽略^[20]。

当温度发生波动时, 由热膨胀作用引起的光纤截面结构参数变化可表示为^[21]

$$A(T) = A_0 \times [1 + \alpha_{\text{therm}} \times (T - T_0)], \quad (3)$$

式中 T 与 T_0 分别为实际温度与室温(298.13K), $A(T)$ 与 A_0 分别为光纤在实际温度及室温下的结构参数(包括 d_1 、 d_2 、 d_3 、 A), α_{therm} 为石英的热膨胀系数, $\alpha_{\text{therm}} = 5.5 \times 10^{-7} \text{ K}^{-1}$ 。

由热光效应引起的光纤材料折射率变化可表示为^[20-21]

$$n(T) = n_0 + n_{\text{therm}} \times (T - T_0), \quad (4)$$

式中 $n(T)$ 及 n_0 分别为石英在实际温度及室温下的折射率, n_{therm} 为光纤材料的热光折射率系数, 本文只考虑石英折射率随温度变化, 石英材料的热光折射率系数为 $1.1 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ 。

3 数值结果及分析

与传统意义上的折射率引导性光纤导光机理不同, PBF是利用光子带隙(PBG)效应进行导光, 即利用包层中有序排列的空气孔形成光子带隙, 通过包层的二维光子晶体的布拉格衍射, 使一定波长的光仅能以缺陷态在纤芯中传播。一般来说, 带隙越大, 其性能就越稳定。经过研究发现, 本文PBF在1.52~1.57 μm 波长范围内, 光能保持单模传输, 即1.52~1.57 μm 是该PBF的一个带隙范围, 且在带隙中心1.55 μm 附近, PBF具有较低的损耗、良好的模场特性及保偏特性。本文PBF结构通过引入小空气孔破坏光纤正交方向的对称性, 获得了很高的双折射。研究发现, 虽然在某些波长处, 表面模式对纤芯模式的影响稍有增大, 但是没有出现折射率引导模式, 光纤仍能在较宽的范围内保持良好的单模传输特性。为了研究环境温度波动对光纤特性的影响, 进行了大量的仿真与分析, 分别研究了在热膨胀及热光效应双重作用下, 当环境温度在-60 $^{\circ}\text{C}$ ~80 $^{\circ}\text{C}$ 范围内波动时, 光纤有效折射率、拍长及限制损耗受温度变化的影响, 并与一些具有典型意义的相关研究进行了性能对比。

3.1 PBF的模场分布及保偏性能

图2为光纤两个正交偏振基模模场分布情况, 在1.55 μm 波长处, PBF具有良好的模场特性, 光主要集中在纤芯空气中传播, 只有少量传导光在传输过程中由包层泄漏出去而产生光功率损耗, 这是有限的包层空气孔层数造成的(本文包层空气孔层数为7), 如第2节所述, PBF的包层空气孔层数每增加一层, 限制损耗就可以降低大约一个数量级。从理论上来说, 只有当包层空气孔层数达到无穷多时, 才能够确保完全没有光泄漏, 因此随着包层气孔层数的增加, 光纤模场束缚能力不断增强, 光能损耗会持续降低。

图1结构的PBF在带隙范围内基模有效折射率, 双折射及拍长随波长变化情况如图3(a)、(b)所示。研究发现, 由于光场束缚作用较强, PBF带隙范围内只存在很弱的表面模, 折射率传导模式及高阶模式几乎没有出现, 与基模相比, 这些模式的影响可以忽略。此处只考虑基模。PBF传输的模式个数不仅和纤芯半径有关, 还和

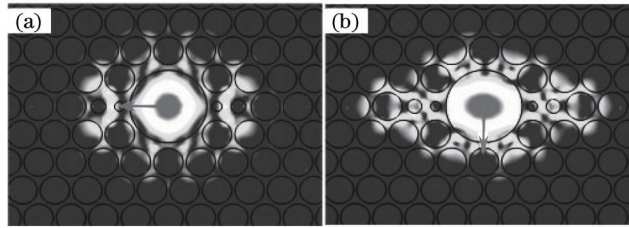


图2 1.55 μm 波长处(a)x 偏振和(b)y 偏振基模模场分布

Fig.2 Modal field distributions of (a) *x*-polarization and (b) *y*-polarization fundamental modes at wavelength of 1.55 μm 特定波长下光子带隙的上下边沿有关^[27]。如图3(a)所示,基模有效折射率曲线同上下带隙边缘发生交叉形成低频和高频截止,带隙范围为 50 nm,传输窗口稍窄,但是在 RFOG 等应用中,一般采用窄线宽高相干光源,其单波长稳定性要求比 IFOG 所采用的低相干光源高得多,因此,这种 PBF 的传输窗口完全能满足这一要求。

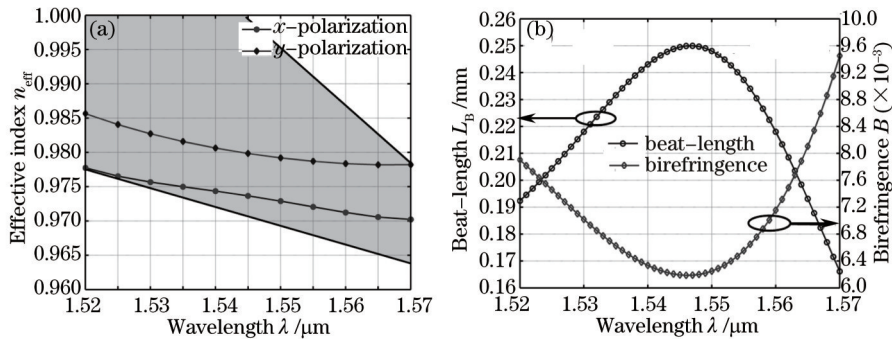


图3 (a) 带隙范围内基模有效折射率; (b) 双折射及拍长随波长变化曲线

Fig.3 (a) Effective index of the fundamental modes within the band-gap; (b) variation curves of birefringence and beat-length as a function of wavelength

从图中可以看出,在 1.52~1.57 μm 波长范围内,光纤模式双折射随波长的增加先减小后增大,在 1.55 μm 波长处光纤模式双折射达到 6.19×10^{-3} ,比普通保偏光纤至少高一个数量级。相应地,光纤拍长随波长的增加先变长后变短,在 1.55 μm 波长处光纤拍长不超过 0.25 mm。由此可见,本文 PBF 具有良好的保偏性能,可应用在光纤陀螺、光纤水听器等领域。

3.2 温度波动对 PBF 折射率及拍长的影响

温度波动对 PBF 在 *x* 偏振及 *y* 偏振方向基模有效折射率及拍长的影响情况如图 4 所示。

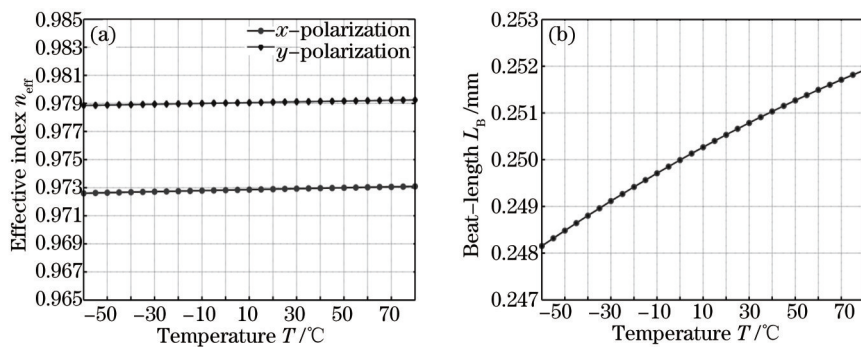


图4 温度波动对 PM-PBF(a)折射率和(b)拍长变化的影响

Fig.4 Effects of temperature fluctuation on (a) effective refractive index and (b) beat-length of the PM-PBF

如图4(a)所示,在 -60 °C~80 °C 温度范围内,*x* 偏振及 *y* 偏振方向基模的有效折射率分别在 0.973 与 0.979 附近波动,且均随温度升高而增大,而 *x* 偏振基模有效折射率始终小于 *y* 偏振方向。同时,*x* 偏振方向基模有效折射率对温度变化更加敏感。进一步研究表明,*x* 偏振及 *y* 偏振基模有效折射率敏感系数分别为 $4.57 \times 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 和 $2.1 \times 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$,这意味着 *x* 偏振态有效折射率比 *y* 偏振态增长更快,两正交偏振态有效折射率之差会随温度的提高而减小,由(1)式可知,光纤双折射会随温度单调减小,拍长会随温度单调增长,这一结论也可由图4(b)看出。由图4(b)可知,随着温度的增加,PBF 拍长由 0.248 mm 增长到 0.252 mm,拍长温度敏感系数低至

$2.857 \times 10^{-8} \text{ m/}^\circ\text{C}$, 只有普通熊猫型保偏光纤拍长温度敏感系数的 1/200。可以看出, 本文 PM-PBF 拍长具有很低的温度敏感性。

另外, 经过进一步研究发现, 该型 PBF 具有较高的参数误差容错性, 当 d_1 、 d_2 分别在 $0.68 \sim 0.72 \mu\text{m}$ 、 $0.98 \sim 1.1 \mu\text{m}$ 范围内波动时, PBF 具有相对平稳的拍长, 而热膨胀作用引起的气孔尺寸变化很小。因此该 PBF 也具有较高的参数误差温度稳定性。

3.3 温度波动对 PBF 损耗特性的影响

环境温度波动对 PBF 限制损耗特性的影响如图 5 所示, 由图 5 可知, PBF 两个正交偏振态的限制损耗均随温度的提高而增大, 且 x 偏振态限制损耗始终高于 y 偏振态。对 y 偏振态而言, 在 $-40 \text{ }^\circ\text{C} \sim 20 \text{ }^\circ\text{C}$ 温度范围内, 限制损耗保持相对稳定, 均低于 0.01 dB/m ; 当温度高于 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 时限制损耗迅速增大。而对于 x 偏振态, 在 $-40 \text{ }^\circ\text{C} \sim 0 \text{ }^\circ\text{C}$ 温度范围内, 限制损耗保持相对稳定, 均低于 0.04 dB/m ; 当温度高于 $0 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 限制损耗急剧增加。显然, x 偏振态损耗特性受温度波动影响要大于 y 偏振态, 这一点与 PBF 保偏特性受温度波动的影响相类似。

PBF 虽然损耗比现有普通光纤要大, 但是在 RFOG 等干涉应用中所需光纤长度只有十几米, 较大的损耗并不会影响此类光纤在 RFOG 等方面的应用^[24]。

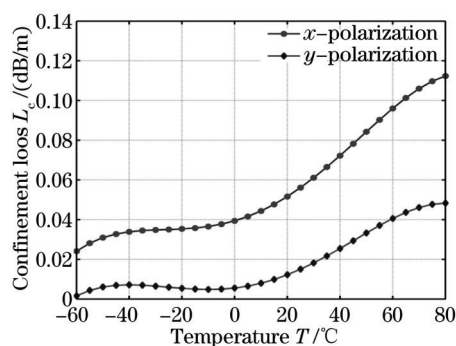


图 5 温度波动对 PBF 限制损耗特性的影响

Fig.5 Effect of temperature fluctuation on the confinement loss of the PBF

由以上研究可知, 本文 PBF 的 x 偏振基模的有效折射率、拍长及限制损耗对环境温度波动更加敏感。而 y 偏振态有效折射率始终高于 x 偏振态, 可以分别将 x 、 y 偏振轴作为保偏光纤的快轴及慢轴, 而快轴对温度的敏感性要高于慢轴, 这一点与普通保偏光纤相类似。

将 PBF 的保偏及温度特性与其他相关研究结果相比较, 比较结果如表 1 所示。由表 1 可知, PBF 具有良好的保偏性能, 其保偏性能比已有文献中的熊猫光纤、PM-PCF 及商用 PM-PBF 至少高 1 个数量级; 文献[29]中的两种 PBF 及本文 PBF 偏振态有效折射率对温度变化敏感性均远低于实芯光纤, 这得益于 PBF 的空气导光机制; 本文 PM-PBF 拍长温度敏感系数分别为熊猫保偏光纤、PM-PCF、PM-1550-01 的 1/200、1/5 和 1/3。由此可见, 本文 PBF 是一种具有极低拍长温度敏感特性的高保偏光纤, 可以有效降低保偏光纤应用中热致偏振串扰带来的影响, 在 RFOG 等干涉应用、光纤通讯、光纤传感等领域具有重要的应用价值。

表 1 几种光纤的保偏及温度特性

Table 1 Polarization-maintaining and thermal properties of several fibers

Fiber	Source	$B \text{ l}(25^\circ\text{C})$	L_B / mm	$dn/dT \text{ l}(^\circ\text{C}^{-1})$	$dL_B/dT \text{ l}(m/^\circ\text{C})$
Panda	Ref.[28]	3.69×10^{-4}	4.20	1.1×10^{-5}	5.75×10^{-6}
PM-PCF	Ref.[29]	1.78×10^{-4}	8.70	1.1×10^{-5}	1.48×10^{-7}
HC-1550-02	Ref.[30]	2.07×10^{-5}	75.0	4.4×10^{-7}	7.28×10^{-6}
PM-1550-01	Ref.[30]	1.78×10^{-4}	8.70	5.0×10^{-8}	9.20×10^{-8}
PM-PBF	Proposed	6.19×10^{-3}	0.25	2.1×10^{-7}	2.86×10^{-8}

另外, 本文 PBF 结构仍可以通过毛细管堆栈、拉制工艺得到, 所不同的是纤芯毛细管需要由特制的外部为六边形、内部为圆形的石英管控制而成。2010 年, D s v dav y 等^[31]通过改进的毛细管堆栈、拉制工艺得到了类似于本文结构的硫系玻璃空芯光纤, 拉制结果表明, 这种结构空芯光纤包层及纤芯气孔能保持良好的形状而不塌陷。这种结构空芯光纤的成功拉制, 为本文提出的 PBF 的制造提供了很好的借鉴。

4 结 论

作为新一代光纤惯性器件,RFOG具有检测精度高、动态范围大、理论精度更高等优点,然而温度波动引起的偏振串扰仍制约着RFOG的性能,PBF的出现为解决这一问题提供了新的方法。鉴于PBF在RFOG偏振波动噪声抑制中的重要价值,有必要对其温度敏感特性进行研究。提出了一种具有良好保偏特性的PBF,利用全矢量有限元分析法研究了PBF的模场分布及保偏特性,并重点对光纤有效折射率、拍长及限制损耗受温度波动的影响进行了研究。研究表明,在 $1.55\ \mu\text{m}$ 波长处,该光纤的模式双折射高达 6.19×10^{-3} ;光纤拍长对温度波动不敏感,拍长温度敏感系数低于 $2.86\times 10^{-8}\ \text{m}/^\circ\text{C}$,比普通熊猫保偏光纤低两个数量级;温度对光纤损耗的影响较大,两正交偏振态限制损耗会随温度提高而增大。这种具有极低拍长温度敏感系数的PM-PBF可以有效降低保偏光纤应用中热致偏振串扰带来的影响,在RFOG等干涉应用、光纤通讯、光纤传感等领域具有重要的应用价值。

参 考 文 献

- 1 Chow W W, Gea-Banaciloche J, Pedrotti L M, *et al.*. The ring laser gyro[J]. *Reviews of Modern Physics*, 1985, 57(1): 61-104.
- 2 Yu Xiujuan, Liao Yanbiao, Zhang Min, *et al.*. Kerr effect in an optical passive ring-resonator gyro using a hollow-core photonic band-gap fiber[J]. *Chinese J Lasers*, 2008, 35(3): 430-435.
于秀娟, 廖延彪, 张敏, 等. 谐振式空心光子带隙光纤陀螺中的光克尔效应[J]. *中国激光*, 2008, 35(3): 430-435.
- 3 Iwatsuki K, Hotate K, Higashiguchi M. Eigenstate of polarization in a fiber ring resonator and its effect in an optical passive ring-resonator gyro[J]. *Appl Opt*, 1986, 25 (25): 2606-2612.
- 4 Ma H, Chen Z, Yang Z, *et al.*. Polarization-induced noise in resonator fiber optic gyro[J]. *Appl Opt*, 2012, 51(28): 6708-6717.
- 5 Iwatsuki K, Hotate K, Higashiguchi M. Kerr effect in an optical passive ring-resonator gyro[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1986, 4(6): 645-651.
- 6 Iwatsuki K, Hotate K, Higashiguchi M. Effect of Rayleigh backscattering in an optical passive ring-resonator gyro[J]. *Appl Opt*, 1984, 23(21): 3916-3924.
- 7 Ma H, Chen Z, Jin Z. Single-polarization coupler based on air-core photonic bandgap fibers and implications for resonant fiber optic gyro[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 32(1): 46-54.
- 8 Takiguchi K, Hotate K. Removal of lock-in phenomenon in optical passive ring-resonator gyro by using optical Kerr effect in fiber resonator [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 1992, 4(7): 810-812.
- 9 Wang X, He Z, Hotate K. Reduction of polarization fluctuation induced drift in resonator fiber optic gyro by a resonator with twin 90 degrees polarization axis rotated splices[J]. *Opt Express*, 2010, 18(2): 1677-1683.
- 10 Ma H, Yu X, Jin Z. Reduction of polarization-fluctuation induced drift in resonator fiber optic gyro by a resonator integrating in-line polarizer[J]. *Opt Lett*, 2012, 37(16): 3342-3344.
- 11 Yan Y, Ma H, Jin Z. Reducing polarization-fluctuation induced drift in resonant fiber optic gyro by using single-polarization fiber[J]. *Opt Express*, 2015, 23 (3): 2002-2009.
- 12 Song Jingming, Sun Kang, Xu Xiaobin. Scattering loss analysis and structure optimization of hollow-core photonic bandgap fibers[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(11): 1105003.
宋镜明, 孙康, 徐小斌. 空芯光子带隙光纤散射损耗特性及结构优化研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(11): 1105003.
- 13 Huang Chongde, Chen Dijun, Cai Haiwen, *et al.*. Laser frequency stabilization technology based on hollow-core photonics crystal fiber gas cell[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(8): 0802006.
黄崇德, 陈迪俊, 蔡海文, 等. 空芯光子晶体光纤吸收池的激光稳频技术[J]. *中国激光*, 2014, 41(8): 0802006.
- 14 Kim H K, Michel J F, Dignonet, Gordon S. Air-core photonic bandgap fiber-optic gyroscope[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2006, 24(8): 3169-3174.
- 15 Sanders G A, Strandjord L K, Qiu T. Hollow core fiber optic ring resonator for rotation sensing[C]. *OFS*, 2006, ME6.
- 16 Terrel M A, Dignonet M J F, Fan S. Resonant fiber optic gyroscope using an air-core fiber[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, 30(7): 931-937.
- 17 Feng Lishuang, Deng Xuewen, Ren Xiaoyuan, *et al.*. Researcher on hollow core photonic bandgap fiber ring resonator based on micro-optics structure[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(8): 0806002.
冯丽爽, 邓学文, 任小元, 等. 基于微光学结构的空芯光子带隙光纤环形谐振腔研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(8): 0806002.

- 18 Lu Lin, Yang Yuanhong, Li Hongying. Study of polarization-maintaining photonic crystal fibers with zero birefringence 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.
- 19 Cao Ye, Cui Danning, Tong Zhenrong, *et al.*. Temperature sensing properties of octagonal photonic crystal fiber[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Nankaiensis*, 2013, 46(4): 100-106.
 曹 晔, 崔丹宁, 童峥嵘, 等. 正八边形双芯光子晶体光纤的温度传感特性[J]. *南开大学学报(自然科学版)*, 2013, 46(4): 100-106.
- 20 Song J, Sun K, Li S, *et al.*. Phase sensitivity to temperature of the guiding mode in polarization-maintaining photonic crystal fiber[J]. *Appl Opt*, 2015, 54 (24): 7330-7334.
- 21 Zhao H, Chen M, Li G. Temperature dependence of birefringence in polarization-maintaining photonic crystal fibres[J]. *Chinese Physics B*, 2012, 21(6): 068404.
- 22 Rahman B M A, Namassivayane K, Agrawal A, *et al.*. Characterizations of photonic crystal fibers by using a full-vectorial finite element method[C]. *The International Society for Optical Engineering*, 2006, 6369: 636904.
- 23 Wang Erlei, Jiang Haiming, Xie Kang, *et al.*. Photonic crystal fibers with high nonlinearity, large birefringence and multiple zero dispersion-wavelength[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(13): 134210.
 王二垒, 姜海明, 谢 康, 等. 一种高双折射高非线性多零色散波长光子晶体光纤[J]. *物理学报*, 2014, 63(13): 134210.
- 24 Ma H, Chen Z, Jin Z. Single-polarization coupler based on air-core photonic bandgap fibers and implications for resonant fiber optic gyro[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 32(1): 46-54.
- 25 Saitoh K, Koshiba M. Confinement losses in air-guiding photonic bandgap fibers[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2003, 15(2): 236-238.
- 26 Ma P, Song N, Jin J, *et al.*. Birefringence sensitivity to temperature of polarization maintaining photonic crystal fibers[J]. *Opt Laser Technol*, 2012, 44(6): 1829-1833.
- 27 Qi Yuefeng, Zhou Liying, Bi Weihong, *et al.*. Research on transmission mechanism and characteristics of hollow-core photonic bandgap fiber gratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(10): 1006006.
 齐跃峰, 周丽英, 毕卫红, 等. 空芯光子带隙光纤成栅机理及特性研究[J]. *光学学报*, 2013, 33(10): 1006006.
- 28 Wegmuller M, Legre M, Gisin N, *et al.*. Detailed polarization properties comparison for three completely different species of highly birefringent fibers[C]. *Optical Fiber Measurements, 2004, Technical Digest: Symposium on, 2004: 119-122.*
- 29 Zhang F, Lit W Y. Temperature and strain sensitivity measurements of high-birefringent polarization-maintaining fibers[J]. *Appl Opt*, 1993, 32(13): 2213-2218.
- 30 Zhao X, Louveau J, Chamoun J, *et al.*. Thermal sensitivity of the birefringence of air-core fibers and implications for the RFOG[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 32(14): 2577-2581.
- 31 Désévéday F, Renversez G, Troles J, *et al.*. Chalcogenide glass hollow core photonic crystal fibers[J]. *Opt Materials*, 2010, 32(11): 1532-1539.

栏目编辑: 王晓琰