

保偏微纳光纤双折射的温度特性

蒋晓勇, 肖悦娱*

上海大学特种光纤与光接入网省部共建重点实验室, 上海 200072

摘要 保偏微纳光纤在光通信、传感检测、非线性光学和量子光学等领域有着广阔的应用前景, 在应用中保持其温度稳定性是一个关键问题。通过仿真分析与实验探究了保偏微纳光纤双折射的温度特性。通过偏光干涉法测得干涉谱随着温度增加发生蓝移, 精确地获得温度与光纤双折射的变化关系。实验结果证明, 温度对保偏微纳光纤的影响远小于对普通保偏光纤的影响, 该现象与理论分析的结果相吻合。

关键词 光纤光学; 保偏微纳光纤; 偏光干涉法; 双折射; 温度特性

中图分类号 TN929

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0806001

Temperature Characteristics of Birefringence of Polarization-Maintaining Micro/nanofiber

Jiang Xiaoyong, Xiao Yueyu*

Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, Shanghai University, Shanghai 200072, China

Abstract Polarization-maintaining micro/nanofibers have various applications in fields including optical communication, sensors, nonlinear optics, and quantum optics. Temperature stability is a key factor in the numerous applications of such fibers. Herein, the temperature characteristics of birefringence of polarization-maintaining micro/nanofibers are studied through experiments and software analysis. By using the polarization interference method, a blue-shift interference spectrum can be obtained with the increase of the temperature. The relationship between temperature and birefringence is obtained. The experimental results show that the influence of temperature on polarization-maintaining micro/nanofibers is much less than that on ordinary polarization-maintaining fibers. The measured results are consistent with the theoretical results.

Key words fiber optics; polarization-maintaining micro/nanofibers; polarization interference method; birefringence; temperature characteristics

OCIS codes 060.2310; 060.2420; 060.2270

1 引 言

在不同的环境应用保偏光纤时, 周围的环境会影响保偏光纤的性能。例如: 对于基于传统的高双折射光纤的光纤陀螺, 高双折射保偏光纤的温度效应会影响其精确度^[1]; 对于基于旋转椭圆型保偏光纤的电流传感器, 保偏光纤的温度同样会影响其测量精确度^[2]。为了保证器件精细度, 研究保偏光纤的温度特性显得尤为重要。2004 年 Michie 等^[3]通过研究发现高双折射保偏光子晶体光纤在温度为 $-25\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的双折射不受温度的影响。同

年 Kim 等^[4]将保偏光子晶体光纤应用于 Sagnac 干涉仪中, 以减小温度敏感性。微纳光纤以其强光场约束性、强倏逝场、尺寸微小和独特的双折射效应等特性, 广泛应用于许多传感系统中。微纳光纤具有反常波导色散、光谱滤波以及饱和吸收等特性, 可应用于激光器的色散调控和偏振锁模等方面^[5]。Cai 等^[6]基于微纳光纤环的滤波和非线性光纤放大环境的等效饱和吸收, 搭建了多波长锁模光纤激光器。Jung 等^[7]研究了应力型保偏光纤拉锥后的偏振保持特性。然而, 目前尚无关于应力型保偏微纳光纤的温度效应的定量研究, 而温度特性又是微纳保偏

收稿日期: 2019-01-04; 修回日期: 2019-01-15; 录用日期: 2019-02-18

* E-mail: yyx@staff.shu.edu.cn

光纤的一个重要参数,故本文对此进行深入的理论
和实验研究。

在保偏光纤的参数中,拍长 L_b 是衡量光纤双折
射的参数。为了分析温度对保偏微纳光纤双折
射的影响,需测量光纤的 L_b 。迄今为止,已经有很多测量
光纤 L_b 的方法被提出,包括压力法^[8]、磁光调制
法^[9]、电磁法^[10] 和 剪 断 法^[11] 等。本文在不同温度条
件下采用偏光干涉法^[12] 测量常规保偏光纤和保偏微
纳光纤,实验结果表明随着直径的减小,保偏光纤的
 L_b 变大,双折射的温度敏感性下降,该现象与利用
Comsol Multiphysics 软件仿真的结果相吻合。

2 保偏光纤温度影响的数值分析

保偏光纤的种类很多,最为常用的是应力型保
偏光纤,在此对此类光纤进行分析。应力型保偏光
纤双折射的大小可以表示为

$$B = C(\lambda) \frac{E}{1 + \gamma} \Delta\alpha \Delta T \epsilon, \quad (1)$$

表 1 仿真用到的光纤材料参数

Table 1 Material parameters of optical fiber used for simulation

Parameter	$d_{\text{clad}}/\mu\text{m}$	$d_{\text{sap}}/\mu\text{m}$	$d_{\text{core}}/\mu\text{m}$	$\alpha_{\text{clad}}/(10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1})$	$\alpha_{\text{core}}/(10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1})$
Value	125	40	5	0.54	2.215
Parameter	$\alpha_{\text{sap}}/(10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1})$	N_{clad}	N_{sap}	N_{core}	$T_0/^\circ\text{C}$
Value	1.54	1.4478	1.4418	1.4558	1000
Parameter	$T_1/^\circ\text{C}$	$E/(10^{10} \text{ m}^2 \cdot \text{N}^{-1})$	γ	$C_1/(10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{N}^{-1})$	$C_2/(10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{N}^{-1})$
Value	20	7.8	0.186	0.7572448	4.18775

2.1 光纤的尺寸对其双折射的影响

图 1 为熊猫保偏光纤及其外部空气介质的横截
面。在研究光纤的直径为原光纤的 $1 \sim 1/100$ 倍时,
在光纤材料和温差不变的前提下,不同尺寸光纤双
折射的大小随着光纤尺寸的变化关系如图 2 所示。
图 3 表示随着光纤尺寸不断变小,整个熊猫保偏光
纤横截面上基模的分布情况。

由图 2 仿真结果可以观察到:熊猫保偏光纤的

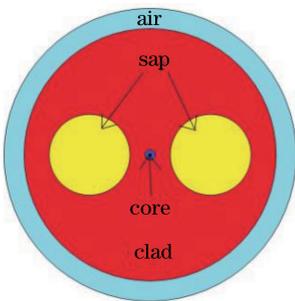


图 1 熊猫保偏光纤的横截面

Fig. 1 Cross section of panda polarization-maintaining fiber

式中: $C(\lambda)$ 表示光弹系数,与波长相关; E 表示光纤
的杨氏模量; γ 表示泊松比; $\Delta\alpha$ 表示温度导致的包
层膨胀因子与纤芯的膨胀因子的差值; ΔT 表示光
纤在熔融状态下的温度与冷却后室温之间的差值; ϵ
表示纤芯的椭圆度,对于所研究的熊猫保偏光纤,其
在理想状态下满足 $\epsilon = 1$ 。保偏光纤双折射的大小
决定着光纤的保偏性能好坏,光纤周围温度的改变
导致光纤的双折射发生变化,从而影响保偏性能。

通过使用 Comsol 软件中固体力学模块与电磁
波频率模块,对光纤的双折射随着温度的变化进行
仿真,分别对常规熊猫保偏光纤以及保偏微纳光纤
进行研究。表 1 是用于仿真的光纤材料参数。表中
 d_{clad} 、 d_{sap} 和 d_{core} 分别表示光纤的包层、应力区和
纤芯的直径; α_{clad} 、 α_{sap} 和 α_{core} 分别表示光纤的包层、
应力区和纤芯的热膨胀系数; N_{clad} 、 N_{sap} 和 N_{core} 分别
表示初始温度为 T_0 、应力为 0 时包层、应力区和纤
芯的折射率; T_0 表示拉制光纤时的初始温度, T_1 表
示冷却后的室温; C_1 和 C_2 均表示光弹系数。

尺寸为 $1 \sim 1/2$ 时,其双折射下降的幅度很大;熊
猫保偏光纤的尺寸为 $1/2 \sim 1/70$ 附近时,双折射的
大小有一个波动变化;熊猫保偏光纤的尺寸为 $1/100$
时,双折射的大小基本呈线性增加,但最终微纳光纤
的双折射远小于初始光纤的双折射。图 2 和图 3 中
横坐标的 n 值均表示熊猫保偏光纤尺寸为原尺寸
的 $1/n$ 。从横截面基模的分布情况可以发现,随着
光纤的尺寸逐渐变小,应力区对光纤纤芯的挤压也
变小,导致其双折射逐渐变大。

2.2 熊猫保偏光纤的双折射随着温度变化的仿真 结果

利用 Comsol 软件研究保偏光纤的双折射在
 $-40 \sim 90 \text{ } ^\circ\text{C}$ 之间的温度特性^[13],仿真中所涉及
到的所有参数如表 1 中所示,熊猫保偏光纤的双折
射与温度仿真结果如图 4 所示。

根据图 4 结果,随着熊猫保偏光纤冷却温度的
增加,其双折射的大小呈线性递减,且温度平均每增
加 $1 \text{ } ^\circ\text{C}$,双折射降低 2.44008×10^{-7} 。因此,熊猫保
偏光纤可用于温度传感。

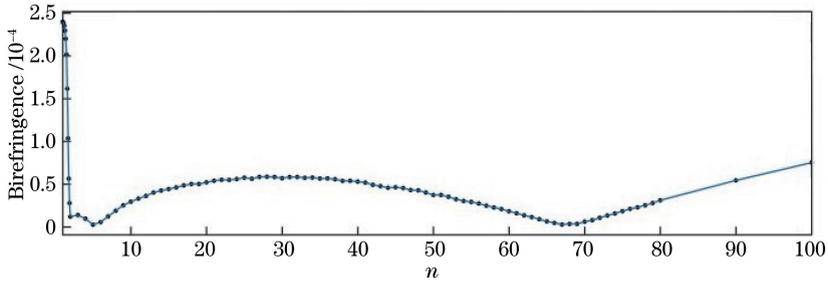


图 2 在光纤材料和温差不变的前提下,不同尺寸熊猫保偏光纤双折射的大小随着光纤尺寸的变化关系
Fig. 2 Variation in birefringence of panda polarization-maintaining fiber with fiber size when fiber material and difference in temperature are invariant

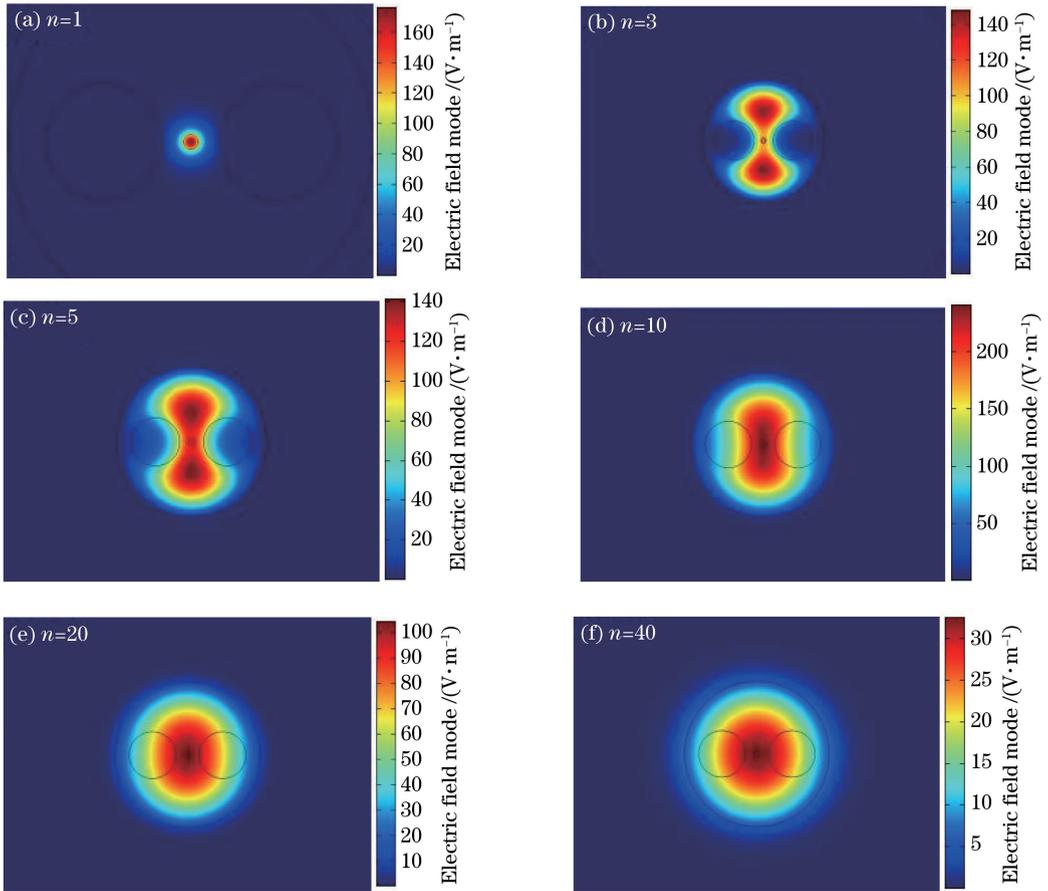


图 3 随着光纤尺寸不断变小,不同尺寸整个熊猫保偏光纤横截面上基模的分布情况。

(a) $n=1$; (b) $n=3$; (c) $n=5$; (d) $n=10$; (e) $n=20$; (f) $n=40$

Fig. 3 Basic mode distributions of panda polarization-maintaining fiber on fiber cross section when fiber size decreases. (a) $n=1$; (b) $n=3$; (c) $n=5$; (d) $n=10$; (e) $n=20$; (f) $n=40$

2.3 保偏微纳光纤的双折射随温度变化的仿真结果

利用 Comsol 软件分别对不同尺寸的保偏微纳光纤进行温度特性的研究。选取光纤的直径分别为原光纤的 $2/3, 1/20, 1/40$, 温度范围为 $-40 \sim 90 \text{ }^\circ\text{C}$ 。仿真得到不同尺寸的保偏微纳光纤的双折射随温度的变化情况如图 5 所示。根据图 5(a), 当光纤的尺寸为原光纤的 $2/3$ 时, 温度平均每增加 $1 \text{ }^\circ\text{C}$ 双折射

降低 1.73808×10^{-7} ; 根据图 5(b), 当光纤的尺寸为原光纤的 $1/20$ 时, 温度平均每增加 $1 \text{ }^\circ\text{C}$ 双折射降低 1.96692×10^{-8} ; 根据图 5(c), 当光纤的尺寸为原光纤的 $1/40$ 时, 温度平均每增加 $1 \text{ }^\circ\text{C}$ 双折射降低 1.83923×10^{-8} 。经分析可以得到, 保偏微纳光纤的双折射受温度的影响远低于原保偏光纤受温度的影响, 这使得微纳保偏光纤更适用于不考虑温度因素

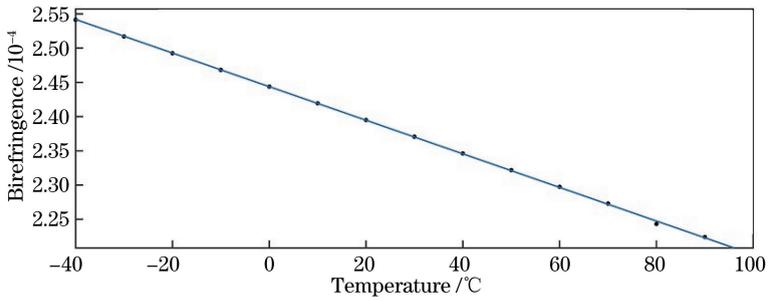


图 4 仿真得到的熊猫保偏光纤的双折射随温度的变化

Fig. 4 Simulated birefringence of panda polarization-maintaining fiber varying with temperature

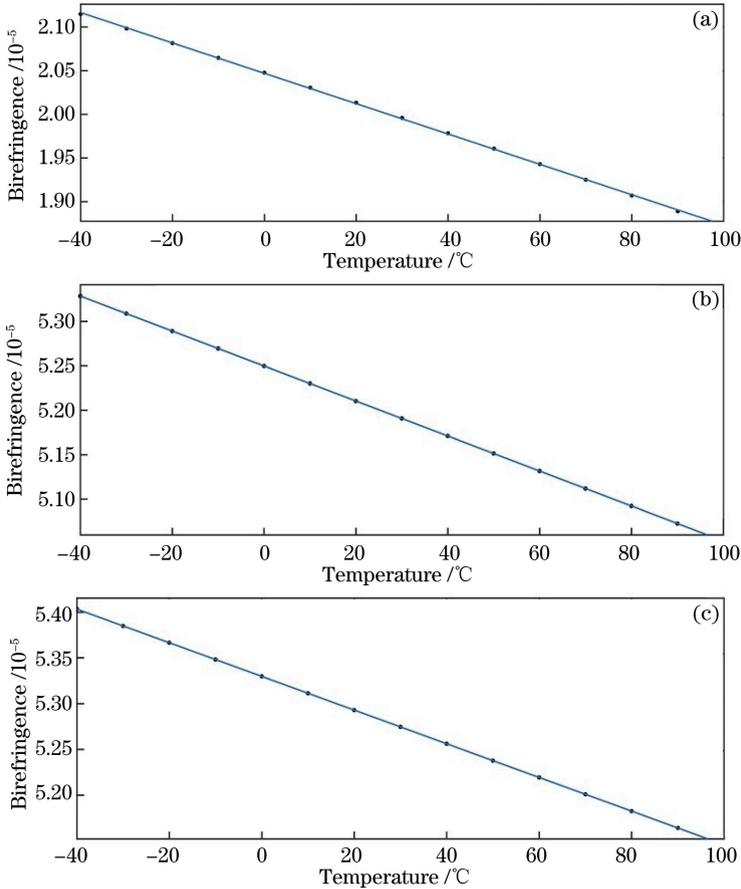


图 5 不同尺寸的保偏微纳光纤的双折射随温度的变化情况。(a) $d = 83.333 \mu\text{m}$; (b) $d = 6.25 \mu\text{m}$; (c) $d = 3.125 \mu\text{m}$

Fig. 5 Birefringence of panda polarization-maintaining fibers with different sizes varying with temperature.

(a) $d = 83.333 \mu\text{m}$; (b) $d = 6.25 \mu\text{m}$; (c) $d = 3.125 \mu\text{m}$

的传感应用中。

3 实验方法

基于偏光干涉效应测量保偏光纤的 L_b 。偏光干涉效应就是指将两个偏振模之间的相位差转化成光强输出,进而得到相位差的变化与波长的关系。测量系统包括宽谱光源、两个宽带光纤偏振器、光谱仪以及被测的保偏(PM)光纤,整个光路完全由光纤器件构成。保偏光纤 L_b 的测量装置示意图如图 6 所示。

实验中的 light source 采用的是自发辐射光源(ASE),其中心波长为 1550 nm,可调节范围为 1530.6~1562.1 nm。光纤圆偏振起偏器的结构原理是:当采用高速旋转的线性双折射光纤的螺距小于一定值时,即可实现宽带圆偏振功能^[14]。待测光纤为中国电子科技集团公司第 46 研究所生产的匹配型熊猫保偏光纤,工作波长为 1550 nm。图中 spectrometer 表示光谱仪(日本,横河公司, AQ6317C)。

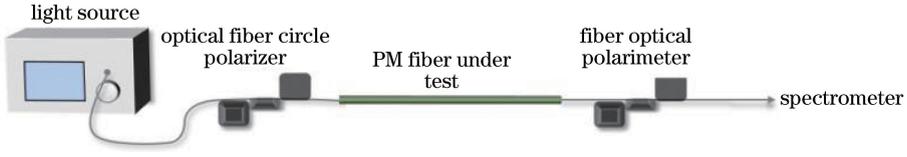


图 6 保偏光纤 L_b 的测量装置示意图

Fig. 6 Diagram of system for measuring L_b of polarization-maintaining

3.1 熊猫保偏光纤双折射随温度变化的理论分析

由于保偏光纤两正交主轴方向上偏振模的传播常数不同,两偏振模式间的相位差 $\Delta\varphi$ 随传播距离 L 变化关系可表示为

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi(n_f - n_s)L}{\lambda}, \quad (2)$$

式中: n_f 和 n_s 分别表示保偏光纤快轴和慢轴的折射率; λ 表示入射光的波长。定义当光通过光纤的长度为 L_b 时,两偏振模式间的相位差为 2π ,那么 L_b 为保偏光纤的拍长。根据(2)式,当 λ 在中心波长 λ_c 附近发生变化时,相位差也会发生变化。所以能够测出相位差与入射光波长的变化关系,也就能得到 λ_c 处保偏光纤的拍长。干涉周期与被测光纤的 L_b 、 λ_c 和 L 的关系表示为^[12]

$$\Delta\lambda = \frac{L_b \times \lambda_c}{L}. \quad (3)$$

根据模式干涉理论,光通过熊猫保偏光纤后,经快慢轴形成的相位差为

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda_c}(\Delta n_1 L_1 + \Delta n_2 L_2), \quad (4)$$

式中: Δn_1 和 L_1 分别表示室温段光纤的双折射与长度; Δn_2 和 L_2 则分别表示加热段光纤的双折射与长度。

加热炉的温度不断改变,会引起 Δn_2 和 L_2 发生变化,最终分别得到光纤的双折射和拍长随温度的变化特性为

$$2(\Delta n_1 L_1 + \Delta n_2 L_2) = (2m + 1)\lambda_c, \quad (5)$$

$$2\left[\Delta n_2 \frac{dL_2}{dT} + L_2 \frac{d(\Delta n_2)}{dT}\right] = (2m + 1) \frac{d\lambda_c}{dT}, \quad (6)$$

$$\frac{d(\Delta n_2)}{dT} = \frac{(2m + 1)}{2L_2} \frac{d\lambda_c}{dT} - \frac{\Delta n_2}{L_2} \frac{dL_2}{dT}, \quad (7)$$

$$\frac{d(L_{b2})}{dT} = \frac{\lambda_c}{\Delta n_2 + \frac{d(\Delta n_2)}{dT}} - L_{b2}, \quad (8)$$

式中:在 Δn_1 和 L_1 一直处于室温条件下,则 $\frac{d\Delta n_1}{dT} =$

$0, \frac{dL_1}{dT} = 0; m$ 为常数; $\frac{d\lambda_c}{dT}$ 表示随着温度的变化初

始指定波谷所对应的波长漂移量; $\frac{1}{L_2} \frac{dL_2}{dT}$ 表示光纤的热膨胀系数; $\frac{dL_{b2}}{dT}$ 表示常规保偏光纤的拍长随温度的变化量。

3.2 保偏微纳光纤双折射随温度变化的理论分析

当被测保偏光纤中含有微纳光纤时,可将光纤等效为两段不同拍长的光纤,此时干涉周期与两光纤拍长的关系为

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda_c(L_{b1} \times L_{b2})}{L_{b2} \times L_1 + L_{b1} \times L_2}, \quad (9)$$

式中: L_{b1} 和 L_1 分别表示常规保偏光纤的拍长与长度; L_{b2} 和 L_2 分别表示保偏微纳光纤的拍长与长度。

根据模式干涉理论,光经过保偏微纳光纤后,最终产生的相位差为

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda_c}(\Delta n_1 L_1 + \Delta n_2 L_2 + \Delta n_3 L_3), \quad (10)$$

式中: Δn_1 和 L_1 分别表示室温时的熊猫保偏光纤的双折射与长度; Δn_2 和 L_2 分别表示加热时熊猫保偏光纤的双折射与长度; Δn_3 和 L_3 分别表示加热时保偏微纳光纤的双折射与长度。

当改变加热炉温度时, Δn_2 、 L_2 、 Δn_3 和 L_3 均发生变化。3.1节中已对 Δn_2 随温度的变化特性进行了分析,本节主要研究 Δn_3 随着温度的变化特性。最终保偏微纳光纤的双折射和拍长的温度特性为

$$2(\Delta n_1 L_1 + \Delta n_2 L_2 + \Delta n_3 L_3) = (2m + 1)\lambda_c, \quad (11)$$

$$2\left[\Delta n_2 \frac{dL_2}{dT} + L_2 \frac{d(\Delta n_2)}{dT} + \Delta n_3 \frac{dL_3}{dT} + L_3 \frac{d(\Delta n_3)}{dT}\right] = (2m + 1) \frac{d\lambda_c}{dT}, \quad (12)$$

$$\frac{d(\Delta n_3)}{dT} = \frac{(2m + 1)}{dL_3} \frac{d\lambda_c}{dT} - \frac{\Delta n_2}{L_3} \frac{dL_2}{dT} - \frac{L_2}{L_3} \frac{d(\Delta n_2)}{dT} - \frac{\Delta n_3}{L_3} \frac{dL_3}{dT}, \quad (13)$$

$$\frac{d(L_{b3})}{dT} = \frac{\lambda_c}{\Delta n_3 + \frac{d(\Delta n_3)}{dT}} - L_{b3}, \quad (14)$$

式中:在 Δn_1 和 L_1 一直处于室温条件下,则 $\frac{d\Delta n_1}{dT} = 0$, $\frac{d\Delta L_1}{dT} = 0$; m 的值通过在室温下计算整根光纤的平均双折射得到; $\frac{d\Delta n_2}{dT}$ 表示熊猫保偏光纤的双折射温度变化特性; $\frac{1}{L_3} \frac{dL_3}{dT}$ 表示保偏微纳光纤的热膨胀系数; $\frac{dL_{b3}}{dT}$ 表示保偏微纳光纤的拍长随温度的变化量。

4 实验结果讨论

4.1 熊猫保偏光纤的双折射随温度变化的实验结果分析

为了研究温度对保偏光纤双折射的影响,需要测量出不同温度情况下光纤的拍长。首先,对此种方式测量光纤拍长的重复性进行了验证。在室温为 16.5 °C 条件下,不同长度光纤的相关参数测量结果如表 2 所示,最终计算得到不同长度光纤的拍长结果如表 3 所示。该实验结果表明,偏光干涉法拍长测量的不重复性在 0.1 mm 左右。

表 2 不同长度光纤的相关参数测量结果

Table 2 Measurement results of related parameters of fiber with different lengths

Fiber length L /m	Center wavelength λ_c /nm	$\Delta\lambda$ /nm
1.27	1551.000	3.480
1.45	1552.080	3.000
0.72	1549.620	6.240
1.17	1552.560	3.780

表 3 不同长度光纤的拍长计算结果

Table 3 Beat-length calculation results of fibers of different lengths

Fiber length /m	Beat-length /mm
1.27	2.85
1.45	2.80
0.72	2.91
1.17	2.86

接着,研究保偏光纤双折射的温度特性,取一根长度为 1.48 m 的保偏光纤,将其中的长度为 0.80 m 部分固定在加热炉上。在室温为 18.6 °C 条件下,记录指定波长在波谷处的波动周期 $\Delta\lambda = 2.940$ nm,该波谷对应的波长为 1549.680 nm。改变加热炉的温度,观察光谱仪干涉频谱图的变化,可以发现整个频谱图的波动周期未发生改变,同时随着温度的增加,整个干涉频谱图不断蓝移。

不断改变温度,并记录每次的波长漂移量。根据实验数据,得到熊猫保偏光纤双折射和拍长的温度特性分别如图 7 和图 8 所示。在初始温度时,光纤的拍长为 2.81 mm,其对应的双折射为 5.51487×10^{-4} 。温度每增加 1 °C,光纤的双折射降低 5.69383×10^{-7} ,拍长增加 3.015×10^{-3} mm。受激光光源波长可调节范围的限制,实验中温度只增加到 35.8 °C,但根据有限的实验数据依旧可得到熊猫保偏光纤双折射的温度特性,该结果与仿真结果完全吻合。

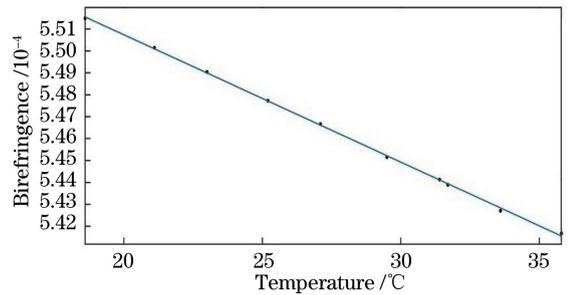


图 7 熊猫保偏光纤的双折射的温度特性

Fig. 7 Temperature characteristic of birefringence of panda polarization-maintaining fiber

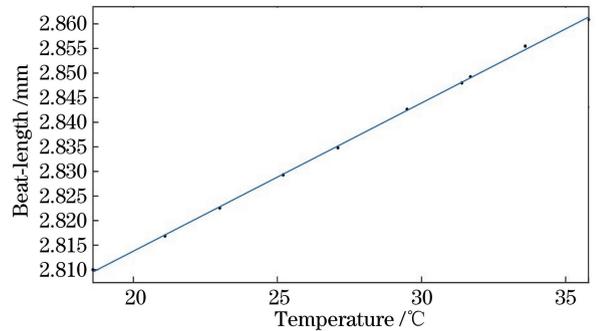


图 8 熊猫保偏光纤的拍长的温度特性

Fig. 8 Temperature characteristic of beat-length of panda polarization-maintaining fiber

4.2 保偏微纳光纤的双折射随温度变化的实验结果分析

实验中使用光纤拉锥机,对相同材料的匹配型熊猫保偏光纤进行拉锥。直径从 125 μm 拉至 3 μm ,锥长为 6.35 cm,整个光纤的长度为 1.242 m,将整个锥以及部分熊猫保偏光纤固定在加热炉上,加热部分的熊猫保偏光纤的长度为 0.54 m。在室温为 16.7 °C 条件下,测得指定波长为波谷处的波动周期 $\Delta\lambda = 3.660$ nm。随着加热炉温度的增加,在光谱仪上同样可以观察到干涉光谱发生了蓝移。改变加热炉的温度,测出每次的波长漂移值,并将其记录下来。根据(9)式得到该温度下微纳保偏光纤的双

折射为 2.825×10^{-4} 。

(13)式中,整数 m 的值是根据在室温下计算整根光纤的平均双折射得到,其计算值 $B_{\text{average}} = 5.28184 \times 10^{-4}$, $m = 422$ 。 $\frac{d\Delta n_z}{dT}$ 表示熊猫保偏光纤的双折射温度变化特性,取值为上节最终的结果。温度每增加 1°C , 光纤的双折射降低 5.69383×10^{-7} , 最终可以得到保偏微纳光纤的双折射和拍长的温度特性分别如图 9 和图 10 所示,即温度每增加 1°C , 保偏微纳光纤的双折射降低 2.863×10^{-8} , 拍长增加 5.562×10^{-4} mm。

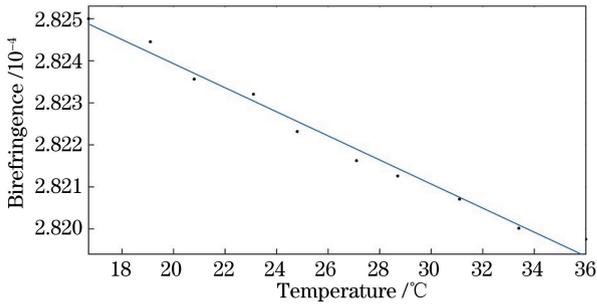


图 9 保偏微纳光纤双折射的温度特性

Fig. 9 Temperature characteristic of birefringence of panda polarization-maintaining micro/nanofiber

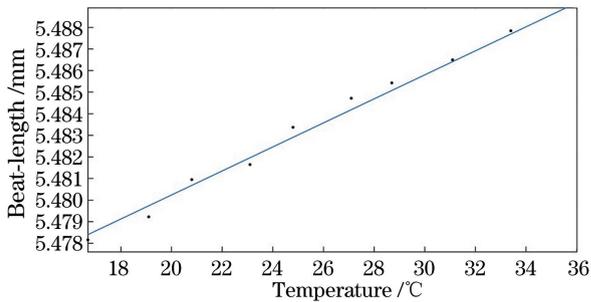


图 10 保偏微纳光纤的拍长的温度特性

Fig. 10 Temperature characteristic of beat-length of panda polarization-maintaining micro/nanofiber

5 结 论

通过 Comsol 软件仿真和实验,分别对保偏微纳光纤的双折射的温度特性进行研究。根据仿真结果,温度每增加 1°C , 熊猫保偏光纤的双折射降低 2.44008×10^{-7} , 拍长增加 6.6722×10^{-3} mm。为了进行对比,选取长度为 $3.125 \mu\text{m}$ 的保偏微纳光纤进行仿真。仿真结果表明,温度每增加 1°C , 保偏微纳光纤的双折射降低 1.83923×10^{-8} , 拍长增加 1.022×10^{-2} mm。而根据实验测量结果可知,温度每增加 1°C , 熊猫保偏光纤的双折射降低 5.69383×10^{-7} , 拍长增加 3.015×10^{-3} mm; 保偏微纳光纤光

纤的双折射降低 2.863×10^{-8} , 拍长增加 5.562×10^{-4} mm。实验测量结果验证了理论仿真,即温度对于保偏微纳光纤双折射的影响远小于对于常规熊猫保偏光纤双折射的影响。

参 考 文 献

- [1] Bassett I M, Bjarme M, Chan D, *et al.* Elliptically polarizing optical fiber [J]. Proceedings of SPIE, 1999, 3860: 501-507.
- [2] Mohr F, Schadt F. Bias error in fiber optic gyroscopes due to elasto-optic interactions in the sensor fiber [J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5502: 410-414.
- [3] Michie A, Canning J, Lyytikäinen K, *et al.* Temperature independent highly birefringent photonic crystal fibre [J]. Optics Express, 2004, 12 (21): 5160-5165.
- [4] Kim D H, Kang J U. Sagnac loop interferometer based on polarization maintaining photonic crystal fiber with reduced temperature sensitivity [J]. Optics Express, 2004, 12(19): 4490-4495.
- [5] Wang L Z, Li L J, Tong L M. Optical microfibers and their applications in mode-locked fiber lasers [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(1): 0126011. 王利镇, 李林军, 童利民. 微纳光纤及其锁模激光应用 [J]. 光学学报, 2019, 39(1): 0126011.
- [6] Cai Y, Qian Y H, Wan H D, *et al.* Multiwavelength mode-locked fiber laser based on micro-fiber loop [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(9): 0901001. 蔡宇, 钱禹豪, 万洪丹, 等. 基于微纳光纤环的多波长锁模光纤激光器 [J]. 中国激光, 2017, 44(9): 0901001.
- [7] Jung Y, Brambilla G, Richardson D J. Polarization-maintaining optical microfiber [J]. Optics Letters, 2010, 35(12): 2034-2036.
- [8] Lin M, Huang J J, Gu X Z. The automatic testing for beat length of fiber [J]. Shenzhen University Journal (Science and Engineering), 1998, 15(2/3): 60-64. 林敏, 黄建军, 古晓忠. 自动测量保偏光纤拍长的实验研究 [J]. 深圳大学学报(理工版), 1998, 15(2/3): 60-64.
- [9] Shi Z D, Bao H H, Liu S. Research on magneto-optic modulation method measuring beat-length of birefringence optical fiber [J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2008, 19(3): 369-372. 石志东, 包欢欢, 柳树. 磁光调制法双折射光纤拍长测试技术研究 [J]. 光电子 • 激光, 2008, 19(3): 369-372.
- [10] Zhang P G, Irvine-Halliday D. Measurement of the

- beat length in high-birefringent optical fiber by way of magneto-optic modulation [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1994, 12(4): 597-602.
- [11] Eickhoff W, Krumpolz O. Determination of the ellipticity of monomode glass fibres from measurements of scattered light intensity [J]. *Electronics Letters*, 1976, 12(16): 405-407.
- [12] Xiao Y Y, Wang Z Z, Shi Z D, *et al.* Beat-length measurement of polarization maintaining fibers based on broadband fiber circular polarizers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(12): 1206002.
- 肖悦娱, 王昭昭, 石志东, 等. 基于宽带光纤圆起偏器的保偏光纤拍长测量 [J]. *光学学报*, 2013, 33(12): 1206002.
- [13] Zhang F, Lit J W Y. Temperature and strain sensitivity measurements of high-birefringent polarization-maintaining fibers [J]. *Applied Optics*, 1993, 32(13): 2213-2218.
- [14] Kopp V I, Churikov V M, Singer J, *et al.* Chiral fiber gratings [J]. *Science*, 2004, 305(5680): 74-75.