

DOI:10.16136/j.joel.2022.05.0105

单模光纤拉伸器分布式双折射特性实验研究

苗甜甜^{1,2}, 冯 亭^{1,2*}, 路子億^{1,2}, 姚晓天^{1,2}

(1. 河北大学 物理学科与技术学院光信息技术创新中心, 河北 保定 071002; 2. 河北省光学感知技术创新中心, 河北 保定 071002)

摘要:在偏振敏感光纤系统中, 光纤双折射是重要的参量。基于压电陶瓷的单模光纤(single-mode fiber, SMF)拉伸器是光纤系统中引入应变、光程或相位变化等常用的器件, 而少有人关注过光纤拉伸器引入的双折射特性。本文提出基于分布式偏振分析的SMF拉伸器双折射特性表征方法, 结合全穆勒矩阵分析和光频域反射仪技术, 可以得到SMF拉伸器缠绕光纤的分布式双折射特性。实验得到: 在光纤拉伸器使用过程中, 光纤双折射随驱动电压增大而增加; 当光纤拉伸器缠绕光纤表面不平整时, 可引入更高的基底双折射, 且在施加驱动电压时, 基底双折射增加更加明显; 设计合适的拉伸机构和光纤缠绕方法, 能有效地避免光纤拉伸器使用过程中双折射的改变, 但可能会引入较强的基底双折射。本文研究结果对于在偏振敏感光纤系统中使用光纤拉伸器时系统性能的评估及优化具有指导意义。

关键词: 光纤拉伸器; 双折射; 分布式偏振分析

中图分类号: TN253 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-0086(2022)05-0458-07

Experimental study of distributed birefringence characteristics of single-mode fiber stretcher

MIAO Tiantian^{1,2}, FENG Ting^{1,2*}, LU Ziyi^{1,2}, YAO Xiaotian^{1,2}

(1. Photonics Information Innovation Center, College of Physics Science & Technology, Hebei University, Baoding, Hebei 071002, China; 2. Hebei Provincial Center for Optical Sensing Innovations, Baoding, Hebei 071002, China)

Abstract: Birefringence is an important parameter in polarization sensitive fiber systems. Piezoelectric transducer based single-mode fiber (SMF) stretcher is a common device in optical fiber systems to introduce strain, optical path or phase changes, but people barely pay attention to the birefringence introduced in the fiber stretcher. In this paper, a characterization method of birefringence characteristics of SMF stretcher is proposed to obtain the birefringence distribution along the fiber wound in the stretcher, based on a distributed polarization analyzer achieved by introducing the full Muller matrix analyzing into the optical frequency domain reflectometry. From the experimental results we draw the following important conclusions: the birefringence of SMF wound in the fiber stretcher increases with the increase of driving voltage; when the surface of stretcher for SMF winding is uneven, a higher level background birefringence can be introduced, compared to a smooth surface, and the background birefringence increases more significantly when the driving voltage is applied; designing an appropriate stretching structure and fiber winding method can effectively avoid the change of birefringence during running the fiber stretcher, while a strong background birefringence may be introduced. This work will provide important guide for the evaluation and optimization of the polarization sensitive fiber systems in which the SMF stretchers are used.

* E-mail: wlxft@hbu.edu.cn

收稿日期: 2022-03-03 修订日期: 2022-03-24

基金项目: 国家自然科学基金(61975049)、河北省自然科学基金优秀青年科学基金(F2020201001)、河北省“三三三人才工程”

项目(A202101010)、河北省创新能力提升计划项目(20542201D)和河北大学高层次人才科研启动项目(521000981006)资助项目

Key words: optical fiber stretcher; birefringence; distributed polarization analysis

1 引言

常见的光纤拉伸器是一种光纤缠绕在压电陶瓷(或压电换能器, piezoelectric transducer, PZT)表面的器件,可通过外部施加驱动电压实现 PZT 形变,从而实现光纤拉伸。光纤拉伸器也常被称为光纤相位调制器,主要用于光纤系统中引入应变、光程或相位变化,常被用于光学相干测试与光纤传感领域。光纤拉伸器作为一种压电相位调制器最先由 Davis 引入多模光纤传感器^[1],后来引入单模光纤(single-mode fiber, SMF)干涉仪。相位调制器外形大都是一个 PZT 圆筒^[2],光纤紧密缠绕在圆筒表面,当 PZT 受到驱动电压激励时,会在调制电压的作用下产生逆压电效应实现相位的调制^[3]。

李保生等^[4]发明了一种光纤拉伸器,可缠绕光纤长度为 55 m,光纤最大可达拉伸量为 1.67 mm。YAN 等^[5]发明了一种可以快速扫描的光纤拉伸器,频率为 2 kHz 时,光纤拉伸量可达 18 mm,并且由于其特殊的结构设计,解决了拉伸过程中光纤双折射变化的问题。表明合理的结构可以使光纤仅沿轴向延伸,而使光学相移的非线性双折射效应最小化。KRUMBHOLZ^[6]将光纤拉伸器作为光延迟线用于光纤耦合 THz 光谱仪中,在 20 Hz 的扫描频率下光纤拉伸器展示了作为快速延迟线的能力。另外,光纤拉伸器作为光延迟线使用,可用来稳定光纤链路的有效长度。IYER 等^[7]将 2 个不同类型光纤并联构成的光纤拉伸器用来补偿色散,同时允许调整干涉仪两臂之间的群延迟。ROGGENBUCK^[8]在一种基于光混频的连续波太赫兹光谱仪中,通过 2 个光纤拉伸器实现了相位的快速调制,其中光程长度变化最大可达 14 mm。ZHAO 等^[9]利用光纤拉伸器引入周期性应力诱导偏振变化,将偏振调制转换为调 Q,获得了稳定的主动调 Q 单频光纤激光器。YANG^[10]等将无源锁模光纤振荡器和 8 km 单模光纤拉伸器相结合实现了全光纤放大器,能够传输纳秒脉冲,同时保持数十 MHz 的超高重复频率。上述工作中,研究者们主要关注拉伸量、应变、响应速度、谐振频率等特性参数,虽然有人考虑到或者直接利用了光纤拉伸器中光纤双折射特性,但是还未发现有人对此特性开展过针对性的研究工作。分析得出,光纤拉伸器工作时的双折射特性发生变化,对于偏振敏感光纤光学系统(如光纤激光器、光纤陀螺、高灵敏度光纤传感器

等^[15,16])的性能可能会产生严重的影响。因此,对于光纤拉伸器的双折射特性进行研究具有重要的意义。

基于分布式偏振分析(distributed polarization analysis, DPA)技术^[11-13],本文重点对单模光纤拉伸器工作过程中双折射特性的变化进行了较为系统的表征,分别研究了自制光纤拉伸器使用过程中驱动电压与双折射特性之间变化的关系、光纤拉伸器缠绕光纤表面不平整光纤双折射的动态特性,以及某特殊结构的商用光纤拉伸器双折射特性的变化与驱动电压的关系等。

2 实验系统及测量原理

2.1 测试系统结构及测量原理

DPA 技术是将偏振分析引入传统光频域反射(optical frequency domain reflectometer, OFDR)^[14]中的分布式光纤双折射测量技术,也被称为偏振分析 OFDR (polarization analyzing optical frequency domain reflectometer, PA-OFDR)。使用 DPA 系统表征 SMF 拉伸器双折射特性的实验系统示意图如图 1 所示,主要由 DPA 系统、光纤拉伸器及电压源等组成。DPA 系统中的光源为可调谐窄线宽激光源(TL, Yenista TUNICS T100S-HP),线宽、扫频速度和扫频范围分别为 ~ 500 kHz、 5×10^3 GHz/s (20 nm/s) 和 1×10^4 GHz (80 nm, 从 1 520 nm 到 1 600 nm),所用功率为 2 dBm。沿待测光纤局部双折射 $\Delta n(z)$ 可通过以下方程获得^[11],其表达式为:

$$\Delta n(z) = \frac{\theta(z)\lambda}{4\pi\Delta z}, \quad (1)$$

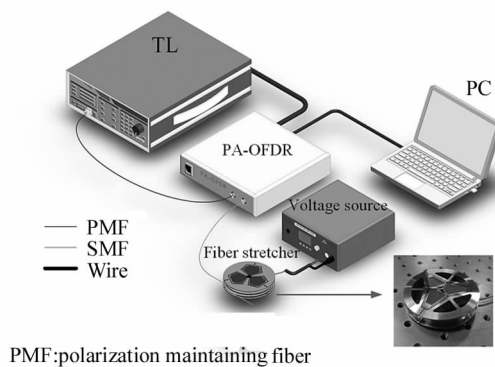


图 1 DPA 系统表征 SMF 拉伸器双折射特性的实验系统示意图

Fig. 1 Experimental system diagram of birefringence characterizing for SMF stretcher using DPA system

式中, $\theta(z)$ 是待测光纤中由局部双折射引起的延迟角, λ 是扫描范围的中心波长, Δz 为双折射空间分辨率(birefringence spatial resolution, BSR)。

该系统中加入了使用二进制磁光晶体制成的偏振态发生器(polarization state generator, PSG)与偏振态分析仪(polarization state analyzer, PSA), 故 $\theta(z)$ 可通过待测光纤前后的穆勒矩阵分析获得^[15]。将偏振分析与 OFDR 系统相结合, 可以得出待测光纤每个点的双折射, 即实现分布式双折射测量。

2.2 光纤拉伸器制作方法

实验用到的光纤拉伸装置, 由 120° 平分放置的 3 支 PZT 组成, 如图 1 中所示, 电压源提供驱动电压, 通过 PZT 叠堆的致动作用, 引起铰链结构向外部扩张, 使得外径膨胀, 从而拉伸缠绕于外径凹槽内的光纤。光纤拉伸装置上缠绕光纤是自行通过光纤绕纤机^[16]完成, 缠绕时采用的张力值大小为 160 g, 张力值波动范围为 0—2 g。为了研究光纤拉伸器在拉伸过程中光纤双折射特性, 设计了 2 种光纤拉伸器: 1) 光纤拉伸器 1: 在光纤拉伸器表面先缠绕光纤 3 圈, 首尾端用 UV 胶固定; 固定尾端后留置光纤 1 m, 重复以上步骤缠绕光纤 3 圈并用同样方法固定。2) 光纤拉伸器 2: 在 1) 中留置光纤 1 m 后缠绕后 3 圈之前, 在光纤拉伸器表面设置 1 个直径为 0.73 mm 的小圆棒后, 继续缠绕后 3 圈, 所以后 3 圈光纤每圈都将经过 1 次小圆棒。

3 实验结果与讨论

3.1 驱动电压对光纤拉伸器双折射的影响

光纤拉伸器的核心为压电换能器, 光纤紧绕其上, 当光纤拉伸器受电压驱动时会产生逆压电效应, 引起光纤长度发生变化。因为光纤拉伸器横截面为圆形, 原理上光纤弯曲或者拉伸过程中受应力作用会在其内部引起双折射。由于定制的光纤拉伸装置半径为 3.5 cm, 根据压力诱导双折射的理论^[17]: $\Delta n = 6.601 \times 10^{-10} (1/R^2)$, 缠绕其上的 SMF 由于弯曲产生的双折射的大小应为 5.388×10^{-7} RIU/m²。图 2(a) 中分别给出了缠绕光纤拉伸器 1 之前的 SMF 松散平放在光学平台上测得的固有双折射(Background)与缠绕光纤拉伸器 1 之后测得双折射(0 V)沿光纤的分布式结果。可分析得当光纤拉伸器 1 制作完成后, 不对拉伸器施加电压激励时, 缠绕的 2 段光纤(前 3 圈和后 3 圈)均有明显的双折射增加, 且平均双折射大小为 5.635×10^{-7} RIU/m², 但与弯曲诱导双折射理论计算结果不相符。主要是因为光纤中不仅存在弯曲诱导双折射特性, 而且存在光纤与缠绕表面之间的相互作用力引起的横向压力诱导双折射的影响, 所以测量的双折射值大于弯曲诱导双折射理论计算值。图 2(b) 给出了不同驱动电压下光纤拉伸器 1 双折射的分布式测量结果, 在图 2(c) 中给出了局部放大图, 可分析出 2 段缠绕光纤在驱动电压变化时均发生双折射的变化, 但在 2 段缠绕光纤之间的 1 m 光纤未发生双折射的变化。在图 2(c)

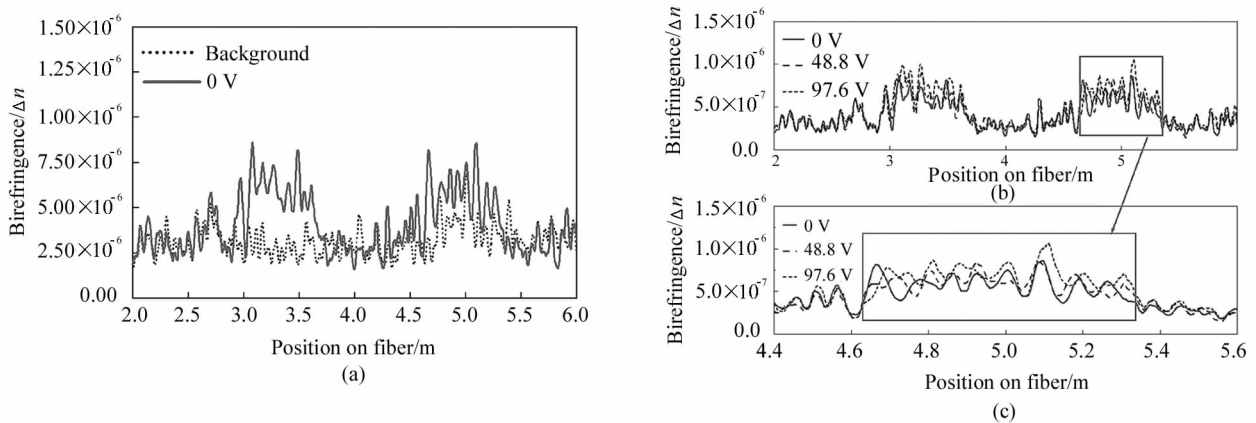


图 2 (a) 光纤拉伸器 1 缠绕光纤在缠绕之前与缠绕之后的双折射分布式测量结构; (b) 施加不同电压时, 光纤拉伸器 1 双折射的分布式测量结果; (c) (b) 图中局部放大图

Fig. 2 (a) Distributed birefringence measurement of single-mode fiber before (dotted line) and after (solid line) wound on the fiber stretcher 1; (b) Variation of birefringence of fiber stretcher 1 under different driving voltages; (c) Zoomed-in for local curves of (b)

中,应变区在 0 V、48.8 V、97.6 V 电压下对应的双折射均值为: 5.50×10^{-7} RIU/m²、 5.79×10^{-7} RIU/m²、 6.54×10^{-7} RIU/m²,可以得出随着驱动电压的增加,缠绕光纤双折射是不断增加的,与预期结果是一致的。

3.2 缠绕表面平整度对光纤拉伸器双折射的影响

光纤拉伸器制作过程中,可能因为光纤拉伸装置截面不是完美的圆、光纤缠绕表面不平整、缠绕光纤过程中引入异物等,使得局部产生比较强烈的双折射,而且随着光纤拉伸器的驱动电压变化可能表现出特殊的性质。为了探究以上问题,在制作光纤拉伸器 2 的过程中,分别在光纤缠绕之前,缠绕完第 4 圈、第 5 圈和第 6 圈并固定后,进行了分布式双折射测量结果如图 3 所示。图中将前 3 圈缠绕的区域称为应变区 1、后 3 圈缠绕的区域称为应变区 2。可以分析出,相比较于缠绕前 (Background),应变区 1 中 3 圈光纤双折射有明显的增加。另外,随着第 4 圈、第 5 圈和第 6 圈缠绕后,相应地的位置均产生了明显的双折射的变化,而且相比较于应变区 1,应变区 2 中双折射明显更加强烈,这是由于小圆棒所引起。即在光纤拉伸器制作过程中,光纤缠绕表面的不平整会增加引入双折射的水平。

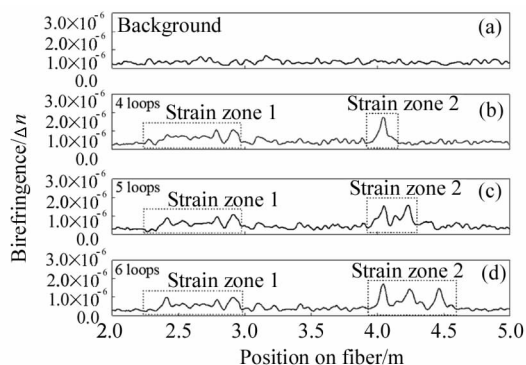


图 3 光纤拉伸器 2 光纤在 (a) 缠绕前, 缠绕完 (b) 第 4 圈、(c) 第 5 圈和 (d) 第 6 圈后, 双折射的分布式测量结果,其中前 3 圈落在应变区 1、后 3 圈落在应变区 2

Fig. 3 Distributed birefringence measurement of

fiber (a) before wound on fiber stretcher 2, after wound (b) 4 loops, (c) 5 loops, and (d) 6 loops, respectively, where the first 3 loops located in strain zone 1, and the last 3 loops located in strain zone 2

3.3 光纤缠绕表面不平整对光纤拉伸器双折射附加影响

为了进一步研究光纤缠绕表面不平整对光纤拉伸器工作时的影响,制作光纤拉伸器 2 时,又研究了

驱动电压对缠绕完第 4 圈并固定后的光纤拉伸器 2 的双折射的影响。图 4(a)给出了驱动电压从 0 V 到 100 V 增加过程中光纤拉伸器 2 双折射的分布式测量结果,图中每条曲线皆为五次平均后的结果。可以得出,应变区 1 和应变区 2 中的光纤双折射均随着驱动电压的增加而增加,但是应变区 2 中的光纤双折射增加更加明显。将应变区 2 中缠绕第 4 圈光纤的双折射峰值提取,得到了双折射与驱动电压的关系,如图 4(b)所示。可见图中数据点具有较好的线性关系,对其进行直线拟合,拟合优度达到了 97.49%。由前期研究结果可知^[18],横向压力与其在光纤中诱导双折射的变化具有线性关系,说明了图 4 (b)中良好的线性关系主要是由于电压增加导致小圆棒作用于光纤上的横向压力不断增加,随即引起双折射的线性增加。

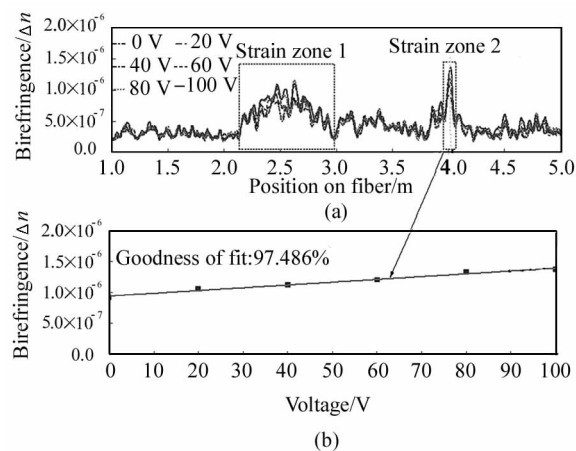


图 4 光纤拉伸器施加不同的电压观察应变区双折射变化:(a) 两个应变区双折射随电压变化;(b) 电压与双折射的线性关系

Fig. 4 Apply different voltages to the fiber stretcher to observe the birefringence change in the strain region:

(a) The birefringence of the two strain regions varies with voltage; (b) Linear optical system of voltage and birefringence

3.2 节和 3.3 节的实验结果表明,与表面平整相比,光纤拉伸器的光纤缠绕表面不平整时,会对其双折射特性产生附加影响,即不仅引入更高的基底双折射,而且在施加驱动电压时,基底双折射增加更加明显。

3.4 商用光纤拉伸器双折射的测量

为了解决光纤拉伸器双折射随驱动电压变化而变化的问题,有些光纤拉伸器生产厂家在拉伸器拉

伸机构上作了一些设计,以下文所提到的光纤拉伸器为例,使用 DPA 系统对其双折射特性进行了测量。商用光纤拉伸器内部结构示意图如图 5 所示,由 4 个堆叠的椭圆跑道形光纤拉伸机构组成,可通

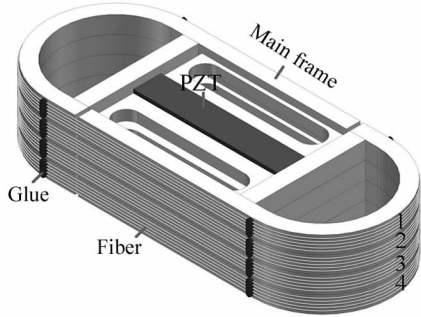


图 5 商用光纤拉伸器内部结构示意图
Fig. 5 Internal structure diagram of a commercial optical fiber stretcher

过模拟信号或数字信号来控制其工作,并且每个拉伸机构都具有独立的电压控制通道,4 个拉伸机构可以独立或并行工作。每个椭圆跑道结构在 PZT 施加驱动电压后,只在直道区发生伸缩应变,环形区不发生应变。光纤缠绕环形区和直道区交界处使用胶水将光纤与机构粘接固定。

图 6(a)中给出了通道 1 和 2 同时施加不同驱动电压时光纤双折射的分布式测量结果,图 6(b)中给出了图 6(a)中所标注 6 个不同位置处不同电压与双折射的关系。可见,随着施加驱动电压的变化,该光纤拉伸器内部双折射基本不发生改变。图 6(c)中给出了不施加驱动电压与分别对通道 1 和 2、通道 3 和 4 同时施加 99 V 驱动电压时,光纤拉伸器内部双折射变化,图 6(d)中给出了虚框的局部放大效果。可得出无论该光纤拉伸器在哪个通道下工作,光纤双折射均基本不发生改变。然而,由图 6(d)可见光纤

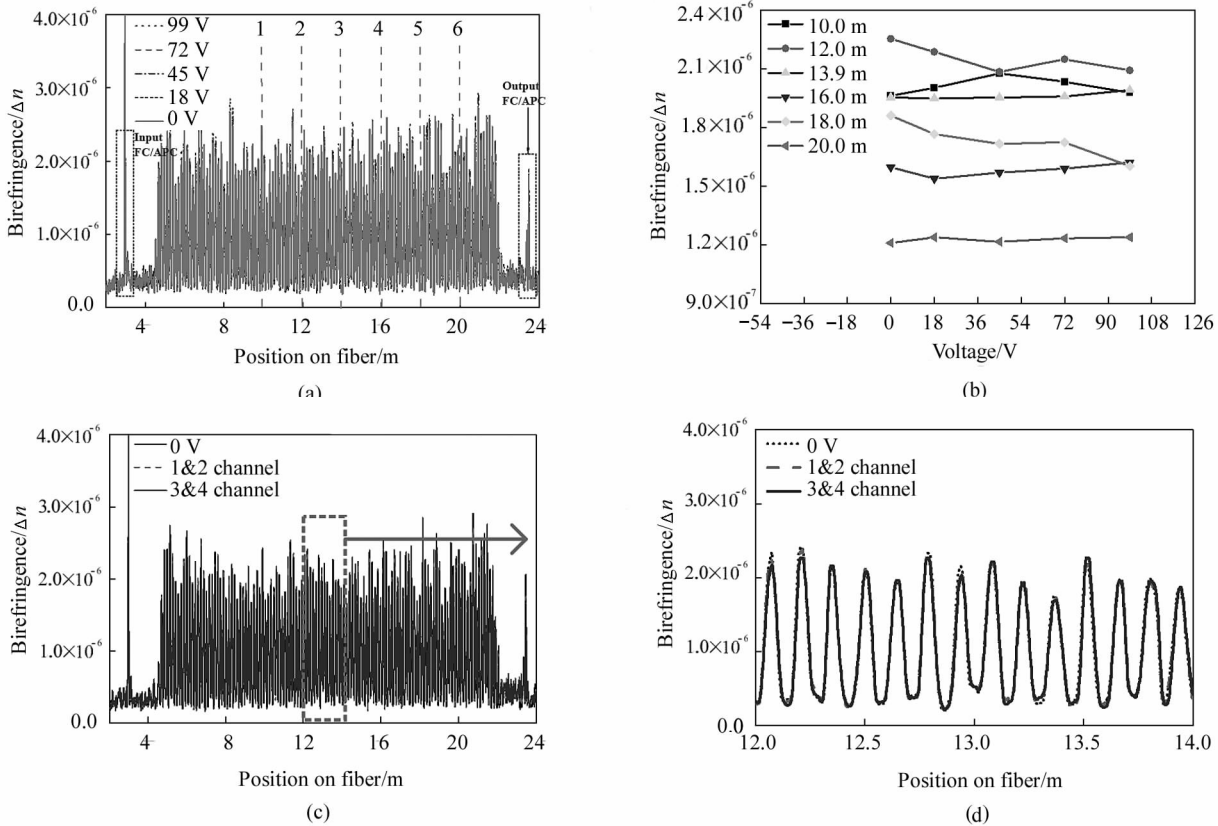


图 6 使用某商用光纤拉伸器测量双折射特性:(a) 通道 1 和 2 同时工作时,不同驱动电压下光纤双折射的分布式测量结果;(b) 图(a)中 6 个不同位置处双折射与驱动电压的关系;(c) 无驱动电压(黑色)、通道 1 和 2 与通道 3 和 4 分别同时施加 99 V 驱动电压时,分布式双折射测量结果;(d) 图(c)局部放大效果

Fig. 6 Birefringence measurements of a commercial fiber stretcher:

- (a) Distributed birefringence measurements when channels 1 and 2 are driven by different voltage signals simultaneously;
- (b) Birefringence versus driving voltage at 6 different positions in (a); (c) Distributed birefringence measurements when there is no driving signal, channels 1 and 2 are driven by 99 V voltage and channels 3 and 4 are driven by 99 V voltage, respectively; (d) Zoomed-in for local curves of (c)

拉伸器中双折射变化呈现周期性。上述结果皆由光纤拉伸器拉伸机构及光纤粘接固定方式决定:由于伸缩应变是在椭圆直道区发生,故只对光纤进行轴向应变而不产生附加双折射;由于光纤在环形区弯曲半径小,故产生弯曲诱导双折射且缠绕具有周期性;由于在环形区和直道区交界处粘接固定光纤与拉伸机构,故直道区的伸缩应变不会对环形区的弯曲诱导双折射产生影响。因此,实验结果表明,使用图5所示拉伸机构制作光纤拉伸器可以避免其在工作时产生双折射的变化,但是可能引入较强的基底双折射,这在偏振敏感光纤系统中也是值得注意的。

4 结 论

基于DPA的SMF双折射测量方法,本文对SMF拉伸器工作过程中双折射特性的变化进行了较为系统的表征,分别研究了自制光纤拉伸器使用过程中驱动电压与双折射之间的关系、光纤拉伸器缠绕光纤表面不平整时光纤双折射的动态特性,以及某特殊结构商用光纤拉伸器双折射与驱动电压的关系等。研究发现,光纤拉伸器使用时双折射随驱动电压增大而增加,光纤拉伸器缠绕光纤表面不平整可引入更高的基底双折射,且当施加驱动电压时基底双折射增加更加明显,设计合适的拉伸机构和光纤缠绕方法能有效避免光纤拉伸器使用过程中双折射改变,但可能会引入较强的基底双折射。研究结果对于光纤拉伸器在光纤激光器、光纤传感、微波光子链路等应用时双折射特性的分析与系统性能的不断优化具有重要的指导作用。

参考文献:

- [1] GIALLORENZI T G, BUCARO J A, DANDRIDGE A. Optical fiber sensor technology[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 1982, 30(4): 472-511.
- [2] XI C. Study on the characteristics of PZT modulator in optical fiber interferometric sensing system [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2012.
袭超. 光纤干涉式传感系统中 PZT 调制器的特性研究, 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012.
- [3] KAHN M. Acoustic and elastic properties of PZT ceramics with anisotropic pores[J]. Journal of the American Ceramic Society, 1985, 68(11): 623-628.
- [4] LI B S, LIU Y, WANG A. Design of large scanning range fiber piezoelectric phase modulator [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2007(1): 127-130.
- 李保生, 刘勇, 王安. 大扫描范围光纤压电相位调制器设计[J]. 半导体光电, 2007(1): 127-130.
- [5] YAN L. Improved fast scanning delay line in optical coherence tomography applications utilizing fiber stretcher[J]. Optical Engineering, 2008, 47(10): 100501.
- [6] KRUMBHOLZ N, SCHWERTDFEGER M, HASEK T, et al. A fiberstretcher operating as an optical delay line in a fiber-coupled THz spectrometer[C]//33rd International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, September 15-19, 2008, Pasadena, CA, USA. New York: IEEE, 2008.
- [7] IYER S, COEN S, VANHOLSBECK F. Dual-fiber stretcher as a tunable dispersion compensator for an all-fiber optical coherence tomography system[J]. Optics Letters, 2009, 34(19): 2903-2905.
- [8] ROGGENBUCK A, THIRUNAVUKKARASU K, SCHMITZ H, et al. Using a fiber stretcher as a fast phase modulator in a continuous wave terahertz spectrometer[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2012, 29(4): 614-620.
- [9] ZHAO Q, WU Z, ZHANG Z, et al. Stable actively Q-switched single-frequency fiber laser at 1.5 μm based on selfinjecting polarization modulation[J]. Optics Express, 2018, 26(13): 17000-17008.
- [10] YANG M, LI P, LI S, et al. 54 W nanosecond Yb-doped all-fiber amplifier at ultra-high repetition rate (tens of MHz) based on mode-locked fiber oscillator and single-mode fiber stretcher [J]. Laser Physics, 2021, 31(2): 148.
- [11] FENG T, SHANG Y L, WANG X C, et al. Distributed polarization analysis with binary polarization rotators for the accurate measurement of distance-resolved birefringence along a single-mode fiber [J]. Optics Express, 2018, 26(20): 25989-26002.
- [12] LIZE Y K, CHRISTEN L, YANG J Y, et al. Independent and simultaneous monitoring of chromatic and polarization-mode dispersion in OOK and DPSK transmission [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2007, 19(1): 3-5.
- [13] YAN L, YAO X S, HAUER M C, et al. Practical solutions to polarization-mode-dispersion emulation and compensation [J]. Journal of Lightwave Technology, 2006, 24(11): 3992-4005.

- [14] YIN G, LU L, ZHOU L, et al. Distributed directional torsion sensing based on an optical frequency domain reflectometer and a helical multicore fiber[J]. *Optics Express*, 2020, 28(11):16140-16150.
- [15] TUCHIN V V, MANHAS S, SWAMI M K, et al. Muller matrix approach for determination of optical rotation in chiral turbid media in backscattering geometry[J]. *Optics Express*, 2006, 14(1):190-202.
- [16] HAO P, YU C, FENG T, et al. PM fiber based sensing tapes with automated 45° birefringence axis alignment for distributed force/pressure sensing[J]. *Optics Express*, 2020, 28(13):18829-18842.
- [17] SHANG Y L. Application exploration of distributed optical fiber birefringence characterization and composite material detection based on PA-OFDR[D]. Baoding: Hebei University, 2019.
- 尚艳玲. 基于 PA-OFDR 的分布式光纤双折射表征及复合材料检测应用探索[D]. 保定: 河北大学, 2019.
- [18] FENG T, ZHOU J, SHANG Y, et al. Distributed transverse force sensing along a single-mode fiber using polarization-analyzing OFDR [J]. *Optics Express*, 2020, 28 (21): 31253-31271.

作者简介:

冯 亭 (1986—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事光纤激光、光纤传感及其应用等方面的研究。