

doi:10.3788/gzxb20174609.0930004

# 基于光纤环形腔衰荡光谱的偏振测量

芦恒,王芳,王旭,刘玉芳

(河南师范大学 电子与电气工程学院,河南 新乡 453007)

**摘 要:**针对传统偏振测量较难同时实现高灵敏度和较好稳定性的问题,提出了一种采用光纤环形腔衰荡光谱技术进行偏振测量的方法,并进行了实验证明.对比分析了掺铒光纤放大器放置在环形腔的内部和外部对脉冲曲线和脉冲数量的影响.在掺铒光纤放大器中使用长度为 2 m 的低增益和低噪声掺铒光纤来减少波形失真并补偿环形腔的内部衰减.利用光纤环形腔衰荡光谱系统对偏振角进行测量,通过记录分析环形腔中光脉冲的衰减时间得到偏振角的变化.结果表明:偏振角和衰减时间在  $0^\circ \sim 90^\circ$  的范围内满足良好的线性关系,光纤环形腔衰荡光谱系统的灵敏度和拟合曲线的相关系数分别为  $4.05 \mu\text{s}/^\circ$  和 0.999 6,最大灵敏度误差为  $0.027 3 \mu\text{s}/^\circ$ .通过 10 次重复实验,选取六组数据进行拟合得到系统的平均再现性误差为 0.030 8,重复性良好,可用于旋光溶液测量,也为光纤径向应力双折射特性和光纤激光器的偏振态测量提供了参考.

**关键词:**光纤环衰荡;光谱;掺铒光纤放大器;耦合器;偏振测量

中图分类号:O433.1

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2017)09-0930004-7

## Polarization Measurement Based on Fiber Loop Cavity Ring-down Spectroscopy

LU Heng, WANG Xu, WANG Fang, LIU Yu-fang

(College of Electronic and Electrical Engineering, Henan Normal University, Xin'xiang, Henan 453007, China)

**Abstract:** A polarization measurement method employing a Fiber Loop Ring-Down Spectroscopy (FLRDS) system is proposed and experimentally demonstrated. The influence of an Erbium-Doped Fiber Amplifier (EDFA) placed inside and outside the fiber ring on the pulse curve and the number of pulse peaks in the annular cavity is analyzed. A length of 2 m low-gain and low-noise erbium-doped fiber in EDFA is used to reduce waveform distortion and compensate for the attenuation of the cavity. Measurement of polarization angle  $\theta$  was performed with the FLRDS system, and the change of  $\theta$  is gained by recording the ring-down time  $\tau$  of light pulse in the fiber loop. Results indicate that a good linear relationship is met between  $\theta$  and  $\tau$  in the range of  $0^\circ \sim 90^\circ$ . The sensitivity of the FLRDS system and the correlation coefficient of the fitted curve are  $4.05 \mu\text{s}/^\circ$  and 0.999 6, respectively. The maximum sensitivity error is 0.027 3. Through ten repeated experiments, six sets of data were selected to fit, and the average reproducibility error of the system was 0.030 8, and the repeatability was good, so it can be used in optical rotatory solution measurement, and also provides a reference for fiber radial stress birefringence and polarization state measurement of fiber lasers.

**Key words:** Fiber loop ring-down; Spectroscopy; EDFA; Coupler; polarization measurement

**OCIS Codes:** 300.6360; 300.6170; 220.4830; 230.2285; 230.5160; 240.6380

**基金项目:**国家自然科学基金(No.61475043)、河南省高等学校重点科研项目计划(No.14B510014)和河南师范大学资助项目(No.201310476046)资助

**第一作者:**芦恒(1990-),男,硕士研究生,主要研究方向为光纤传感测量.Email:15090378052@163.com

**导 师:**王芳(1972-),女,教授,硕导,主要研究方向为光纤传感和光电探测技术.Email:ffdd1012@163.com

**通讯作者:**刘玉芳(1963-),男,教授,博导,主要研究方向为激光测量和原子分子碰撞与光物理技术.Email:yf-liu@htu.edu.cn

**收稿日期:**2017-04-24; **录用日期:**2017-06-31

<http://www.photon.ac.cn>

## 0 引言

在过去 30 年中,光纤环形腔衰荡光谱(Fiber Loop Ring Down Spectroscopy, FLRDS)技术在化学、环境、食品安全和医疗应用等<sup>[1-4]</sup>领域已取得了巨大进步和成功的应用。21 世纪初,Stewart 等<sup>[5]</sup>首次提出了 FLRDS 技术。FLRDS 是一种新颖而优越的灵敏吸收光谱技术,其使用光纤环路而不是高反射镜作为谐振腔<sup>[6-7]</sup>,不仅具有一般光纤传感器的优点,而且具有独特的优势,如快速检测、实时响应、免受光源功率波动影响、减少对超高反射镜的依赖等<sup>[8-9]</sup>。由于其在光纤传感领域的巨大潜力,FLRDS 技术已被广泛应用于痕量物质、浓度、磁场、压力、应变、温度和偏振等物理量的测量<sup>[10-13]</sup>。

近年来,各种光纤激光器已被广泛应用于激光雷达、空间检测、高精度传感系统等领域<sup>[14]</sup>,然而双折射的影响导致光纤中传输光的偏振态不稳定进而限制了光纤激光器的进一步发展<sup>[15-16]</sup>,因此光纤激光器中偏振态的测量显得尤为重要。应力双折射是单模光纤一个重要的双折射特性,它是指光纤在应力下的传播常数沿应力方向变化的现象<sup>[17-18]</sup>,目前已有许多方法可以测量光纤的径向应力双折射,如使用价格昂贵的偏振分析仪<sup>[19]</sup>等。而 FLRDS 偏振测量方法的发展有望克服这些缺点,该方法灵敏度高、分析速度快、操作简单、成本低、在线检测方便,可用于测量由偏振特性引起的应力、温度、色散和折射率等物理量<sup>[20-22]</sup>。

与常规光谱测量相比,FLRDS 测量光脉冲的衰减时间,而不是光强度<sup>[23]</sup>。作为全光纤系统,FLRDS 的普遍缺点是光脉冲耦合到腔中时的耦合损耗,解决此问题的有效方法是采用掺铒光纤放大器(Erbium-doped Optical Fiber Amplifier, EDFA)来补偿损耗并增加系统的衰减时间。目前,关于腔内信号放大的研究存在光脉冲曲线上升、脉冲峰值数量少等问题,为解决这些问题,本文提出一种使用 EDFA 放大腔内信号的高灵敏度和较好稳定性的偏振测量方法,对比分析了 EDFA 放置在环形腔的内部和外部对脉冲曲线和脉冲数量的影响,并进行了偏振测量实验。

## 1 偏振测量原理

时域分析法通常是通过监测光纤环路中光脉冲的衰减寿命来确定光纤环路内的光损耗<sup>[24]</sup>。在 FLRDS 系统中,调制的脉冲光通过耦合器 1 进入光纤环路,然后在光纤环内多次往返,在每次往返过程中,由于腔内损耗,少量的光会丢失,其结果是环形腔内的光随时间呈指数衰减。指数衰减信号由光电探测器检测记录每次经过耦合器 2 的少量泄漏光得到。在偏振测量实验中,腔内衰减随着偏振角  $\theta$  变化而变化,环形腔内的损耗越低,衰减时间  $\tau$  越大。因此  $\tau$  反映了由  $\theta$  变化引起的损耗,并且可以通过测量  $\tau$  得到。环形腔的衰减时间  $\tau_0$  被定义为光衰减到其初始强度的  $1/e$ <sup>[25]</sup>所需的时间,该表达式为

$$\tau_0 = nd/cA \quad (1)$$

式中, $d$  是光纤环腔的长度, $c$  是光速, $n$  是光纤环腔的折射率, $A$  是每次腔衰荡过程中的总损耗。在光纤环形腔内,腔的损耗主要来自光纤环腔的吸收、光纤耦合器的插入损耗、光纤的散射损耗和光纤的连接损耗。

在偏振测量实验中,偏振片使光脉冲变成偏振光,由偏振控制器波片旋转引起的光损耗应予以考虑, $B$  表示的是由于偏振角改变引起的外在衰减,包括“不可预期”的插入损耗和偏振角变化引起的“预期”损耗。偏振损耗  $B$  表示为

$$B = e^{-[\gamma + \ln(\cos \theta)^2]} \quad (2)$$

式中, $e^{-\gamma}$  是偏振引起的耦合损耗,根据“马吕斯定律”, $e^{\ln(\cos \theta)^2}$  依赖于  $\theta$ 。波器检测到的光强的时间衰减表达式为

$$I = I_0 e^{-\frac{c(A+B)t}{nd}} \quad (t = t_0 + (N-1)T \quad N = 1, 2, 3 \dots) \quad (3)$$

式中, $I$  是第  $N$  次光脉冲在  $t_0 + (N-1)T$  时的光强, $I_0$  是  $t_0$  时的初始光强, $t = t_0 + (N-1)T$  是获得输出脉冲光强的采样时间。根据式(1)、(2)和(3)得

$$\tau = \frac{nd}{c(A+B)} = \frac{nd}{c(A + e^{-[\gamma + \ln(\cos \theta)^2]})} \quad (4)$$

由式(4)可知,偏振角  $\theta$  可以通过测量  $\tau$  得到,并且  $\tau$  随着  $\theta$  的增大而减小。

## 2 系统设计

### 2.1 实验装置

基于腔内放大的 FLRDS 系统偏振测量原理如图 1 所示.该系统的组成部分由两个标准  $2 \times 2$  单模光纤耦合器(耦合比为 99 : 1)、一段长度约为 3.6 km 的单模光纤(SMF-28)、一个掺铒光纤放大器用于提供增益来补偿光纤环路的损耗、两个隔离器、起偏器和偏振控制器组成.一个中心波长为 1 550 nm、带宽为 1 MHz 的蝶形分布反馈式半导体激光器(DFB LD)作为激光源,LD 控制器的输出电流和温度分别设置为 101 mA 和 25℃,然后由数字波形发生器产生的一系列脉冲波(1 kHz,2 V,14  $\mu$ s)通过“模拟调制输入”端口输送到 LD 控制器调制成脉冲光,光电探测器和示波器用于监测每次往返的衰减信号和记录分析数据.

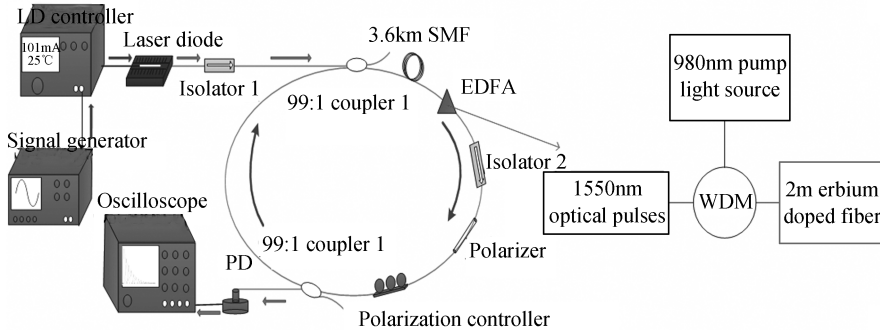


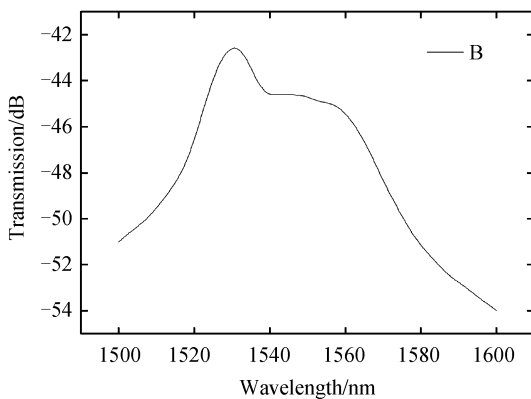
图 1 腔内放大的 FLRDS 系统实验设置

Fig.1 Schematic diagram of polarization measurement of FLRDS system based on cavity amplification

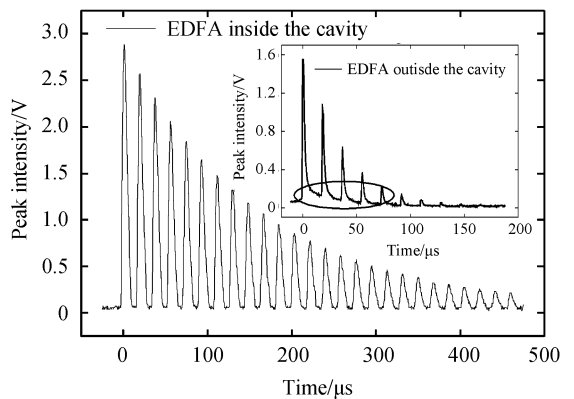
经过调制的脉冲光通过耦合器 1 的 1%臂耦合到光纤环路中,围绕光纤环路循环,然后通过耦合器 2 的 1%臂耦合到光纤环路外,剩余 99%脉冲光被保持在环形腔内,并继续在其中传输.衰减脉冲的输出周期性序列被光电探测器转换成电信号,最终显示在数字示波器上.在该衰荡系统中,隔离器用于确保信号单向传输,避免光源损坏.偏振器使脉冲光变为偏振光.由偏振控制器波片的旋转引起的腔内损耗导致脉冲信号的衰减时间发生改变.为了提高衰减时间的测量精度,有必要增加脉冲峰值的数量.因此,使用 EDFA 补偿光纤环路内的大损耗.通过不同长度的铒纤实验发现铒纤过长易产生激光;过短则脉冲间隔小、增益不够.因此,实验中的 EDFA 采用的是 2 m 的掺铒光纤(峰值吸收为 20.04 dB/m@980 nm)和 980 nm 泵浦激光器通过 980/1 550 WDM 耦合器制作而成.

### 2.2 腔内和腔外信号放大对比

图 2(a)为 EDFA 的增益光谱,光谱分析仪为 YOKOGAWA 的 AQ6370C 型号,扫描范围为 600~1 700 nm,最小分辨率为 0.02 nm.实验选取 1 550 nm 处的一个波长,增益平坦度不影响偏振测量.在相同条件下,放置在腔内和腔外的 EDFA 的衰减光谱如图 2(b)所示.当 EDFA 放置在腔内时,衰减光谱的灵敏度为



(a) Gain spectrum of the EDFA



(b) Comparison of the ring-down spectrums of the EDFA placed inside and outside the cavity

图 2 EDFA 光谱图

Fig.2 Spectrum of the EDFA

0.028 6 V/ $\mu$ s, 相对于腔外部的 0.016 3 V/ $\mu$ s 较大. 从图 2(b) 可以看出, 腔内放大比腔外放大的脉冲峰值强度更大、数量更多, 更有利于检测到  $\tau$ . 而且腔外放大存在脉冲曲线上升的问题, 经过不同长度的辑纤调试, 采用长度为 2 m 的低增益和低噪声掺铒光纤来消除曲线上升问题, 与常规的腔衰荡信号处理相比, 对偏振角测量灵敏度的提高有很大改善.

### 3 结果和讨论

基于对腔内和腔外信号放大的对比, 采用腔内放大进行偏振测量实验. 为了在实验过程中测得衰减时间  $\tau$ , 采用偏振控制器控制脉冲峰数量并保持泵浦功率恒定, 然后调节偏振控制器并通过示波器观察不同的输出脉冲. 图 3 显示了 EDFA 在腔内时, 偏振角  $\theta$  以  $9^\circ$  为间隔从  $0^\circ$  到  $90^\circ$  变化时的脉冲衰减曲线. 可以看到  $\tau$  随着  $\theta$  增加而减小. 因此, 根据上述讨论  $\theta$  能够通过测量对应的  $\tau$  得到.

为了进一步研究  $\theta$  和  $\tau$  的关系, 通过实验拟合了  $0^\circ$ 、 $45^\circ$  和  $90^\circ$  的三个衰减曲线, 见图 4、图 5. 由图 4、5 可知, 衰减时间  $\tau$  通过测量指数波形衰减到光强最大值的  $1/e$  得到, 分别为  $460 \mu$ s、 $280 \mu$ s 和  $98 \mu$ s.

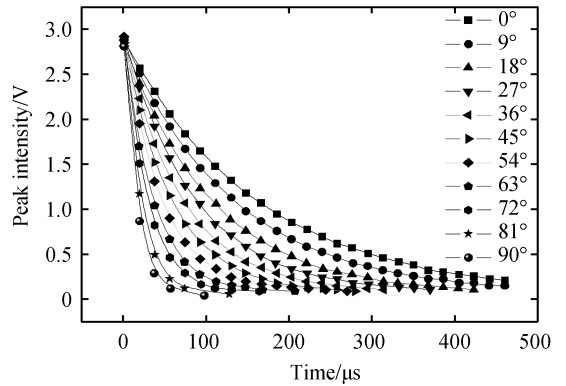


图 3 脉冲峰值点的衰减曲线

Fig.3 Ring-down curves of the pulse peak points

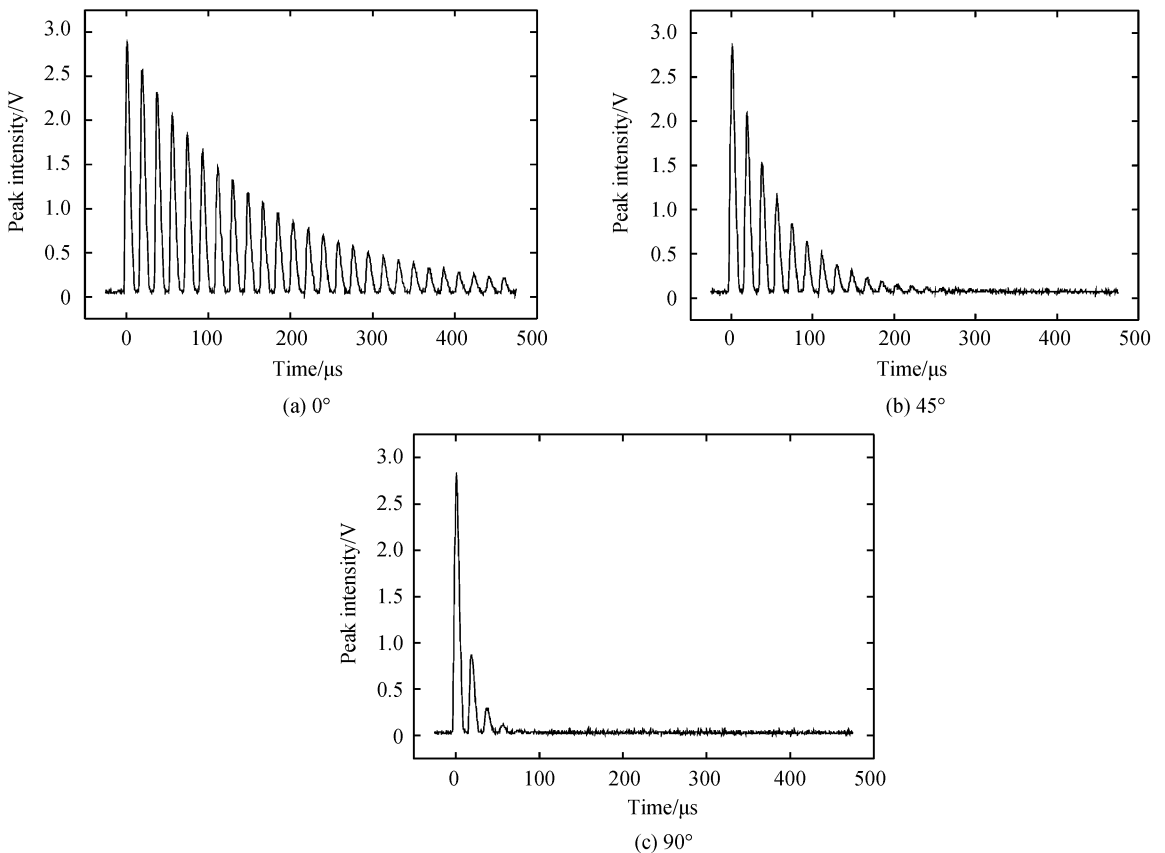


图 4 偏振角为  $0^\circ$ 、 $45^\circ$  和  $90^\circ$  的 FLRD 系统的三个衰减曲线

Fig.4 The three ring-down curves of the FLRD system with polarization angle of  $0^\circ$ 、 $45^\circ$  and  $90^\circ$

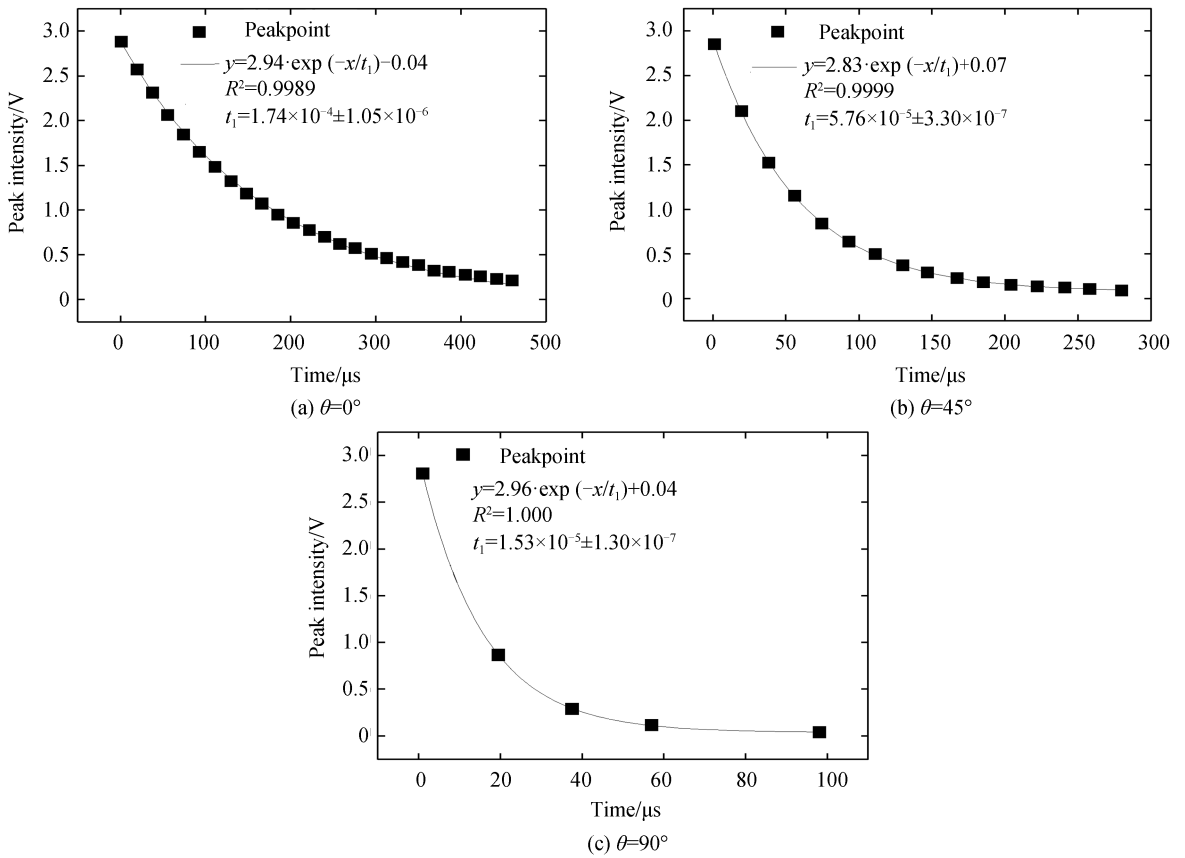


图5 不同偏振角( $\theta=0^\circ$ 、 $45^\circ$ 和 $90^\circ$ )的衰减时间  $\tau$  和峰值强度的指数拟合曲线

Fig.5 Exponential fitting curves of the ring-down time  $\tau$  with the peak intensity for different polarization angle  $\theta$  ( $\theta=0^\circ$ 、 $45^\circ$  and  $90^\circ$ )

根据图5,三个衰减曲线的标准方差( $R^2$ )分别为0.9989、0.9999和1.0000,表明拟合指数衰减曲线与实验数据吻合良好,然后通过测量不同偏振角 $\theta$ 对应的衰减时间 $\tau$ 获得了良好的线性度,如图6(a)所示.通过十次重复实验以测试系统的再现,实验结果如图6(b)所示: $0^\circ$ 、 $18^\circ$ 、 $36^\circ$ 、 $54^\circ$ 、 $72^\circ$ 、 $90^\circ$ 偏振角的再现性误差分别为0.0304、0.0311、0.0292、0.0322、0.0303、0.0315,平均再现性误差为0.0308,因此,该系统的重复性良好.

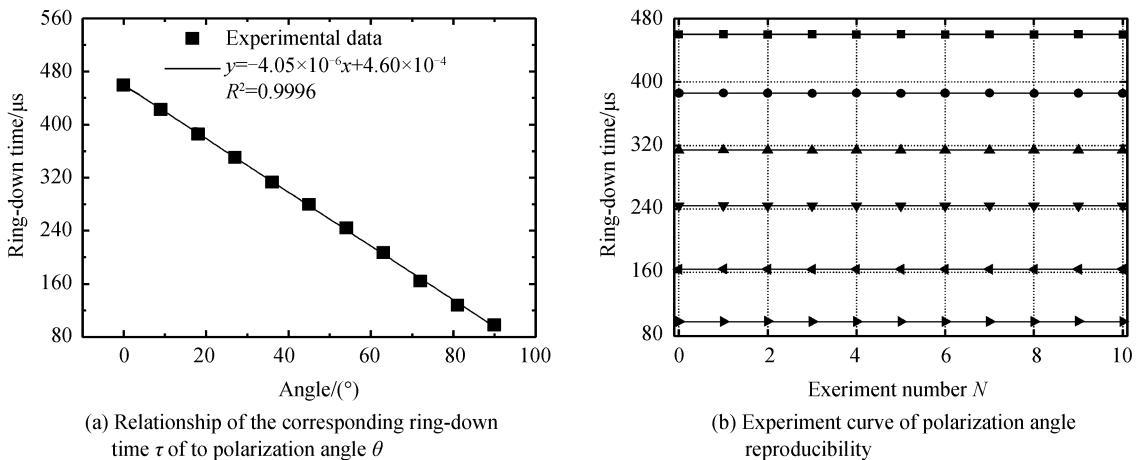


图6 衰减时间  $\tau$  与偏振角  $\theta$  的关系及偏振角再现性实验曲线

Fig.6 Relationship of the corresponding ring-down time  $\tau$  to polarization angle  $\theta$ , and the Experiment curve of polarization angle reproducibility

从图3可以看出, $0^\circ$ 至 $90^\circ$ 的衰减时间 $\tau$ 分别为 $460 \mu$ s、 $423 \mu$ s、 $386 \mu$ s、 $351 \mu$ s、 $314 \mu$ s、 $280 \mu$ s、 $244 \mu$ s、 $207 \mu$ s、 $164 \mu$ s、 $128 \mu$ s、 $98 \mu$ s.根据式(3),当FLRDS系统的其他参数恒定时,随着 $\theta$ 的变化而导致环形腔内

不同的光吸收.最终,所有这些因素都导致了 $\tau$ 的变化,然后得到如图6所示的衰减时间 $\tau$ 与偏振角 $\theta$ 的关系,从图5可以看出, $\tau$ 对应于 $\theta$ 的变化呈现良好的线性响应,FLRDS系统的灵敏度为 $4.05 \mu\text{s}/^\circ$ ,拟合曲线的相关系数为0.9996,最大灵敏度误差为 $0.0273 \mu\text{s}/^\circ$

## 4 结论

提出了一种采用光纤环形腔衰荡光谱(FLRDS)系统进行偏振测量的高灵敏度和较好稳定性的方法,并进行了实验证明.结果表明,EDFA在腔内进行信号放大的效果优于将EDFA放置在腔外.通过实验拟合了偏振角为 $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 和 $90^\circ$ 的三个衰减曲线,三个衰减曲线的标准方差( $R^2$ )分别为0.9989、0.9999和1.0000,表明拟合指数衰减曲线与实验数据非常一致,获得了良好的线性关系.从结果可以看出,FLRDS系统的灵敏度为 $4.05 \mu\text{s}/^\circ$ ,拟合曲线的相关系数为0.9996,最大灵敏度误差为 $0.0273 \mu\text{s}/^\circ$ .通过十次重复实验,选取六组数据进行拟合得到系统的平均再现性误差为0.0308,重复性良好,可用于旋光溶液测量,也为光纤径向应力双折射特性和光纤激光器的偏振态测量提供了参考.

## 参考文献

- [1] TANG D, YANG D, JIANG Y, *et al.* Fiber loop ring-down optical fiber grating gas pressure sensor[J]. *Optics & Lasers in Engineering*, 2010, **48**(12): 1262-1265.
- [2] WAECHTER H, MUNZKE D, JANG A, *et al.* Simultaneous and continuous multiple wavelength absorption spectroscopy on nanoliter volumes based on frequency-division multiplexing fiber-loop cavity ring-down spectroscopy[J]. *Analytical Chemistry*, 2011, **83**(7): 2719-25.
- [3] JIANG M, ZHANG W, ZHANG Q, *et al.* Investigation on an evanescent wave fiber-optic absorption sensor based on fiber loop cavity ring-down spectroscopy[J]. *Optics Communications*, 2010, **283**(2): 249-253.
- [4] ZHOU X, WANG X, CHEN K, *et al.* Melamine detection using phase-shift fiber-loop ring-down spectroscopy[J]. *Optics Communications*, 2014, **333**: 105-108.
- [5] ZHAO Y, BAI L, WANG Q. Gas concentration sensor based on fiber loop ring-down spectroscopy[J]. *Optics Communications*, 2013, **309**(22): 328-332.
- [6] ANDREWS N L P, LITMAN J, STROH D, *et al.* Near-infrared absorption detection in picolitre liquid volumes using amplified fiber loop ring-down detection[J]. *Optical Fiber Technology*, 2013, **19**(6): 822-827.
- [7] VALLANCE C. Innovations in Cavity Ringdown Spectroscopy[J]. *Cheminform*, 2005, **36**(43): 867-874.
- [8] BESCHERER K, BARNES J A, LOOCK H P. Absorption measurements in liquid core waveguides using cavity ring-down spectroscopy[J]. *Analytical Chemistry*, 2013, **85**(9): 4328-34.
- [9] YE F, ZHOU C, QI B, *et al.* Continuous-wave cavity ring-down evanescent-field sensing with a broadband source based on frequency-shifted interferometry[J]. *Sensors & Actuators B Chemical*, 2013, **184**(8): 150-155.
- [10] SILVA S O, MAGALHAES R, MARQUES M B, *et al.* New advances in fiber cavity ring-down technology[J]. *Optics & Laser Technology*, 2016, **78**: 115-119.
- [11] 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 & Measurement*, 2015, **64**(7): 2005-2011.
- [12] NI N, CHAN C C, WONG W C, *et al.* Cavity ring-down long period grating pressure sensor[J]. *Sensors & Actuators A Physical*, 2010, **158**(2): 207-211.
- [13] JIANG Y, ZHAO J, YANG D, *et al.* High-sensitivity pressure sensors based on mechanically induced long-period fiber gratings and fiber loop ring-down[J]. *Optics Communications*, 2010, **283**(20): 3945-3948.
- [14] ZHANG Xue-xia, GE Ting-wu, DING Xing, *et al.* Study of continuous fiber laser with distributed pump structure[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2016, **37**(9): 1071-1075.  
张雪霞,葛廷武,丁星,等.分布式抽运连续光纤激光器研究[J].发光学报,2016,**37**(9): 1071-1075.
- [15] CHEN G L, DAI F L, ZHOU X G. Magnetic light domino effect applied to measuring double refraction caused by stress in high double refraction optic fiber[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2002, **17**: 153-156.  
陈国霖,戴福隆,周辛庚.应用磁光效应测量高双折射光纤中应力引起的双折射[J].实验力学,2002,**17**(s1): 153-156.
- [16] YANG Lei, YU You-long. A new method to measure the birefringence of the single-mode fiber which is side-pressed using polarization controller[J]. *Computer Knowledge & Technology*, 2010, **6**(4): 2534-2535.  
杨磊,余有龙.一种利用偏振控制器测量径向受力光纤双折射的方法[J].电脑知识与技术,2010,**6**(4): 2534-2535.
- [17] LI Xiao-fu, YU Hai-hu, HUANG Hua, *et al.* Research on reflection spectra of locally pressed chirped grating of diametric force under birefringence[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2011, **33**(1): 139-138.  
李小甫,余海湖,黄华,等.双折射下啁啾光栅径向局部受压特性研究[J].武汉理工大学学报,2011,**33**(1): 139-141.
- [18] SU Yang, XU Jun-hua, ZHANG B F, *et al.* Polarization states of transmitted light in linear birefringence gratings[J].

- Journal of Applied Optics*, 2011, **32**(3): 512-517.
- 苏洋,徐俊华,张宝富,等. 线双折射传感光栅中的传输光偏振态分析[J]. 应用光学,2011, **32**(3): 512-517.
- [19] HUANG Wei-xi, CHEN Zhe, SUI Zhan, *et al.* Fiber polarization controller based on thermal birefringent effect of PANDA fiber[J]. *Infrared & Laser Engineering*, 2010, **39**(6):1137-1142.  
黄伟溪,陈哲,隋展,等. 熊猫光纤热双折射效应光纤偏振控制器研究[J]. 红外与激光工程,2010, **39**(6): 1137-1142.
- [20] QIAN X, ZHAO Y, ZHANG Y N, *et al.* Theoretical research of gas sensing method based on photonic crystal cavity and fiber loop ring-down technique[J]. *Sensors & Actuators B Chemical*, 2016, **228**: 665-672.
- [21] LIU K, LIU T G, PENG G D, *et al.* Theoretical investigation of an optical fiber amplifier loop for intra-cavity and ring-down cavity gas sensing[J]. *Sensors & Actuators B Chemical*, 2010, **146**(1): 116-121.
- [22] MAGAKHAES R, SILVA S O, FRAZAO O. Fiber ring resonator using a cavity ring-down interrogation technique for curvature sensing[J]. *Microwave & Optical Technology Letters*, 2016, **58**(2): 267-270.
- [23] JIANG Y, JIANG W, JIANG B, *et al.* Precise measurement of liquid-level by fiber loop ring-down technique incorporating an etched fiber[J]. *Optics Communications*, 2015, **351**: 30-34.
- [24] ITTUARAH J V, SIDHIK S, GANGOPADHYAY T K. Refractometry using evanescent field based fiber loop ringdown spectroscopy[J]. *Sensors & Actuators A Physical*, 2015, **223**: 61-66.
- [25] SILVA S, MAGAKHAES R, PEREZ-HERRERA R A, *et al.* Fiber cavity ring down and gain amplification effect[J]. *Photonic Sensors*, 2016, **6**(4): 324-327.