

基于压电陶瓷闭环控制的线性可调谐 环形腔光纤激光器

李国玉 杨 康 贾素梅 李 燕 刘明生

邯郸学院信息技术研究所, 河北 邯郸 056005

摘要 提出了一种基于压电陶瓷闭环控制的线性可调谐环形腔光纤激光器。光纤激光器环形腔结构中光纤光栅固定在压电陶瓷上,通过控制压电陶瓷改变光纤光栅波长,从而改变环形腔光纤激光器的波长,构成基于压电陶瓷的可调谐环形腔光纤激光器。应变传感器贴附在压电陶瓷上,实时监测压电陶瓷的步长变化,通过惠斯顿桥式电路反馈给驱动控制系统,并补偿和修正压电陶瓷固有的磁滞和蠕变特性,形成压电陶瓷闭环控制系统。实验结果表明基于压电陶瓷闭环控制的可调谐环形腔光纤激光器调谐线性度好,波长调谐范围可达0.9 nm,线宽为4 kHz,波长稳定性为 ± 0.01 nm,功率稳定性为 ± 0.3 dB。

关键词 激光器; 光纤环形腔激光器; 可调谐; 光纤布拉格光栅

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201535.0614003

Linear Tunable Fiber Ring Laser Based on Closed-Loop Piezoelectric ceramics

Li Guoyu Yang Kang Jia Sumei Li Yan Liu Mingsheng

Institute of Information Technology, Handan College, Handan, Hebei 056005, China

Abstract The linearity tunable fiber ring laser based on closed-loop piezoelectric ceramics (PZT) is proposed. The fiber Bragg grating (FBG) of the ring cavity is fixed on the PZT, the wavelength of FBG changes with controlling the PZT, which leads to the wavelength change of fiber ring laser, so the tunable fiber ring laser based on PZT is realized. The strain sensor attached on the PZT is monitoring the step change of the PZT real-time, reporting to the PZT driver system, compensating and rectifying the inherent hysteresis and creep through the Wheatstone bridge, so the tunable fiber ring laser based on closed-loop PZT is achieved. Experimental results show that the tuning curve of the fiber ring laser is linear with the tuning range nearly of 0.9 nm and the linewidth nearly of 4 KHz. Furthermore, the wavelength fluctuations of the tunable fiber ring laser are kept within ± 0.01 nm, and the power variation is kept within ± 0.3 dB.

Key words lasers; fiber ring laser; tunable; fiber Bragg grating

OCIS codes 140.3510; 140.3560; 140.3600; 060.3735

1 引 言

近年来,可调谐环形腔光纤激光器以其成本低、插入损耗低、输出功率高,转换效率高和结构简单等优点,越来越受到研究人员的青睐。满足特殊需求性能优良的商用可调谐环形腔光纤激光器已经量产,并被广泛应用到光学精密测量、光纤通信、光纤传感器和高分辨率光谱测量等领域^[1-4]。当前可调谐环形腔光纤激光器利用可调谐光纤光栅滤波器^[5],可调谐带通滤波器^[6],可调谐法布里-珀罗(F-P)滤波器^[7]和声光可调谐滤波器^[8]对光纤环形腔进行调谐,从而改变输出激光波长。可调谐光纤环形腔激光器利用掺铒光纤增益作

收稿日期: 2015-02-10; 收到修改稿日期: 2015-03-30

基金项目: 国家自然科学基金(60807033),河北省应用基础研究计划重点基础研究项目(13960306D)和校级基金(13207)

作者简介: 李国玉(1977—),男,博士,副教授,主要从事光纤激光器和光纤传感器方面的研究。

E-mail: guoyu_li@mail.nankai.edu.cn

为介质,利用光纤光栅或者棱镜改变谐振波长^[9],达到光纤环形腔调谐的目的。可调谐环形腔光纤激光器实现调谐方法有两种,一种是基于温度调谐,调谐范围宽,但是调谐速度比较慢,而且温度不易精确控制和记录,上升调谐曲线和下降调谐曲线不能重合,并且调谐曲线是非线性的,因此基于温度的可调谐环形腔光纤激光器线性度和重复性差,精确度低。另一种是基于压电陶瓷(PZT)调谐,调谐速度快,但调谐范围窄。压电陶瓷具有磁滞和蠕变特性,因此基于压电陶瓷的可调谐环形腔光纤激光器具有较差的重复性和线性度。

本文提出了一种基于压电陶瓷闭环控制的线性可调谐环形腔光纤激光器。相对于压电陶瓷开环控制的可调谐环形腔光纤激光器来说,固定在压电陶瓷上的位移传感器实时监测压电陶瓷的非线性磁滞和蠕变,驱动系统根据反馈信息进行补偿和修正,最终得到波长调谐范围为0~0.9 nm的线性可调谐环形腔光纤激光器。

2 实验装置

图1是基于压电陶瓷闭环控制的可调谐环形腔光纤激光器的装置图。如图1所示,光纤环形腔由10 m长的掺铒光纤(EDF),环形器,光纤布拉格光栅(FBG),70:30耦合器和波分复用器(WDM)组成。掺铒光纤在980 nm和1550 nm的吸收系数分别为3.0 dB/m和6.0 dB/m,掺铒光纤长度的选择满足抽运功率为341.62 mW时激光谐振的要求。光纤光栅波长、调制深度和长度分别为1524.23 nm, -7.90 dB和6 mm。

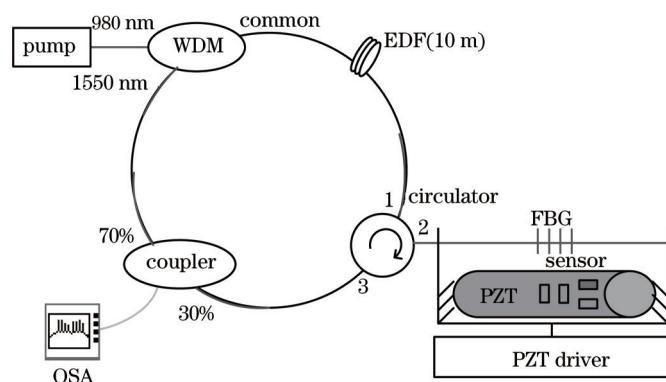


图1 基于压电陶瓷的可调谐环形腔光纤激光器装置图

Fig.1 Schematic diagram of tunable fiber ring laser based on PZT

抽运激光器经过980 nm端口与光波分复用器连接,抽运光经过光波分复用器的公共端进入长度为10 m的掺铒光纤进行放大,接着进入环形器的1端口,光从环形器的2端口进入光纤光栅,满足布拉格条件的反射光经过环形器的3端口进入耦合器的30%的一端,耦合器的分光比为70%的一端与光波分复用器的1550 nm端口相连,组成光纤激光器的环形腔。耦合器的另一端与光谱分析仪(OSA)相连,用来监测输出激光。为了研究环形腔光纤激光器的调谐特性,将光纤光栅固定在压电陶瓷上,压电陶瓷的伸缩由压电陶瓷驱动器控制。压电陶瓷驱动器的驱动电压变化时,控制压电陶瓷伸长或缩短,光纤光栅随之伸长或缩短,从而改变环形腔光纤激光器的出射波长,达到调谐的目的,可调谐环形腔光纤激光器的波长改变由光谱分析仪监测和记录。

磁滞和蠕变是压电陶瓷的固有特性,压电陶瓷在电解质和电磁的大信号情况下显示出磁滞特性。压电材料中晶体偏振效应和分子效应导致压电陶瓷的磁滞现象。蠕变是驱动电压为零时,压电陶瓷位移随时间变化的一种现象。当压电陶瓷驱动电压变化时,剩余极化强度继续变化,导致压电陶瓷对目标位置的缓慢变化。

为了补偿和修正压电陶瓷的磁滞和蠕变引起的位移偏移,固定在压电陶瓷上的薄膜电阻阻值变化对应压电陶瓷的应变变化。如图1所示,4个薄膜电阻组成惠斯登电桥,由驱动电源进行供电控制。当电桥电阻阻值发生变化时,电压变化转换成位移变化的模拟信号。在压电陶瓷闭环控制中,压电陶瓷伸长或缩短发生误差时,应变电桥的电阻值发生变化,电桥外部电路电压变化转换成位移变化反馈给驱动系统,然后由驱动系统根据位移误差大小,调整驱动电压,从而实现对压电陶瓷磁滞和蠕变的补偿和修正^[10]。

3 实验研究内容与结果分析

3.1 可调谐环形腔光纤激光器线宽测量

测量激光器线宽的方法包括延时零拍法和延时自外差法以及其他非平衡光纤干涉仪测量方法^[11]。利用

外差法测量可调谐环形腔光纤激光器的线宽,光纤激光器出射激光通过 50/50 分束器分为两路,一路激光经过 20 km 单模光纤延迟线,另一路激光直接通过 100 MHz 声光调制器,然后两路光经过光纤耦合器会合,由光电探测器检测。图 2 是利用延迟自外差法测量的可调谐环形腔光纤激光器的线宽测量谱图,从图中可以看出,环形腔光纤激光器的线宽约为 4 kHz。窄线宽可以保证光纤激光器的长相干距离,可以作为光频域分布式光纤传感器的适用光源,实现长距离分布式光纤传感的相干检测。

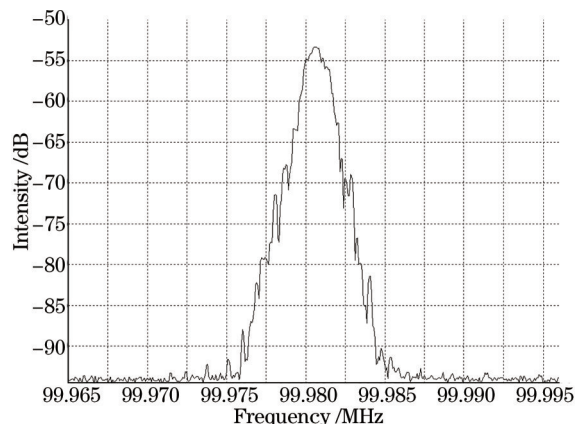


图 2 20 km 光纤延时自外差法环形腔光纤激光器线宽频谱图

Fig.2 Delayed heterodyne spectra of the fiber ring laser with 20-km fiber delay

3.2 可调谐环形腔光纤激光器的调谐特性

首先对压电陶瓷开环控制的环形腔光纤激光器的调谐特性进行测量和研究,当驱动电压增加或减小时,环形腔光纤激光器的出射波长由光谱分析仪测量。为了观测环形腔光纤激光器的调谐特性,实验分为两步:1) 压电陶瓷驱动电压从 0 V 增加到 150 V,步长为 10 V,环形腔光纤激光器对应各驱动电压的出射波长由光谱分析仪测量并记录;2) 压电陶瓷驱动电压从 150 V 降低到 0 V,步长为 10 V,环形腔光纤激光器对应各驱动电压的出射波长同样由光谱分析仪测量并记录。整个测量过程重复 3 次,最后得到 3 条完整的环形腔光纤激光器的闭合调谐曲线。接着研究了压电陶瓷闭环控制的环形腔光纤激光器的调谐特性,测量过程与压电陶瓷开环控制测量过程相同,只是压电陶瓷的调节范围变为 0~90 μm 之间。

基于压电陶瓷开环控制的环形腔光纤激光器的调谐曲线如图 3 所示,图中实线表示电压上升调谐曲线,点线表示电压下降调谐曲线。同样符号代表一个完整的调谐过程,图 3 表示对环形腔光纤激光器出射波长的 3 个完整调谐循环。在图 3 中,随着驱动电压的变化,上升调谐曲线和下降调谐曲线都是非线性的,3 条上升调谐曲线互不重合,3 条下降调谐曲线也互不重合。同一个完整循环,上升调谐曲线和下降调谐曲线彼此不重合。压电陶瓷开环控制的环形腔可调谐光纤激光器具有非线性输出,较差的重复性和明显的磁滞回线,主要原因是压电陶瓷具有固有的磁滞和蠕变特性。

基于压电陶瓷闭环控制的环形腔光纤激光器的调谐曲线如图 4 所示,实线表示上升调谐曲线,点线表示

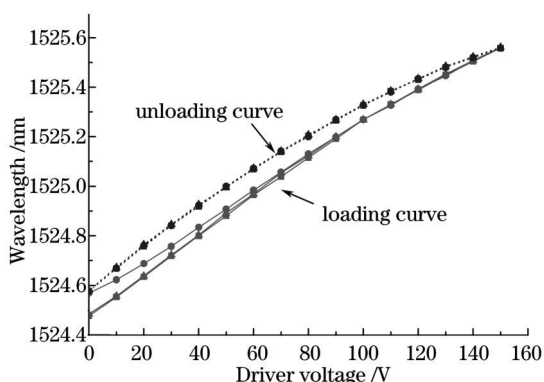


图 3 压电陶瓷开环控制的环形腔光纤激光器调谐曲线图

Fig.3 Tuning curves of the fiber ring laser based on open loop PZT

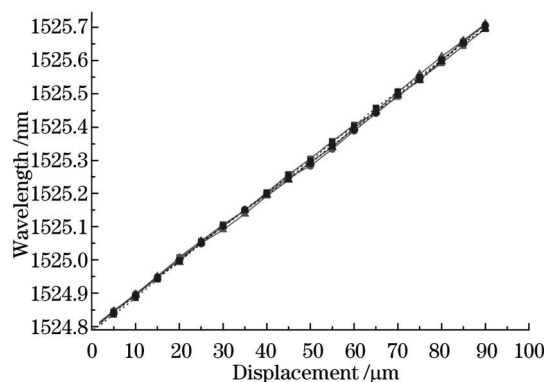


图 4 压电陶瓷闭环控制的环形腔光纤激光器调谐曲线图

Fig.4 Tuning curves of fiber ring laser based on closed-loop PZT

下降调谐曲线。同样符号代表一个完整的调谐过程,图4表示环形腔光纤激光器出射波长的3个完整调谐循环。图4中,随着驱动电压的变化,上升调谐曲线和下降调谐曲线都是线性的,3条上升调谐曲线互相重合,3条下降调谐曲线互相重合。同一个完整循环,上升调谐曲线和下降调谐曲线彼此重合。压电陶瓷闭环控制的环形腔可调谐光纤激光器具有线性输出和较好的重复性,主要原因是粘附在压电陶瓷上的应变电桥补偿和修正了磁滞和蠕变特性带来的非线性。

3.3 可调谐环形腔光纤激光器的波长和功率稳定性

最后对压电陶瓷闭环控制的可调谐环形腔光纤激光器的波长稳定性和功率稳定性进行了测量和研究。环形腔中光纤光栅伸长 $60\ \mu\text{m}$,并保持稳定 2 h,环形腔光纤激光器出射波长的波动性和功率波动性分别由波长计和光谱分析仪记录和分析。

环形腔可调谐光纤激光器的波长稳定性定义为在固定驱动电压下,波长偏移随着时间变化的函数。图5就是固定驱动电压下线性可调谐光纤激光器的波长稳定性图,光纤光栅伸长 $60\ \mu\text{m}$,光纤激光器的中心波长为 $1523.398\ \text{nm}$,保持 2 h 稳定,可调谐光纤激光器的波长波动数据由多波长计记录。从图5可以看出,线性可调谐环形腔光纤激光器的波长波动为 $\pm 0.01\ \text{nm}$,最大偏移值为 $0.008\ \text{nm}$ 。

环形腔可调谐光纤激光器的功率稳定性定义为在固定驱动电压下,输出功率偏移随着时间变化的函数。图6就是固定驱动电压下线性可调谐光纤激光器的功率稳定性图,光纤光栅伸长 $60\ \mu\text{m}$,光纤激光器的输出功率为 $-10.60\ \text{dBm}$,保持 2 h 稳定,可调谐光纤激光器的输出功率波动数据由光谱分析仪记录。从图6可以看出,线性可调谐环形腔光纤激光器的输出功率波动为 $\pm 0.3\ \text{dB}$,最大偏移值为 $0.18\ \text{dB}$ 。

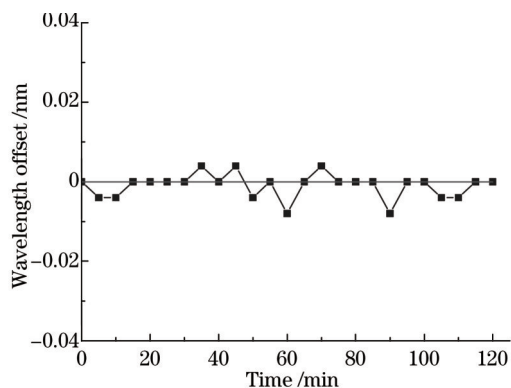


图5 恒定驱动电压下环形腔光纤激光器的波长稳定性图

Fig.5 Wavelength stability of tunable fiber ring laser for a constant voltage

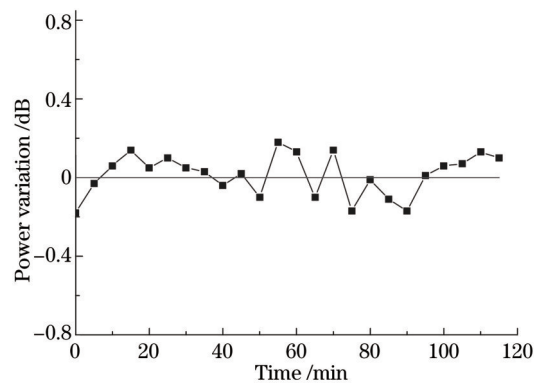


图6 恒定驱动电压下环形腔光纤激光器的功率稳定性图

Fig.6 Power stability of tunable fiber ring laser for a constant voltage

4 结 论

提出了基于压电陶瓷闭环控制的线性可调谐环形腔光纤激光器,并成功得到实验证明。实验结果表明环形腔光纤激光器的调谐曲线是线性的,最大调谐范围为 $0.9\ \text{nm}$,线宽为 $4\ \text{kHz}$ 。并且线性可调谐环形腔光纤激光器的波长稳定性为 $\pm 0.01\ \text{nm}$,输出功率稳定性为 $\pm 0.3\ \text{dB}$,在远距离和高分辨光频段分布式传感监测领域有着广泛的应用前景。

参 考 文 献

- 1 Liaw S K, Hung K L, Lin Y T, *et al.*. C-band continuously tunable lasers using tunable fiber Bragg gratings[J]. Optics & Laser Technology, 2007, 39(6): 1214-1217.
- 2 Wang X Z, Li Y, Bao X Y. C- and L-band tunable fiber ring laser using a two-taper Mach-Zehnder interferometer filter[J]. Opt Lett, 2010, 35(20): 3354-3356.
- 3 Li Guo Yu, Li Yan, Yang Kang, *et al.*. A linearity tunable DBR fiber laser based on closed-loop PZT[J]. Opt & Laser Technol, 2013, 45: 702-704.
- 4 T Zhu, X Y Bao, L Chen. A single longitudinal mode tunable fiber ring laser based on stimulated Rayleigh scattering in a non-

- uniform optical fiber[J]. *J Lightwave Technol*, 2011, 29(12): 1802-1807.
- 5 Y Yu, L Lui, H Tam, W Chung. Fiber-laser based wavelength-division multiplexed fiber Bragg grating sensor system[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2001, 13(7): 702-704.
- 6 S Yamashita, M Nishihara. Widely tunable erbium-doped fiber ring laser covering both C-band and L-band[J]. *IEEE J Sel Top Quantum Electron*, 2001, 7(1): 41-43.
- 7 Zhang Yan, Chen Wei, Ren Min, *et al.*. Stable, tunable single-longitudinal-mode erbium-doped fiber laser with multiple ring cavities[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(3): 507-511.
张 艳, 陈 伟, 任 民, 等. 稳定可调谐的单纵模多环形腔掺铒光纤激光器[J]. *光学学报*, 2008, 28(3): 507-511.
- 8 Guo Wei, Liu Ying, Xiao Lifeng, *et al.*. Study on characteristics of acoustooptical tunable erbium-doped fiber ring laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 33(7): 877-881.
郭 巍, 刘 迎, 肖立峰, 等. 基于新型两级集成光学声光可调谐滤波器的环形腔掺铒光纤激光器[J]. *光学学报*, 2006, 33(7): 877-881.
- 9 H Sakata, M Ichikawa, H Nakagami. Tunable Tm-doped fiber ring laser operationing at 1.9 μm band using force-induced fiber grating as wavelength tuner[J]. *Appl Optics*, 2011, 50(3): 291-295.
- 10 H W Jung, J Y Shim, D G Gweon. New open-loop actuating method of piezoelectric actuators for removing hysteresis and creep[J]. *Rev Sci Instrum*, 2000, 71(9): 3436-3440.
- 11 Cao Chunyuan, Yao Qiong, Rao Wei, *et al.*. Linewidth measurement using unbalanced fiber-optic interometer for narrow linewidth lasers[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(5): 0508005.
曹春燕, 姚 琼, 饶 伟, 等. 窄线宽激光器线宽的非平衡光纤干涉仪测量法[J]. *中国激光*, 2011, 38(5): 0508005.

栏目编辑: 宋梅梅