

基于注入式有源双环腔的高功率单频窄线宽 光纤激光器

万洪丹¹ 鲁志明² 胡涛平³

¹南京邮电大学, 江苏 南京 210046

²上海贝尔股份有限公司, 江苏 南京 210037

³南京林业大学, 江苏 南京 210037

摘要 提出了一种注入式有源双环腔结构光纤激光器。采用双环复合腔结构,通过对主环腔增益控制以及子环腔光注入的方法,获得了单频、窄线宽、无跳模的连续稳定激光输出。实验测得激光器的输出功率达 36 dBm,信噪比为 40 dB,频谱线宽为 7.1 kHz,中心波长为 1550 nm。数小时运行时间内,激光器的输出功率与波长稳定性较高。该激光器的单频运行取决于主环腔的增益和振荡波长与子环腔内种子激光器的功率和中心波长之间的匹配情况,其中主环腔的增益通过调节抽运光功率、腔内耦合系数进行控制。激光器输出的中心波长可通过改变种子激光器波长进行调谐。利用多模振荡半经典理论模型分析了有源双环腔内实现单频激光输出的物理过程,仿真结果与实验结果一致。该光纤激光器在相干光通信和光纤传感领域将具有广阔的应用前景。

关键词 激光器; 光纤激光器; 有源双环腔; 单频; 窄线宽

中图分类号 TN 248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.071401

A High Power, Single-Frequency, Narrow Linewidth Fiber Laser Based on an Active Double-Ring Cavity

Wan Hongdan¹ Lu Zhiming² Hu Taoping³

¹Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, Jiangsu 210046, China

²Alcatel-Lucent Shanghai Bell Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu 210037, China

³College of Science, Nanjing Forestry University, Nanjing, Jiangsu 210037, China

Abstract A high power, single-frequency, narrow linewidth fiber laser based on an active double-ring cavity under optical injection is proposed. The laser produces power of 36 dBm, signal-to-noise ratio (SNR) of 40 dB and linewidth of 7.1 kHz. The wavelength and power are stable within several hours of observing time. The all-fiber double-ring cavity consists of two sub-ring cavities: the main-ring cavity is gain-controlled through adjustment of the pump power and the intracavity feedback ratio, however, the sub-ring cavity is injected by a master laser whose power and wavelength are tunable. To achieve single-frequency lasing, the intracavity gain and oscillation mode's frequency of double-ring cavity should be matched with the optical power and frequency of the master laser, respectively. This frequency locking condition is achieved by adjusting the pump power and variable optical coupler. The single-longitudinal-mode selection regime is analyzed by a semi-classical multimode oscillation theory. Simulation results are in good accordance with the experimental results. This fiber laser can be useful in current coherent communication systems and distributed optical fiber sensors.

Key words lasers; fiber laser; active double-ring cavity; single-frequency; narrow linewidth

OCIS codes 140.3510; 140.3570; 140.3500

1 引言

高稳定、窄线宽、中心波长位于 1550 nm 的单频光纤激光器是应用于光纤传感与相干光通信系统的重要

收稿日期: 2015-02-20; 收到修改稿日期: 2015-03-02; 网络出版日期: 2015-05-12

基金项目: 南京邮电大学科研项目基金(NY213083, NY214059)、江苏省自然科学基金青年基金(BK20140982)。

作者简介: 万洪丹(1984—), 女, 博士, 讲师, 主要从事高功率光纤激光器、窄线宽光纤激光器、特种光纤放大器等高性能光纤光源相关的理论及其在光纤通信与光纤传感系统中的应用方面的研究。E-mail: hdwan@njupt.edu.cn

光源^[1]。为实现单频、窄线宽激光,光纤谐振腔设计是关键,其中线性短腔与环形长腔是目前两种最常用的腔结构^[2-3]。

线性短腔结构由于具有更大的腔内模式间隔,易于实现单纵模激光输出。目前,实现窄线宽输出的线性腔光纤激光器主要有:基于单个光纤布拉格光栅(FBG)的分布式反馈(DFB)光纤激光器和基于两个FBG的分布式布拉格反射(DBR)光纤激光器。对于后者,两个FBG的中心反射波长需要完全一致,这成为实际应用的难点。此外,为实现单个振荡频率激光输出,线性短腔结构腔长通常为厘米级别,采用相对较短的增益介质来实现,降低了腔内增益,激光器输出功率受到限制。目前已获得的激光器输出功率仅为毫瓦级别。为此,提出了基于种子光振荡器的主振荡功率放大(MOPA)技术^[4]。MOPA技术采用多级放大器级联方式实现高功率激光振荡输出,然而,光放大自发辐射(ASE)噪声以及非线性效应等问题降低了输出激光信噪比,限制了激光输出功率的进一步提升。

环形腔结构通常具有数十米以上的长度,腔内增益更高,可提升激光器输出功率。但是,长腔内存在多纵模振荡与模式竞争效应,需要通过合适的纵模选择技术来实现单纵模激光输出^[4]。研究表明,腔内窄带滤波器是一种重要的纵模选模方法,如法布里-珀罗(FP)光纤滤波器^[5-6],回音壁模谐振腔(WGM)滤波器^[7],以及曾提出的FP微腔级联滤波器^[8]。然而,设计带宽(BW)小于兆赫兹的滤波器以获得千赫兹单频激光输出难以实现。此外,采用腔内滤波器选模的方式引入了额外损耗,降低了激光器的输出效率。

复合型谐振腔(复合腔)基于 Vernier 效应进行腔内纵模选择,无需窄带滤波器就能实现单纵模激光输出,并且复合腔内采用长增益介质可提高激光器输出功率^[9]。然而,目前提出的复合腔光纤激光器,普遍采用无源腔结构,输出激光频谱宽度大于兆赫兹;此外,无源长腔易受环境因素的干扰,激光器长期运行的稳定性不高,容易产生跳模现象。

本文提出了一种基于注入式有源双环腔的窄线宽光纤激光器。通过双环复合腔选模、增益控制以及光注入相结合的方法,获得了中心波长位于 1550 nm、输出功率为 36 dBm,线宽为 7 kHz 的单频窄线宽激光。该激光器输出功率为瓦级,信噪比为 40 dB,功率和波长稳定性较高。

2 实验装置与原理

图 1 为注入式有源双环腔光纤激光器实验装置。激光器谐振腔由两个子环腔经过 2×2 耦合器连接而成。其中,主环腔内包含两级光放大器,分别为:第一级掺铒光纤放大器(EDFA)和第二级双包层铒镱共掺光纤放大器(EY-DCFA)。前者由单模半导体激光器(LD)抽运掺铒光纤实现,后者经两个多模 LD 抽运双包层铒镱共掺光纤获得,两级放大器提供的可调光增益系数最高达 38 dB。采用两级光放大结构,有利于实现更高的激光功率。通过控制 3 个抽运激光器驱动电流,监控每一级光放大器输出功率和调节 VOC 的腔内耦合系数 r 来实现主环腔内的增益控制。采用中心波长为 1550 nm、最高功率为 5 mW、线宽为 3 MHz 的半导体 DFB 激光器作为主振荡种子源,经过一个光纤耦合器注入子环腔内,使双环腔成为有源腔。主环腔内设有一个偏振控制器(PC),对腔内激光偏振态进行控制。两级光放大器之间通过隔离器 ISO1 抑制后向反射光的影响。通过 PC 与 BPF 之间的光纤 ISO2 确保主环腔内激光沿单向传输,避免空间烧孔效应。主环腔内置入中心波长为 1550 nm、

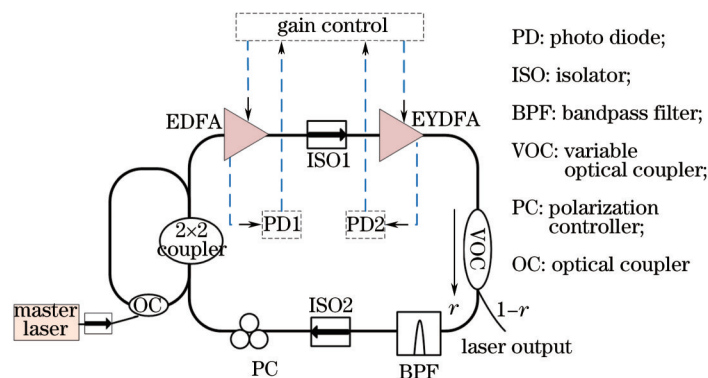


图 1 基于注入式有源双环腔的光纤激光器结构示意图

Fig.1 Experimental configuration of active double ring cavity fiber laser

带宽为 1.2 nm 的光纤滤波器实现粗选模和 ASE 噪声抑制。双环腔的子环腔长度约为 0.2 m, 在无外来种子激光器注入的条件下, 由于 Vernier 效应, 双环腔的自由振荡频率间隔约为 1 GHz。

上述基于注入式有源双环腔结构光纤激光器的单频运行条件取决于: 双环腔内增益系数、振荡频率与外注入种子激光器功率和波长之间的匹配情况。即存在一种注入锁定状态, 使得双环腔内位于种子激光谐振频率附近的激光模式将获得最大增益, 优先形成振荡输出, 整个激光器的谐振频率将最终稳定于种子激光器的波长上。激光器的窄线宽运行条件由图 1 中的第一级放大器中掺铒光纤(EDF)内的空间烧孔效应决定: 主环腔内激光与有源子环腔的种子激光相向传输, 二者相互作用, 在 EDF 内产生了动态增益光栅效应, 进一步抑制多模振荡、压窄激光光谱带宽^[9]。

3 实验结果与讨论

图 2(a) 为采用不同多模抽运激光器驱动电流所获得的光谱实验测试结果, 其中, 注入种子激光中心波长为 1550 nm、功率为 5 mW、 r 为 10%、单模抽运激光器功率为 300 mW。可以看出, 达到注入锁定后, 激光光谱中心波长始终位于种子激光中心波长(1550 nm)处, 并且光谱宽度随抽运光功率的增加而减小, 光功率则随抽运光功率的增加而变大。图 2(b) 对比了相同抽运功率条件下, 4 种不同光谱的带宽宽度, 其中黑色三角表示主环腔内两级光放大器串联的输出光谱(BW 为 20 nm), 红色虚线表示无种子激光注入的双环腔激光器输出光谱(BW 为 1 nm), 蓝色实心圆表示种子激光器经两级光放大器形成 MOPA 结构的输出光谱(BW 为 0.1 nm), 绿色实线表示基于注入式有源双环腔的激光器输出光谱(BW 为 0.01 nm)。实验结果表明, 与其他三种光路结构相比, 有源双环腔激光器产生的光谱带宽最窄、信噪比最高。主环腔内两级光放大器直接放大产生的宽带光谱带宽达 20 nm; 自由运转的无源双环腔激光器存在跳模效应, 其输出瞬态光谱带宽为 1 nm; 在种子激光注入腔内之后, 通过增益控制实现双环腔与种子激光器的共振并达到波长一致(1550 nm)(即实现注入锁定)。增益控制通过调节抽运激光器、种子激光器功率以及 r 实现。图 2(b) 表明, 当 r 为 10%, 种子激光器功率为 5 mW 时, 所搭建的注入式有源双环腔激光器可获得带宽为 0.01 nm(光谱分析仪 OSA 的分辨率极限)、SNR 为 40 dB。与 MOPA 结构相比, 有源双环腔结构产生的激光光谱在 1550 nm 处的 SNR 高 16 dB, 峰值功率处高 30 dB。

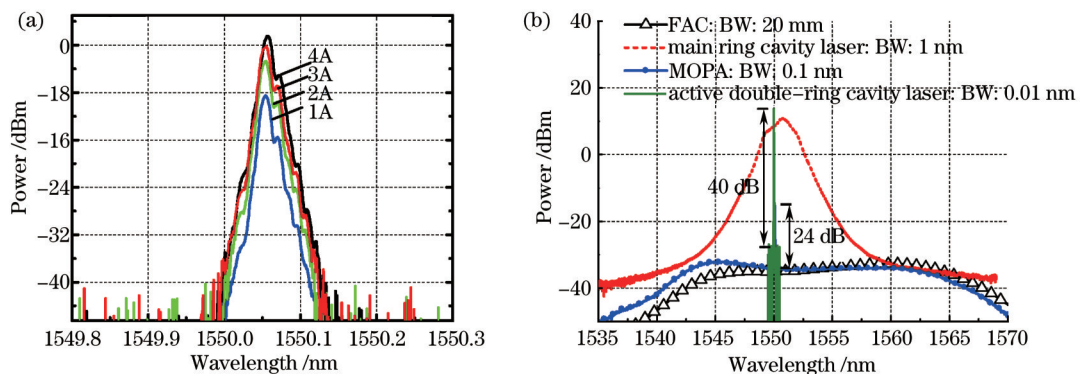


图 2 光谱测试结果。(a) 注入锁定态下不同多模抽运驱动电流(即不同功率)时的激光光谱;
(b) 4 种具有不同带宽的光谱测试结果。

Fig.2 Measured optical spectra. (a) Single-wavelength lasing spectra for different MM LD

driving current (namely power) under injection locking condition; (b) spectra measured with four different bandwidths

图 3(a) 为实验测得的在不同单模抽运与多模抽运驱动电流(即抽运光功率)条件下, 激光器主环腔内两级光放大器各自输出的光功率。其中, 由于主环腔内两级光放大器形成了闭合环形腔结构, 第一级 EDFA 的输出功率 P_1 即为第二级 EYDFA 的 P_m 。实验结果表明, 双包层多模抽运光放大器可提供的光增益远大于单包层单模(SM)抽运光放大器, 两级光放大器的增益大小主要由第二级 EYDFA 决定, 即由多模(MM)抽运激光器驱动电流大小决定。图 3(b) 为固定单模抽运激光器驱动电流时, 改变多模抽运激光器驱动电流和 r 所获得的激光器输出带宽和光功率的变化曲线。实验结果表明, 当两个多模抽运驱动电流分别达到最大值 3 A 时(对应单个多模抽运功率为 2 W), 激光器输出可达到最大值 36 dBm。相同抽运驱动电流条件下, 不同的 r 对应不同的带宽以及输出功率, 并且, 存在一个最佳 r 使得激光器的输出带宽达最小值。如: 对于 3 A 多模抽运驱动电流, r 分别取 10% 和 80% 时激光器输出带宽达最小值 0.01 nm。

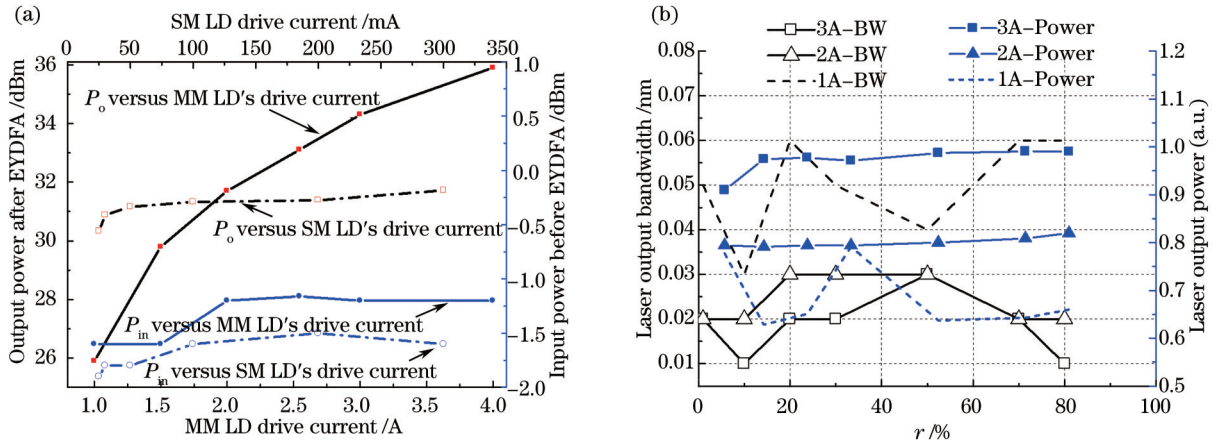


图3 (a) 激光器主环腔内两级光放大器采用不同多模与单模抽运驱动电流的输出功率;
 (b) 激光器输出带宽以及归一化光功率与VOC的腔内耦合系数 r 、多模抽运驱动电流关系曲线
 Fig.3 (a) Optical power of the main cavity under different MM and SM LD pump powers;
 (b) laser BW and power versus r of the VOC and driving current of the MM LD

通过自外差探测法测试了激光器的频谱特性,采用长度为50 km的光纤作为自外差干涉光路的延迟线。图4(a)和(b)分别对比了实现注入锁定前后的激光频谱细节与全频谱范围测试结果。当 r 为10%时,激光器运行于单频振荡模式,中心频率的频谱线宽为7.1 kHz左右,整个频谱范围内没有出现频率噪声抖动现象,激光器输出功率稳定;当仅增加 r 至20%时,激光器频谱SNR下降,具有多个频率谐振峰,中心频率的频谱宽度展宽为MHz,整个频谱范围出现明显的频率噪声,激光器输出功率不稳定。实验过程中,通过调节 r 或者抽运功率、种子激光功率,来改变腔内增益,可以让激光器由失锁状态变成单频锁定状态。

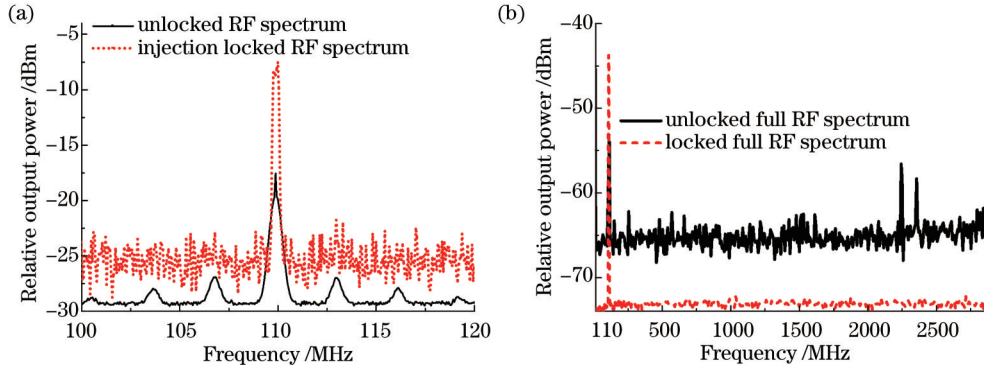


图4 激光频谱自外差测试结果。(a) 频谱细节对比:单频振荡(锁定态: $r=10\%$,线宽为7.1 kHz,虚线),多频振荡(失锁态: $r=20\%$,线宽为436.4 kHz,实线);(b) 全频谱对比

Fig.4 Self-heterodyne-detection of laser's frequency spectra.

(a) Details of the injection-locked single-frequency laser ($r=10\%$, 7.1 kHz linewidth, dashed) and the un-locked multi-frequency lasing ($r=20\%$, 436.4 kHz linewidth, solid); (b) full spectra of the single-frequency laser

上述激光器达到单频锁定条件主要通过通过对有源环腔内进行增益控制,抑制多纵模振荡效应来实现,其具体过程可利用激光器的多模振荡半经典理论解释^[9]。在实现锁定之前,激光器工作于多模振荡模式。考虑稳态解条件,种子激光光强与主环腔内第 n 个激光振荡模式光强之间具有如下关系^[10]:

$$I_{inj} = \left[\alpha_1 - \beta_1 I_1 - \sum_{n=2}^N \theta_{1n} I_n^2 + (v_1 - v_i)^2 \right] I_1 / \Delta v^2 \kappa, \quad (1)$$

式中 I_n 为注入种子激光之前双环腔内第 n 个振荡模式的光强, I_1 为双环腔内具有最高增益的激光振荡模式的光强(即波长与种子激光器波长最接近的模式); v_i 为种子激光器的谐振频率, Δv 为种子激光与被注入的双环腔激光器之间谐振频率的差值,即频率失谐量; κ 为 2×2 耦合器的耦合系数(此处为0.5), α_1 , β_1 以及 θ_{1n} 为激光器增益介质相关的谱系数^[9]。为简化计算过程,仅考虑未锁定时,有源双环腔内有两个激光模式同时振荡(即 $N=2$)的情况。通过改变 r 来调节激光器谐振腔内增益并控制各个模式的振荡特性,从而改变上式

中的谱系数进行仿真计算多模振荡抑制过程。

图5(a)为基于(1)式的仿真计算结果。 r 取不同值时,光注入强度 R (定义为:注入的种子激光器光强与无源双环腔内激光强度的比值)与不同激光振荡模式光强之间的关系曲线。当 R 较小时(小于-25 dB),小 r 更容易获得单频锁定状态。值得注意的是,通常情况下,对于一般的基于注入锁定技术选模的激光器而言, R 需要尽可能大,以通过各个模式之间的交叉饱和和效应降低其他纵模的增益,避免出现多纵模振荡效应。然而,实验结果证明,本文提出的有源双环腔激光器在 $R=-29$ dB的条件下,实现了单频锁定运行,并且 R 越大(注入种子激光器光功率越高),越容易实现与种子激光器中心波长一致的锁定态激光振荡输出。图5(b)为实际实验获得的两种激光振荡光谱测试结果,注入锁定态($r=10\%$)的单纵模窄带激光光谱和失锁态($r=90\%$)存在两个模式竞争(跳模)效应的激光光谱。调节 r 使得激光器获得不同的腔内增益系数,产生了不同的激光振荡模式数目,与仿真计算结果一致。

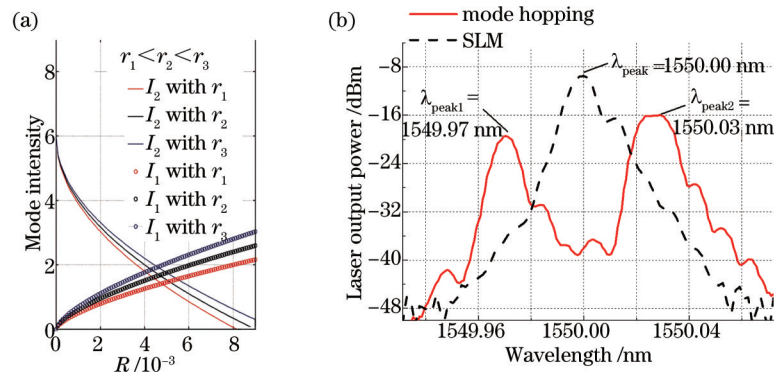


图5 仿真与实验结果对比。(a)不同 r 时,仿真得到的有源双环腔内各激光模式光强与注入强度 R 的关系曲线;

(b)实验测得单纵模激光(虚线, $r=10\%$)和存在跳模的激光光谱(实线, $r=90\%$)

Fig.5 Comparison of simulated and experimental results. (a) Mode intensity of the active double ring laser versus injection intensity R under different r ; (b) optical spectra of the single-longitudinal-mode lasing with single peak wavelength (dash, $r=10\%$) and mode-hopping lasing (solid, $r=90\%$) with two peak wavelengths

图6为实验获得的激光输出稳定性测试结果,在室温条件下每20 min记录一次光谱。当注入种子激光功率为5 mW,中心波长为1550 nm时,采用最大抽运光功率时(单模LD最大功率为300 mW,单个多模LD功率最大为2 W),获得的激光器最大输出功率达36 dBm。在整个测试过程中,激光器中心波长位于1550 nm,信噪比为40 dB,两小时测试时间内光谱中心波长漂移小于0.01 nm,且平均波长变化量小于OSA的带宽分辨率极限(0.01 nm),功率的抖动小于0.1%。

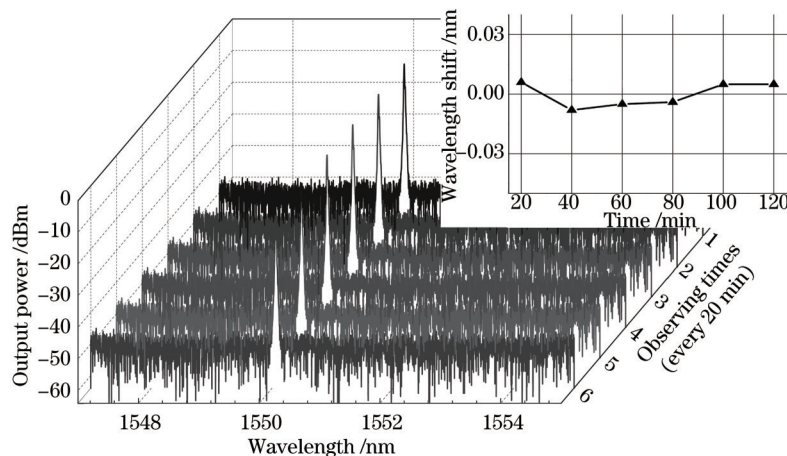


图6 单纵模、无跳模激光光谱

Fig.6 Optical spectra of single-longitudinal-mode, mode-hopping-free laser.

图7为采用不同种子光中心波长条件下,实验获得的具有不同峰值波长的单纵模激光光谱测试结果。从图中可以看出,所获得的激光光谱中心波长在注入锁定状态下,由种子激光的中心波长决定,即通过有源双环腔内增益控制技术使激光器的谐振频率最终被锁定于种子激光器的振荡频率上,可通过控制种子激光

器的波长实现有源双环腔激光器的波长调谐。

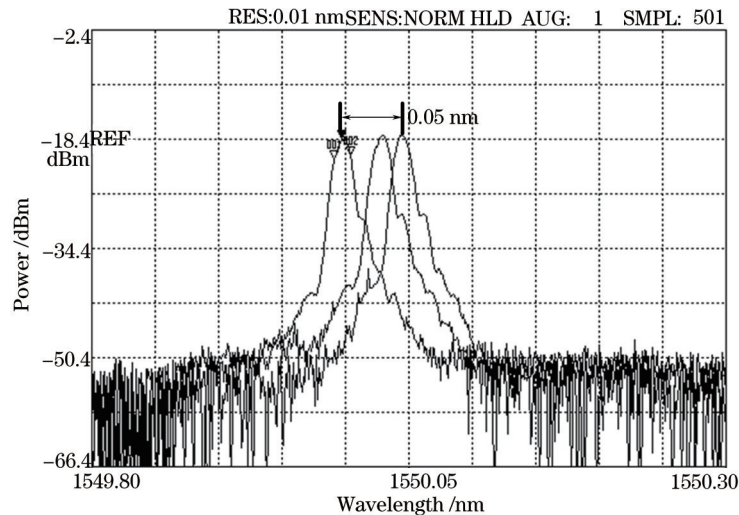


图7 注入锁定条件下调节种子激光中心波长获得具有3种不同峰值波长的激光光谱

Fig.7 Injection-locked laser spectra peaked of three different wavelengths under various seeding wavelengths

4 结 论

基于注入式有源双环腔结构,通过主环腔内增益控制以及子环腔光注入方法,在低注入强度下达到锁定条件,获得了单频、线宽为7.1 kHz的窄线宽激光输出。激光器最大输出光功率为36 dBm,信噪比为40 dB,激光振荡频率可通过改变种子激光器中心波长进行调谐。数小时测试结果表明,在注入锁定态下,激光器输出为稳定、无跳模的单纵模激光,波长漂移和功率抖动分别小于0.01 nm和0.1%。该全光纤结构的光纤激光器将为相干光通信以及分布式光纤传感系统提供一种有效的光源。

参 考 文 献

- 1 Yang Fei, Chen Dijun, Pan Zhengqing, *et al.*. Shorter linear cavity single-frequency fiber laser with active frequency stabilization by fiber Bragg grating[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(9): 0902005.
杨 飞, 陈迪俊, 潘政清, 等. 光纤光栅主动稳频的短直线腔单频光纤激光器[J]. 中国激光, 2012, 39(9): 0902005.
- 2 Xue M L. A novel dual-wavelength DFB fiber laser based on symmetrical FBG structure[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2007, 19(9): 632-634.
- 3 Meng Li, Pan Zhengqing, Geng Jianxin, *et al.*. A short-cavity phosphate glass fiber laser and its output characteristic[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(2): 362-366.
孟 莉, 潘政清, 耿建新, 等. 短腔磷酸盐玻璃光纤激光器及输出特性[J]. 中国激光, 2010, 37(2): 362-366.
- 4 Jiao Mingxing, Xing Junhong, Tong Congwei, *et al.*. Design and experimental study of two-wavelength single-longitudinal-mode erbium-doped fiber ring laser[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(6): 0602013.
焦明星, 邢俊红, 同聪维, 等. 双波长单纵模掺铒光纤环形激光器设计及实验研究[J]. 中国激光, 2013, 40(6): 0602013.
- 5 X P Cheng, P Shum, M Tang, *et al.*. Single-longitudinal-mode erbium-doped fiber ring laser based on high finesse fiber Bragg grating Fabry-Perot etalon[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2008, 20(12): 976-978.
- 6 Yang X X, Zhan L, Shen Q S, *et al.*. High-power single-longitudinal-mode fiber laser with a ring Fabry-Perot resonator and a saturable absorber[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2008, 20(11): 879-881.
- 7 Sprenger B, Schwefel H G L, Wang L J. Whispering-gallery-mode-resonator-stabilized narrow-linewidth fiber loop laser[J]. Opt Lett, 2009, 34(21): 3370-3373.
- 8 Wan H, Jiang W, Gong Y, *et al.*. Single-longitudinal-mode fiber ring laser stabilized by tandem all-fiber Fabry-Pérot micro-cavities[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2012, 24(5): 404-406.
- 9 Yeh C H, Huang T T, Chien H C, *et al.*. Tunable S-band erbium-doped triple-ring laser with single-longitudinal-mode operation[J]. Opt Express, 2007, 15(2): 382-386.
- 10 Chow W W. Theory of line narrowing and frequency selection in an injection locked laser[J]. IEEE J Quantum Electron, 1983, 19(2): 243-249.