

双波长单纵模掺铒光纤环形激光器 设计及实验研究

焦明星 邢俊红 同聪维 刘 芸

(西安理工大学机械与精密仪器工程学院精密仪器系, 陕西 西安 710048)

摘要 为了实现 1550 nm 正交线偏振双频激光输出,设计了一种复合环形腔双波长单纵模掺铒光纤(EDF)激光器,以保偏光纤 Bragg 光栅作为波长选择元件,并采用未抽运掺铒光纤饱和吸收体作为激光单纵模选择元件,从而实现正交线偏振 1550 nm 双波长单纵模激光稳定振荡输出。简要介绍了复合环形腔选模及未抽运掺铒光纤饱和吸收体选模的基本原理,理论分析了未抽运掺铒光纤长度对单纵模选择的影响,实验研究了不同选模情况下双波长激光的振荡特性。实验结果表明:腔内含有保偏光纤 Bragg 光栅和未抽运掺铒光纤饱和吸收体的复合环形腔。掺铒光纤激光器能够稳定输出 1550 nm 正交线偏振双波长单纵模激光,其波长间隔约为 0.344 nm。这种双波长单纵模光纤激光器可广泛应用于激光传感与测量以及密集波分复用(DWDM)光纤通信等领域。

关键词 激光器;双波长单纵模掺铒光纤激光器;保偏光纤 Bragg 光栅;未抽运掺铒光纤饱和吸收体;复合环形腔
中图分类号 TN248 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0602013

Design and Experimental Study of Two-Wavelength Single-Longitudinal-Mode Erbium-Doped Fiber Ring Laser

Jiao Mingxing Xing Junhong Tong Congwei Liu Yun

(Department of Precision Instruments, School of Mechanical and Instrumental Engineering,
Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

Abstract In order to produce the orthogonally and linearly polarized dual-frequency laser output at 1550 nm, a two-wavelength single-longitudinal-mode erbium-doped fiber (EDF) laser with a structure of compound ring cavity is designed, which employs a polarization-maintaining fiber Bragg grating as the wavelength selector, and uses a saturable absorber of an unpumped EDF as laser single-longitudinal-mode selector. The basic principles of single longitudinal-mode selection of both compound ring cavity and unpumped EDF saturable absorber have been briefly introduced, the effect of the unpumped EDF length on the single-longitudinal-mode selection is theoretically analyzed, and the two-wavelength laser oscillating characteristics are investigated experimentally on different longitudinal-mode selection occasions. The experimental results show that the EDF laser with a compound ring cavity in which both a polarization-maintaining fiber Bragg grating and an unpumped EDF saturable absorber are included can steadily output orthogonally and linearly polarized two-wavelength single-longitudinal-mode laser at 1550 nm, and the wavelength spacing is approximately 0.344 nm. Such a two-wavelength single-longitudinal-mode fiber laser will find wide applications in the fields of laser sensing and measuring system, dense wavelength division multiplexing (DWDM) optical fiber communications, and so on.

Key words lasers; two-wavelength single-longitudinal-mode erbium-doped fiber laser; polarization-maintaining fiber Bragg grating; unpumped erbium-doped fiber saturable absorber; compound ring cavity

OCIS codes 140.3460; 140.3500; 140.3510; 140.3560; 140.3570

收稿日期: 2012-12-01; 收到修改稿日期: 2013-01-20

基金项目: 国家自然科学基金(51175421)、陕西省科技计划(2011K09-14)、陕西省教育厅产业化培育项目(2010JC12)和陕西省教育厅科学研究计划(2010JK726、2010JK696)资助课题。

作者简介: 焦明星(1962—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事激光技术及器件、激光传感与测量技术等方面的研究。

E-mail: jiaomx@xaut.edu.cn

1 引 言

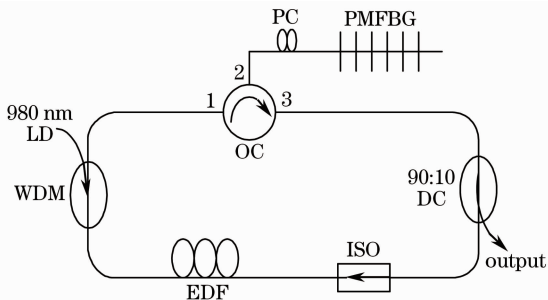
随着光纤通信的发展,双波长单纵模光纤激光器广泛应用于密集波分复用(DWDM)光纤通信系统、光纤传感测量等领域^[1~4]。单色性好的双波长光纤激光光源可增大波分复用系统的容量,提高光纤传感测量的精度,因此双波长单纵模光纤激光器具有重要的研究价值和广阔的应用前景。

掺铒光纤(EDF)是均匀加宽的增益介质,采用环形腔结构可以消除增益介质的空间烧孔效应,有利于单纵模振荡。但是,由于环形腔腔长较长,纵模间隔较小,纵模分布密集,使得相邻模式之间的增益差别很小,模式竞争激烈,往往会出现多模振荡。近年来,人们采用多种选模技术以实现光纤激光器的单纵模振荡输出,常用的选模技术有光纤光栅法布里-珀罗(F-P)标准具选模^[5]、相移光栅与普通光栅共同选模^[6]、饱和吸收体(SA)选模^[1,2,7]以及复合环形腔选模^[8,9]等。本文设计了一种包含保偏光纤 Bragg 光栅(PMFBG)和未抽运掺铒光纤饱和吸收体的复合环形腔双波长单纵模掺铒光纤激光器,简要介绍了该激光器的设计原理和系统组成,实验研究了双波长激光的振荡特性,并对实验结果进行了分析。

2 设计原理与系统组成

2.1 双波长掺铒光纤激光器工作原理

环形腔双波长掺铒光纤激光器系统如图 1 所示。980 nm 的抽运光通过波分复用器(WDM)耦合进 EDF 中,光隔离器(ISO)保证激光器中激光单向运转,光环行器(OC)的 2 端连接偏振控制器(PC)



LD: laser diode
 WDM: wavelength division multiplexer
 OC: optical circulator
 PC: polarization controller
 PMFBG: polarization-maintaining fiber Bragg grating
 DC: directional coupler
 ISO: isolator
 EDF: erbium-doped fiber

图 1 环形腔双波长掺铒光纤激光器系统图
 Fig. 1 Schematic diagram of two-wavelength erbium-doped fiber ring laser system

和双波长选择元件 PMFBG,当激光腔内增益大于损耗时,10%的激光通过定向耦合器(DC)输出,90%的激光反馈回腔内继续振荡。由于 PMFBG 具有偏振态相互正交的两个反射波长,将其接入环形腔光纤激光器中可实现正交线偏振双波长激光振荡。在激光腔内接入 PMFBG 波长选择元件,增强了激光器的偏振非均匀性,利用偏振烧孔效应,并调节 PC 以改变激光腔内的偏振状态,可实现稳定的双波长或单波长振荡^[10]。

2.2 选模原理

2.2.1 饱和吸收体选模原理

利用未抽运的 EDF 作为 SA,在没有抽运光的情况下,Er³⁺对信号光有吸收作用。选模结构如图 2 所示,两束频率相同的光波在 SA 中相对传播时,会在 SA 中形成驻波干涉,驻波的光强在 SA 轴向周期变化,光强较大处引起吸收饱和,相应的吸收系数下降,所以光强和掺杂光纤的吸收系数成反比,导致吸收系数在 SA 中呈现周期性变化。根据 Kramers-Kroning 关系,折射率与吸收系数成反比,当吸收系数周期性变化时,折射率也呈周期性调制,相当于在 SA 中写入了窄带 Bragg 光栅^[1,7,11],当这种自写入光栅的带宽小于激光器纵模间隔时,只有一个纵模能够振荡,其余纵模由于损耗太大而被抑制掉,从而实现单纵模振荡。自写入光栅的形成过程使其可自追踪反射元件的反射波长,这有利于可调谐光纤激光器的选模。

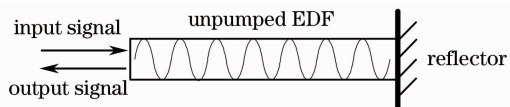


图 2 未抽运掺铒光纤饱和吸收体选模结构简图
 Fig. 2 Schematic of longitudinal-mode selection using unpumped EDF as saturable absorber

自写入 Bragg 光栅的反射带宽 Δf 可表示为^[2,7]

$$\Delta f = \frac{c}{\lambda} \kappa \sqrt{\left(\frac{\Delta n}{2n_{\text{eff}}}\right)^2 + \left(\frac{1}{N}\right)^2}, \quad (1)$$

$$\kappa = \frac{2\Delta n}{n_{\text{eff}}\lambda}, \quad (2)$$

$$N = L_g/\Lambda, \quad (3)$$

$$\lambda = 2n_{\text{eff}}\Lambda, \quad (4)$$

式中 κ 、 Λ 、 N 分别为自写入光栅的耦合系数、周期及周期个数, L_g 为自写入光栅的长度(即 SA 的长度), n_{eff} 为 SA 的有效折射率($n_{\text{eff}} = 1.48$), Δn 为 SA 的诱导折射率变化量($\Delta n < 1.5 \times 10^{-7}$), λ 为自写入光栅

的中心波长。

环形腔光纤激光器纵模间隔为

$$\Delta\nu = \frac{c}{nl}, \quad (5)$$

式中 nl 为环形光纤激光器的光学腔长。取光纤激光器主环形腔(即不含 SA)的腔长为 22 m。为了确定 SA 的长度,仿真研究了自写入光栅的带宽和激光器纵模间隔随 SA 长度的变化规律,如图 3 所示。可以看出,当 SA 长度大于 2 m 时, $\Delta f < \Delta\nu$, 即可满足单纵模选择条件。

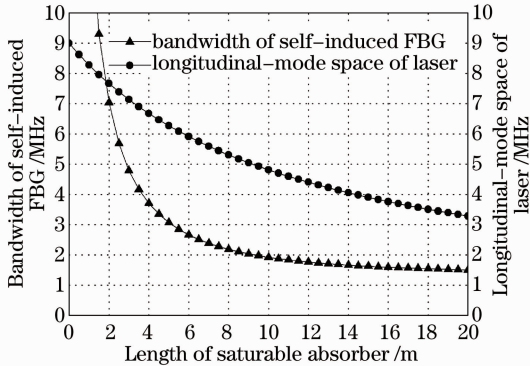


图 3 自写入光栅带宽和激光器纵模间隔与 SA 长度的关系

Fig. 3 Dependence of bandwidth of self-induced FBG and laser longitudinal-mode space on the length of SA

2.2.2 复合环形腔选模原理

在主环形腔上耦合几个次级环形腔,每个环形腔的长度不同,那么只有同时满足每个环形腔振荡条件的光波模式才能在复合腔中振荡输出。由于每个环形腔对应的纵模间隔不同,复合腔的纵模间隔是每个环形腔相应纵模间隔的最小公倍数,于是复合腔将有较大的纵模间隔,从而可以有效抑制模式竞争。

2.3 双波长单纵模掺铒光纤激光器系统组成

双波长单纵模掺铒光纤激光器系统如图 4 所示。EDF 的长度为 10 m,掺杂浓度为 $5.4 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$;在主环形腔中接入长度为 4 m 的未抽运 EDF 作为 SA,主环形腔长度从原来的 22 m 增加到约 30 m,未抽运 EDF 在 1530 nm 波长处的吸收系数为 6~7.5 dB/m,由 2×2 定向耦合器构成的次级环形腔长度约为 2 m,耦合比为 50:50;980 nm 的抽运光经 WDM 耦合进入 EDF,形成粒子数反转分布并产生自发辐射光,辐射光被 ISO 阻挡再次进入 EDF,一方面增强 EDF 的利用效率,另一方面 EDF 再次吸收抽运光,使进入未抽运 EDF 的辐射光中无抽运光。然后辐射光经光环行器 OC 和偏振控制器 PC 进入未抽运 EDF 和 PMFBG 中,PMFBG 的两个正

交线偏振反射波长与进入未抽运 EDF 的相同频率光干涉形成两个独立的窄带光栅^[2],它们分别对 PMFBG 的两个波长中的激光纵模进行选择。窄带光栅的反射光经过光环行器,一部分进入次级环形腔,另一部分在主环形腔中振荡,当增益大于损耗时,满足复合环形腔振荡条件的激光中 10% 经定向耦合器输出,其余 90% 的激光提供反馈继续在腔内振荡,这样即可获得 1550 nm 正交线偏振双波长单纵模激光同时振荡输出。

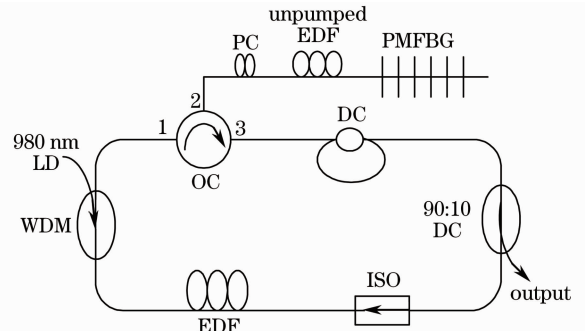


图 4 环形腔双波长单纵模掺铒光纤激光器系统图
Fig. 4 Schematic diagram of two-wavelength single-longitudinal-mode erbium-doped fiber ring laser system

3 激光振荡特性实验研究

3.1 双波长激光振荡及其开关特性

在未加入 SA 选模元件的情况下,当 980 nm 抽运光功率为 140.70 mW 时,调节 PC 使激光器以双波长稳定振荡,采用 AQ6317C 型光谱分析仪(波长分辨率为 0.015 nm)测量激光器的振荡光谱,如图 5(a)所示,可以看出激光器的两个振荡波长分别为 1549.620 nm 和 1549.972 nm,3 dB 带宽均为 0.02 nm,波长间隔为 0.352 nm。连续 16 次重复扫描测量得到的双波长激光振荡光谱如图 5(b)所示,可以看出,在扫描过程中双波长光谱运转稳定,功率稳定性好。采用格兰-泰勒棱镜检查输出激光的偏振态,发现双波长激光是正交线偏振激光。

调节 PC 以改变腔内双折射状态,可使激光器在双波长之间进行切换,即工作在任一单波长振荡状态,如图 6 所示,两个单波长分别为 1549.600 nm(短波长)和 1549.968 nm(长波长)。在单波长运转状态下,采用自由光谱范围为 3.75 GHz 的 1550 nm 共焦 F-P 扫描干涉仪测量单波长激光的振荡模谱,如图 7 所示,可以看出,当腔内无选模元件时,无论短波长激光还是长波长激光均以多纵模振荡。

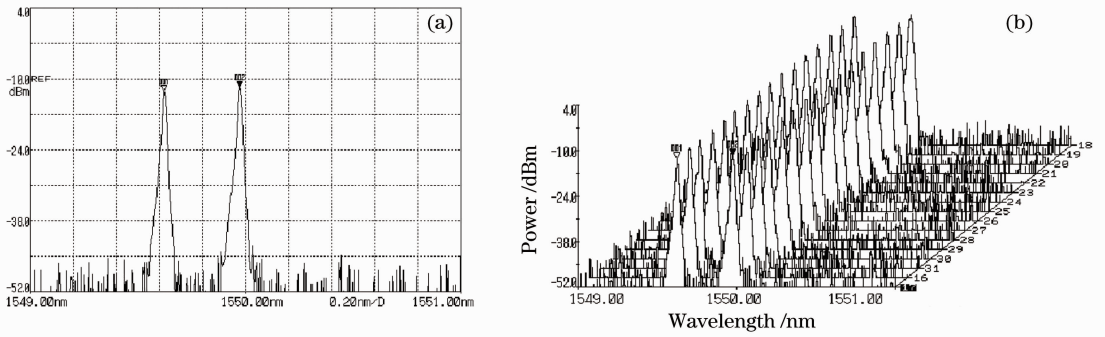


图 5 双波长激光振荡光谱。(a) 单次扫描; (b) 16 次重复扫描

Fig. 5 Oscillating spectra of two-wavelength laser with (a) single scan and (b) sixteen repeat scans

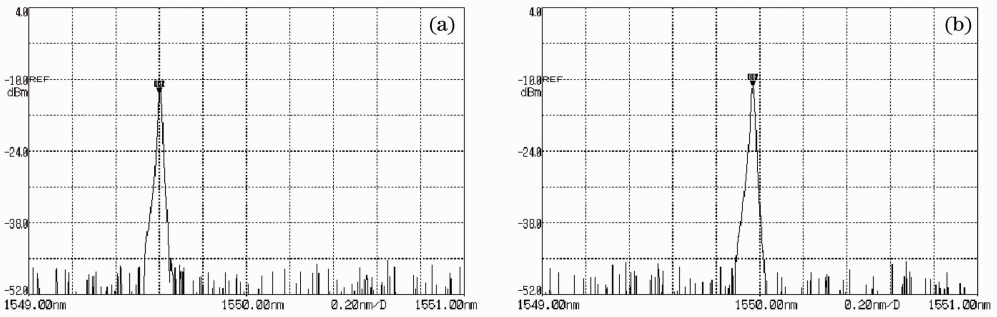


图 6 单波长激光振荡光谱。(a) 短波长; (b) 长波长

Fig. 6 Oscillating spectra of single-wavelength laser with (a) short wavelength and (b) long wavelength

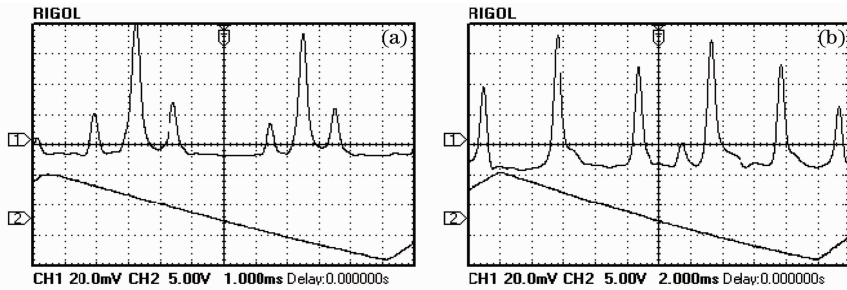


图 7 无选模元件时单波长激光振荡模谱。(a) 短波长; (b) 长波长

Fig. 7 Oscillating mode spectra of single-wavelength laser without mode selector. (a) Short wavelength; (b) long wavelength

3.2 单纵模选择特性

在主环形腔内只接入由 2×2 光纤定向耦合器形成的子环形腔, 从而构成复合腔实现纵模选择, 复合环形腔增大了激光器的纵模间隔, 减少了腔内振

荡模式的数量, 从而抑制模式竞争。通过调节偏振控制器使双波长激光器先后以两个不同的单波长振荡输出, 并用共焦 F-P 扫描干涉仪测得相应的振荡模谱如图 8 所示, 可以看出单波长激光的振荡纵模

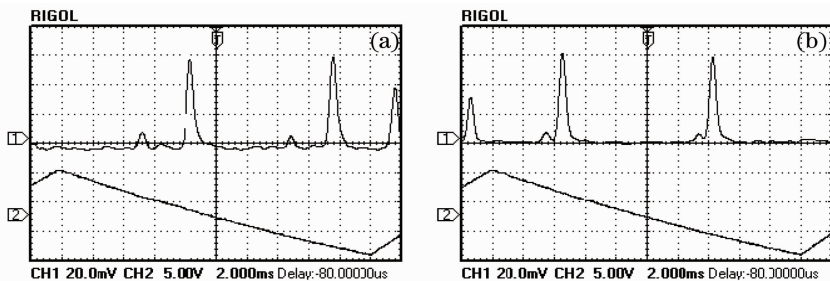


图 8 复合腔单波长激光振荡模谱。(a) 短波长; (b) 长波长

Fig. 8 Oscillating mode spectra of compound cavity single-wavelength laser. (a) Short wavelength; (b) long wavelength

个数明显减少,且以单模振荡为主,偶尔会出现多纵模振荡的情况。

当在主环形腔内只接入未抽运掺铒光纤饱和吸收体选模元件时,测得两个单波长激光的振荡模谱如图 9 所示,可以看出饱和吸收体具有明显的选模

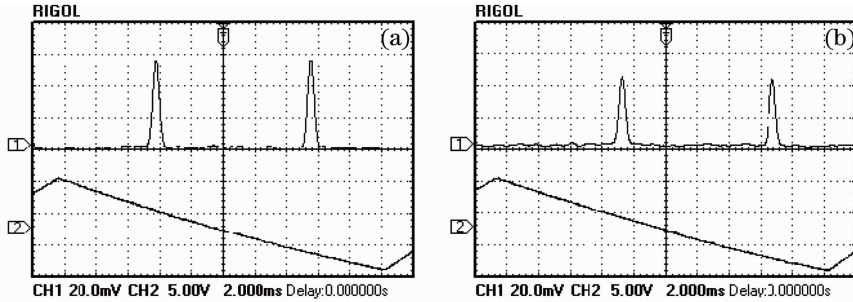


图 9 只有饱和吸收体时单波长激光振荡模谱。(a)短波长;(b)长波长

Fig. 9 Oscillating mode spectra of single-wavelength laser only with saturable absorber. (a) Short wavelength; (b) long wavelength

当在主环形腔内同时接入子环形腔与未抽运掺铒光纤饱和吸收体选模元件时,实验测得两个单波长激光的振荡模谱如图 10 所示,可以看出无论是短

效果,单波长激光器以单纵模振荡输出,但偶尔会出现跳模现象。这主要是因为 SA 的加入加长了谐振腔的长度,减小了纵模间隔,增强了模式竞争,加上 SA 的自追踪作用,在模式竞争的同时,自写入光栅的中心波长发生变化,从而产生跳模现象。

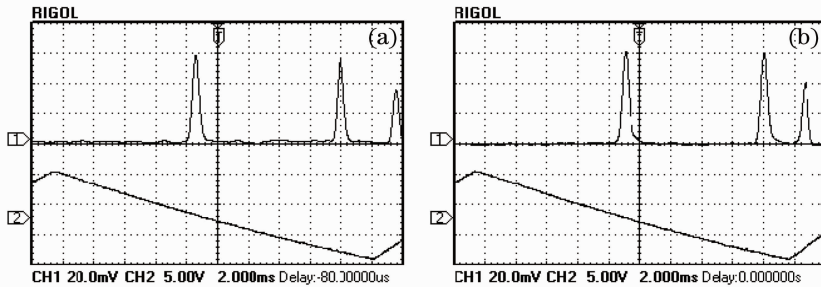


图 10 含饱和吸收体的复合腔单波长激光振荡模谱。(a)短波长;(b)长波长

Fig. 10 Oscillating mode spectra of compound ring cavity laser with saturable absorber. (a) Short wavelength; (b) long wavelength

3.3 双波长单纵模同时振荡特性

研究表明,当波长间隔远大于未抽运掺铒光纤饱和吸收体 SA 的截止频率 f_c (小于 1 GHz) 时,双波长激光可在 SA 中形成互不干扰的两列驻

波^[2,12~14],进而可同时对该双波长激光进行纵模选择。因此,在复合环形腔内接入未抽运掺铒光纤饱和吸收体作为纵模选择元件的情况下,通过调节偏振控制器 PC,可使掺铒光纤环形激光器以双波长单纵模同时振荡,从而获得 1550 nm 正交线偏振双频激光输出。用光谱分析仪测得的双波长单纵模激光振荡光谱如图 11 所示,两个中心波长分别为 1549.596 nm 和 1549.940 nm, 3 dB 带宽均为 0.016 nm,其波长差为 0.344 nm。

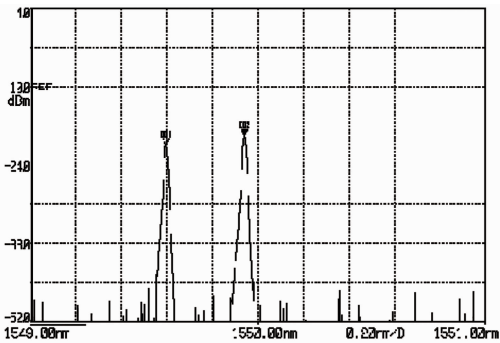


图 11 双波长单纵模掺铒光纤环形激光器振荡光谱

Fig. 11 Oscillating spectrum of two-wavelength single-longitudinal-mode erbium-doped fiber ring laser

4 结 论

采用 PMFBG 作为双波长选择元件,用未抽运掺铒光纤饱和吸收体和复合腔选模,设计了一种 1550 nm 双波长单纵模掺铒光纤环形激光器。实验研究表明,这种腔内含有 PMFBG 和未抽运掺铒光纤饱和吸收体的复合环形腔掺铒光纤激光器能

以双波长单纵模稳定振荡,输出激光是正交线偏振光,其波长差为 0.344 nm,相应的频率差约为 43 GHz。这种 1550 nm 双波长单纵模掺铒光纤环形激光器在激光传感与测量和密集波分复用光纤通信等领域具有广阔的应用前景。

参 考 文 献

- 1 He Xiaoying, Fang Xia, Liao Changrui *et al.*. A tunable and switchable single-longitudinal-mode dual-wavelength fiber laser with a simple linear cavity[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(24): 21773~21781
- 2 Pan Shilong, Yao Jianping. A wavelength-switchable single-longitudinal-mode dual-wavelength erbium-doped fiber laser for switchable microwave generation [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(7): 5414~5419
- 3 Yang Xiufeng, Wei Fangfang, Tong Zhengrong *et al.*. Dual-wavelength fiber laser based on a high finesse fiber ring filter[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(4): 0402010
杨秀峰,魏芳芳,童峥嵘等.基于高精度光纤滤波器的双波长光纤激光器[J].*中国激光*,2011,**38**(4):0402010
- 4 Yang Fei, Chen Dijun, Pan Zhengqing *et al.*. Short 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
- 5 X. P. Cheng, P. Shum, C. H. Tse *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 Chen Xiangfei, Yao Jianping, Zeng Fei *et al.*. Single-longitudinal-mode fiber ring laser employing an equivalent phase-shifted fiber Bragg grating[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(7): 1390~1392
- 7 Kang Zhang, Jin U. Kang. C-band wavelength-swept single-longitudinal-mode erbium-doped fiber ring laser [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(18): 14173~14179
- 8 Zhang Xin, Chen Wei, Liu Yu *et al.*. Single longitudinal mode fiber laser with multiple ring cavities and its frequency stabilization[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(1): 50~54
张欣,陈伟,刘宇等.单纵模多环形腔掺铒光纤激光器及其稳定性[J].*中国激光*,2007,**34**(1):50~54
- 9 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
- 10 Yang Hening. Optimization Design and Experimental Study of Tunable Dual-Wavelength Fiber Laser [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2011. 27~34
杨合宁.可调谐双波长光纤激光器优化设计与实验研究[D].西安:西安理工大学,2011.27~34
- 11 Li Meng. The Study of Tunable Narrowband Filter Based on EDFA [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007. 27~30
李蒙.基于EDFA的可调窄带滤波器的研究[D].武汉:华中科技大学,2007.27~30
- 12 R. Schatz. Dynamics of spatial hole burning effects in DFB lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1995, **31**(11): 1981~1993
- 13 Naoto Kishi, Tomonori Yazaki. Frequency control of a single-frequency fiber laser by cooperatively induced spatial-hole burning [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(2): 182~184
- 14 Jian Liu, Jianping Yao, Jian Yao *et al.*. Single-longitudinal-mode multi wavelength fiber ring laser[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(4): 1020~1022

栏目编辑:宋梅梅