

波长间隔可调谐多波长光纤光学参量振荡器

孙 兵^{1,3} 陈达如^{2,3*} 高士明^{1,3}

(¹浙江大学光及电磁波研究中心, 浙江 杭州 310058; ²浙江师范大学信息光学研究所, 浙江 金华 321004)
³浙江师范大学-浙江大学光学联合研究实验室, 浙江 杭州 310058)

摘要 提出并实现了一种以高非线性色散位移光纤为增益介质,以光栅对形成谐振腔,简单线形结构的连续光抽运的波长间隔可调谐多波长光纤光学参量振荡器(MW-FOPO)。采用波长可调谐的窄线宽激光器作为抽运种子光源,以伪随机相位调制抽运光来抑制高非线性光纤中的受激布里渊(SBS)散射效应,结合高功率掺铒光纤放大器构成光纤光学参量振荡器的大功率抽运,通过四波混频(FWM)效应获得了室温下稳定的多波长激光输出。MW-FOPO的波长间隔可以通过调节抽运波长进行调谐。在 1505~1615 nm 光谱范围内,获得了 17 条消光比大于 10 dB 的多波长谱线。实验证明了 MW-FOPO 实现多波长激光光源的优异特性。

关键词 光纤光学;参量振荡器;四波混频;高非线性光纤;光纤激光器;受激布里渊散射

中图分类号 TN248.1; O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0202006

Multi-Wavelength Fiber Optical Parametric Oscillator with a Tunable Wavelength-Spacing

Sun Bing^{1,3} Chen Daru^{2,3} Gao Shiming^{1,3}

¹Center for Optical and Electromagnetic Research, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310058, China
²Institute of Information Optics, Zhejiang Normal University, Jinhua, Zhejiang 321004, China
³Joint Research Laboratory of Optics of Zhejiang Normal University and Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310058, China

Abstract A wavelength-spacing tunable multi-wavelength fiber optical parametric oscillator (MW-FOPO) with a simple line cavity is proposed. A tunable laser provides the pump seed light. A pseudorandom modulation method is used to broaden the line-width of the pump seed light by employing a phase modulator, which can successfully suppress the stimulated Brillouin scattering (SBS) when the high power pump light is injected into the highly nonlinear optical fiber (HNLF). A high power erbium-doped fiber amplifier is used to achieve a high power pump source. Stable multi-wavelength lasing at room temperature is achieved due to the four wave mixing (FWM) effect and the broadband gain of the fiber optical parametric amplifier. The wavelength spacing of the MW-FOPO can be tuned by adjusting the wavelength of the pump light. Seventeen lasing lines with an extinction ratios larger than 10 dB which cover the wavelength region from 1505 to 1615 nm are achieved. Advantages of fiber optical parametric amplifiers to implement multi-wavelength fiber laser are demonstrated.

Key words fiber optics; parametric oscillator; four wave mixing; highly nonlinear fiber; fiber laser; stimulated Brillouin scattering

OCIS codes 140.0140; 190.4975; 190.4223; 190.4370

1 引 言

近年来,由于在波分复用(WDM)通信、光学元

件测试、光纤传感等方面的广泛应用,多波长光纤激光器得到了人们日益广泛的关注。掺铒光纤放大器

收稿日期: 2010-08-10; 收到修改稿日期: 2010-10-18

基金项目: 国家自然科学基金(60907020,60977066)和浙江省自然科学基金(Y1090379)资助课题。

作者简介: 孙 兵(1987—),男,硕士研究生,主要从事光纤激光器方面的研究。E-mail: sunbing@coer.zju.edu.cn

导师简介: 高士明(1977—),男,副教授,硕士生导师,主要从事非线性光学方面的研究。

E-mail: gaosm@coer.zju.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: daru@coer.zju.edu.cn

(EDFA)、半导体光放大器以及拉曼放大器等增益机制都可用来实现多波长光纤激光器,其中掺铒光纤放大器的应用最为广泛。但是由于强烈的模式竞争,基于掺铒光纤放大器的多波长光纤激光器通常在室温下难以稳定工作。为了获得稳定的多波长输出,可以采用冷却掺铒光纤、频移反馈、结合四波混频(FWM)效应或者频振烧孔等非线性效应方法^[1]。但是这些方法不可避免地加大了多波长激光器的复杂度。作为另外一种增益机制,光纤光学参量放大器由于具有高增益^[2,3]、大增益带宽、任意增益范围等优点得到人们日益广泛的关注。M. Ho等^[4]结合光参量放大和拉曼放大实现了宽达200 nm增益带宽的光纤光学参量放大器;T. Torounidis等^[2]通过对信号光进行相位调制实现了超过70 dB增益的放大。基于光纤光学参量放大器(FOPO)的光纤光学参量振荡器具有大范围调谐性、多波长稳定输出等特性,是理想的可调谐多波长光纤激光光源之一。目前在国际上已经出现了一些光纤光学参量振荡器的报道^[5~8],但是大部分都是实现可调谐单波长激光输出。据作者所知,目前只有厦门大学和新加坡南洋理工大学报道过多波长光纤光学参量振荡器^[9],其结构非常复杂,不具备调谐性。

本文设计了一种具有简单线性结构的多波长光纤光学参量振荡器(MW-FOPO)。利用FWM效应以及光参量放大器本身的放大特性,实现了室温下稳定的多波长激光输出。通过调节抽运激光的波长,可以对输出的多波长激光进行间隔调节。实验证明了光纤光学参量放大器在实现多波长激光器方面的优异特性。

2 实验装置与工作原理

波长间隔可调谐 MW-FOPO 的结构如图 1 所

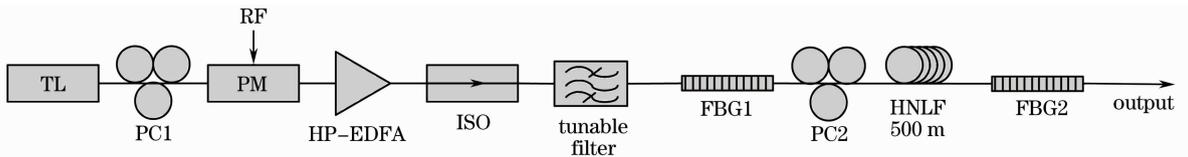


图 1 波长间隔可调 WM-FOPO 结构图

Fig. 1 Schematic diagram of the wavelength-spacing tunable MW-FOPO

如图 1 所示,一对反射波长相同的布拉格光栅形成的线性谐振腔只能让与一个布拉格反射波长相同的激光起振。但是,在高非线性色散位移光纤中,高功率的抽运激光与新产生的激光之间会发生多阶 FWM 效应^[10],由两个波长的高功率激光多次混频产生多个波长的激光,从而形成多波长的激光输出。

示。它主要包括抽运源和谐振腔两个部分。采用一个波长可在 1520~1630 nm 范围内调谐的窄线宽激光器(TL, Agilent, 81940A)产生抽运源的种子光。以包含 3.5 GHz, $2^{31}-1$ 的伪随机码信号的射频(RF)信号对种子光进行相位调制(PM),让种子光谱宽超过受激布里渊散射的增益带宽,从而极大地抑制高功率抽运光注入高非线性光纤出现的布里渊效应。由于相位调制器的偏振敏感特性,采用一个偏振控制器(PC1)对输入的种子光进行偏振控制。采用最大输出功率为 2 W 的高功率掺铒光纤放大器(HP-EDFA)来放大种子光,从而获得光纤光学参量振荡器所需要的大功率抽运激光。抽运光经过光隔离器(ISO),并通过可调谐滤波器(tunable filter, Santec, 0TF30M-08S1)滤除放大产生的自发荧光谱(ASE)噪声后,直接注入到线性激光谐振腔中。值得注意的是,由于光隔离器引入的损耗,能获得的最大抽运功率大约 1.5 W。线性激光谐振腔由一对反射波长相同的布拉格光纤光栅(FBG)、一个偏振控制器(PC2)和一段 500 m 长的高非线性色散位移光纤(HNLF)组成。高非线性色散位移光纤的零色散波长(ZDW)、损耗因子、色散斜率、非线性系数分别为: 1553.35 nm, 0.92 dB/km, 0.016 ps/(nm²·km), 10.7/(W·km)。谐振腔中的两个布拉格光纤光栅(FBG1 和 FBG2)的反射率都达到 94% 以上,并且有着相同的中心波长和线宽,分别为 1551.0 nm 和 0.19 nm。其中反射率稍低的 FBG2,作为 MW-FOPO 的输出端。由于光参量放大器的偏振敏感特性,使用一个偏振控制器(PC2)来调节偏振态,以获得最大的多波长激光输出。光谱输出采用安捷伦(Agilent)公司的 86142B 光谱仪(OSA)进行测量,分辨率与灵敏度分别为 0.06 nm 和 -65 dBm。

值得注意的是,获得的多波长激光中包含着抽运激光。由于 FWM 效应使得能量从功率高的波长向功率低的波长进行转移,这种增益机制不存在任何的模式竞争,所以很容易就能获得室温稳定的多波长光纤激光器。

3 实验结果与讨论

调节高功率放大器使得注入到高非线性色散位移光纤中的抽运光功率达到 1.524 W 左右,由于光纤光学参量放大的偏振敏感特性,进行简单的偏振控制,得到了室温下稳定的多波长激光输出。图 2 显示了抽运波长为 1558.0 nm 时的多波长光纤光学参量振荡器输出光谱图,此时对应的波长间隔为 7 nm。由于光纤光学参量放大器的大增益带宽、高增益等特性,在 1505~1615 nm 光谱范围内,获得了 17 条消光比大于 10 dB 的多波长谱线。图 3 给出了多波长激光输出功率随抽运功率变化的曲线。如前所述,获得的多波长激光中包含抽运激光,测量之前需通过一个窄带滤波器滤除抽运光。多波长光纤光学参量振荡器的阈值功率大约为 1.27 W,斜率效率为 23.20%。较高的斜率效率主要归功于较高的抽运激光输入后会导致更多的能量向高阶 FWM 产生的新激光转移。如图 3 所示,并没有发生明显的增益饱和,意味着进一步提高抽运功率会获得更高功率的多波长激光输出。

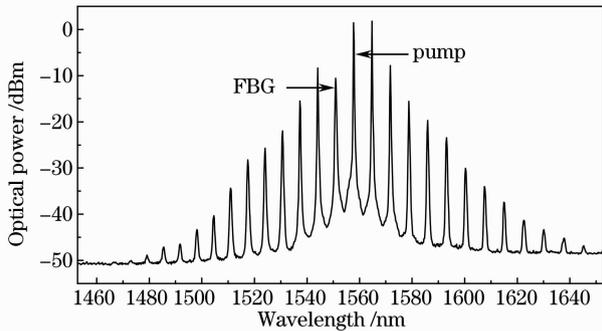


图 2 MW-FOPO 输出光谱图

Fig. 2 Output spectrum of the MW-FOPO

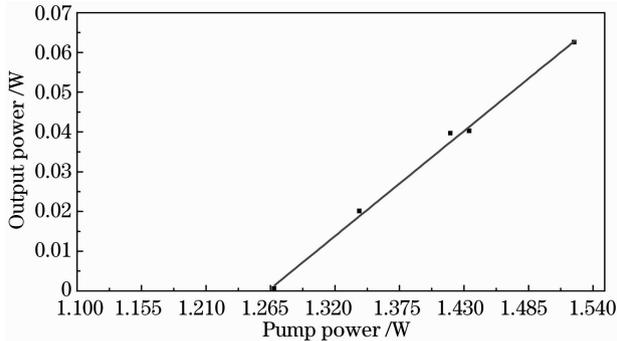


图 3 输出功率与抽运功率的关系

Fig. 3 Output power as a function of pump power

波长间隔可调在多波长激光器的应用中有着重要的作用,近年来也报道了一些采用基于掺铒光纤放大器的波长间隔可调的多波长激光器^[11~13]。通

过对抽运波长进行调节,可以实现抽运波长与光栅中心波长间隔的调节,即多阶 FWM 效应产生的多波长激光的波长间隔的调节,在这里同样证明了报道的 MW-FOPO 的波长间隔可调特性。图 4 显示了在 6 个不同抽运波长下的 MW-FOPO 的输出光谱图,对应的波长间隔分别为:(a)11 nm,(b)7 nm,(c)3 nm,(d)1 nm,(e)5 nm,(f)9 nm。值得注意的是,受制于光纤光学参量放大器的增益带宽,当波长间隔过大时对应较少的波长数,如图 4(a)所示。由于不存在模式竞争的问题,当调节抽运波长,使之接近布拉格光栅的中心波长时,能获得波长间隔更小的多波长激光输出。但是,由于光谱仪分辨率的限制,无法研究该多波长光纤光学参量振荡器的最小波长间隔。

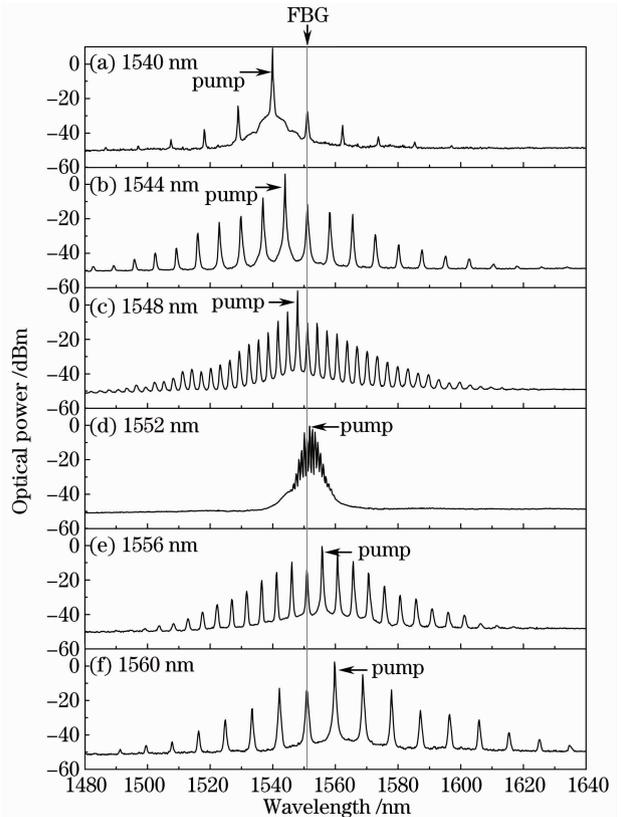


图 4 不同抽运波长下 MW-FOPO 的输出光谱

Fig. 4 Output spectra of the MW-FOPO under different pump wavelengths

除了波长间隔的调谐性,稳定性也是多波长激光器在应用中的一重要指标。图 5 给出了多波长光纤光学参量振荡器在功率为 1.524 W,波长为 1558 nm 的抽运激光作用下,每隔 10 min 扫描一次,共约 2 h 的重复扫描图。归功于光纤光学参量放大的优异特性,没有观察到任何明显的振幅变化。

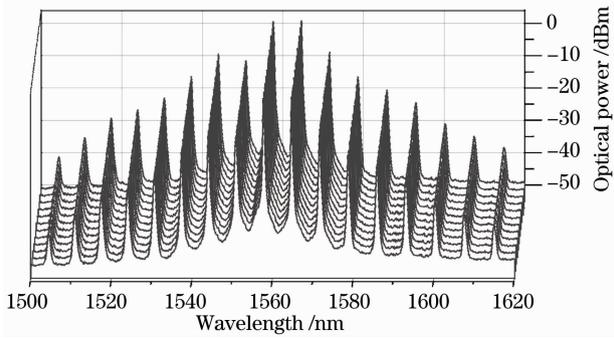


图 5 MW-FOPO 输出光谱的重复扫描

Fig. 5 Output spectra of the MW-FOPO under repeated scanning

4 结 论

设计了一种简单线形结构的连续光抽运的波长间隔可调谐 MW-FOPO。采用波长可调谐的窄线宽激光器作为抽运种子光源,以伪随机相位调制抽运光来抑制高非线性光纤中的受激布里渊散射效应,结合高功率掺铒光纤放大器构成光纤光学参量振荡器的大功率抽运,获得了室温下稳定的多波长激光输出。MW-FOPO 的波长间隔可以通过调节抽运波长进行调谐。由于光纤光学参量放大器的大增益带宽、高增益等特性,在 1505~1615 nm 光谱范围内,获得了 17 条消光比大于 10 dB 的多波长谱线。实验证明了多波长光纤光学参量振荡器实现多波长激光光源的优异特性。

参 考 文 献

1 Liu Yanke, Feng Xinhuan, Dong Xiaoyi. Progress in room-temperature stable multi-wavelength fiber laser technologies[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(7): 883~894

刘艳格, 冯新焕, 董孝义. 室温稳定多波长光纤激光器技术的研究新进展[J]. *中国激光*, 2007, **34**(7): 883~894

2 T. Torounidis, P. A. Andrekson, B. Olsson. Fiber-optical parametric amplifier with 70 dB gain[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(10): 1194~1196

3 K. K.-Y. Wong, K. Shimizu, K. Uesaka *et al.*. Continuous-wave fiber optical parametric amplifier with 60 dB gain using a novel two segment design[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2003, **15**(12): 1707~1709

4 M. Ho, K. Uesaka, Y. Akasaka *et al.*. 200-nm-bandwidth fiber optical amplifier combing parametric and Raman gain[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2001, **19**(7): 977~981

5 J. Lasri, P. Devgan, R. Tang *et al.*. A microstructure-fiber-based 10-GHz synchronized tunable optical parametric oscillator in the 1550-nm regime[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2003, **15**(8): 1058~1060

6 C. J. S. de Matos, J. R. Taylor, K. P. Hansen. Continuous-wave, totally fiber integrated optical parametric oscillator using holey fiber[J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(9): 983~985

7 G. K. L. Wong, S. G. Murdoch, R. Leonhardt *et al.*. High-conversion-efficiency widely-tunable all-fiber optical parametric oscillator[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(6): 2947~2952

8 Y. Q. Xu, S. G. Murdoch, R. Leonhardt *et al.*. Widely tunable photonic crystal fiber Fabry-Perot optical parametric oscillator[J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(12): 1351~1353

9 Z. Luo, W. D. Zhong, Z. Cai *et al.*. Multiwavelength fiber optical parametric oscillator[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2009, **21**(21): 1609~1611

10 D. L. Hart, A. F. Judy, R. Roy *et al.*. Dynamical evolution of multiple four-wave-mixing processes in an optical fiber[J]. *Phys. Rev. E.*, 1998, **57**(4): 4757~4774

11 Y. G. Han, T. V. A. Tran, A. B. Lee. Wavelength-spacing tunable multiwavelength erbium-doped fiber laser based on four-wave mixing of dispersion-shifted fiber[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(6): 697~699

12 D. Chen, H. Ou, H. Fu *et al.*. Wavelength-spacing tunable multi-wavelength erbium-doped fiber laser incorporating a semiconductor optical amplifier[J]. *Laser. Phys. Lett.*, 2007, **4**(4): 287~289

13 D. Chen, S. Qin, S. He. Channel-spacing-tunable multi-wavelength fiber ring laser with hybrid Raman and erbium-doped fiber gains[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(3): 930~935