

四波混频增强多波长布里渊掺铒光纤 激光器的实验研究

焦 磊 宋跃江* 张旭苹

(南京大学光通信工程研究中心, 江苏 南京 210093)

摘要 提出一种利用四波混频增强多波长布里渊掺铒光纤激光器的方法,在激光器中使用色散位移光纤作为布里渊增益介质,通过布里渊多波长之间四波混频效应提供的参变增益展宽激光器的有效增益谱,产生高阶斯托克斯光和反斯托克斯光,增加多波长的数目并改善输出功率。分析了激光器中掺铒光纤放大器功率和布里渊抽运功率对四波混频增强效果的影响,在 980 nm 抽运为 105 mW,外部注入 1559 nm 布里渊抽运为 8 dBm 的条件下,在 1557.56~1560.78 nm 之间得到了稳定的 39 个波长的输出。

关键词 光纤激光器;多波长;四波混频;受激布里渊散射

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0214007

Four-Wave-Mixing Enhanced Multi-Wavelength Brillouin Erbium-Doped Fiber Laser

Jiao Lei Song Yuejiang Zhang Xuping

(Institute of Optical Communication Engineering, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210093, China)

Abstract A four-wave-mixing enhanced multi-wavelength Brillouin erbium-doped fiber laser, in which dispersion-shifted fiber is used as Brillouin gain medium is demonstrated. The gain spectrum of the laser is efficiently broadened by the parametric gain of four-wave-mixing between Stokes lines, then more high-order Stokes and anti-Stokes lines are produced. The influences of the erbium-doped fiber amplifier power and the Brillouin pump power on the four-waves-mixing enhancement effect are also investigated. A stable multi-wavelength output with 39 waves is obtained with a 980 nm pump of 105 mW and a 1559 nm Brillouin pump of 8 dBm.

Key words fiber lasers; multiwavelength; four-wave-mixing; stimulated Brillouin scattering (SBS)

OCIS codes 140.3500; 140.3510; 190.4380; 290.5900

1 引 言

多波长布里渊掺铒光纤激光器(MW-BEFL)是一种基于受激布里渊散射(SBS)的多波长激光器,与其它的多波长激光器^[1~4]相比,它具有波长间隔稳定、线宽窄和结构简单等特点,在光纤传感以及密集波分复用技术等方面有着很广泛的应用前景。近年来,人们对 MW-BEFL 的研究不断深入,使用受

激拉曼散射(SRS)提供增益^[5],自激发布里渊抽运^[6,7],输出波长可调谐^[8~10],NOLM-NALM 腔结构^[11,12],双谐振腔结构^[13,14],线性腔结构^[15]等多种多波长布里渊掺铒光纤激光器都有报导。目前绝大部分 MW-BEFL 都用单模光纤(SMF)作为布里渊增益物质^[4~13],由掺铒光纤放大器(EDFA)提供线性增益,由 SMF 中的 SBS 提供非线性增益,通过

收稿日期: 2010-05-10; 收到修改稿日期: 2010-07-16

基金项目: 国家 973 计划(2010CB327803)和国家自然科学基金(60907022,60644001)资助课题。

作者简介: 焦 磊(1985—),男,硕士研究生,主要从事光纤激光器方面的研究。E-mail: best8990@163.com

导师简介: 张旭苹(1962—),女,教授,博士生导师,主要从事光通信网络的监控与故障定位、光通信系统关键器件和组件以及光纤传感技术与应用等方面的研究。E-mail: xpzhang@nju.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: yjsong@nju.edu.cn

级联效应输出频率间隔固定的多波长激光。多波长的频率间隔等于增益光纤的布里渊频移,多波长的数目主要由激光器的增益谱宽决定。由外部提供布里渊抽运的 MW-BEFL 在两个谐振腔的情况下可以得到最多 24 个波长的输出^[13]。

本文研究了一种采用色散位移光纤(DSF)作为布里渊增益介质的 MW-BEFL,由于 1550 nm 波长附近的光在 DSF 中传输时色散很小,布里渊多波长之间会发生四波混频(FWM)效应,以此展宽激光器的有效增益谱。通过研究 FWM 在 MW-BEFL 中的作用,分析影响 FWM 增强效果的条件,提出有效地利用 FWM 提高多波长布里渊掺铒光纤激光器性能的方法。

2 实验原理和装置

图 1 是 FWM 增强 MW-BEFL 的实验装置图,线宽 100 kHz,最大输出功率 8 dBm,波长可调谐的激光器(TLS)作为布里渊抽运,通过一个 50:50 的耦合器(coupler)连入光路;980 nm 的抽运光通过一个 980 nm/1550 nm 波分复用器(WDM)连入光路,同 8 m 的掺铒光纤(EDF)组成一个 EDFA,为激光器提供线性增益;4.2 km 的 DSF 作为产生 SBS 以及 FWM 的非线性增益介质;1,3 端相连的环形器(OC)2 起反射镜的作用,将进入 2 端的光全部返回;多波长光通过 90:10 的耦合器输出到最小分辨率为 0.06 nm 的光谱分析仪(OSA)进行光谱测量。

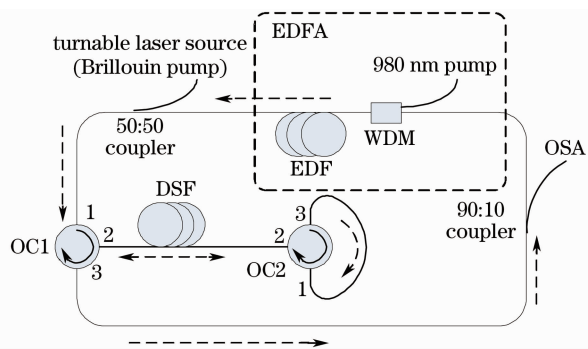


图 1 FWM 增强 MW-BEFL 实验装置

Fig. 1 Experimental setup of four-wave-mixing enhanced multi-wavelength Brillouin erbium doped fiber laser

在激光器工作的过程中,经 OC1 的 1 端进入 DSF 的布里渊抽运光,会在 DSF 中发生 SBS 和 FWM 效应。DSF 中所有向右传播的抽运光经过起反射作用的 OC2 返回 DSF,与 DSF 中所有向左传播的斯托克斯光一起经由 OC1 的 3 端输出,从右端进入由 980 nm 抽运和 8 m 长的 EDF 组成的

EDFA,部分被放大并从其左端输出,然后再次经 OC1 的 1 端进入 DSF,实现激光器的反馈振荡。图 1 中的虚线箭头表明了光传输的方向。抽运光在 DSF 中产生的斯托克斯光被 EDFA 放大后作为新的抽运光产生下一阶斯托克斯光,通过这种级联的 SBS 效应激光器就会产生一系列波长间隔等于布里渊频移(10.78 GHz)的多波长斯托克斯光。同时由于 DSF 在 1550 nm 附近色散很小,较低的抽运功率就可以满足 FWM 所需要的相位匹配条件^[16],所以 SBS 产生的多波长光在 DSF 中还会发生 FWM。而 FWM 产生的参变增益随着作为 FWM 抽运的多波长斯托克斯功率的提高而增大,因此多波长斯托克斯光功率越大,数目越多,参变增益也就越大,增益谱展宽越明显。如果用 SMF(G652b)作为布里渊增益介质,由于它在 1550 nm 附近的色散系数较高,激光器中斯托克斯光的功率不足以使得它们之间发生 FWM^[15,16],此时 MW-BEFL 中就不会有 FWM 增强的效应。

3 实验结果与讨论

在没有外部注入布里渊抽运而只有 980 nm 抽运的情况下,该激光器的自由振荡中心位于 1559 nm 附近。实验选择 1559 nm 作为布里渊抽运波长,不仅保证布里渊多波长能够得到增益形成振荡,而且激光器能得到更多波长的输出。

实验中激光器采用 DSF 作为布里渊增益介质,它的长度为 4.2 km,衰减系数为 0.21 dB/km,1559 nm 附近的色散系数 $D < 0.3$ ps/(km·nm)。根据布里渊的阈值公式^[16]可得单段 4.2 km 光纤的布里渊阈值约为 5 mW(即 7 dBm)。但由于在激光腔中反馈放大的存在,激光器的 SBS 阈值会明显的降低。实验发现 980 nm 抽运功率为 80 mW 时,激光器的布里渊阈值甚至在 -3 dBm 以下。为了使 DSF 中的布里渊多波长能发生 FWM,它们必须满足准相位匹配的条件 $\Delta k < -4\gamma P_0$,其中 Δk 是光纤中的材料色散引起的相位失配, γ 是光纤的非线性系数, P_0 是 FWM 抽运的功率。根据光纤参数可以计算出满足发生 FWM 的多波长光功率 $P_0 > 0.056$ mW。

下面分析一下在 MW-BEFL 中引入 FWM 的效果。固定布里渊抽运的功率为 8 dBm,当 980 nm 抽运的功率为 80 mW 时,使用 DSF 增益光纤产生的 MW-BEFL 输出光谱如图 2(a)所示,而在其它条件不变的前提下,用等长度 SMF 增益光纤替代 DSF,此时多波长激光器的输出光谱如图 2(b)所示。

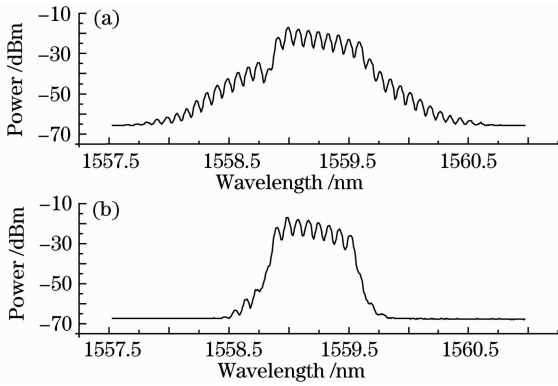


图2 相同980 nm抽运和布里渊抽运功率下分别用DSF(a)和SMF(b)作为布里渊增益光纤的输出光谱

Fig. 2 Output spectra with DSF (a) and SMF (b) as Brillouin gain fiber under the same 980 nm and Brillouin pump power

比较图2(a),(b),发现使用SMF增益光纤的MW-BEFL在增益谱中央有7个斯托克斯光,在前沿有4个功率很弱的反斯托克斯光。而使用DSF增益光纤的MW-BEFL在1557.73~1560.36 nm之间产生了35个多波长,频率间隔为10.78 GHz。不仅在增益谱中央有9个斯托克斯光,而且在前沿和后沿也有14个反斯托克斯光和12个高阶斯托克斯光。这是因为使用SMF增益光纤的MW-BEFL,它的增益只包括SMF提供的SBS增益和EDFA的增益,所以增益谱较窄,只能产生少量的多波长;使用DSF增益光纤的MW-BEFL中,增益谱中央处的多波长光在经过EDFA放大后进入DSF时的功率很容易达到FWM的阈值,由于它们之间发生的FWM效应,FWM增强MW-BEFL的总增益由SBS增益、FWM参变增益和EDFA增益3部分组成。虽然总增益值不变,但参变增益增加了激光器增益谱的有效宽度,从而产生许多高阶斯托克斯光和反斯托克斯光,增加多波长的数目。距离激光器增益谱中央越近,参变增益越大,距离激光器增益谱中央越远,参变增益越小,最终结果是在激光器的前沿和后沿形成功率坡状分布的多波长光。实验发现,FWM增强的作用很明显,当980 nm抽运功率大于16 mW时,由于增益谱中央处布里渊多波长光数目增多,这种现象就已经开始显现。

由于EDFA增益的大小会影响到多波长的功率,进而会影响到激光器的输出,所以研究了980 nm抽运功率对FWM增强作用的影响。图3a和b分别是980 nm抽运功率为80 mW和105 mW时激光器的输出光谱。通过比较可知,当980 nm抽运功率增加时,增益谱前沿和后沿的斯托克斯光不仅数目增多而且

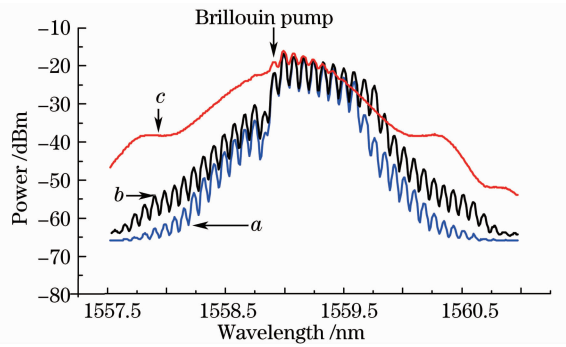


图3 相同布里渊抽运,不同980 nm抽运功率下的输出光谱

Fig. 3 Output spectra with the same Brillouin pump power and different 980 nm pump powers

对应波长的功率也有所提高。这是因为980 nm抽运功率增加会使SBS产生的布里渊多波长的功率提高,它们本身作为FWM抽运,功率提高会使FWM作用变强,从而改善多波长光功率的分布。但当980 nm抽运功率从105 mW继续提高时,较强的FWM反而会抑制多波长的产生,使得激光器输出的信噪比下降,甚至多波长消失。图3c是980 nm抽运功率为220 mW时激光器的输出光谱,光谱中只有3个斯托克斯光,并且有很强的噪声基底。这是因为当980 nm抽运功率很高时,DSF中的FWM效应变得很大,SBS增益相比与其它两种增益较小,增益竞争的结果是SBS效应被抑制,激光器只能通过SBS产生3阶斯托克斯光,而无法产生高阶的斯托克斯光以及反斯托克斯光。同时,较强的FWM增益和EDFA增益会产生较大的噪声,降低了信噪比,并使得增益谱形状改变,表现为增益谱前后沿有小幅度的隆起。总的来说,980 nm抽运功率从0~105 mW增加时,激光器能在保持信噪比基本不变的情况下增加波长数;从105 mW继续提高时,较强的FWM会使信噪比下降,而且波长数反而减少。因此,当布里渊抽运功率恒定时,980 nm抽运的功率需要控制在一定范围内,FWM才能起到增加波长数和改善功率分布的作用。实验发现,固定布里渊抽运为8 dBm,当980 nm抽运功率取105 mW时激光器输出的波长数最多,并且具有较高的信噪比,FWM增强的效果最好,称两个抽运的功率满足匹配关系。此时激光器在1557.56~1560.78 nm之间有39个波长的稳定输出,除布里渊抽运波长外有16个反斯托克斯光和22个斯托克斯光。实验结果表明,每一个布里渊抽运功率都有一个980 nm抽运功率与之相匹配,只要980 nm抽运的功率小于或者等于此匹配值,激光器就会有较高

的信噪比,而当 980 nm 抽运功率大于此匹配值时,激光器的信噪比就会下降。并且当 980 nm 抽运功率等于此匹配值时,激光器不但有较高的信噪比,还能输出最多的波长数,因此实验中往往选取 980 nm 抽运的功率与布里渊抽运的功率满足这种匹配关系,以取得最好的实验效果。固定布里渊抽运功率后,此匹配值可以通过由小到大改变 980 nm 抽运,观察激光器信噪比的变化情况得到。

另外,还研究了布里渊抽运功率对 FWM 增强效果的影响。固定 980 nm 抽运功率,对不同的布里渊抽运功率下的输出光谱进行测量。图 4 是 980 nm 抽运功率为 98 mW,布里渊抽运功率分别为 8,5 和 3 dBm 时激光器的输出光谱。对比发现,随着布里渊抽运功率的下降,增益谱中央的多波长光功率下降,前沿和后沿多波长光的功率基本不变,但是噪声增大,信噪比降低,而且多波长数目也有所下降。当抽运功率小于 3 dBm 时,增益谱前沿和后沿的多波长消失,这是因为布里渊抽运的功率下降会导致 SBS 增益的降低, SBS 增益与其它两个增益相比就显得很小,增益竞争的结果是 SBS 被抑制,从而只能产生较少的波长,并且参变增益的提高会使得噪声基底增大。

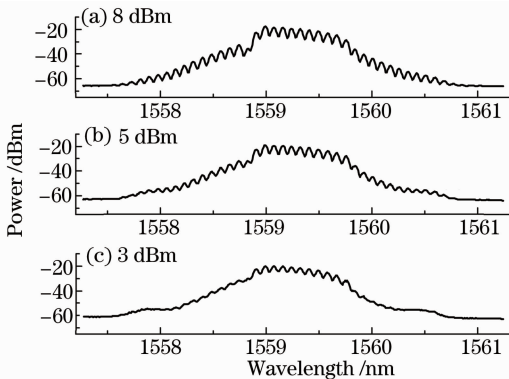


图 4 相同 980 nm 抽运功率,不同布里渊抽运功率下的输出光谱

Fig. 4 Output spectra with the same 980 nm pump power and different Brillouin pump powers

综上所述,MW-BEFL 中 FWM 增强的效果同时受布里渊抽运功率和 980 nm 抽运功率的影响,只有两个抽运功率满足一定的匹配关系才能使 FWM 增强的效果最佳,此时激光器可以输出最多的波长数并且有较高的信噪比。如实验中布里渊抽运功率取 8 dBm 和 980 nm 抽运功率取 105 mW 就是其中满足关系的一组数值,此时可以得到稳定的 39 个波长输出,除布里渊抽运波长外,有 16 个为反斯托克斯光,22 个为斯托克斯光。两个抽运功率在

满足匹配关系的前提下,980 nm 抽运功率越高,增益谱中央处布里渊多波长光的数目越多功率越大,参变增益也就越高,四波混频增强的效果也就越好。受实验条件的限制,只能得到布里渊抽运为 8 dBm,980 nm 抽运为 105 mW 时的实验结果,但如果有满足匹配关系的高功率的布里渊抽运和 EDFA,增益谱可以被展得很宽,FWM 增强 MW-BEFL 不仅仅局限于类似实验中在增益谱的前沿和后沿产生多波长,而会在很宽波长范围内产生数目更多,功率更均衡的多波长光。

4 结 论

本文提出并通过实验研究了一种利用 FWM 增强 MW-BEFL 的方法,该激光器采用 DSF 作为布里渊增益介质,在斯托克斯光之间引入了 FWM 效应,增加 MW-BEFL 的波长数,改善光功率的分布。通过分析认为 FWM 增强的效果受 980 nm 抽运和布里渊抽运功率的制约,若要在保证较高的信噪比的同时得到更多波长数的输出,两个抽运功率需要满足匹配关系。并在 980 nm 抽运功率为 105 mW 和布里渊抽运功率为 8 dBm 时得到了稳定的 39 波长输出。实验结果表明,FWM 增强是一种有效的提高多波长布里渊掺铒光纤激光器性能的方法;在满足匹配条件的基础上,使用高功率的布里渊抽运和 EDFA,激光器的增益谱可以得到极大的展宽,FWM 增强 MW-BEFL 可以输出数目更多功率分布更均匀的多波长光。

参 考 文 献

- 1 S. W. Harun, F. A. Rahman, K. Dimiyati *et al.*. An efficient multiwavelength light source based on ASE slicing[J]. *Laser Phys. Lett.*, 2006, **3**(10): 495~497
- 2 Hu Zongfu, Wang Hao. Multi-wavelength laser generated by an active fiber ring resonator incorporating an optical phase modulator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(3): 833~838
胡宗福,王浩.有源光纤环形腔内相位调制产生多波长激光[J]. *光学学报*, 2010, **30**(3): 833~838
- 3 Qin Zujun, Zhou Xiaojun, Wu Haocheng. Design of multi-wavelength cascaded Raman fiber lasers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1): 244~248
秦祖军,周晓军,伍浩成等.多波长级联拉曼光纤激光器的设计[J]. *光学学报*, 2009, **29**(1): 244~248
- 4 Tian Jiajun, Yao Yong, Sun Yunxu *et al.*. Study on generation of the multiwavelength laser using the symmetric nonlinear optical loop mirror[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(3): 787~792
田佳峻,姚勇,孙云旭等.利用对称非线性光纤环镜产生多波长激光的研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(3): 787~792
- 5 S. W. Harun, F. A. Rahman, K. Dimiyati *et al.*. An efficient multiwavelength light source based on ASE slicing[J]. *Laser Phys. Lett.*, 2006, **3**(10): 495~497
- 6 Y. J. Song, L. Zhan, J. H. Ji *et al.*. Self-seeded

- multiwavelength Brillouin-erbium fiber laser [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(5): 486~488
- 7 J. Xia, L. Zhan, Y. Huang *et al.*. Self-seeded multiwavelength Brillouin-erbium laser by using NOLM-NALM [J]. *Laser Physics*, 2008, **18**(4): 442~445
- 8 Zuxing Zhang, Li Zhan, Yuxing Xia. Tunable self-seeded multiwavelength Brillouin-erbium fiber laser with enhanced power efficiency[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(15): 9731~9736
- 9 Y. Huang, L. Zhan, J. H. Ji *et al.*. Multiwavelength self-seeded Brillouin-erbium fiber laser with 45 nm tunable range[J]. *Opt. Commun.*, 2008, **281**(3): 452~456
- 10 Wang Pinghe, Liao Xian, Rao Yunjiang. A novel self-exciting Brillouin erbium-doped fiber laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(12): 2200~2204
汪平河, 廖弦, 饶云江. 一种新型自激发布里渊掺铒光纤激光器[J]. *光学学报*, 2007, **27**(12): 2200~2204
- 11 Hu Song, Wei Shikang, Zhan Li *et al.*. 15-wavelength Brillouin erbium-doped fiber laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(2): 212~215
胡松, 尉仕康, 詹黎等. 15 波长输出的布里渊掺铒光纤激光器[J]. *光学学报*, 2005, **25**(2): 212~215
- 12 M. Kamil Abd-Rahman, M. Khazani Abdullah, Harith Ahmad. Multiwavelength, bidirectional operation of twin-cavity Brillouin/erbium fiber laser[J]. *Opt. Commun.*, 2000, **181**: 135~139
- 13 Gregory J. Cowle, Dmitrii Yu Stepanov. Multiple wavelength generation with Brillouin/erbium fiber lasers[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1996, **8**(11): 1465~1467
- 14 D. S. Lim, H. K. Lee, K. H. Kim *et al.*. Generation of multiorder Stokes and anti-Stokes lines in a Brillouin erbium-fiber laser with a Sagnac loop mirror[J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(21): 1671~1673
- 15 Wang Yuhl Oh, Je Soo Ko, Dong Sung Lim *et al.*. 10 and 20 GHz optical combs generation in Brillouin/erbium fiber laser with shared cavity of Sagnac reflector[J]. *Opt. Commun.*, 2002, **201**: 399~403
- 16 Govind P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics & Applications of Nonlinear Fiber Optics*, Third Edition[M]. Jia Dongfang, Yu Zhenhong, Tan Bin *et al* Transl., Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002. 246~256
阿戈沃, 非线性光纤光学原理及应用[M]. 贾东方, 余震虹, 谈斌等译. 北京:电子工业出版社, 2002. 246~256