

间隔双倍频移的可调谐多波长布里渊/铒光纤激光器

张 诚¹ 苗长云¹ 赵军发¹ 童峥嵘²

(¹天津工业大学电子与信息工程学院, 天津 300387)
(²天津理工大学计算机与通信工程学院, 天津 300384)

摘要 设计了一种结构简单的波长间隔双倍布里渊频移的可调谐多波长布里渊/铒光纤激光器。利用一个 3 dB 耦合器形成复合环形腔结构,使奇数阶斯托克斯信号被局限在一个腔内循环,仅有初始布里渊抽运信号和偶数阶的斯托克斯信号能够耦合输出,实现了波长间隔双倍布里渊频移的多波长输出。分析了不同布里渊抽运功率、不同 980 nm 抽运功率下激光器的输出特性。在布里渊抽运信号功率 10 dBm,980 nm 抽运功率 110 mW 的情况下,激光器在 1555~1565 nm 范围内获得了波长间隔 0.176 nm 的 6 个波长输出。

关键词 激光器;光纤激光器;受激布里渊散射;双倍布里渊频移间隔;调谐范围

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.1102005

Tunable Multiwavelength Brillouin/Erbium Fiber Laser with Double-Brillouin-Shift Spacing

Zhang Cheng¹ Miao Changyun¹ Zhao Junfa¹ Tong Zhengrong²

(¹ School of Electronics and Information Engineering, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China)
(² School of Computer and Communication Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China)

Abstract A tunable multiwavelength Brillouin/erbium fiber laser with double-Brillouin-shift spacing is experimentally demonstrated. The compound ring cavity configuration formed by a 3 dB coupler confines the odd-order Stokes signals to circulate in a cavity and provides the initial Brillouin pump and even-order Stokes signals to be coupled out. Then multiwavelength outputs with double-Brillouin-shift spacing are achieved. The output characteristics of the fiber laser are analyzed under different Brillouin pump powers and 980 nm pump powers. At the Brillouin pump power of 10 dBm and the 980 nm pump power of 110 mW, 6 output channels with 0.176 nm channel spacing from 1555 nm to 1565 nm are achieved.

Key words lasers; fiber lasers; stimulated Brillouin scattering; double-Brillouin-shift spacing; tuning range

OCIS codes 060.3510; 230.1150; 290.5900

1 引 言

多波长布里渊/铒光纤激光器(MW-BEFL)是将光纤中的受激布里渊散射(SBS)非线性放大和掺铒光纤的线性放大作用相结合而实现室温稳定的多波长输出。因为具有波长间隔小、线宽窄以及功率谱相对平坦等优点,其在波分复用、光谱测量、光纤传感以及微波光子学等领域有着广泛的应用^[1~5]。多波长布里渊/铒光纤激光器最初的研究集中在增

加调谐范围和输出多波长数。为了克服腔内自激模的影响,Mohd Nasir 等^[6,7]利用同步调节布里渊抽运(BP)信号的工作波长和腔中插入的可调谐带通滤波器(TBF)的工作带宽的方法,实现了大抽运功率下的宽带可调谐多波长输出,但是 TBF 的应用增加了激光器的复杂性和不稳定因素。利用 SBS 效应作为反射端,Ajiya 等^[8]实现了整个 C 波段的宽带可调谐多波长布里渊/铒光纤激光器。利用同一

收稿日期: 2012-06-26; **收到修改稿日期**: 2012-07-30

基金项目: 国家自然科学基金(60977059)、天津市自然科学基金(11JCYBJC00100)和天津市高等学校科技发展基金(20100710)资助课题。

作者简介: 张 诚(1982—),男,博士,讲师,主要从事光纤激光器及光纤传感等方面的研究。

E-mail: zhangchengly730@yahoo.com.cn

原理, Ajiya 等^[9]继续改进了光路结构,对 BP 信号进行双级放大,有效降低了光源阈值功率、加强了多波长的产生。Tang 等^[10]利用高非线性光纤中的四波混频增强效应,实现了 150 个波长的输出。Al-Mansoori 等^[11]利用放大的光纤环作为反射端,有效地减少了铷增益损耗,布里渊增益饱和降低了布里渊阈值,实现了 L 波段 55 个波长的输出。多波长布里渊/铷光纤激光器输出的多波长间隔固定,是由作为布里渊增益介质的光纤的特性决定的,通常通信光纤的布里渊频移在 10 GHz 左右^[12]。当波长间隔 10 GHz 左右的多波长光纤激光器作为密集波分复用(DWDM)系统的光源时,增加了系统解调的复杂性,降低了实际应用价值。为了扩大输出多波长的波长间隔,Shee 等^[13]利用四端口环行器构成的双布里渊频移器,使奇数阶的斯托克斯信号局限在环内循环,偶数阶的斯托克斯信号能够耦合输出,实现了波长间隔双倍布里渊频移的多波长输出。Tang 等^[14]利用两个三端口环行器构成的环形结构,使奇/偶数阶的斯托克斯信号相向传输,实现了分离输出;利用四波混频增强效应,实现了波长间隔双倍布里渊频移的多波长输出。Parvizi 等^[15]利用 3 dB 耦合器形成的复合腔结构,实现了 80 nm 调谐范围内波长间隔 0.16 nm 的多波长输出,但是由于腔内仅利用了布里渊增益,该结构多波长激光器对 BP 信号的功率要求较高,输出多波长数仅有 3 个。

本文设计了一种结构简单的波长间隔双倍布里渊频移的可调谐多波长布里渊/铷光纤激光器。该环形腔激光器利用一个 3 dB 耦合器形成复合环形腔结构,这种结构使奇/偶数阶斯托克斯信号能够相向传输,并且奇数阶的斯托克斯信号被局限在一个环内循环,仅有初始 BP 信号和偶数阶的斯托克斯信号能够耦合输出,实现了波长间隔双倍布里渊频移的多波长输出。实验研究了不同 BP 功率、不同 980 nm 抽运功率下激光器的输出特性。

2 实验结构及原理

设计的波长间隔双倍布里渊频移的可调谐多波长布里渊/铷光纤激光器实验装置如图 1 所示。该环形腔光纤激光器包括作为线性放大的掺铒光纤放大器(EDFA),作为布里渊增益介质的 3 km 普通单模光纤(SMF),一个 2×2 的 3 dB 耦合器(C1),一个 1×2 的 3 dB 耦合器(C2)和一个三端口光环行器(Cir)。C1 的一对输入/输出端接 EDFA 和 SMF,另一对输入/输出端接 Cir 和 C2 形成复合环形腔结

构。EDFA 由最大抽运功率为 110 mW 的 980 nm 抽运源、980/1550 nm 波分复用器(WDM)和一段 7 m 长的掺铒光纤组成。实验中选用调谐范围 120 nm(1510~1630 nm)的可调谐激光器(TLS, SANTEC TSL-510)作为 BP 光源,激光器的线宽远小于布里渊增益谱带宽(约 40 MHz),保证了布里渊增益介质中受激布里渊散射的效率。该可调谐多波长布里渊/铷光纤激光器的工作原理为:窄线宽可调谐激光器输出的 BP 信号经过环行器后沿顺时针方向进入左环,被耦合器 C1 分成两部分。50%的 BP 信号沿逆时针方向进入右环,经 EDFA 放大后进入 SMF。当被放大的 BP 信号的强度超过产生布里渊增益的阈值时,由于 SBS 效应,在光纤中会产生同 BP 信号传播方向相反的沿着顺时针方向传输的 1 阶斯托克斯信号。1 阶斯托克斯信号被 C1 分成两部分,50%在右环中顺时针方向循环,50%经过左环逆时针传输后重新耦合进入右环顺时针传输,顺时针传输的 1 阶斯托克斯信号被 EDFA 放大。当 1 阶斯托克斯信号强度满足布里渊增益阈值条件时,会作为新的 BP 信号激发逆时针方向的 2 阶斯托克斯信号。2 阶斯托克斯信号同初始 BP 信号一样,50%在右环中逆时针循环产生高阶的斯托克斯信号,实现级联,50%经过耦合器 C2 耦合输出。右环中奇偶数阶的斯托克斯信号分别沿顺时针和逆时针方向传输,并且奇数阶的斯托克斯信号被限制在环形腔内循环,只有初始 BP 信号和偶数阶的斯托克斯信号能够耦合输出,实现了波长间隔双倍布里渊频移的多波长输出。这一过程不断重复,直到新产生的斯托克斯信号的强度不满足布里渊增益阈值条件时,级联过程终止。激光器的输出通过光谱仪(AQ6370B)观察测量。

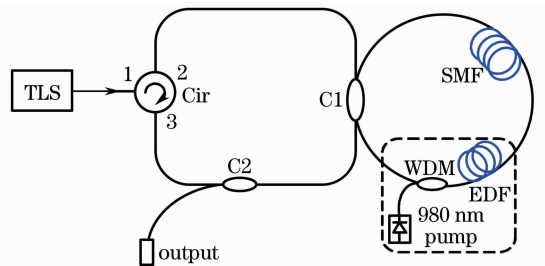


图 1 多波长布里渊/铷光纤激光器实验装置图
Fig. 1 Experimental setup of multiwavelength Brillouin/erbium fiber laser

3 结果与讨论

在没有外部 BP 信号输入,只有 980 nm 抽运功

率注入的情况下,该激光器在 1560 nm 附近出现自激振荡模,自激模的存在影响了激光器的调谐范围和输出多波长数。首先实验研究激光器输出波长数随 980 nm 抽运功率的变化情况,将 BP 信号固定在 1556 nm, 10 dBm。图 2 表示不同 980 nm 抽运功率下激光器的输出光谱图。从图 2 中可以看出,当 980 nm 抽运功率增长到 10 mW 时,激光器仅仅是 BP 信号的耦合输出,2 阶斯托克斯信号并没有被激发。当 980 nm 抽运功率增长到 15 mW 时,与 1556 nm 波长间隔 0.176 nm (约 20 GHz) 处出现了 2 阶斯托克斯信号;随着 980 nm 抽运功率的继续增大,更高阶的斯托克斯信号被激发;当 980 nm 抽运功率增加到 95 mW 时,10 阶斯托克斯信号被激发,激光器实现了波长间隔 0.176 nm (约 20 GHz) 的 6 波长输出。当 980 nm 抽运功率增加到最大的 110 mW 时,并没有更高阶的斯托克斯信号被激发,激光器输出光谱如图 3 所示,6 个波长的峰值功率分别为: -1.16 dBm, -5.95 dBm, -6.96 dBm, -8.11 dBm, -9.65 dBm 及 -13.28 dBm。从图 3 可以看出,由于四波混频效应,产生了波长间隔 0.176 nm 的高阶斯托克斯和反斯托克斯光,增加了多波长数目,但是这些波长的光的峰值功率以及信噪比同中心的 6 个波长的光相比要低得多。受限于 980 nm 抽运光源抽运功率以及作为布里渊增益介质的单模光纤长度的影响,激光器仅有 6 个波长的输出,通过加大抽运光源的抽运功率以及优化光纤的长度,激光器可以产生更多的输出波长。从图 2、3 可以看出,奇数阶的斯托克斯信号强度虽然很小,但是并没有完全消除。这是由于瑞利散射效应的影响,当奇数阶斯托克斯信号在单模光纤中传输时,在反方向产生了散射信号,散射信号在右环中逆时针

循环放大后耦合输出,但是它们的输出强度和信噪比很低。

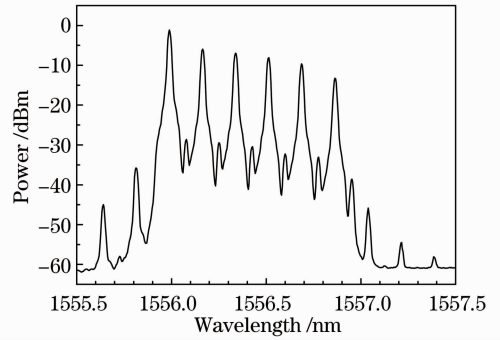


图 3 BP 功率为 10 dBm, 980 nm 抽运功率为 110 mW 时输出光谱图

Fig. 3 Output spectrum at BP power of 10 dBm and 980 nm pump power of 110 mW

调谐范围和输出多波长数是可调谐多波长布里渊/铒光纤激光器的两个重要指标。BP 功率的大小直接影响激光器的可调谐范围和输出多波长数,实验研究了不同 BP 功率下的调谐范围和输出多波长数,实验结果如图 4 所示。当 BP 信号为 6 dBm, 抽运功率 30、60、80、110 mW 时,激光器的输出波长数分别为 3、5、6、8,对应的调谐范围为 26、14、9、5 nm。当 BP 信号为 10 dBm, 抽运功率 30、60、80、110 mW 时,激光器的输出波长数分别为 2、4、5、6,对应的调谐范围为 43、23、16、10 nm。当 BP 功率固定时,随着 980 nm 抽运功率的增大,EDFA 为高阶斯托克斯信号的激发提供了增益,激光器的输出波长数增加。但是高的抽运功率使得腔内自激振荡模与斯托克斯信号模式竞争加剧,导致了调谐范围的降低,使激光器的调谐范围局限在自激振荡模范围附近。在同样的 980 nm 抽运功率下,高功率的 BP 信号对腔

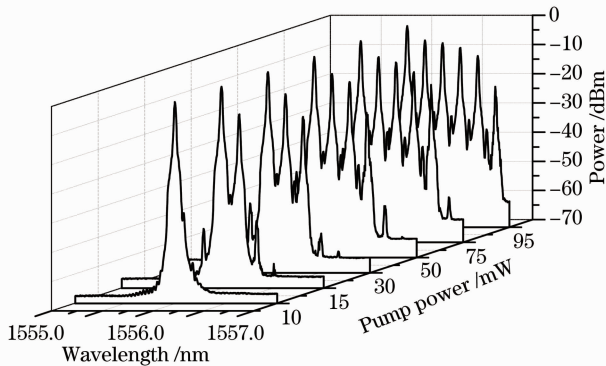


图 2 不同 980 nm 抽运功率下的输出光谱图 (BP: 10 dBm)

Fig. 2 Output spectra at different 980 nm pump powers (BP: 10 dBm)

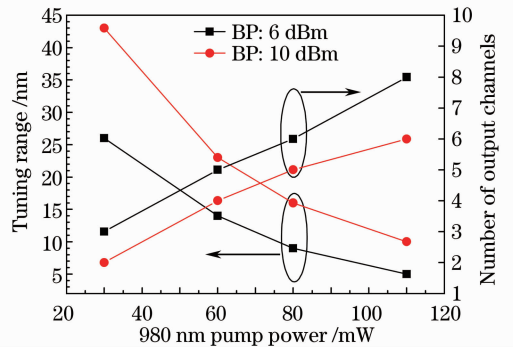


图 4 BP 功率为 6 dBm 和 10 dBm 时不同 980 nm 抽运功率下的调谐范围和输出波长数

Fig. 4 Tuning ranges and numbers of output channels versus 980 nm pump power at BP powers of 6 dBm and 10 dBm

内自激振荡模抑制性强,使得激光器的调谐范围大。但是高功率的BP信号使得激光器的振荡阈值增加,降低了激光器的输出波长。当BP信号为10 dBm,

980 nm 抽运功率为 60 mW 和 110 mW 时,激光器的调谐范围光谱图如图 5 所示。

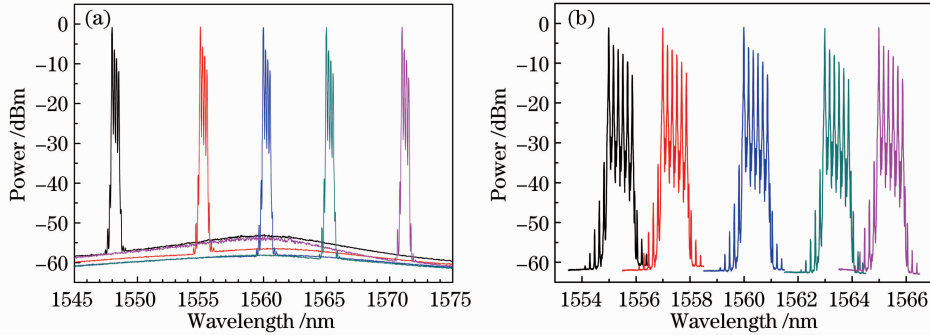


图 5 不同 980 nm 抽运功率下的可调谐范围谱。(a) 60 mW; (b) 110 mW

Fig. 5 Tuning range spectra at 980 nm pump power of (a) 60 mW and (b) 110 mW

图 6 表示在 BP 信号为 10 dBm,980 nm 抽运功率 110 mW 时,激光器输出的 6 个波长的输出稳定性。在 60 min 内,每 5 min 间隔扫描一次。激光器输出的 6 个波长的最大抖动分别为 0.21 dB,0.32 dB,0.34 dB,0.37 dB,0.43 dB 和 1.36 dB,激光器具有良好的输出稳定性。受限于 980 nm 抽运功率,激光器的第 6 个波长并没有达到饱和输出,峰值功率抖动较大。如果采用抽运功率更大的抽运光源,第 6 个输出波长将达到饱和输出,抖动减小的同时峰值功率将增加,充足的抽运功率能够激发更高阶的斯托克斯信号。

渊抽运信号功率 10 dBm,980 nm 抽运功率 110 mW 的情况下,激光器在 1555~1565 nm 范围内获得了波长间隔 0.176 nm 的 6 个波长输出。

参 考 文 献

- 1 Zhao Junfa, Yang Xiufeng, Liu Zhuolin *et al.*. Multiwavelength Brillouin/erbium fiber source with 40 nm tuning range [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(10): 2482~2486
赵军发, 杨秀峰, 刘卓琳 等. 调谐范围 40 nm 的多波长布里渊/铒光纤光源[J]. *中国激光*, 2010, **37**(10): 2482~2486
- 2 J. Zhao, T. Liao, X. Yang *et al.*. A simple tunable multiwavelength Brillouin-erbium fiber ring laser with low threshold power[J]. *J. Opt.*, 2010, **12**(11): 115202
- 3 Miao Xuefeng, Wang Tianshu, Zhou Xuefang *et al.*. A tunable multiwavelength Brillouin-erbium fiber laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(6): 0602010
缪雪峰, 王天枢, 周雪芳 等. 一种可调谐的多波长布里渊掺铒光纤激光器[J]. *中国激光*, 2012, **39**(6): 0602010
- 4 Jiao Lei, Song Yuejiang, Zhang Xuping. Four-wave-mixing enhanced multi-wavelength Brillouin erbium-doped fiber laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(2): 0214007
焦磊, 宋跃江, 张旭苹. 四波混频增强多波长布里渊掺铒光纤激光器的实验研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(2): 0214007
- 5 Shen Ying, Wang Rong, Pu Tao. A novel technique to generate high-frequency microwave signal based on high-order stimulated Brillouin scattering [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(6): 1571~1575
沈颖, 王荣, 蒲涛. 基于高阶受激布里渊散射的高频微波信号产生技术[J]. *光学学报*, 2010, **30**(6): 1571~1575
- 6 M. N. Mohd Nasir, Z. Yusoff, M. H. Al-Mansoori *et al.*. Broadly tunable multi-wavelength Brillouin-erbium fiber laser in a Fabry-Perot cavity [J]. *Laser Phys. Lett.*, 2008, **5**(11): 812~816
- 7 M. N. Mohd Nasir, Z. Yusoff, M. H. Al-Mansoori *et al.*. Widely tunable multi-wavelength Brillouin erbium fiber laser utilizing low SBS threshold photonic crystal fiber [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(15): 12829~12834
- 8 M. Ajiya, M. A. Mahdi, M. H. Al-Mansoori *et al.*. Seamless tuning range based on available gain bandwidth in multiwavelength Brillouin fiber laser[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(8): 5944~5952
- 9 M. Ajiya, M. H. Al-Mansoori, M. A. Mahdi. Widely tunable

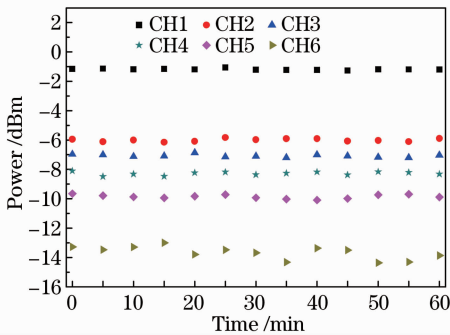


图 6 110 mW 抽运功率时的输出稳定性

Fig. 6 Stability of the output channels at 980 nm pump power of 110 mW

4 结 论

报道了一种波长间隔双倍布里渊频移的可调谐多波长布里渊/铒光纤激光器。该环形腔激光器利用一个 3 dB 耦合器形成复合环形腔结构,使奇数阶的斯托克斯信号局限在一个环内循环,仅有初始 BP 信号和偶数阶的斯托克斯信号能够耦合输出,实现了波长间隔双倍布里渊频移的多波长输出。在布里

- linear-cavity multiwavelength fiber laser with distributed Brillouin scattering[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2011, **9**(3): 031401
- 10 J. Tang, J. Q. Sun, L. Zhao *et al.*. Tunable multiwavelength generation based on Brillouin-erbium comb fiber laser assisted by multiple four-wave mixing processes[J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(15): 14682~14689
- 11 M. H. Al-Mansoori, M. Ajiya, M. A. Mahdi. L-band multi-wavelength BEFL with amplified fiber loop mirror [J]. *IEEE Photon. J.*, 2012, **4**(2): 483~490
- 12 Zhao Junfa, Yang Xiufeng, Li Yuan *et al.*. Stimulated Brillouin scattering slow light in photonic crystal fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(8): 2437~2440
赵军发, 杨秀峰, 李 元 等. 光子晶体光纤中受激布里渊散射慢光研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(8): 2437~2440
- 13 Y. G. Shee, M. H. Al-Mansoori, A. Ismail *et al.*. Multiwavelength Brillouin-erbium fiber laser with double-Brillouin-frequency spacing [J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(3): 1699~1706
- 14 J. G. Tang, J. Q. Sun, T. Chen *et al.*. A stable optical comb with double-Brillouin-frequency spacing assisted by multiple four-wave mixing processes[J]. *Opt. Fiber Technol.*, 2011, **17**(6): 608~611
- 15 R. Parvizi, H. Arof, N. M. Ali *et al.*. 0.16 nm spaced multi-wavelength Brillouin fiber laser in a figure-of-eight configuration [J]. *Opt. Laser Technol.*, 2011, **43**(4): 866~869

栏目编辑:宋梅梅