

文章编号: 0258-7025(2010)10-2482-05

调谐范围 40 nm 的多波长布里渊/铒光纤光源

赵军发¹ 杨秀峰^{2*} 刘卓琳¹ 童峥嵘² 刘艳格¹ 赵启大¹

(¹ 南开大学现代光学研究所, 天津 300071; ² 天津理工大学计算机与通信工程学院, 天津 300384)

摘要 设计了一种宽带可调谐多波长布里渊/铒光纤光源。利用光纤中的受激布里渊散射效应产生反方向传输的斯托克斯信号将光信号返回线型腔中, 消除了腔内自激模的影响, 使光源的调谐带宽仅由掺铒光纤放大器的带宽和布里渊抽运信号的调谐范围决定。布里渊抽运信号进入布里渊增益介质之前经过掺铒光纤放大器的两次放大, 有效降低了布里渊增益的抽运阈值。该光源实现了 1530~1570 nm 之间 40 nm 可调谐范围的输出。在布里渊抽运信号功率 2 mW, 1480 nm 抽运源抽运功率 110 mW 情况下, 在 1540~1566 nm 范围内, 获得了波长间隔 0.084 nm 的 5 个波长的输出。

关键词 光纤光学; 多波长布里渊/铒光纤光源; 受激布里渊散射; 调谐范围

中图分类号 TN253 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103710.2482

Multiwavelength Brillouin/Erbium Fiber Source with 40 nm Tuning Range

Zhao Junfa¹ Yang Xiufeng² Liu Zhuolin¹ Tong Zhengrong² Liu Yange¹ Zhao Qida¹

¹*Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071, China*

²*School of Computer and Communication Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China*

Abstract A widely tunable multiwavelength Brillouin/erbium fiber source is experimentally demonstrated. The Brillouin Stokes signals return back to the linear cavity owing to the effect of stimulated Brillouin scattering. The influence of the self-lasing modes is effectively eliminated because of the weak reflectivity. The tuning range of the fiber source is only limited by the bandwidth of erbium-doped fiber amplifier and the tuning range of Brillouin pump signal. The pump threshold of Brillouin gain is effectively reduced by the double-pass Brillouin pump signal amplification. The fiber source provides a tuning range of 40 nm (1530~1570 nm). At the Brillouin pump power of 2 mW and the 1480 nm pump power of 110 mW, 5 output channels with 0.084 nm channel spacing from 1540 to 1566 nm are achieved.

Key words fiber optics; multiwavelength Brillouin/erbium fiber source; stimulated Brillouin scattering; tuning range

1 引 言

受激布里渊散射(SBS)是光纤中主要的非线性现象, 光纤 SBS 在光纤激光器、光纤传感和光可控

延迟等方面有着重要的应用^[1~3]。多波长布里渊/铒光纤激光器(MW-BEFL)因为具有波长间隔小、线宽窄以及功率谱相对平坦等优点, 使其在密集波

收稿日期: 2010-01-25; 收到修改稿日期: 2010-03-23

基金项目: 国家自然科学基金(10774077)、国家 973 计划(2010CB327605)、天津市自然科学基金(08JCYBJC14400)、天津市科技发展计划科技攻关项目(05YFGPGX04900)和天津市科技支撑重点项目(07ZCKFGX00200)资助课题。

作者简介: 赵军发(1979—), 男, 博士研究生, 主要从事光纤中基于受激布里渊散射可控慢光及多波长布里渊/铒光纤激光器等方面的研究。E-mail: johnfar@163.com

导师简介: 赵启大(1942—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事现代光通信与光纤传感等方面的研究。
E-mail: zhaoqida@126.com

* 通信联系人。E-mail: yangxfbee@163.com

分复用(DWDM)、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^[4~8]。调谐范围和输出多波长数是可调谐 MW-BEFL 的重要工作指标。无论是线型腔或者环型腔布里渊/铒光纤激光器,由于腔内自激模的存在,制约了激光器的调谐范围。随着抽运源抽运功率的增大,为高阶斯托克斯信号的产生提供了能量,使输出波长数增加;但是由于斯托克斯信号和腔内自激模之间的模式竞争加剧,激光器的可调谐范围降低^[9~11]。在文献[12]中,虽然获得了 60 nm 的可调谐范围,但这是以高功率的布里渊抽运信号和低的 980 nm 抽运源抽运功率为代价的,导致激光器只有两个波长的输出。在文献[13, 14]中,通过同步调节布里渊抽运信号和腔中插入的宽带可调谐带通滤波器(TBF),激光器实现了大的抽运功率下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。

本文设计了一种线型宽带可调谐多波长布里渊/铒光纤光源。该光源的一端利用单模光纤(SMF)中 SBS 产生的反向斯托克斯信号将光信号返回腔中,而布里渊抽运信号通过光纤的另一端透射出去,这种结构消除了腔内的自激模,使调谐范围不受抽运源抽运功率的影响。

2 实验装置及原理

设计的线型腔多波长布里渊/铒光纤光源实验装置如图 1 所示。该线型腔光源结构简单,腔中除了掺铒光纤放大器(EDFA)和作为布里渊增益介质的 20 km 普通单模光纤外,仅包含 4 个光学器件:1×2 的 3 dB 耦合器(C1,C2)、光环形器和光隔离器。C1 用来实现布里渊抽运光的耦合输入和腔内多波长的耦合输出,C2 形成光纤环用作全反镜,光隔离器用来消除单模光纤的端面反射。EDFA 由最大抽运功率为 110 mW 的 1480 nm 抽运源,1480/1550 nm 波分复用器(WDM)和一段 10 m 长掺铒光纤(1531 nm 的吸收系数为 5.6 dB/m)组成。该可调谐多波长布里渊/铒光纤光源的工作原理为:窄线宽可调谐激光器(SANTEC MLS-2100)输出的布里渊抽运(BP)信号经过环形器和 C1 后沿向左的方向进入 EDFA,放大的信号被全反镜(C2)反射后沿向右方向再次进入 EDFA 进行放大,经过两次放大后,50%作为激光输出,50%沿向右的方向进入 SMF。当 BP 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向左传输的 1 阶斯托克斯信号。1 阶斯托克斯信号作为新的 BP

信号,当布里渊增益阈值条件被满足时,会激发 2 阶斯托克斯信号。这样,低阶的斯托克斯信号作为新的 BP 信号激发高阶的斯托克斯信号,这一过程不断地重复,产生多波长输出,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,这一过程终止。光源的输出通过光谱仪(ANDO AQ6317B)进行观察测量。

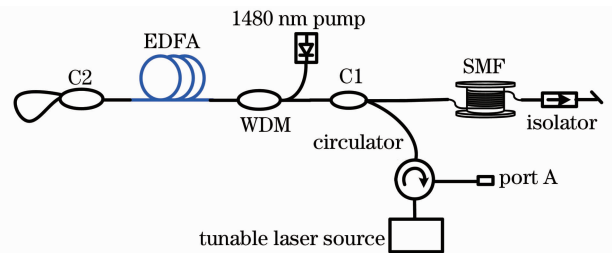


图 1 线型腔多波长布里渊/铒光纤光源实验装置图
Fig. 1 Configuration of linear cavity multiwavelength Brillouin/erbium fiber source

3 结果与讨论

首先,对不同强度布里渊抽运信号输入情况下,产生 1 阶斯托克斯信号所需的 1480 nm 抽运源的抽运功率阈值进行了研究。抽运功率阈值设定为光源产生的 1 阶斯托克斯信号强度大于 -10 dBm,信噪比高于 20 dB 时对应的 1480 nm 抽运源的抽运功率值。实验中 BP 信号的波长固定在 1550 nm,功率从 0.1 mW 变化到 2 mW。图 2 表示了不同强度 BP 信号对应的抽运阈值,从图中可以看到,随着 BP 信号的增大,抽运阈值呈指数规律递减,当 BP 信号强度为 2 mW 时,抽运阈值降为 20 mW。图 3 表示 1480 nm 抽运源抽运功率 20 mW 时,光源的输出光谱图。由于 BP 信号在进入布里渊增益介质之前,要经过 EDFA 的两次放大,这种配置有效地降低了 SBS 对 BP 信号和 1480 nm 抽运源抽运功率的需求。

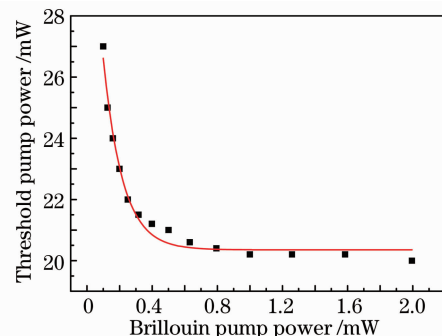


图 2 抽运功率阈值随布里渊抽运信号强度变化的关系
Fig. 2 Threshold power of 1480 nm pump power versus different Brillouin pump (BP) powers

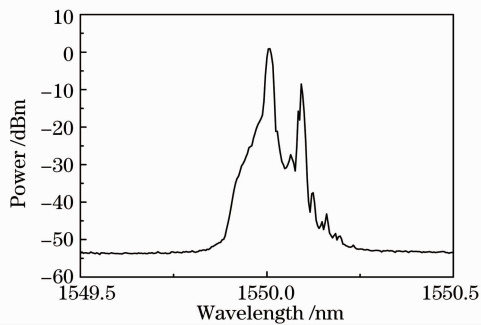


图3 BP信号2 mW,1480 nm抽运源抽运功率20 mW情况下的输出光谱图

Fig.3 Output spectrum at BP power of 2 mW and 1480 nm pump power of 20 mW

一般的线型腔可调谐 MW-BEFL 在腔的两端用高反射镜将光信号反射回腔内,形成激光振荡,但是由于腔内自激模的存在,使调谐范围和输出多波长数之间成为一对矛盾。随着抽运源抽运功率的增大,输出波长数增加的同时,由于斯托克斯信号和腔内自激模之间的模式竞争的加剧,导致激光器的可调谐范围降低。本文设计的多波长布里渊/铒光纤光源一端用3 dB耦合器形成的光纤环境作全反镜,另一端利用 SMF 中的 SBS 效应产生的斯托克斯信

号形成反射。光纤中的 SBS 效应对 BP 信号的线宽要求比较严格,只有当 BP 信号的线宽远小于布里渊增益谱带宽(约为 40 MHz)时,才能有效地激发 SBS。这种结构并没有形成真正意义上的激光振荡腔,消除了自激模的影响,使光源即使在大抽运功率下,也可以实现宽的调谐范围。实验研究了 BP 信号为 2 mW 时,光源在不同 1480 nm 抽运源抽运功率下的可调谐范围和输出多波长数。设计的光源实现了室温下 40 nm(1530~1570 nm)可调谐范围的输出。当抽运功率增加到 60 mW 时,光源实现了 40 nm 可调谐范围内,波长间隔 0.084 nm 的 3 波长输出。图 4 表示在调谐范围内 4 个不同 BP 波长的输出光谱图。抽运功率 80 mW 时,输出多波长数增加到 4。当抽运功率增加到最大 110 mW 时,1540~1566 nm 范围内,输出多波长数为 5,在 40 nm 调谐范围内其余波长输出多波长数为 4。图 5 表示在 1480 nm 抽运源抽运功率 110 mW 时,50 nm 范围的输出光谱图。这种结构的多波长光源的调谐范围仅仅受限于腔中 EDFA 的工作带宽和 BP 信号的调谐范围。通过优化 EDFA 的工作带宽,可以使光源工作在 S,C 或 L 波段的任意波长^[7,15]。

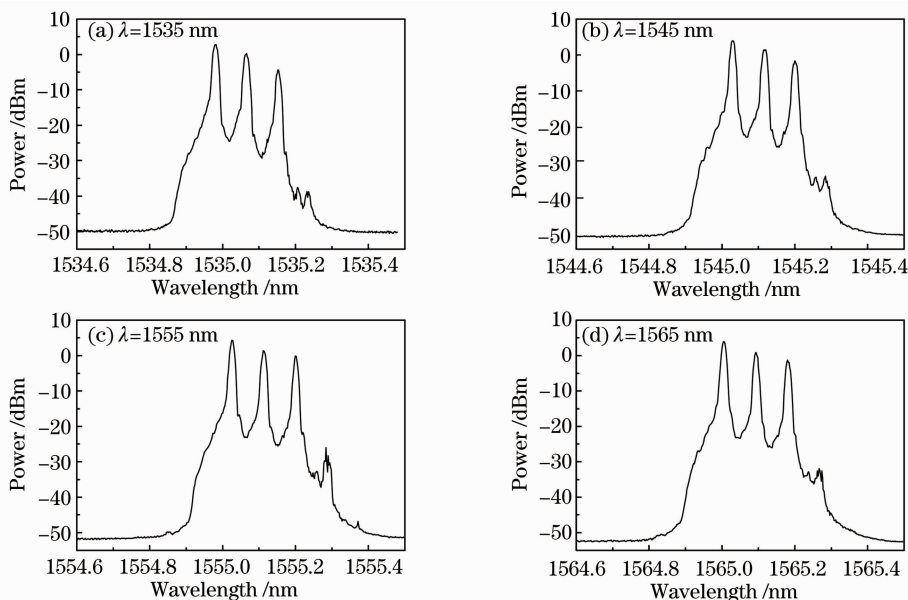


图4 1480 nm抽运源抽运功率60 mW时,不同波长BP信号的输出光谱图

Fig.4 Output spectra at different BP wavelengths under 1480 nm pump power of 60 mW

图 6 表示了光源输出的各个波长的峰值功率随 1480 nm 抽运源抽运功率的变化情况。实验中,BP 信号波长固定在 1550 nm,功率 2 mW。第一个波长的输出是 BP 信号的耦合输出,其余 4 个波长分别是 1 阶到 4 阶斯托克斯信号。各个波长的输出功

率在达到饱和前,随着抽运功率的增大呈线性变化。进入饱和区后,各个波长的峰值功率随抽运功率的变化不明显。充足的抽运源抽运功率可以保证各个波长的信号进入深度饱和,减少各个波长之间的峰值功率差。当抽运功率增加到最大 110 mW 时,4

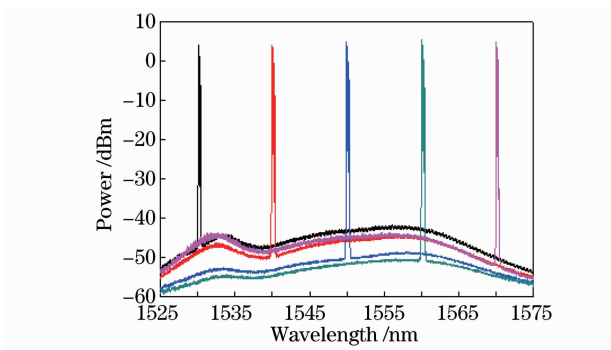


图 5 1480 nm 抽运源抽运功率 110 mW 时的调谐范围谱图

Fig. 5 Tuning range spectra at 1480 nm pump power of 110 mW

阶斯托克斯信号还是停留在线性增长区,没有达到饱和输出。光源的输出光谱图如图 7 所示,5 个波长的信号峰值功率分别为 5.29, 4.01, 1.945, -0.18 和 -3.296 dBm;信噪比分别为 26.1, 24.8, 24.4, 24.3 和 24.1 dB。

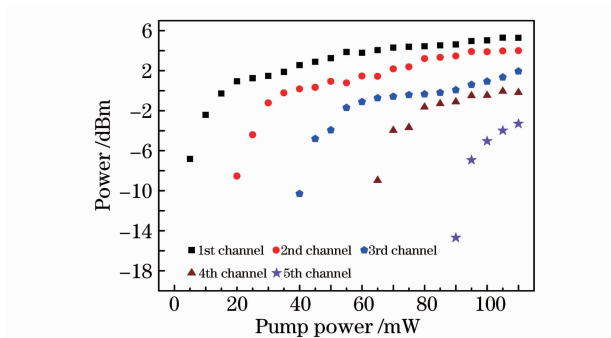


图 6 输出波长峰值功率随 1480 nm 抽运源抽运功率的变化

Fig. 6 Peak power of output channels versus 1480 nm pump power

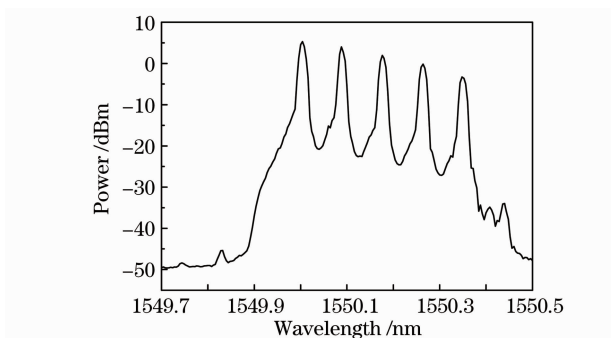


图 7 110 mW 抽运功率时的输出光谱图

Fig. 7 Output spectrum at 1480 nm pump power of 110 mW

图 8 表示在最大抽运功率 110 mW 时,光源输出的 5 个波长的峰值功率随时间的变化情况。在 60 min 内,每间隔 3 min 扫描一次。光源 5 个波长

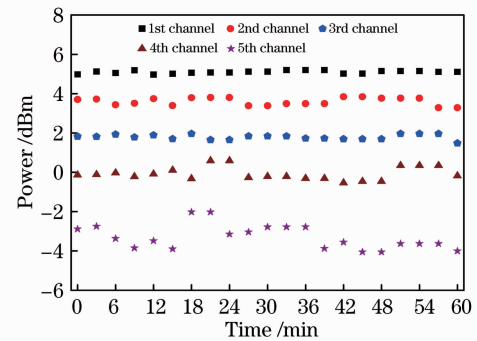


图 8 110 mW 抽运功率时的输出稳定性

Fig. 8 Stabilities of output channels at 1480 nm pump power of 110 mW

的最大抖动分别为 0.232, 0.553, 0.504, 1.123 和 2.031 dB。第 5 个波长抖动较大的原因在于 1480 nm 抽运源最大抽运功率 110 mW 时,它的输出没有达到饱和。如果 1480 nm 抽运源的抽运功率能够继续加大,第 5 个波长峰值功率增大的同时,抖动将会减小,同时能够产生高阶的斯托克斯信号,光源的输出波长数将增加。

4 结 论

报道了一种宽带可调谐多波长布里渊/铒光纤光源。该线型腔光源利用单模光纤中的受激布里渊散射特性作为一个反射端,使腔内没有自激模的存在,即使在大的抽运功率下,也可以获得宽调谐范围的输出。受限于 EDFA 的工作带宽,实验仅获得了 40 nm 的可调谐范围的输出。在布里渊抽运信号功率 2 mW, 1480 nm 抽运功率 110 mW 情况下,光源在 1540~1566 nm 范围内获得了波长间隔 0.084 nm 的 5 波长输出。使用具有更大抽运功率的抽运源,可以有效地增加光源的输出波长数。

参 考 文 献

- 1 P. P. Zhang, S. L. Hu, S. Y. Chen *et al.*. A high-efficiency Brillouin fiber ring laser[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(6): 495~497
- 2 Liu Yu, Ren Liyong, Wang Shihe. Theoretical study of stimulated Brillouin scattering slow light and pulse-broadening reduction using double broadband pump in optical fibers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(11): 2077~2082
- 3 刘宇,任立勇,王士鹤. 光纤中双宽带抽运 SBS 慢光及其脉冲展宽减小的理论研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(11): 2077~2082
- 4 Wan Shengpeng, He Xingdao. Temperature effects in a Brillouin fiber-optic gyroscope[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(1): 162~165
- 5 万生鹏,何兴道. 温度对布里渊光纤陀螺的影响[J]. *中国激光*, 2010, **37**(1): 162~165
- 6 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
- 5 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
- 6 Liu Yange, 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
- 7 M. H. Al-Mansoori, A. W. Naji, S. J. Iqbal *et al.*. L-band Brillouin-erbium fiber laser pumped with 1480 nm pumping scheme in a linear cavity[J]. *Laser Phys. Lett.*, 2007, **4**(5): 371~375
- 8 G. F. Shen, X. M. Zhang, H. Chi *et al.*. Microwave/millimeter-wave generation using multi-wavelength photonic crystal fiber Brillouin laser[J]. *Progress in Electromagnetics Research*, 2008, **80**: 307~320
- 9 M. H. Al-Mansoori, M. A. Mahdi. Tunable range enhancement of Brillouin-erbium fiber laser utilizing Brillouin pump preamplification technique [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(11): 7649~7654
- 10 N. M. Samsuri, A. K. Zamzuri, M. H. Al-Mansoori *et al.*. Brillouin-erbium fiber laser with enhanced feedback coupling using common erbium gain section[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(21): 16475~16480
- 11 M. I. Johari, A. Adamiat, N. S. Shahabuddin *et al.*. Ring cavity multiwavelength Brillouin-erbium fiber laser with a partially reflective fiber Bragg grating[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2009, **26**(9): 1675~1678
- 12 M. H. Al-Mansoori, M. Kamil Abd-Rahman, F. R. Mahamd Adikan *et al.*. Widely tunable linear cavity multiwavelength Brillouin-erbium fiber lasers[J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(9): 3471~3476
- 13 M. N. M. 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
- 14 M. N. M. 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
- 15 S. W. Harun, M. Z. Zulkifli, H. Ahmad. A linear cavity S-band Brillouin/erbium fiber laser[J]. *Laser Phys. Lett.*, 2006, **3**(7): 369~371