

·激光技术·

## 一种超窄线宽双向反馈的多波长布里渊光纤激光器

徐雨萌, 王国政, 刘艳阳, 彭玲玲, 刘昕男, 寇艳强, 吴柯鑫

(长春理工大学理学院, 吉林 长春 130022)

**摘要:**提出一种超窄线宽双向反馈的多波长布里渊光纤激光器。一个2×2的3 dB耦合器连接10 km普通的单模光纤(SMF)作为布里渊增益环,分布反馈式半导体激光器作为布里渊抽运源,两个光环行器实现多波长激光的输出和反馈,没有加入掺铒光纤线性增益结构。当布里渊功率为80 mW时,在10 km单模光纤中产生受激布里渊散射效应,而获得反向传输的多阶斯托克斯光。不包括抽运光,共观察到12个波长的斯托克斯光输出,波长间隔为0.088 nm,输出激光线宽达300 kHz。

**关键词:**光纤激光器;多波长;受激布里渊散射;超窄线宽;非线性放大

中图分类号:TN248.1

文章标识码:A

文章编号:1673-1255(2014)-01-0018-04

## Multi-wavelength Brillouin Fiber Laser with Ultra-narrow Line-width Bidirectional Feedback

XU Yu-meng, WANG Guo-zheng, LIU Yan-yang, PENG Ling-ling, LIU Xin-nan, KOU Yan-qiang, WU Ke-xin

(School of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

**Abstract:** A multi-wavelength Brillouin fiber laser with ultra-narrow line-width bidirectional feedback is introduced. A 10 km long single-mode fiber (SMF) connected with a 2×2 3 dB coupler is used as the Brillouin gain ring and a distributed feedback (DFB) semiconductor laser is taken as the Brillouin pump (BP). The output and feedback of multi-wavelength lasers are realized by two optical circulators without adding erbium-doped fiber linear gain structure. At the Brillouin pump power of 80 mW, stimulated Brillouin scattering is produced in 10 km long single-mode fiber (SMF). Therefore, multi-order Stokes reflection lights can be obtained. Stokes light output of 12 wavelengths with 0.088 nm wavelength spacing and 300 kHz output laser line width is observed except BP.

**Key words:** fiber laser; multi-wavelength; stimulated Brillouin scattering; ultra-narrow line-width; no linear gain

随着超大容量光纤通信网的发展,密集波分复用(DWDM)技术得到越来越多的应用<sup>[1]</sup>。多波长光纤激光器因具有低阈值、等间隔、窄线宽、相邻峰值功率稳定平坦等优点,被认为是实现DWDM载波源的重要技术<sup>[2-3]</sup>。多波长光纤激光器在激光测距、光谱测量、分布式光纤传感和微波光子技术等也有着重要的应用前景<sup>[4-7]</sup>。因此,多波长光纤激光器成为近年来研究的热点。

利用光纤受激布里渊散射(SBS)效应,在满足斯托克斯信号光频率产生的条件下,入射光波在光纤

中产生反向传输的斯托克斯散射光即可在腔内振荡并且受激放大形成激光输出,从而实现稳定的多波长光纤激光器。自1976年K. O. Hill等人首次实现连续波运转的布里渊光纤激光器以来<sup>[8]</sup>,国内外大量研究人员对其展开了一系列的理论、实验方面的研究<sup>[9-14]</sup>。布里渊光纤激光器大多采用腔内激发的斯托克斯信号光重新注入单模光纤中作为激发高阶斯托克斯信号的抽运光从而产生下一级的斯托克斯信号光,此过程持续进行直到泵源无法满足阈值条件<sup>[15]</sup>,这样就可形成稳定的多波长激光输出。

收稿日期:2013-11-10

作者简介:徐雨萌(1989-),女,硕士研究生,主要从事光纤激光器研究。

设计了一个双向反馈的布里渊多波长光纤激光器结构,采用分布反馈半导体激光器(DFB)作为布里渊抽运光(BP),无需掺铒光纤线性增益,可实现超窄线宽多波长的激光输出。利用一个2×2的3 dB(50/50)耦合器,其中2、3端口连接一段10 km长的普通单模光纤(SMF)作为布里渊增益环,4端口连接由光环行器(C2)构成的光纤环形反射镜,1端口连接环行器(C1)作为布里渊抽运光的输入和输出。该结构可输出稳定的12个波长的斯托克斯光,激光线宽小于300 kHz。

## 1 实验结构与工作原理

多波长布里渊光纤激光器的实验结构如图1所示。腔中用一段长度为10 km长的普通单模光纤两端与一个2×2的3 dB耦合器的同侧端口2和端口3连接,组成一个布里渊增益环。环行器2的端口1和端口3相连构成光纤反射镜,实现将布里渊抽运光和斯托克斯信号光反射回布里渊增益环,环行器1的端口3连接耦合器作为多波长输出端,连接光谱分析仪(OSA)和光功率计等仪器观测。

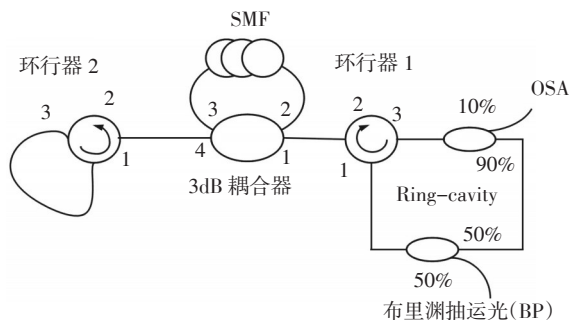


图1 多波长布里渊光纤激光器结构

布里渊抽运光(BP)通过1×2的3 dB耦合器和环行器1的端口2进入2×2的3 dB耦合器(端口2),BP被分为相同的两部分分别耦合器的端口3和端口4输出,从端口3出射的BP逆时针进入10 km长普通单模光纤,在单模光纤中产生反向传输的斯托克斯光;从端口4出射的BP通过环行器2后再次进入布里渊增益环,一部分经耦合器端口1输出,另一部分经耦合器的端口2再次进入10 km长普通单模光纤产生反向传输的斯托克斯光,经端口4的光都在环行器2中反射回来,经端口1的光一部分进入OSA中进行观测,另一部分会再次通过环行器1进入布里渊增益腔。注入10 km单模光纤的光的强度比布里渊阈值大时,由于受激布里渊散射效应会产生与BP方向相

反的斯托克斯光,进入10 km单模光纤的那部分光将作为低阶布里渊抽运光而激发高阶斯托克斯光,直到不再满足布里渊阈值而不能激发更高阶斯托克斯光为止,整个结构未采用掺铒光纤线性放大结构。产生的多阶斯托克斯光信号线宽更窄,可获得等间隔窄线宽多波长激光输出。

## 2 实验结果与讨论

实验采用窄线宽分布反馈半导体激光器作为布里渊抽运源,如图2所示。采用光谱分析仪(AQ6370C)观测到抽运源波长为1 550.12 nm,3 dB带宽0.01 nm(受光谱分析仪分辨率限制),其最大输出功率超过80 mW。

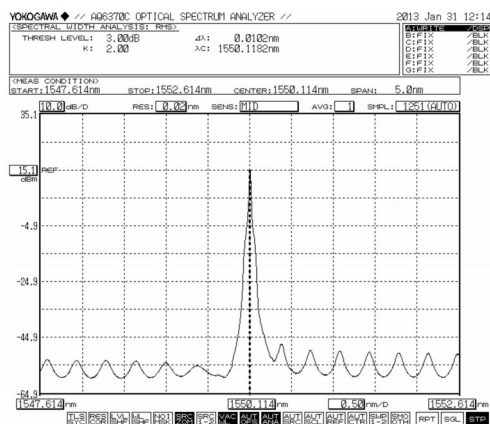


图2 窄线宽分布反馈激光器输出光谱

BP光经环行器1注入光纤激光器,进入10 km单模光纤产生反向传输的斯托克斯光。随着BP功率的提高,开始观察到反向斯托克斯光越来越多,当BP为最大输出的80 mW时,光纤激光器输出端观察到的多波长光谱如图3所示(采用复谱分析仪AP2441B观测),第1阶斯托克斯光波长为1 550.29 nm,与BP的波长相比,布里渊频移为0.088 nm,峰值功率为-11 dBm。该实验虽然未采用线性增益结构,但输出波长数量仍然较多。各阶斯托克斯光波长间隔均为0.088 nm,且强度基本呈不断降低的趋势,主要由于各阶光在光纤中不断产生更高阶斯托克斯激光的同时产生声学声子损耗能量所致。实验中,只观察到了第12阶斯托克斯光,而没有观察到第13阶斯托克斯光,这是由于第12阶斯托克斯光功率已经达不到阈值功率的要求,所以不会产生更高阶斯托克斯光。

在第12阶斯托克斯光的长波段还有几个强度较

低的信号,应该是未能激发成为激光的更高阶斯托克斯光。根据受激布里渊散射原理可知,若采用更长的光纤将会降低斯托克斯光阈值,可产生更多的波长,但也将带来更高的光衰减而降低抽运功率。由此可见,如果采用更优化的单模光纤长度和抽运功率,将能获得更多的波长输出。在布里渊抽运信号的短波长区出现5个强度较小的反斯托克斯光,主要是由于共同传输的抽运光和斯托克斯光在光纤中产生的四波混频效应导致的自激模式。

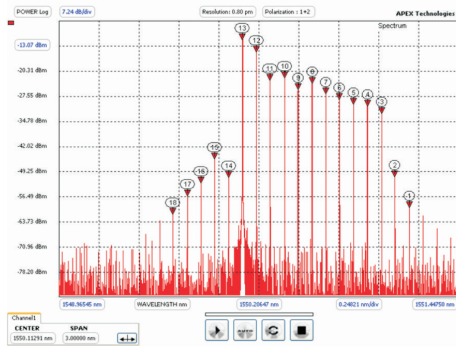


图3 多波长输出光谱(BP功率80 mW)

图4所示为50 min之内测量的不同时刻的多波长布里渊光纤激光器的输出多波长光谱。在本次实验中,每隔5 min记录一次输出光谱的变化,从图4中可以看出,在50 min内的10次测量中,多波长布里渊光纤激光器的输出十分稳定,没有较大幅度的变化。整个系统由于结构简单,因此工作状态稳定,具有良好的应用性能。

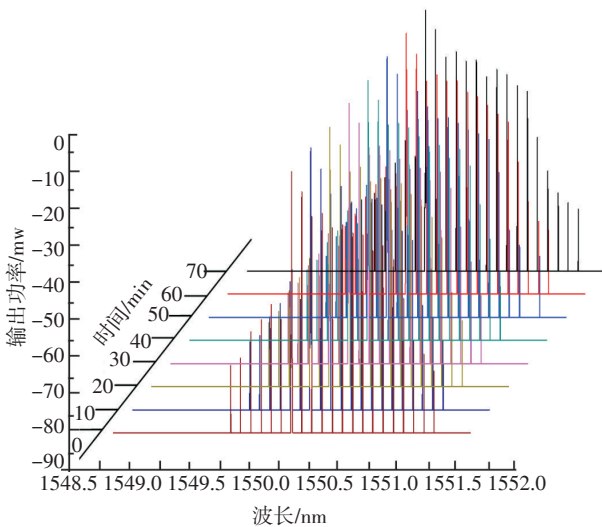


图4 多波长输出稳定性

实验未采用掺铒光纤线性放大结构,避免了微

波信号的展宽。采用M-Z干涉仪延时自差法,通过频谱分析仪测量到光纤激光器的输出线宽如图5所示,其5.69 dB线宽为455 kHz,经换算3 dB线宽约300 kHz。

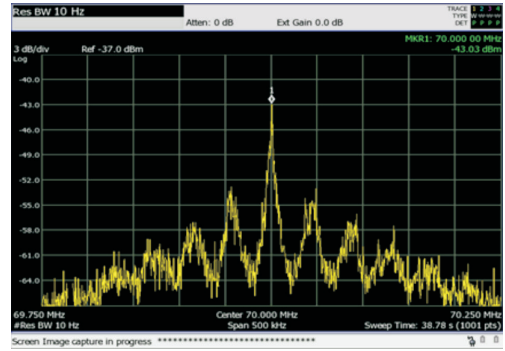


图5 光纤激光器的线宽频谱

### 3 结论

设计并实验了一种无掺铒光纤线性增益结构的超窄线宽多波长布里渊光纤激光器,10 km长普通单模光纤作为布里渊增益介质,利用环行器的反馈作用和DFB激光的布里渊抽运,实现多波长输出。实验结果表明,当BP功率为80 mW、波长为1 550.20 nm时,可以观测到12个波长输出的斯托克斯光信号,峰值功率为-11 dBm,输出线宽达300 kHz。该光纤激光器结构简单,工作状态稳定,可以作为波分复用系统的载波源,同时在激光测距、光谱测量、分布式光纤传感和微波光子技术领域具有重要的应用前景。

### 参考文献

- [1] Boyd TL, Klemer D, Leilabady PA, et al. A 1.55  $\mu\text{m}$  solid-state laser source for DWDM applications[J]. Lightwave Technology, 1999, 17 (10): 1904-1908.
- [2] ZHANG Jing-jing, Ansari N. Scheduling hybrid WDM/TDM passive optical networks with nonzero laser tuning time[J]. IEEE Sensors Journal, 2012, 12(1):1014-1027.
- [3] Alexis Debut, Stecphane Randoux, Jaouad Zemmouri, et al. Experimental and theoretical study of linewidth narrowing in Brillouin fiber ring lasers [J]. J Opt Soc Am B, 2001, 18(4): 556-567.
- [4] Parvizi, R, Ali,et al. Multi-wavelength Brillouin fiber laser using dual-cavity configuration[J]. Laser Physics, 2011, 21(1): 205-209.



- [5] 宋牟平, 鲍翀, 裘超, 等. 结合布里渊光时域分析和光时域反射计的分布式光纤传感器[J]. 光学学报, 2010, 30(3): 650-654.
- [6] Kazuo Hotate, Zuyuan He. Synthesis of optical-coherence function and its applications in distributed and multiplexed optical sensing [J]. J Lightwave Technology, 2006, 24 (7): 2541-2557.
- [7] 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.
- [8] Hill K O, Kawasaki B S, Johnson D C. CW Brillouin laser [J]. Applied Physics Letters, 1976, 28(10): 608-609.
- [9] 缪雪峰, 王天枢, 周雪芳, 等. 一种新颖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.
- [10] Al-Mansoori, M H, Ajiya, et al. L-band multi-wavelength BE-FL with amplified fiber loop mirror [J]. Photonics Journal, 2012, 4(2): 483-490.
- [11] 邢磊, 冯雪, 张磊, 等. 受激布里渊散射主被动混合调Q光纤激光器. 中国激光, 2008, 35(3): 338-342.
- [12] 湛鸿伟, 王小林, 杨春波, 等. 基于受激布里渊散射效应的4.5 W全光纤窄线宽双波长激光器[J]. 中国激光, 2010, 37(10): 2477-2481.
- [13] Abd Rahman Z Abd, Hitam, Al-Mansoori, et al. Multi-wavelength fiber laser with enhanced reverse-S-shaped feedback coupling assisted by out-of-cavity optical amplifier[J]. Optics Express, 2011, 19(22): 21238-21245.
- [14] Z Abd Rahman, S Hitam, M H Al-Mansoori, et al. Multi-wavelength fiber laser with enhanced reverse-S-shaped feedback coupling assisted by out-of-cavity optical amplifier [J]. Optics Express, 2011, 19 (22): 21238-21245.
- [15] 沈一春, 宋牟平, 章献民, 等. 单模光纤中受激布里渊散射阈值研究[J]. 中国激光, 2005, 4(32): 497-500.

(上接第3页)

个解。那么在不同的情况下所形成的相图也是截然不同的, 在小于分支点的情况下图像就会简单很多, 大于分支点就非常复杂。而且是先在图像的一只翅膀上绕着稳定态旋转, 然后跳跃到另一只翅膀上的另一个稳定态旋转, 然后再跃回第一只翅膀上, 就这样反复循环下去。但是, 仔细观察便会发现, 无论曲线怎么跳跃怎么旋转都是始终不会相交的; 另外, 在一只翅膀上环绕多少圈再跳跃到另一只翅膀上也是无规则的。这是混沌吸引子的特性。

## 2 结 论

简述了单模激光 Lorenz 系统模型。然后利用 Matlab 软件编制计算程序, 对单模激光系统模型进行仿真模拟。给出不同参量下激光系统的相图。并结合仿真模拟的图像, 展示参量变化对系统动力学行为的影响。研究表明, 当系统参数大于分支点处的取值时, 系统变为不稳定的, 从而进入混沌状态。在混沌区域, 不同参数值下的相图是不同的, 图形曲线犹如蝴蝶的翅膀, 先在一只翅膀上绕着稳定态旋转, 然后跳跃到另一只翅膀上绕着稳定态旋转, 反复循环不相交, 形成混沌吸引子。

## 参考文献

- [1] Tsimring L S, Rulkov N F, Larsen M L, et al. Repulsive synchronization in an array of phase oscillators[J]. Phys Rev Lett, 2005, 95(1): 14101-14104.
- [2] Li T Y, York J A. Period three implied chaos[J]. Amer Math Monthly Dec, 1975, 82(10): 985-992.
- [3] Lorenz E N. Deterministic nonperiodic flow[J]. J Atmos Sci, 1963, 20(2): 130-141.
- [4] Feigenbaum M J. Quantitative universality for a class of nonlinear transformations[J]. J Stat Phys, 1978, 19(1): 25-52.
- [5] Ikeda K. Multiple-valued stationary state and its instability of the transmitted light by a ring cavity system[J]. Opt Commun, 1979, 30(2): 257-261.
- [6] Gibbs H M, Hopf F A, Kaplan D L, et al. Observation of chaos in optical bistability[J]. Phys Rev Lett, 1981, 46(7): 474-477.
- [7] Weiss C O, Godone A, Olafsson A. Routes to chaotic emission in a cw He-Ne laser[J]. Phys Rev (A), 1983, 28(2): 892-895.
- [8] Weiss C O, Klische W, Ering P C, et al. Instabilities and chaos of a single mode NH<sub>3</sub> ring laser[J]. Phys Rev Lett 1985, 55(6): 405-408.
- [9] 沈柯. 光学中的混沌[M]. 沈阳: 东北师范大学出版社, 1999.
- [10] 张洪钧. 光学混沌[M]. 上海: 上海科技教育出版社, 1997.