

# 基于反馈光纤环的可调多波长布里渊掺铒 光纤激光器

刘 毅 于晋龙 王红杰 王文睿 潘洪刚 杨恩泽

(天津大学电子信息工程学院, 天津 300072)

**摘要** 提出一种基于反馈光纤环(FFL)的多波长布里渊掺铒光纤激光器(MW-BEFL)。主腔由光环行器构成单通谐振腔,长度为 50 m,而 FFL 选用传统单纵模布里渊光纤激光器的光纤,长度为 10 m,以保证每一阶斯托克斯波及反斯托克斯波处于单纵模运行状态,并添加恒温系统消除外界干扰。采用延时干涉法,测得第一阶斯托克斯有 45 dB 的边模抑制比和 3.23 kHz 的线宽,通过调节不同的掺铒光纤放大器(EDFA)功率,对比分析了每一阶斯托克斯波和反斯托克斯波的关系。利用级联受激布里渊散射和四波混频效应,最终获得了 50 nm(1520~1570 nm)可调范围的间隔为 0.084 nm 的 15 个稳定输出的多波长布里渊掺铒光纤激光器。

**关键词** 光纤光学; 布里渊掺铒光纤激光器; 反馈光纤环; 多波长

**中图分类号** TN248 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0202003

## Tunable Multiwavelength Brillouin-Erbium Fiber Laser Based on Feedback Fiber Loop

Liu Yi Yu Jinlong Wang Hongjie Wang Wenrui Pan Honggang Yang Enze

(School of Electronic & Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract** A novel multiwavelength Brillouin-erbium fiber laser (MW-BEFL) based on the feedback fiber loop (FFL) is proposed. The main single pass ring is constructed by an optical circulator and a 50 m single mode fiber (SMF). In order to guarantee the single longitudinal mode operation of each Stokes waves and anti-Stokes waves, the FFL is configured with a 10 m SMF of traditional Brillouin-fiber laser. The system is enclosed in temperature control system so that environment disturbance is reduced. 45 dB sidemode suppression and 3.23 kHz linewidth of the first-order Stokes wave are measured by delay interference method. Through the cascaded stimulated Brillouin scattering (SBS) and degenerate four-wave mixing (FWM) process, the laser can be freely and steadily tuned in 50 nm range from 1525 nm to 1575 nm with 0.084 nm wavelength spacing.

**Key words** fiber optics; Brillouin-erbium fiber laser; feedback fiber loop; multiwavelength

**OCIS codes** 140.3510; 190.4370; 290.5900

## 1 引 言

多波长光纤激光器在很多领域都有应用,如光学传感,密集波分复用(DWDM)以及微波光子<sup>[1]</sup>等。对多波长光纤激光器的要求有大带宽多通道,严格稳定的波长间隔以及窄线宽和低抖动。由于受激布里渊散射(SBS)不仅具有严格的频移量和窄线宽的特性<sup>[2-3]</sup>,而且可以克服掺铒光纤放大器(EDFA)的增益竞争,因此许多研究都集中在多波长布里渊掺铒光纤激光器(MW-BEFL)<sup>[4-9]</sup>,而且

相对于基于半导体光放大器(SOA)的多波长布里渊激光器<sup>[10-11]</sup>,EDFA具有偏振影响小,饱和功率高以及增益谱平坦等优点。国外研究内容主要有基于 Sagnac 环的 MW-BEFL<sup>[4-5]</sup>、基于环形腔的单/双倍布里渊频移 MW-BEFL<sup>[6-8]</sup>、基于光栅的环腔 MW-BEFL<sup>[9]</sup>,而国内研究主要有双 s 结构的环腔 MW-BEFL<sup>[12]</sup>、基于 Sagnac 反射镜的线性腔的 MW-BEFL<sup>[13]</sup>以及双向反馈环腔结构的 MW-BEFL<sup>[14]</sup>。MW-BEFL 的主要原理就是结合 EDFA

收稿日期: 2013-08-02; 收到修改稿日期: 2013-09-23

基金项目: 国家 973 计划(2010CB327603,2012CB315704)、国家杰出青年科学基金(61205061)

作者简介: 刘 毅(1984—),男,博士研究生,主要从事光纤激光器方面的研究。E-mail: liuyi28@163.com

导师简介: 于晋龙(1969—),男,教授,博士生导师,主要从事高速光纤通信系统、光微波和光纤传感等方面的研究。

E-mail: yujinlong@tju.edu.cn

的线性增益和 SBS 的非线性增益, 所以为了获得足够的增益, MW-BEFL 的腔长一般都选择千米量级, 因此很难保证每一阶的斯托克斯和反斯托克斯波都处于单纵模运行状态。

提出一种新型基于反馈光纤环的可调多波长布里渊掺铒光纤激光器。由于反馈光纤环的配置, 每一阶的斯托克斯波和反斯托克斯波都可以以单纵模的形式运行。实验采用延时干涉法对第一阶斯托克斯的线宽进行了测试, 获得了具有 45 dB 的边模抑制比和 3.23 kHz 线宽的单纵模状态, 并对比分析了 EDFA 功率与每一阶斯托克斯波和反斯托克斯波的关系。最终实现了 50 nm (1520~1570 nm) 可调范围、0.084 nm 间隔、15 个稳定输出的多波长布里渊掺铒光纤激光器。

## 2 实验结构及原理

### 2.1 实验结构

图 1 为基于反馈光纤环的多波长布里渊掺铒光纤激光器结构原理图。用线宽为 100 kHz 及最大输出功率为 3.7 dBm 的可调谐激光器 (TLS) 作为布里渊激光器的抽运光, 通过 50/50 的耦合器 (OC1) 后用掺铒光纤放大器 (EDFA) 对其进行放大。为了获得最大的布里渊增益, 在注入主谐振腔 (R1) 前放置偏振控制器 (PC1) 来调节抽运光与斯托克斯波的偏振态。随后抽运光通过光环形器 (Cir) 沿逆时针方向注入到 R1 中, 且仅环绕谐振腔一圈, R1 配以长度为 50m 的单模光纤。反馈光纤环由一个对偏振不敏感的光纤耦合器 (OC2) 和一段单模光纤组成, OC2 的分光比为 50:50, 单模光纤长度选为传统单纵模布里渊激光器的长度 (10 m)。偏振控制器 (PC2) 用来调节 R1 偏振态, 以保证激光器处于单模运行状态。当抽运光功率高于受激布里渊散射的阈值时, 一部分布里渊激光通过耦合器 (OC3) 的 1% 口注回 OC1, 通过 EDFA 放大后再注入 R1 中, 激发下一级布里渊激光, 而另一部分通过 OC3 的

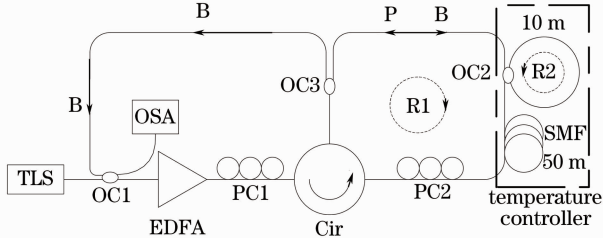


图 1 基于反馈光纤环的多波长布里渊掺铒激光器结构原理图

Fig. 1 Experimental setup of FFL-based MW-BEFL

99% 口沿逆时针方向多次环绕谐振腔 R1。激光器的输出通过 OC1 的另一端口, 进入分辨率为 0.05 nm 的光谱仪 (OSA)。考虑到环境对激光器稳定性的影响, 将激光器主体部分置于精度优于 0.5 °C 的恒温控制系统中。

### 2.2 实验原理

图 2 为基于反馈光纤环的多波长布里渊掺铒光纤激光器运行原理图。根据维纳效应可知, 当选用适当的环长匹配对时, 每一级斯托克斯波可以处于单模运行状态。布里渊频移量  $\nu_B$  与抽运频率  $\nu_P$  的关系可以表示为<sup>[2-3]</sup>

$$\nu_B = (2\nu_A/c)\nu_P, \quad (1)$$

式中  $\nu_A$  为声速,  $c$  为光速,  $\nu_B$  在 1550 nm 处大约为 10 GHz。自由频谱宽 (FSR)  $R_{fs,m} = \frac{c}{nL_m}$  ( $m=1, 2$ ) 是 R1 和 R2 的 FSR,  $L_m$  ( $m=1, 2$ ) 为 R1 和 R2 的环长,  $m=1, 2$  为整数, 有效 FSR 表示为<sup>[2]</sup>

$$R_{fs,E} = n_1 R_{fs1} = n_2 R_{fs2}. \quad (2)$$

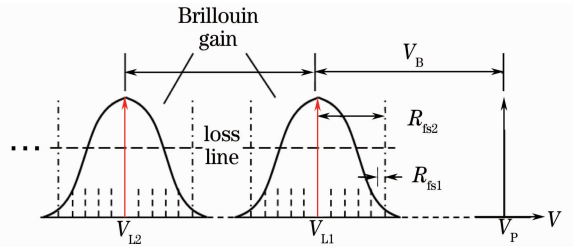


图 2 基于反馈光纤环的多波长布里渊掺铒光纤激光器运行原理图

Fig. 2 Principle of FFL-based MW-BEFL operation

因此当某一频率达到布里渊增益最大值并且同时满足 R1 和 R2 的谐振条件时, 激光器  $\nu_{L1}$  模式起振。当抽运光足够大时, 可以产生高阶斯托克斯波  $\nu_{L,n}$  ( $n=2, 3, \dots$ )。另外可知, 此布里渊激光器的线宽  $\Delta\nu_{L,n}$  与抽运光线宽  $\Delta\nu_P$  关系可表示为<sup>[3]</sup>

$$\Delta\nu_{BFL} = \frac{\Delta\nu_P}{[1 + (\gamma_A/\Gamma_C)^2]^2} \Delta\nu_{L,n} = \frac{\Delta\nu_{L,(n-1)}}{[1 + (\gamma_A/\Gamma_C)^2]} = \frac{\Delta\nu_{L,(n-2)}}{[1 + (\gamma_A/\Gamma_C)^2]^2} = \dots = \frac{\Delta\nu_{L1}}{[1 + (\gamma_A/\Gamma_C)^2]^{n-1}} = \frac{\Delta\nu_P}{[1 + (\gamma_A/\Gamma_C)^2]^n}, \quad (3)$$

式中  $\gamma_A = \pi\Delta\nu_B$  (布里渊增益带宽  $\Delta\nu_B = 20$  MHz) 为声波衰减率,  $\Gamma_C = -c \ln R/nL_t$  为腔损耗率,  $L_t = L_1 + L_2$  为总环长。假设只有 R1 提供增益, 耦合比  $R=0.495$ , 理论上一级斯托克斯波的线宽大约为抽运光线宽的百分之一。用延时干涉法对其进行了测试, 选 20 km 单模光纤作为延时, 图 3(a)、(b) 为电

谱仪获取结果,可知添加反馈光纤环后边模抑制比提高了 45 dB,图 3(c)为洛伦兹拟合后的结果,线宽

值为 3.23 kHz,与理论分析吻合。

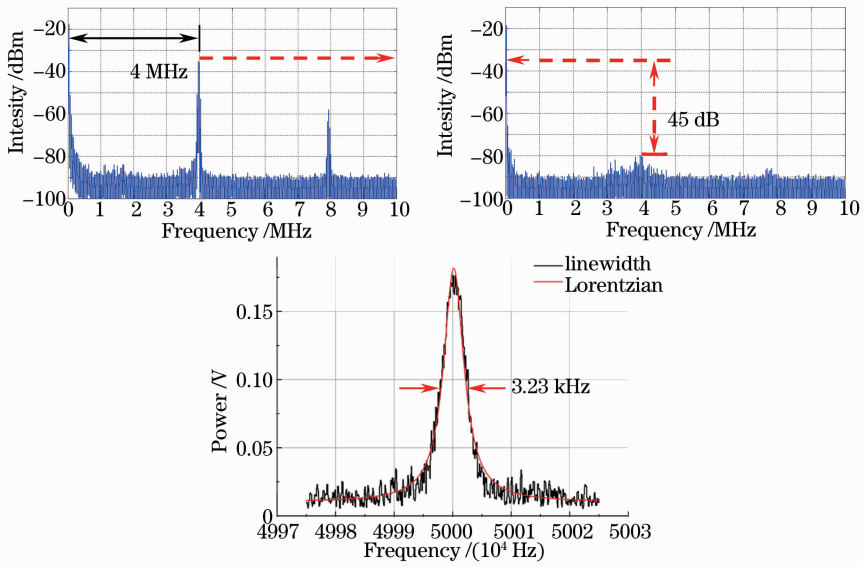


图 3 第一阶斯托克斯频谱图及线宽测试

Fig. 3 Result of measurement for the first Stokes frequency spectrum and linewidth

### 3 结果与分析

图 4 为不同 EDFA 功率下产生的多波长曲线图。将 TLS 波长设置为 1549.8 nm,功率为最大功率 3.6 dBm,当 EDFA 的功率置于 15 dBm 时,可以观察到,没有斯托克斯波产生。而当 EDFA 功率调至 24 dBm 时,激发出功率为 -6 dBm 的一阶斯托克斯波及功率为 -15 dBm 的二阶斯托克斯波;当 EDFA 功率增加至 29 dBm 时,产生三、四阶斯托克斯波以及很弱的二阶反斯托克斯波;继续增加 EDFA 功率至 31.5 dBm 时,由于级联受激布里渊散射及四波混频效应,产生了更高阶的斯托克斯波及反斯托克斯波,有 11 个斯托克斯波及 4 个反斯托克斯波,且每个波长之间间隔为 0.084 nm(对应 10.5 GHz)。由于一阶反斯托克斯波主要是由抽运

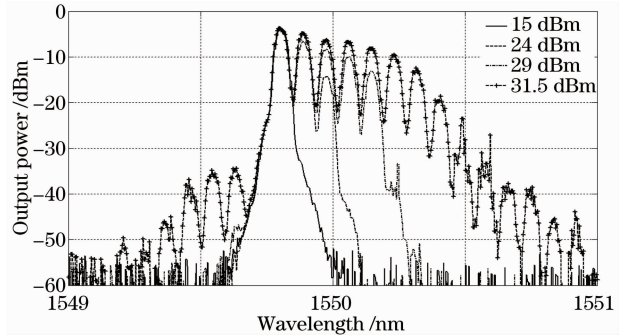


图 4 不同 EDFA 功率条件下产生的多波长

Fig. 4 Multiwavelength generation in FFL-based MW-BEFL with different EDFA powers

光与一阶斯托克斯波的四波混频效应产生,因此其峰值功率很小,从图中亦可看出 EDFA 功率增至 31.5 dBm 时一阶反斯托克斯波也没有出现。

图 5(a)、(b)分别为 7 个斯托克斯波和 4 个反斯

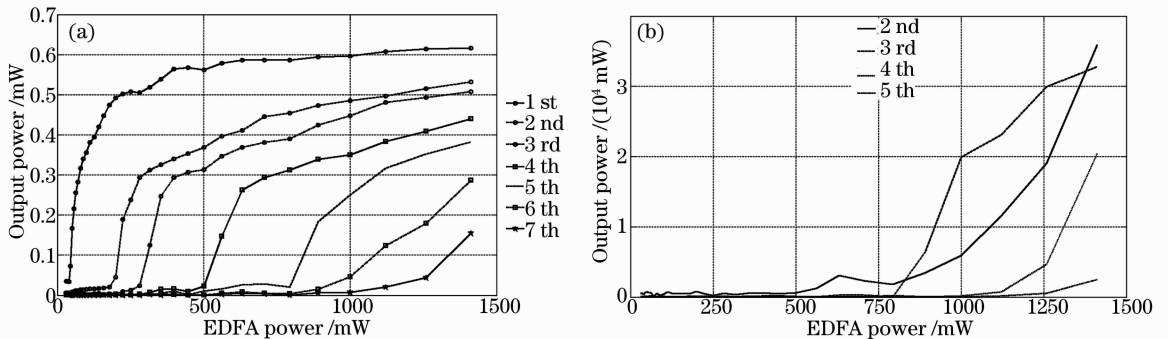


图 5 不同 EDFA 功率下(a)斯托克斯波及(b)反斯托克斯波峰值功率曲线

Fig. 5 Peak power of (a) Stokes and (b) anti-Stokes lines plotted versus EDFA power

托克斯波峰值功率与 EDFA 功率关系曲线图。对于斯托克斯波,当二阶斯托克斯波出现时,一阶斯托克斯波达到了饱和状态;同样地,当三阶斯托克斯波出现时,二阶斯托克斯波达到饱和状态。可推断,当第  $n$  阶斯托克斯波产生时就会减小第  $n-1$  阶斯托克斯波的功率。对于反斯托克斯波,当 EDFA 增至一定数值时,二阶反斯托克斯波峰值功率快速增加,同样的现象在其他高阶反斯托克斯波也可以观察到。

为了研究基于反馈环的多波长的可调性,将 TLS 功率调至 3.6 dBm, EDFA 的功率调至 31.5 dBm。通过调节 PC1 及改变 TLS 的波长,获得了 50 nm(1520~1570 nm)连续可调范围,如图 6 所示,并且在整个调节过程中,增益带宽保持恒定。讨论了输出功率的稳定性。影响 BFL 稳定的主要因素是温度系数,引起发生跳模的温度范围可表示为<sup>[16]</sup>

$$\Delta T_{\text{mode-hopping}} \approx R_{f_s, \min} / \nu_B \left( \frac{1}{\nu_B} \frac{\partial \nu_B}{\partial T} + \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial T} + \frac{1}{L} \frac{\partial L}{\partial T} \right), \quad (4)$$

式中,取主腔对应的基频  $R_{f_s, \min} = 4$  MHz,对于单模光纤来说,长度波动对应的温度系数为  $(1/L)(\partial L / \partial T) = 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ , 1550 nm 波段处布里渊频移温度系数为  $\partial \nu_B / \partial T = 1.04$  MHz/ $^\circ\text{C}$ , 折射率温度系数为  $\partial n / \partial T \approx 1.2 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ 。可求得发生模式跳变的温度范围为 3.78  $^\circ\text{C}$ , 此温度变化量低于温控系统的最小变化量,所以将恒温系统置于 25  $^\circ\text{C}$ , 此精度可以保证激光器输出频率不会发生跳模。

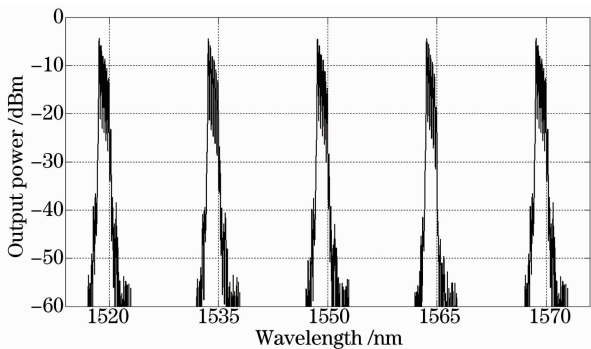


图 6 基于反馈光纤环的多波长布里渊掺铒光纤激光器可调性

Fig. 6 Wavelength tuning process in FFL-based MW-BEFL

## 4 结 论

采用反馈光纤环的结构,搭建可调谐多波长布里渊掺铒光纤激光器,主腔长度为 50 m,反馈光纤

环长度为 10 m,可以保证每一阶斯托克斯波和反斯托克斯波处于单纵模运行状态,并添加温控系统消除外界干扰。测得第一阶斯托克斯波具有 45 dB 的边模抑制比和 3.43 kHz 的线宽,激光器可调谐范围为 50 nm,且输出功率稳定,为多波长光纤激光器提供一定的参考。

## 参 考 文 献

- Zhan Li, Gu Zhaochang, Xing Liang, *et al.*. Advances of fiber Brillouin lasers and amplifiers and their applications[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(4): 901-911.  
詹黎, 顾照昶, 邢亮, 等. 光纤布里渊激光器和放大器的研究进展及其应用[J]. 中国激光, 2010, 37(4): 901-911.
- L F Stokes, M Chodorow, H J Shaw. All-fiber stimulated Brillouin ring laser with submilliwatt pump threshold[J]. Opt Lett, 1982, 7(10): 509-511.
- S Smith, F Zarinetchi, S Ezekiel. Narrow-linewidth stimulated Brillouin fiber laser and applications[J]. Opt Lett, 1991, 16(6): 393-395.
- Y J Song, L Zhan, S Hu, *et al.*. Tunable multiwavelength Brillouin-erbium fiber laser with a polarization-maintaining fiber Sagnac loop filter [J]. Photonics Technology Letters, IEEE, 2004, 16(9): 2015-2017.
- 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.
- M R Shirazi, M Biglary, S W Harun, *et al.*. Bidirectional multiwavelength Brillouin fiber laser generation in a ring cavity [J]. Journal of Optics A: Pure and Applied Optics, 2008, 10(5): 055101.
- Y 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.
- L Jun, C Tao, S Junqiang, *et al.*. Double-Brillouin-frequency spaced multiwavelength generation in a ring Brillouin-erbium fiber laser[J]. Chinese Physics Letters, 2013, 30(2): 024205.
- 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]. Journal of the Optical Society of America B, 2009, 26(9): 1675-1678.
- L Zhang, Z X Zhang, Z W Xu. A tunable multiwavelength Brillouin fiber laser with a semiconductor optical amplifier[J]. Laser Physics, 2013, 23(4): 045102.
- S Pan, X Zhao, C Lou. Switchable single-longitudinal-mode dual-wavelength erbium-doped fiber ring laser incorporating a semiconductor optical amplifier[J]. Opt Lett, 2008, 33(8): 764-766.
- 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.
- Zhao Junfa, Yang Xiufeng, Liu Zhuoli, *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.
- Miao Xuefeng, Wang Tianshu, Zhou Xuefang. A tunable multiwavelength Brillouin-erbium fiber laser [C]. 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.

15 P Nicati, K Toyama, S Huang, *et al.*. Temperature effects in a Brillouin fiber ring laser[J]. Opt Lett, 1993, 18: 2123–2125.

栏目编辑: 宋梅梅

## 高功率 2.97 $\mu\text{m}$ 中红外被动调 Q 掺铒 ZBLAN 光纤激光器

中红外调 Q 脉冲光纤激光器在光电对抗、激光微创手术、工业加工和非线性波长变换等领域有着重要的应用前景, 已引起了国内外研究者的高度关注。2012 年开始, 美国亚利桑那大学的 Zhu 等报道了利用  $\text{Fe}^{3+}:\text{ZnSe}$  晶体和石墨烯作为可饱和吸收体被动调 Q 掺  $\text{Er}^{3+}$  ZBLAN 光纤激光器和被动调 Q 掺  $\text{Ho}^{3+}$  ZBLAN 光纤激光器, 所实现的最长波长为 2.93  $\mu\text{m}$ , 最高脉冲能量为 2.0  $\mu\text{J}$ 。近年来, 我国在 2  $\mu\text{m}$  波段脉冲光纤激光器领域已取得了较大的发展, 但在 3  $\mu\text{m}$  波段的研究还较少。2012 年, 电子科技大学利用声光

调制器实现了主动调 Q 掺  $\text{Ho}^{3+}$  ZBLAN 光纤激光器, 脉冲宽度为 380 ns, 脉冲能量为 29  $\mu\text{J}$ , 中心波长达到了 3.005  $\mu\text{m}$ 。同时还实现了波长调谐范围为 2.970~3.015  $\mu\text{m}$  的主动调 Q 光纤激光器。最近, 本课题组将中红外波段半导体可饱和吸收镜 (SESAM) 应用于掺  $\text{Ho}^{3+}$  ZBLAN 光纤激光器中, 实现了 2.97  $\mu\text{m}$  被动调 Q 脉冲激光输出, 激光输出单脉冲能量超过了 6.65  $\mu\text{J}$ , 脉冲宽度为 1.68  $\mu\text{s}$ , 重复频率为 47.6 kHz, 这是目前国内已报道的中红外波段波长最长以及单脉冲能量最高的被动调 Q 光纤激光器。

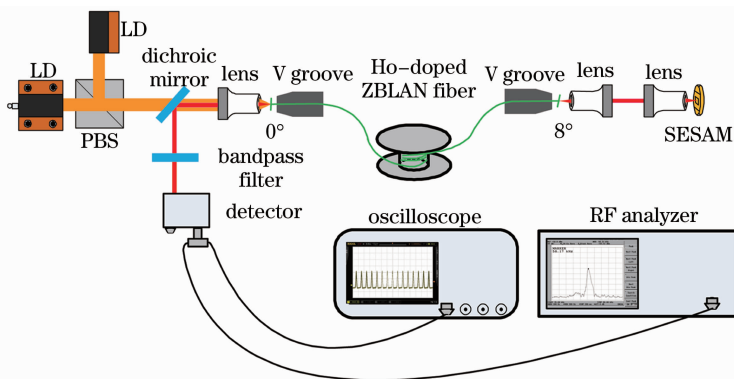


图 1 基于 SESAM 的被动调 Q 光纤激光器实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of experimental setup for SESAM-based passively Q-switched fiber laser

该被动调 Q 光纤激光器结构如图 1 所示, 抽运源为 1150 nm 的半导体激光器, 最大耦合进光纤的功率为 3.005 W。所采用的双包层 ZBLAN 光纤的内包层为 D 型, 直径为 125  $\mu\text{m}$ , 数值孔径为 0.50; 纤芯直径为 10  $\mu\text{m}$ , 数值孔径为 0.2。光纤的掺杂浓度为 1.5% (摩尔分数), 光纤的长度为 8.0 m, 以保证 90% 以上的抽运光被吸收。光纤的抽运耦合端垂直切割构成激光器的输出腔, 光纤另一端以 8° 角切割以防止形成复合腔并保证更多的激光被 SESAM 调制。在耦合进光纤的

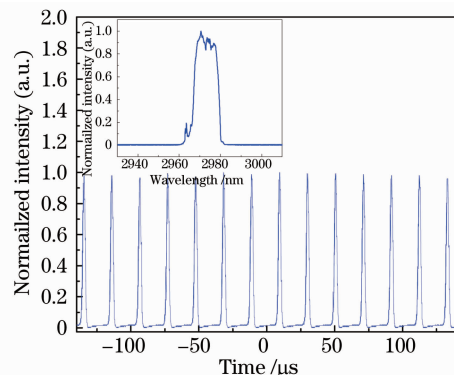


图 2 抽运功率 3.005 W 时的调 Q 脉冲序列和 (插图) 光谱

Fig. 2 Pulse sequence and optical spectrum (inset) at launched pump power of 3.005 W

抽运功率为 202 mW 时, 连续激光开始产生; 抽运功率达到 305 mW 时, 调 Q 脉冲开始产生并且一直稳定到最大抽运功率。图 2 是在抽运功率为 3.005 W 时的输出脉冲激光的波形图, 其重复频率为 47.6 kHz, 脉冲宽度为 1.68  $\mu\text{s}$ 。最高输出激光的平均功率为 316.7 mW, 脉冲能量为 6.65  $\mu\text{J}$ , 斜率效率为 12.1%, 测试得到的信噪比为 40 dB。脉冲激光输出光谱图如图 2 (插图) 所示, 其中心波长为 2971.5 nm, 半峰全宽 (FWHM) 为 12.05 nm。

罗鸿禹 李剑峰 何雨莲 王乐乐 刘永

(电子科技大学光电信息学院, 四川成都 610054)

\* E-mail: lijianfeng@uestc.edu.cn

收稿日期: 2013-11-12; 收到修改稿日期: 2013-12-09