

文章编号: 0258-7025(2009)04-0794-05

# 被动锁模光纤激光器的耦合输出比

赵 羽<sup>1</sup> 赵德双<sup>2</sup> 刘永智<sup>1</sup> 黄 琳<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 电子科技大学光电信息学院, 四川 成都, 610054; <sup>2</sup> 电子科技大学物理电子学院, 四川 成都, 610054;)

**摘要** 基于环形腔被动锁模光纤激光器的基本原理, 对影响其输出特性的关键因素——耦合输出比( $R$ )作了理论和实验研究。理论仿真结果表明, 要得到高质量的脉冲, 激光器腔内增益与耦合输出比存在一最佳比值, 小信号增益为 7.5 dB 时, 耦合输出比应在 30% 左右。实验中取 3 m 长的增益光纤, 分别采用 5%, 10%~40% 和 60%~90% 的耦合输出比搭建环形腔被动锁模光纤激光器。实验结果对比分析表明, 耦合输出比对激光器的输出特性有重要影响,  $R$  取 5%~10% 间时脉冲谱宽最宽(可达 25.4 nm)且谱宽调谐范围较大( $>12$  nm),  $R=10%$  和 30% 时脉冲波动幅度最小,  $R=70%$  左右时单脉冲能量最大(达 3.86 nJ)。另外, 取  $R=30%$ , 可在脉冲幅值波动较小的基础上获得最大的脉冲能量; 而  $R=10%$  时为保证脉冲波动小、谱宽宽和能量大的平衡点。取 3 m 长的增益光纤和  $R=10%$  的激光器, 获得了重复频率 15.87 MHz, 谱宽 25.4 nm, 单脉冲能量约 0.52 nJ 的脉冲激光, 这些特性不会受到工作台振动、激光器搬动及普通温度变化等因素的影响, 脉冲幅值存在约 4% 的波动。

**关键词** 激光器; 光纤激光器; 被动锁模; 稳定性; 耦合输出比

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093604.0794

## Output Coupling Ratio in Passively Mode-Locked Fiber Laser

Zhao Yu<sup>1</sup> Zhao Deshuang<sup>2</sup> Liu Yongzhi<sup>1</sup> Huang Lin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> School of Optoelectronic Information, University of Electronic Science and Technology,  
Chengdu, Sichuan 610054, China

<sup>2</sup> School of Physical Electronics, University of Electronic Science and Technology, Chengdu, Sichuan 610054, China

**Abstract** The impact of output coupling ratio in passively mode-locked fiber ring laser was studied based on basic principle of passively mode-locked fiber ring laser. Theoretical simulation shows that there is a best ratio between gain and output ratio. And the ratio should be 30% when the small single gain is 7.5 dB. Ratio( $R$ ) of 5%, 10% to 40%, and 60% to 90% was experimentally carried out when the length of gain fiber was 3 m. The experiments show that, when  $R=5%$  to 10%, spectrum width is the widest (about 25.4 nm) and tunable range of spectrum width is wider ( $>12$  nm). The fluctuation of pulse magnitude is the smallest when  $R=10%$  and 30%. The single pulse energy is the largest one (about 3.86 nJ) when  $R=70%$ . To get the highest pulse energy while keep the pulse stable the  $R$  should be 30%. To make the pulse spectrum wider, the pulse energy higher while keep the output stable, the  $R$  should be 10%. The fiber laser with  $R=10%$  and  $\text{Er}^{3+}$ -doped fiber(EDF) length of 3 m was experimentally carried out, with the repetition rates of 15.87 MHz, spectrum width of 25.4 nm and single pulse energy of 0.52 nJ, which wouldn't be impacted by librations of desk, movement of fiber laser or temperature variation. The fluctuation of pulse magnitude is 4%.

**Key words** lasers; fiber laser; passive mode-locking; stabilization; output coupling ratio

收稿日期: 2008-04-22; 收到修改稿日期: 2008-08-03

基金项目: 国家自然科学基金(60736038), 国家 863 计划(2007AA01Z269)和国防预研基金(9140A02040106DZ0222)资助课题。

作者简介: 赵 羽(1981-), 男, 博士研究生, 主要从事脉冲光纤激光器及其应用方面的研究。

E-mail: yuzhao@uestc.edu.cn.

导师简介: 刘永智(1942-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光信息处理与光纤传感方面的研究。

E-mail: yzliu123@uestc.edu.cn

## 1 引言

被动锁模光纤激光器结构简单,可以直接产生变换极限的超短光脉冲,在未来超高速、长距离光纤通信、超快现象、光纤传感、新一代频标测量等方面有着十分广阔的应用前景,近 10 年取得了快速的发展<sup>[1~8]</sup>。然而,被动锁模光纤激光器的稳定性一直没有得到很好的解决,在很大程度上限制了它的广泛应用。在不同的实验研究中发现,其锁模脉冲幅值、脉冲宽度在不断地改变,并且重复频率很难控制,激光谐振腔体中可以同时存在多个脉冲,各个脉冲间隔不完全相等<sup>[5~9]</sup>。为适应被动锁模光纤激光器在实际工程中的应用,不断提高其工作稳定性已经显得十分必要。

本文基于被动锁模光纤激光器的基本原理,对影响其稳定性的关键因素:耦合输出比  $R$  作了理论和实验研究,实验上分别获得了增益光纤长度为 3 m 时,  $R$  取 5%, 10%~40%, 60%~90% 的锁模脉冲,通过理论和实验结果的对比分析分别确定了优化脉冲波动幅度、光谱宽度或单脉冲能量所对应的耦合输出比。

## 2 实验装置与原理分析

### 2.1 实验装置

环形腔被动锁模掺  $\text{Er}^{3+}$  光纤激光器实验装置如图 1 所示。其腔体主要由高掺杂浓度掺  $\text{Er}^{3+}$  光纤,光纤起偏器(Polarizer),光纤隔离器(ISO),2 个光纤偏振控制器 PC1 和 PC2,980 nm/1550 nm 波分复用器(WDM)和输出耦合器(output coupler)组成。掺  $\text{Er}^{3+}$  光纤长度为 3 m,对 980 nm 的吸收为 15 dB/m,对应小信号增益约 7.5 dB;抽运源为高稳定带尾纤的激光二极管(LD),中心输出波长为 980 nm,最大输出功率约为 120 mW,输出功率波动小于 0.5 mW。为尽量降低腔体插入损耗和连接损耗,整个激光器采用全光纤器件,并使用裸纤熔接,总长度约为 13 m。为保护探测器,锁模脉冲输出后经 17dB 的衰减,再由 50:50 耦合器分成两束用光谱分析仪(spectrum analyzer)和示波器(oscillograph)观测。

锁模的基本原理如下:信号光经过起偏器变为线偏光,再通过 PC1 转换成椭圆偏振光。椭圆偏振光可以认为是强度不同的左旋与右旋圆偏振光的合成,当这两列旋转方向相反的偏振光在腔体中传播时,会因光纤的正弦相位调制(SPM)和交叉相位调

制(XPM)作用而产生不同的非线性相移。而非线性相移量与脉冲光场强度有关,因此,脉冲的不同部位会因强度不同而累积不同的非线性相移量;相应地,其合成矢量偏振态会产生不同程度的偏振旋转。当其再次通过起偏器时,就会引发出一个偏振相关自幅度调制可饱和吸收体效应,进而实现锁模脉冲窄化,形成超短脉冲。

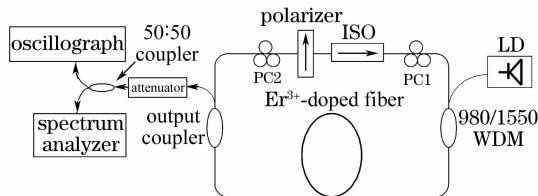


图 1 环形腔被动锁模激光器实验结构

Fig. 1 Structure of passively mode-locked fiber ring laser

根据原理,可将环形腔体分为四个部分:非线性偏振旋转可饱和吸收体、增益光纤、普通光纤和耦合输出器。非线性偏振旋转结构可视为快速可饱和吸收体锁模器件,它对锁模光脉冲的调制( $M$ )通常等效为<sup>[9]</sup>

$$M = -\alpha_s + \gamma_3/\gamma |U|^2 - \gamma_5/(\gamma^2 L_d) |U|^4, \quad (1)$$

式中  $U$  为归一化脉冲包络,  $\alpha_s$  为可饱和吸收体所引入的线性损耗,  $\gamma_3$  表示等效可饱和吸收体的三阶非线性增益系数,  $\gamma_5$  为可饱和吸收体的五阶非线性调制系数;  $\gamma$  为光纤非线性 Kerr 系数,  $L_d = t_0^2/|\beta_2|$  为色散长度,  $\beta_2$  为光纤群速度色散(GVD)系数,  $t_0$  为腔内脉冲的时间宽度。

在增益光纤中,脉冲满足归一化非线性薛定谔(NLS)方程<sup>[9,10]</sup>

$$i \frac{\partial U}{\partial \xi} - \frac{1}{2} \text{sgn}(\beta_2) \frac{\partial^2 U}{\partial \tau^2} + |U|^2 U = \left[ \frac{i}{2} g L_d \left( 1 + \frac{t_2}{t_0} \frac{\partial^2 U}{\partial \tau^2} \right) \right] U, \quad (2)$$

式中  $\xi$  和  $\tau$  分别为归一化空间距离和时间。  $g(z, t) = \frac{g_0}{1 + P_{av}/P_{sat}}$  为增益光纤归一化增益系数,其中  $g_0$  为小信号增益,  $P_{av} = \frac{P_0}{T} \int_{-T/2}^{T/2} |U|^2 dt$  为长序列脉冲平均光功率,  $P_{sat}$  为增益介质的饱和功率;  $t_2$  为极化弛豫时间,它与光脉冲远离增益峰谱分量的增益减小有关。

在普通光纤中,脉冲传输满足的 NLS 方程为<sup>[10]</sup>

$$i \frac{\partial U}{\partial \xi} - \frac{1}{2} \text{sgn}(\beta_2) \frac{\partial^2 U}{\partial \tau^2} + \frac{L_d}{L_n} |U|^2 U = 0, \quad (3)$$

式中  $L_n = 1/(P_0 \gamma)$  为非线性长度,  $P_0$  为脉冲峰值功率。

耦合输出器对腔内造成的损耗可表示为

$$U = U^* (1 - R)^{1/2} \quad (4)$$

式中  $R$  为耦合器耦合输出比。光脉冲在腔内经过这四部分的放大、损耗、传输、展宽和窄化作用,多次循环后达到动态平衡,这可通过以下仿真结果看出。

## 2.2 数值仿真及结果分析

通过(1)~(4)式,结合分步有限差分法(SSFD)对腔内光脉冲的传输进行了数值仿真,使用的参数值为:激光器腔长 13 m,增益光纤长 3 m,增益带宽 30 nm,小信号增益 7.5 dB,归一化增益介质的饱和功率 0.33;普通光纤和增益光纤的色散系数分别为  $-20 \text{ ps}^2/\text{km}$  和  $25.5 \text{ ps}^2/\text{km}$ ,  $\gamma, \gamma_3, \gamma_5$  和  $\alpha_s$  分别为  $2.6 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ ,  $0.39 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ ,  $0.12 \text{ W}^{-2} \cdot \text{km}^{-1}$  和  $0.08 \text{ dBkm}^{-1}$ ;脉冲基本宽度为 500 fs,极化弛豫时间取 100 fs,峰值功率取归一化强度。

图 2 所示的是锁模光纤激光器在耦合输出比分别为 10%, 30%, 90% 时的脉冲传输图像,可以看

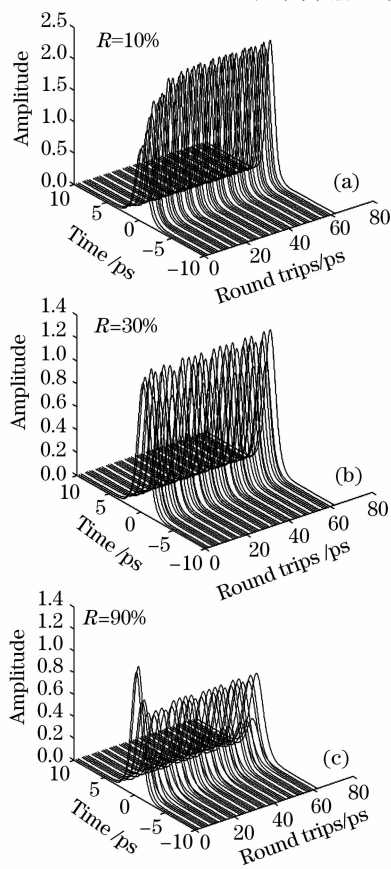


图 2 锁模光纤激光器在不同耦合输出比下的锁模脉冲序列图像

Fig. 2 Output pulse of phase-locked fiber laser with different output ratio

出,随着  $R$  的增加,脉冲幅度的波动出现了一个先减小后增加的过程。其中,  $R = 30\%$  时波动最小,脉冲形状几乎能够保持输入时的状态。而  $R = 10\%$  时出现了脉冲幅度的增大和脉宽的压缩,  $R = 90\%$  时出现了脉冲幅度的降低和脉宽的展宽。

上述讨论中,通过改变耦合输出比改变了腔体能量的大小,另外还可以通过改变腔体增益来改变腔体能量。数值实验表明其效果是一样的,结果也基本相同。从上面的分析结果可以看出,如果要得到高质量的稳定脉冲,腔内增益与耦合输出比存在一最佳比值,对于 7.5 dB 的小信号增益系数,耦合输出比应在 30% 左右。

## 3 实验结果与分析

按照图 1 所示结构搭建被动锁模环形腔掺  $\text{Er}^{3+}$  光纤激光器系统,并通过仔细调节偏振控制器可以获得锁模脉冲输出,如图 3 所示。实验中使用的是 ANDO6319 光谱仪和 SDA3000A 数字示波器,光电探测器为中电 44 所的 10 GHz 宽带高速探测器。实验中,通过改变耦合输出比  $R$ ,分别获得了  $R = 5\%, 10\%, 20\%, 30\%, 40\%, 60\%, 70\%, 80\%$  和  $90\%$  的锁模脉冲,其中,  $R = 90\%$  情况下获得的锁模脉冲是目前报道过的锁模脉冲激光器中采用的耦合输出比最大的,但只要有足够的抽运功率支持,可以获得  $R = 95\%$  以上的锁模脉冲。

图 3 为  $R = 10\%$  时测得的脉冲序列,可见其周期约 63 ns,脉宽约 200 ps,对应重复速率为 15.8 MHz。其他 8 种  $R$  值下测得的脉冲周期与脉宽与此类似,其区别主要在脉冲的幅值波动上。

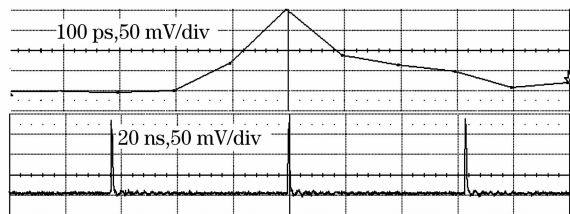


图 3  $R = 10\%$  时在不同的示波器量程下测得的脉冲序列  
Fig. 3 Pulse detected with oscillograph at different ranges when  $R = 10\%$

图 4 为各种耦合输出比下激光器的输出光谱。从图中可以看出,各个光谱的中心波长都分布在 1560 nm 左右。其中  $R = 10\%$  时光谱的 3 dB 谱宽最大(达 25.4 nm),根据 sech 脉冲近似以及傅里叶变换极限估计,其半峰全宽(FWHM)约 120 fs。而通过示波器测得其脉宽约为 200 ps,这是因为此时

激光器腔内存在较大的色散和啁啾效应,脉宽展宽较严重。其次,光谱中没有出现尖锐的频谱边带突起,频谱边带以细密的形式分布在光谱的两边。而且随着  $R$  的增大,光谱宽度有一个渐变的过程,其趋势可从图 5 中看出。

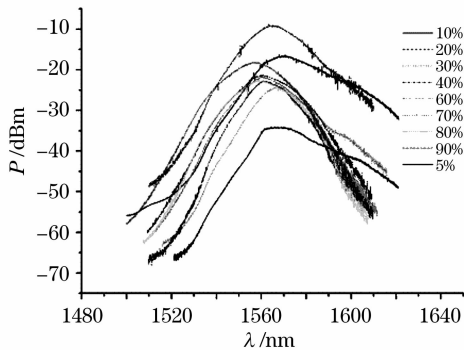


图 4 不同耦合输出比下激光器的输出光谱

Fig. 4 Output spectrum of fiber laser with different output ratio

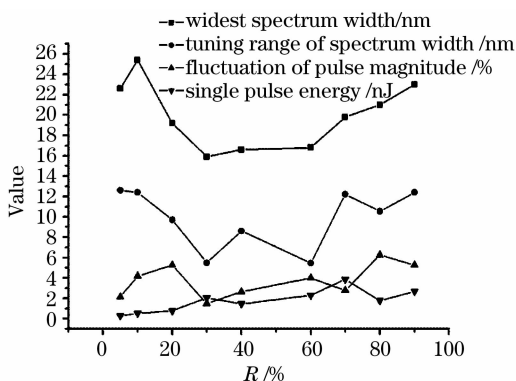


图 5 光谱最大谱宽、谱宽调谐范围、脉冲波动幅度和单脉冲能量随  $R$  的增加而变化

Fig. 5 Widest spectrum width, tuning range of spectrum width, fluctuation of pulse magnitude, and single pulse energy with different output ratio

图 5 为  $R$  从 5% 增加到 90% 的过程中,最大光谱宽度、谱宽调谐范围、脉冲波动幅度和单脉冲能量的变化规律。可以看出单脉冲能量和脉冲波动幅度的变化趋势相反。其中,单脉冲能量是在抽运功率调到 120 mW 时测得的,其最高值出现在  $R = 70%$  处,此时激光器平均输出光功率达 61 mW,对应约 3.86 nJ 的脉冲能量,属于同类型最大的激光器之一。 $R = 10%$  和  $30%$  时,脉冲波动幅度最小(这验证了前文的理论仿真结果),且  $R = 30%$  时单脉冲能量较大,达 2.05 nJ; $R = 20%$  和  $R = 80%$  时单脉冲能量较小,脉冲波动幅度最大。这是因为若脉冲幅度波动的绝对值不变,单脉冲能量减小后,波动的相

对值就会增大。

从图 5 还可以看出,最大谱宽和谱宽调谐范围随耦合输出比的增加而变化的趋势相近。其中  $R = 10%$  时获得的光谱宽度最大(为 25.4 nm),这也是报道过的谱宽最大的 NPE 型锁模光纤激光器之一;其次谱宽较宽的为  $R = 90%$  和  $R = 5%$ ,这三个  $R$  值下光谱宽度的可调谐范围达到了 12 个 nm 以上; $R = 30%$  时谱宽最小,为 15.9 nm,调谐范围为 5.5 nm。这是因为当谱宽的基数减小时,意味着其调谐的上限在降低,所以调谐的范围就会减小。

另外,  $R$  的改变对激光器的连续工作稳定性也有影响。工作稳定性主要是指激光器长时间(5 h 以上)锁模运转时,脉冲幅值、重复频率等参量在受到工作台振动、激光器搬动以及温度变化等因素的影响下波动的情况,以及失锁后恢复模式锁定的难易程度。相比而言,在  $R = 10% \sim 20%$  时,工作状态最稳定;随着  $R$  的增加,此稳定性逐渐减小,并且开始出现失锁的现象(这也与数值仿真结论相近),特别是在  $R > 80%$  之后,工作平台的振动都有可能引起失锁,这是由谐振腔内单次循环的损耗过大,对模式锁定的状态干扰过大引起的。而  $R < 10%$  后的锁模脉冲的不稳定性主要表现在,要通过偏振调制获得锁模起振变得困难,这是因为腔内能量太大,引起过强的色散波干扰,影响了激光器的自起振。

通过以上分析可知,取  $R = 30%$  适宜于在脉冲波动较小的基础上获得最大的脉冲能量;而  $R = 10%$  时为保证脉冲波动小、谱宽宽和能量大的平衡点。取 3 m 长的增益光纤和  $R = 10%$  的激光器,获得了重复频率 15.87 MHz,谱宽 25.4 nm 单脉冲能量约 0.52 nJ 的脉冲激光器,经过多次 5 h 连续运转测试,以上输出特性不会受到工作台振动、激光器搬动以及普通温度变化等因素的影响,脉冲幅值有约 4% 的波动。

## 4 结 论

就耦合输出比对被动锁模光纤激光器输出特性的影响进行了理论和实验分析。理论仿真结果表明,腔内增益与腔体损耗(即耦合输出损耗)存在一最佳比值;理论同实验结果的对比分析得出了激光器脉冲波动幅度、光谱宽度和脉冲能量随耦合输出比的增加而变化的规律,并得出了使脉冲波动小、谱宽宽和脉冲能量大的各种最佳耦合输出比值。其中,耦合输出比为 70% 时单脉冲能量最大,达 3.86 nJ,但此时激光器连续工作的稳定性会受到高

耦合损耗的影响。下一步的工作将深入研究激光器在高耦合输出比下的锁模机制,比如,要采用较大的耦合输出比值则需要激光器内部的偏振态保持得更好,腔体应换用保偏光纤,并降低外界干扰对锁模的影响等。

### 参 考 文 献

- 1 Zhang Xin, Chen Wei, Liu Yu *et al.* . Single longitudinal mode fiber laser with multiple ring cavities and its frequency stabilization[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(1):50~54  
张欣,陈伟,刘宇等.单纵模多环形腔掺铒光纤激光器及其稳定性[J].中国激光,2007,**34**(1):50~54
- 2 Daru Chen, Shan Qin. Injection-switchable erbium-doped fiber laser with two output ports[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(2):96~98
- 3 Xia Jiangzhen, Cai Haiwen, Ren Hong *et al.* . Study on output characteristics of erbium-doped fiber ring lasers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(7):823~827  
夏江珍,蔡海文,任虹等.掺铒光纤环形激光器输出特性的研究[J].光学学报,2003,**23**(7):823~827
- 4 Wang Jing, Zhang Hongming, Zhang Jun *et al.* . Passively mode-locked fiber laser with a semiconductor saturable absorber mirror[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(2):163~165  
王旌,张洪明,张璠等.基于饱和吸收镜的被动锁模光纤激光器[J].中国激光,2007,**34**(2):163~165
- 5 D. Y. Tang, B. Zhao, D. Y. Shen *et al.* . Compound pulse solitons in a fiber ring laser [J]. *Phys. Rev. A*, 2003, **68**(1): 013816
- 6 D. J. Richardson, R. I. Lanming, D. N. Payne *et al.* . Pulse repetition rates in passive selfstarting, femtosecond, soliton fibre laser [J]. *Electron. Lett.*, 1991, **27**(16): 1451~1453
- 7 Liu Dongfeng, Chen Guofu, Wang Xianhua. Experimental study of selfstarting passively mode-locked Er<sup>3+</sup> doped fiber ring laser [J]. *Science in China A*, 1999, **29**(7): 656~661  
刘东峰,陈国夫,王贤华.自起振被动锁模掺 Er<sup>3+</sup> 光纤环形腔孤子激光器的试验研究[J],中国科学 A 辑, 1999, **29**(7): 656~661
- 8 B. Zhao, D. Y. Tang, D. Y. Shen *et al.* . Compound pulse solitons in a passively mode-locked fiber laser [C]. *SPIE*, 2002, **4906**:212~219
- 9 Yang Xianglin, Wen Yangjing. Fundamental Theories of Optical Fiber Soliton Communications [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2000. 114~119  
杨祥林,温扬敬.光纤孤子通信理论基础[M].北京:国防工业出版社,2000.114~119
- 10 Govind P. Agrawal. Nonlinear Fiber Optics & Applications of Nonlinear Fiber Optics [M]. Jia Dongfang Transl. Beijing, Publishing House of Electronics Industry., 2001. 26~30, 94~100, 381~391  
Govind P. Agrawal. 非线性光纤光学原理及应用[M].贾东方译,北京.电子工业出版社,2001.26~30,94~100,381~391