

文章编号: 0258-7025(2008)05-0655-05

利用半导体可饱和吸收镜实现的全光纤 被动锁模激光器

谷庆元 侯 静 程湘爱 许晓军

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 设计了包含半导体可饱和吸收镜(SESAM)、单包层高掺 Yb 增益光纤和光纤布拉格光栅(FBG)的全光纤激光器,实现了皮秒级,中心波长约为1064 nm,3 dB线宽约为0.4 nm,重复频率约为17.3 MHz的稳定的连续(CW)被动锁模脉冲输出。观察并分析了输出激光随抽运功率升高和降低的变化过程,升高过程中连续锁模启动时抽运功率阈值为50 mW,降低过程中能够实现稳定锁模的最小抽运功率为37 mW。随着抽运功率的加大,首先出现调 Q 现象,然后出现连续锁模,并伴有很小幅度的调 Q 现象。继续加大功率,脉冲会出现分裂;抽运功率越大,单脉冲分裂成的多脉冲越多,多脉冲调制越强。在较少脉冲演变为较多脉冲的过程中,会出现调制的不稳定性。当抽运功率足够大时,会出现多脉冲个数及峰值的不稳定现象。半导体可饱和吸收镜被动锁模会使输出激光谱线加宽,随着抽运功率的加大和锁模的加强,输出激光谱线逐渐加宽。随着脉冲分裂个数增多,单个脉冲脉宽变窄。在多脉冲调制阶段,外界微扰会对系统产生一定影响。

关键词 激光器;脉冲激光器;被动锁模;半导体可饱和吸收镜;全光纤;调 Q;多脉冲调制

中图分类号 TN 248.1 **文献标识码** A

All-Fiber Passive Mode-Locked Laser Realized by Semiconductor Saturable Absorber Mirror

Gu Qingyuan Hou Jing Cheng Xiang'ai Xu Xiaojun

(College of Opto-Electronic Science and Engineering, National University of
Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract Picosecond-scale, 1064 nm central wavelength, 0.4 nm 3 dB spectrum width, 17.3 MHz steady continuous wave (CW) passive mode-locked fiber laser is realized using semiconductor saturable absorber mirror (SESAM), highly-doped Yb fiber and fiber Bragg grating (FBG). In the process of increasing pump power, the pump power threshold of mode-locking start-up is 50 mW, while in the process of decreasing pump power, the minimum pump power of steady mode-locking is 37 mW. Q-switched pulse, CW passive mode-locked pulse with Q-switch fluctuation of little amplitude, double-pulse modulation, tri-pulse modulation and more pulse modulation appearing successively as the pump power are escalated. The modulation becomes unsteady in the process of splitting. The number and peak value of split pulses present uncertainty when the pump energy is high enough. The higher pump power and stronger mode-locking, the wider the spectra are. It is demonstrated that more split pulses mean narrower autocorrelation trace and shorter pulse width. The environmental disturbance may have some effect on the multi-pulse modulation.

Key words laser; pulse laser; passive mode-locking; semiconductor saturable absorber mirror; all-fiber; Q-switch; multi-pulse modulation

1 引 言

超短脉冲激光经放大器功率放大后,注入具有

高非线性的光子晶体光纤中,可实现超连续(CW)谱的输出。目前超短脉冲激光器的研究以固体激光

收稿日期:2007-08-16;收到修改稿日期:2007-11-05

作者简介:谷庆元(1981—),男,河北人,硕士研究生,主要从事光纤激光器的研究。E-mail: gqy271@yahoo.com.cn

导师简介:侯 静(1975—),女,四川人,副教授,硕士生导师,主要从事光纤激光器的研究。E-mail: houjing25@sina.com

器居多,但固体激光器在光束质量、可靠性、体积大小、集成度以及工作环境要求等方面具有劣势。光纤激光器可避免固体激光器的劣势,从而使得光纤激光器在超短脉冲领域具有光明的应用前景。利用半导体可饱和吸收镜(SESAM)实现被动锁模的光纤激光器,可实现连续锁模脉冲输出,具有结构简单、性能稳定、可实现全光纤构架的独特优势,应用前景非常广阔^[1~9]。

2 实验原理及装置

利用半导体可饱和吸收镜实现的被动锁模光纤激光器,是以光纤和半导体可饱和吸收镜的非线性效应作为锁模机制,激光腔内无需任何主动器件,可实现自启动,且结构简单、性能稳定、响应时间小、插入损耗小。掺 Yb 光纤具有宽吸收带和宽发射带的特性,利用掺 Yb 光纤的激光器可实现高转换率和多波长可调谐输出。

图 1 为实验系统原理图。抽运源为 Lumics 生产的 LU0975M330-1001F10C 型激光二极管(LD),中心波长约 975 nm,变换功率,中心波长漂移很小,最大输出功率 330 mW,半峰全宽(FWHM)为 0.6 nm,尾纤输出。抽运源电源为 THORLABS 公司生产的 ITC510 型 LD 专用电源,具有温控作用,输出非常稳定。

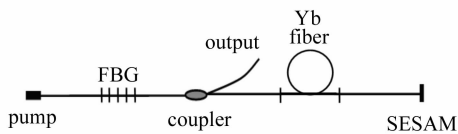


图 1 半导体可饱和吸收镜被动锁模脉冲全光纤激光器系统

Fig. 1 System of passive mode-locking all-fiber laser using SESAM

光纤布拉格光栅(FBG)中心波长为 1064.1 nm,中心波长处反射率为 94.3%,3 dB 线宽约为 0.15 nm。光纤耦合器的分光比为 30:70,输出端为 30%。增益光纤为 Liekki 公司生产的 976 nm 处吸收率 1200 dB/m 的高掺 Yb 光纤,长度约 60 cm。半导体可饱和吸收镜为 BATOP 公司生产的 SAM-1064-45-FC/PC 型可饱和吸收镜,吸收层为多量子阱结构,高反区(大于 40%)为 1020~1100 nm,调制深度为 25%,饱和通量为 $20 \mu\text{J}/\text{cm}^2$,恢复时间小于 10 ps,非饱和吸收损耗为 20%,尾纤输出,且具有色散补偿功能,如图 2 所示。

所用测量仪器分别为 Tektronix 公司生产的

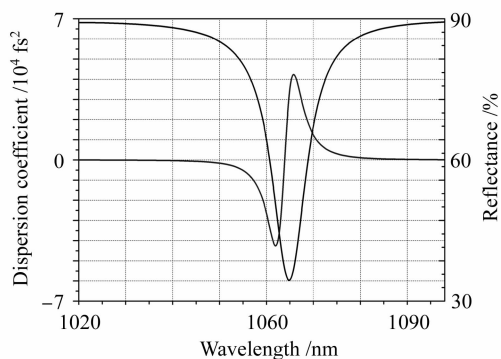


图 2 半导体可饱和吸收镜的反射率及色散系数

Fig. 2 Dispersion coefficient and reflectance of SESAM
TDS7154 数字示波器,Agilent 公司生产的 ATO-26005 光谱分析仪,APE 公司生产的 Pulse Check SM250ps 自相关仪和上海嘉慧光电子技术有限公司生产的 JW3201D 台式光功率计。

3 实验及结果分析

3.1 脉冲波形的变化

逐渐加大抽运功率至某一较高值,然后再逐渐降低功率至初始值,观察激光输出并总结其变换规律。

当抽运功率加至 31 mW 时,开始出现调 Q 现象,继续升高功率,调 Q 现象愈加明显,如图 3 所示。当抽运功率升高至 50 mW 时,出现稳定的连续锁模,重复频率约为 17.3 MHz,如图 4 所示。在继续升高功率的过程中,会出现多脉冲调制现象,单脉冲会依次分裂为稳定的双脉冲、三脉冲、四脉冲和五脉冲,如图 5 所示。但在功率升至 179 mW 时,开始出现多脉冲调制不稳定现象。主要表现为多脉冲个数在 1~6 个之间随机跳动,相应峰值极不稳定,且随着抽运功率的继续升高,跳动和不稳定加剧,这是一种“锁模极不稳定现象”(其实是半导体可饱和吸收镜被深度饱和)。发现在抽运功率加大过程中,会间

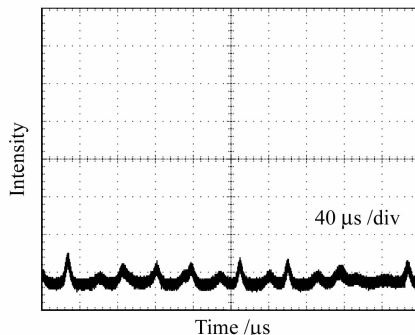


图 3 $W_{\text{pump}} = 44 \text{ mW}$ 时的调 Q 现象

Fig. 3 Q-switched phenomenon at $W_{\text{pump}} = 44 \text{ mW}$

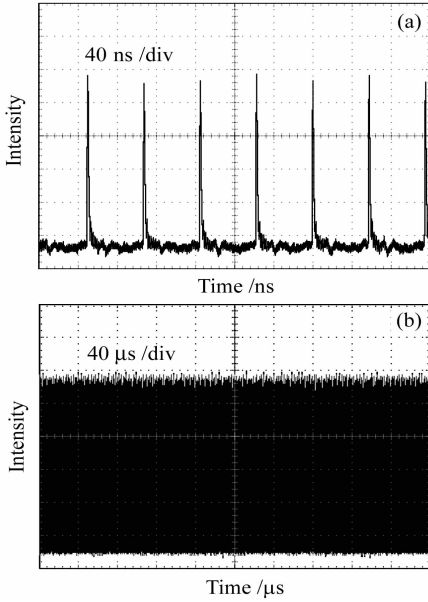


图 4 $W_{\text{pump}} = 50 \text{ mW}$ 时出现稳定连续锁模
 Fig. 4 Steady CW passive mode-locked pulse
 at $W_{\text{pump}} = 50 \text{ mW}$

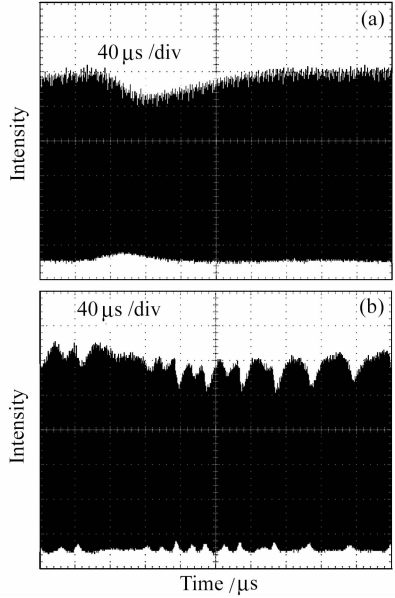


图 6 单脉冲分裂为双脉冲过程中 $W_{\text{pump}} = 97 \text{ mW}$ 时
 的调 Q 波动

Fig. 6 Q-switch fluctuation in the process of CW mode-locking to double-pulse modulation at $W_{\text{pump}} = 97 \text{ mW}$

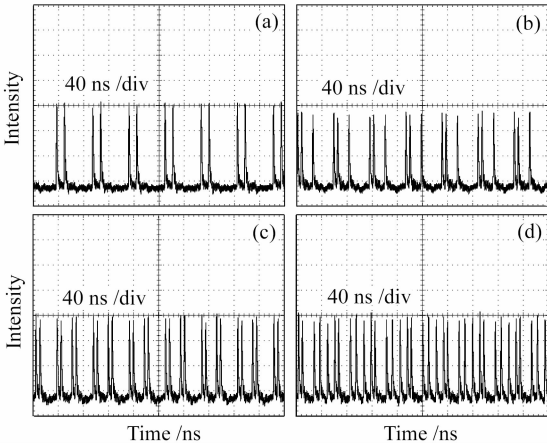


图 5 $W_{\text{pump}} = 104 \text{ mW}$ (a), 117 mW (b), 138 mW (c),
 158 mW (d)时稳定的双~五脉冲调制
 Fig. 5 Corresponding steady double ~ five pulse
 modulation at $W_{\text{pump}} = 104 \text{ mW}$ (a), 117 mW (b),
 138 mW (c), 158 mW (d)

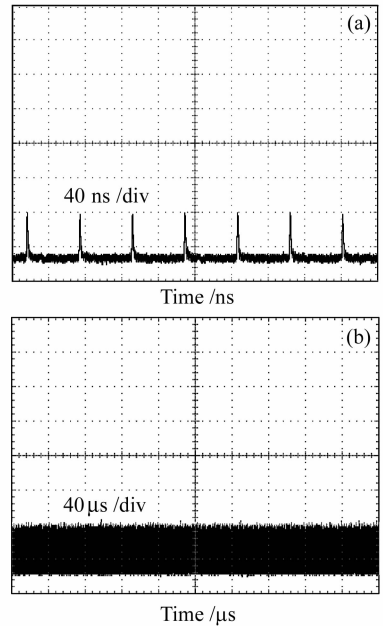


图 7 降至 $W_{\text{pump}} = 37 \text{ mW}$ 时稳定的连续锁模

Fig. 7 Steady CW mode-locking at $W_{\text{pump}} = 37 \text{ mW}$

歇性地出现脉冲整体波动较大现象,该现象主要出现于脉冲分裂为更多脉冲过程中。比如在稳定连续锁模和稳定双脉冲调制之间、稳定双脉冲调制和稳定三脉冲调制之间,以此类推;认为这些波动为调 Q 带来的波动,这是“调 Q 波动”,这种调 Q 波动在单脉冲分裂为双脉冲的过程中最为剧烈,如图 6 所示。

在抽运功率降低过程中,开始会持续原来更高功率时的多脉冲个数跳动和峰值不稳定,直至降低至 145 mW ,才出现较稳定的四脉冲调制。再继续降低,会依次出现三脉冲、双脉冲调制。抽运功率降

低至 70 mW 时,重新出现稳定的连续锁模。在降低过程中,没有出现调 Q 锁模现象,只是脉冲峰值的降低。直至降低至 37 mW ,仍旧有稳定的连续锁模,比原来升高抽运功率时出现连续锁模的阈值低,只是峰值较低,如图 7 所示。与原来相比,在多脉冲调制变化过程中,没有出现非常明显的调 Q 波动。降至 36 mW 时,锁模现象完全消失,重新出现调 Q

现象。

从图3~图7输出激光脉冲随抽运功率增强和减弱的变化过程,可以看出锁模启动抽运功率阈值比实际实现稳定锁模时最小抽运功率值要大,各种现象在抽运功率提高过程中的出现阈值要比降低过程中高,具有双稳态现象。

半导体可饱和吸收镜已经固化于光纤 FC/PC 接头一端,故其表面的光通量不能凭实验测量和猜测得知,但可将能够实现连续锁模的最低输出功率约1.05 mW等价于饱和通量^[10],而开始出现多脉冲调制时的输出功率8.70 mW(升高过程中)或5.75 mW(降低过程中)等价于入射光通量,这样算得的饱和通量的比值 $S = 8.3$ 或 5.5 。

3.2 输出功率及斜率效率

图8为30%端输出功率与抽运功率曲线图。从中可以算出,斜率效率大约为12.7%。若折算成腔内功率,则斜率效率大约为42.3%。

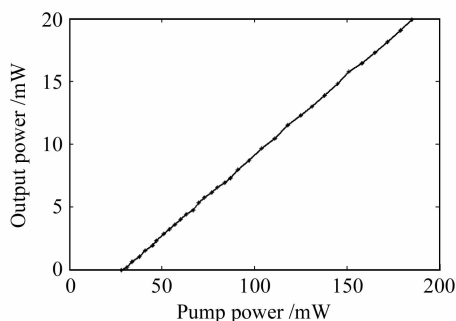


图8 抽运功率与30%端输出功率的实测曲线

Fig. 8 Curve of 30% output and pump energy

3.3 外界微扰对激光系统的影响

外界的微扰对系统出光状态影响很大。图5测量结果是在具有较小外界微扰情况下测得的,可以看出规律性很强。但若在实验过程中对实验系统加以较强外界微扰,比如轻轻振动某段光纤、轻敲实验

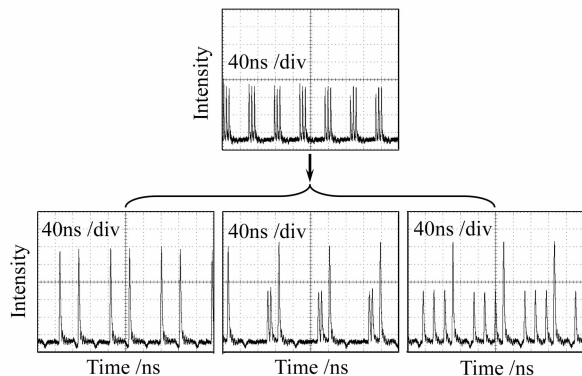


图9 加微扰后多脉冲的可能变化

Fig. 9 Pulse changes with environmental disturbance

台等,可能看到输出脉冲的变化,比如三脉冲调制可能会变成双脉冲调制,或一强两弱的三脉冲调制,或一强三弱的四脉冲调制等不同状态,如图9所示。但这种微扰对于处于功率相对较低时的连续锁模状态影响不太大,而是主要影响多脉冲调制和单脉冲分裂为多脉冲的过程中。

如果加入实时(未必实时持续)的外界微扰,加大抽运功率的过程中达到连续锁模的阈值降低,锁模的实现更容易,并且会使“锁模极不稳定现象”比不加时提前来到。比如加与不加实时微扰时,实现锁模(连续锁模)的抽运功率分别为43 mW和50 mW,该现象出现的阈值分别约为127 mW和179 mW。

加入微扰或实时微扰时,会使系统内激光状态的不确定性加剧,加大了激光功率整体的波动性;锁模出现阈值的降低正是由微扰带来的激光功率更大幅度的波动所致;而多脉冲在微扰时的变化和“锁模极不稳定现象”的提早出现,也正是由微扰在深度锁模(多脉冲调制)状态时得以放大所致。

3.4 输出光谱的变化

随着抽运功率的提高,输出光谱谱线会变宽,如图10所示。未锁模时、连续锁模时和多脉冲调制时3 dB线宽分别约为0.2 nm,0.4 nm和0.5 nm。

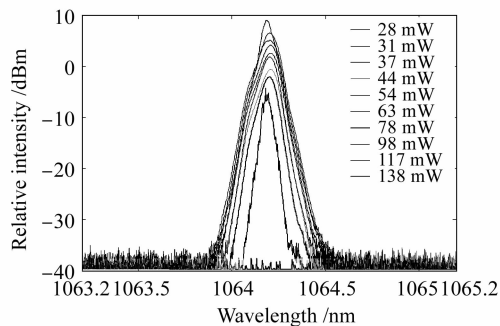


图10 输出光谱(由内至外功率逐步加大)

Fig. 10 Output spectra (pump is gradually increased from inside to outside)

从图10可以看出,在未实现锁模时,输出光谱具有很多毛刺;而在实现锁模后,光谱则变得很平滑,几乎没有毛刺。这是因为锁模后模式之间的相位因被锁定而固定,使各模式之间的振幅或强度相互之间具有固定的依赖关系,不再是原来的随机波动,从光谱上看就是代表随机波动的毛刺消失了。该现象提示我们可以从光谱的平滑程度来判断是否已经实现锁模。

由于脉冲宽度和激光线宽或纵模数成反比,从连续激光到脉冲激光,由于时域宽度的变短,相应地

需要较宽的线宽支持, 而从单脉冲到多脉冲, 就意味着单个脉冲宽度的进一步变窄, 线宽相应地进一步变宽。所以, 随着抽运功率的提高和锁模的加深, 谱线加宽。

单脉冲分裂为多脉冲后, 多脉冲中的单个脉冲宽度会变窄。从光谱图上可以看出, 随着多脉冲调制的加剧(多脉冲个数增多), 输出谱线在加宽, 正如上文所述, 这是脉冲变窄的体现; 反之, 如果脉冲变宽, 那么谱线应相应地变窄, 但实验结果正好相反。

脉冲自相关迹的测量结果验证了这一观点, 如图 11 所示。在抽运功率分别为 43 mW, 64 mW, 84 mW, 118 mW, 即分别处于连续锁模、双脉冲、三脉冲和四脉冲调制时, 输出脉冲自相关迹显示的半峰全宽(FWHM)分别为 41.4 ps, 37.3 ps, 34.4 ps 和 33.8 ps, 可以看出脉宽是变窄的。而且随着脉冲分裂个数的增多, 其自相关迹也愈加平滑。

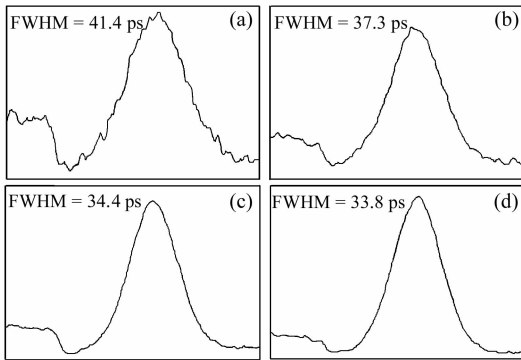


图 11 分别处于连续锁模(a), 双脉冲(b), 三脉冲(c)和四脉冲(d)调制时的脉冲自相关迹

Fig. 11 Corresponding autocorrelation trace at CW mode-locking, double-~four-pulse modulation ((a)~(d))

但需要注意的是, 脉冲分裂时脉宽变窄的现象仅限于利用光纤布拉格光栅作为一端腔镜的情况, 在其他利用宽谱高反镜作腔镜的情况下并不适用。

4 结 论

利用高掺 Yb 全光纤半导体可饱和吸收镜被动

锁模激光器实现了调 Q, 稳定的连续锁模以及多脉冲调制输出。实验观察到了锁模极不稳定现象、微扰对系统的影响、锁模前后输出光谱的变化、多脉冲调制时的脉宽变窄等。对以后的实验工作具有一定的参考意义。

参 考 文 献

- 1 Michael J. Hayduk. Passively mode-locked erbium-doped fiber lasers using multiple quantum well saturable absorbers [R]. 1998
- 2 O. G. Okhotnikov, L. Gomes, N. Xiang *et al.*. Mode-locked ytterbium fiber laser tunable in the 980 ~ 1070 nm spectral range [J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(17):1522~1524
- 3 Luis A. Gomes, Lasse Orsila, Tomi Jouhti *et al.*. Picosecond SESAM-based ytterbium mode-locked fiber lasers [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2004, **10**(1):129~136
- 4 C. K. Nielsen, B. Ortac, T. Schreiber *et al.*. Self-starting self-similar all-polarization maintaining Yb-doped fiber laser [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(23):9347~9351
- 5 C. K. Nielsen, K. G. Jespersen, S. R. Keiding. A 158 fs 5.3 nJ fiber-laser system at 1 μ m using photonic bandgap fibers for dispersion control and pulse compression [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(13):6063~6068
- 6 A. Isomäki, O. G. Okhotnikov. All-fiber ytterbium soliton mode-locked laser with dispersion control by solid-core photonic bandgap fiber [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(13):4368~4373
- 7 V. P. Kalosha, Liang Chen, Xiaoyi Bao. Ultra-short pulse operation of all-optical fiber passively mode-locked ytterbium laser [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(11):4935~4945
- 8 You Xiaoli, Wang Yonggang, Xue Yinghong *et al.*. Passively Q-switched mode-locking in a Yb³⁺ doped double-clad fiber laser with transmission type SESAM [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, **34**(6):673~686
- 游小丽, 王勇刚, 薛迎红等. 透射式 SESAM 实现掺 Yb³⁺ 光纤激光器被动调 Q 锁模 [J]. *红外与激光工程*, 2005, **34**(6):673~686
- 9 Wang Jing, Zhang Hongming, Zhang Jun *et al.*. Passively mode-locked fiber laser with a semiconductor saturable absorber mirror [J]. *Chinese J. Laser*, 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
- 10 Ursula Keller, Kurt J. Weingarten, Franz X. Krätner *et al.*. Semiconductor saturable absorber mirrors (SESAM's) for femtosecond to nanosecond pulse generation in solid-state lasers [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 1996, **2**(3):435~452