

透射式 SESAM 实现掺 Yb³⁺ 光纤激光器被动调 Q 锁模*

游小丽¹, 王勇刚^{1,2}, 薛迎红¹, 曹士英¹, 张志刚¹, 柴路¹, 王清月¹, 孙虹¹, 马骁宇²

(1. 天津大学精密仪器与光电子工程学院超快激光实验室, 天津 300072;
2. 中国科学院半导体研究所, 北京 100083)

摘要: 锁模光纤激光器具有体积小、性能稳定及模式好等优点, 日益受到关注。利用一种新型的透射式半导体可饱和吸收镜, 实现双包层掺 Yb³⁺ 光纤激光器调 Q 锁模脉冲激光输出。得到的脉冲调 Q 包络半高宽约 500 ns, 重复频率 110 kHz, 平均输出功率 45 mW, 锁模脉冲重复频率 26.7 MHz。锁模光路比反射式吸收镜更简单, 易于调节, 为进一步引入色散补偿元件进行飞秒脉冲的实验研究奠定了基础。

关键词: 光纤激光器; 调 Q 锁模; 半导体可饱和吸收镜; 双包层

中图分类号: TN248.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2276(2005)06-0673-03

Passively Q-switched mode-locking in a Yb³⁺ doped double-clad fiber laser with transmission type SESAM*

YOU Xiao-li¹, WANG Yong-gang^{1,2}, XUE Ying-hong¹, CAO Shi-ying¹, ZHANG Zhi-gang¹,
CHAI Lu¹, WANG Qing-yue¹, SUN Hong¹, MA Xiao-yu²

(1. Ultrafast Laser Laboratory, School of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, University of Tianjin 300072, China;
2. Institute of Semiconductors, the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract: Mode-locking fiber laser has many merits such as compactness, stability and good mode. Using a novel transmitted type semiconductor saturable absorber mirror (SESAM) as an output coupler, a Yb³⁺ doped double-clad Q-switching mode-locking fiber laser is constructed. The shortest period of the envelope of the Q-switched mode-locking is about 500 ns with a repetition rate of 110 kHz and an average output power of 45 mW. The repetition rate of the mode-locking pulse train is 26.7 MHz. The setup of mode-locking laser using transmission type SESAMs is simple and easy to adjust, than that using reflection type SESAMs. So it's convenient for insert dispersion compensation elements to achieve femtosecond pulse mode-locking laser.

Key words: Fiber laser; Q-switched mode-locking; SESAM; Double-clad

收稿日期: 2005-02-06; 修订日期: 2005-03-18

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60178008)

作者简介: 游小丽(1981-), 女, 江西临川人, 硕士, 主要从事锁模光纤激光器的理论和实验研究。

0 引言

近十几年来,超短脉冲激光锁模光纤激光器得到了飞速的发展,与大多数锁模固体激光器相比,具有体积小,稳定性高等优点,应用前景非常广阔。锁模光纤激光器按锁模机制的不同,主要分为两类:主动锁模光纤激光器和被动锁模光纤激光器。所谓主动锁模光纤激光器是指在激光腔内插入主动调制器件(如 LiNbO_3 调制器、声光调制器、电光调制器等)或外界有脉冲注入,即利用外加的光学调制脉冲串引入光纤激光器中的非线性相位微扰作为产生脉冲锁模的机制。主动锁模的缺点是外加调制使整个激光腔的结构复杂、脉冲宽等。被动锁模光纤激光器是利用光纤的非线性效应作为锁模机制,激光腔内无需任何主动器件。利用半导体可吸收镜实现被动锁模的光纤激光器结构简单、性能稳定,是近年来线性腔超短脉冲光纤激光器锁模的常用手段^[1~6]。

早在 1998 年, M. Hofer 等人^[1]就利用 SESAM 实现了高功率端面泵浦的被动锁模掺 Er^{3+} - Yb^{3+} 光纤激光器,在泵浦功率为 1 W 时,实现了中心波长 1550 nm,脉宽 3 ps,重复频率 30 MHz,平均功率 50 mW 的正啁啾脉冲输出。在腔外进行线性压缩,可使脉宽缩短到 130 fs,单脉冲能量 1.2 nJ。1999 年, U. Keller 等人^[2]使用 SESAM 在掺 Er^{3+} 光纤激光器上实现了被动调 Q,脉冲能量为 0.1 mJ,重复频率大于 1 kHz。这是迄今为止,光纤激光器被动调 Q 产生的最高能量的脉冲。同年,德国 M. Leitner 等人^[3]使用 LT-GaAs 在掺 Nd^{3+} 的光纤激光器上得到了自启动 4.1 ps 的脉冲输出。2002 年,英国南汉普顿大学 L. Lefor 等人^[4]利用 SESAM 启动锁模,在掺 Yb^{3+} 的光纤激光器上实现了脉宽小于 110 fs,重复频率 54 MHz 的脉冲输出。2004 年,芬兰 Luis A Gomes 等人^[5]利用 SESAM 在掺 Yb^{3+} 光纤激光器上实现了宽带可调谐的皮秒脉冲输出,光谱中心波长从 980~1105 nm 宽带可调,调节范围为 125 nm,脉宽在 15~26 ps 之间。同年 10 月,芬兰 Matei Rusu 等人^[6]利用 SESAM 在一个激光腔中同时得到了 1550 nm 和 1040 nm 的脉冲输出,1550 nm 脉冲的脉宽为 200 fs,1040 nm 脉冲的脉宽为 13 ps。

1 透过式 SESAM

目前国际上用来进行光纤激光器被动锁模的吸收镜都是反射式的,用反射式吸收镜作为锁模器件需要在腔内用透镜对激光进行准直聚焦。而使用透射式半导体可饱和吸收镜可以简化腔内结构,将透射式 SESAM 直接置于增益光纤的后端面,同时作为调制器件和输出耦合。这种透射式半导体可饱和吸收镜在固体激光器($\text{Nd}:\text{YVO}_4$)上已经实现被动锁模,最短脉冲宽度达到 2.3 ps^[7]。国内也有采用透过式离子注入 GaAs 吸收体实现光纤激光器被动调 Q 锁模^[8]的报道,但是这种利用双光子吸收原理进行饱和吸收的器件吸收系数很小,同时离子注入造成吸收镜非饱和损耗较大,抗损伤阈值低。

本文采用的透过式 SESAM 吸收区同反射式 SESAM 相同,采用 $\text{In}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}$ 量子阱为吸收区,全区为 10 nm 的 GaAs,利用半导体导带与价带间的带间吸收为吸收机制。与反射式 SESAM 不同的是,透过式 SESAM 不需要镀布拉格反射膜,它通过在吸收区两侧分别镀增透膜和部分反射膜得以兼作输出镜。为了用作输出镜,SESAM 外延面镀增透膜,采用按 4:1 比例混合的 ZrO_2 和 Y_2O_3 材料作为膜层材料。衬底表面镀反射膜,采用 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Si}/\text{SiO}_2/\text{Si}$ 多层膜为膜层材料。生长温度为 550 °C,SESAM 在 1064 nm 处的透过率为 10%。

2 实验及结果分析

实验装置如图 1 所示,泵浦源是相干公司生产的 CA95054 型多模 LD 泵浦源,最大输出功率为 2 W,控制温度可以使泵浦激光波长稳定在 976 nm 附近,偏差小于 1 nm,这有利于 Yb^{3+} 介质对泵浦光的有效吸收。泵浦源采用光纤耦合输出,尾纤纤芯直径为 200 μm ,数值孔径 0.22。双包层光纤是 Thorlabs 公司生产的内包层为 4-D 型结构的光纤,光纤横截面如图 2 所示,纤芯直径为 6 ± 1 μm ,数值孔径为 0.11 ± 0.01 ,对 976 nm 泵浦光的吸收为 2000 dB/m;内包层最大通光孔径为 125 ± 2 μm ,数值孔径为 0.46;外包层(即光固化涂层)直径为 225 ± 15 μm ;光纤长度为 4 m。耦

合系统采用的是两个小焦距非球面耦合透镜组合,分别为 11 mm(数值孔径 0.25)和 6.24 mm(数值孔径 0.16),耦合系统的耦合效率可达 80%。可饱和吸收镜 SESAM 置于双包层光纤后端面,作为调制器件,也作为激光输出耦合。

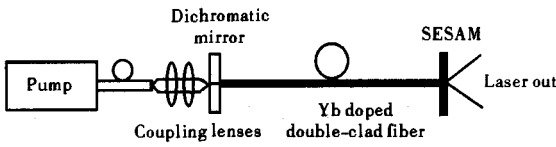
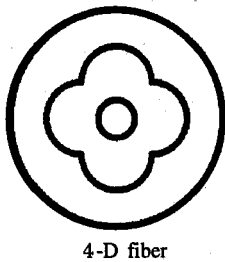


图 1 调 Q 锁模光纤激光器

Fig.1 Q-switched mode-locking fiber laser



4-D fiber

图 2 光纤横截面示意图

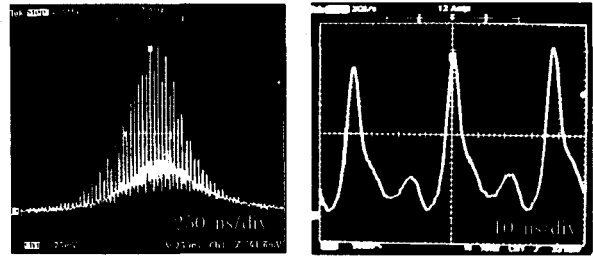
Fig.2 Cross section of double-clad fiber

在不加 SESAM 而直接利用光纤端面 4% 反射充当后腔镜的情况下,得到连续状态下输出的激光中心波长为 1090 nm,出光阈值 350 mW,在最大泵浦功率为 2 W 时,激光输出功率为 500 mW。在此基础上,把 SESAM 置于双包层光纤后端面处作为输出耦合。这种状态下光纤激光器的激光阈值下降到 180 mW,激光中心波长为 1100 nm,泵浦功率为 1.8 W 时最大输出功率为 45 mW。在示波器上得到调 Q 锁模脉冲输出的时域图形。

当泵浦功率为 408 mW 时,示波器上开始出现不稳定的调 Q 包络。增加泵浦功率到 1.2 W,调 Q 包络的半高宽约为 1 μs,重复频率 83.3 kHz,锁模脉冲重复频率 26.7 MHz。继续增加泵浦功率到 1.8 W,观察到的脉冲时域图形如图 3 所示,调 Q 包络半高宽约为 500 ns,重复频率 110 kHz,锁模脉冲重复频率 26.7 MHz。

根据锁模原理,激光器腔长与锁模脉冲重复频率的关系为 $f=c/2nL$,当光纤长为 4 m,折射率近似为 1.46 时,锁模脉冲的重复频率应为 25.6 MHz,与实验中得到的脉冲重复频率 26.7 MHz 基本符合。可以确

定调 Q 包络中的脉冲为锁模脉冲,即所观察到的现象为调 Q 锁模。



(a)

(b)

图 3 泵浦功率为 1.8 W 时脉冲时域图

Fig.3 Pulse at a pump power of 1.8 W

对锁模过程中调 Q 包络的产生,我们认为是 SESAM 内激光的能量密度达不到 SESAM 的饱和通量。SESAM 的饱和通量为 50~60 μJ/cm²,要克服自调 Q,实现连续(CW)锁模,要求 SESAM 内激光光强处于深度饱和状态,也就是达到饱和通量的 3 倍以上,即在 150~180 μJ/cm² 以上。实验中得到激光输出最大腔内循环功率为 450 mW,计算得出激光在 SESAM 内的能量密度约为 121 μJ/cm²,小于 SESAM 连续锁模需要的饱和通量条件。为了抑制调 Q 现象,要求腔内参数满足^[9,10]:

$$\left| \frac{dR}{dt} \right| I < \frac{g_0 T_R}{l \tau_L} \approx \frac{T_R}{\tau_{stim}} \quad (1)$$

式中 $g_0=rl$, l 是腔内总损耗, r 是泵浦参数,表示泵浦功率对于阈值的倍数; T_R 是腔内循环时间; τ_L 是激光介质的上能级寿命; τ_{stim} 为受激上能级寿命, $\tau_{stim}=\tau_L/(r-1) \approx \tau_L/r$, 假设 $r \gg 1$ 。公式(1)左边决定了可饱和吸收体的漂白引起腔内损耗的减少,这个减少增加了腔内脉冲强度。右边决定了增益饱和的量,以补偿损耗的减小。如果增益饱和响应不够快,不足以抵消损耗的减少,腔内激光强度就会不断增加而导致自调 Q。从公式(1)可看出要抑制自调 Q 需要较小的 dR/dt (即大的腔内光强), 大的小信号增益 g_0 , 小的腔内损耗 (即大泵浦参数 r) 和大的腔内循环时间 T_R (即低重复率或者高脉冲能量)。因此,需要增加泵浦功率来增加激光的输出功率, (下转第 686 页)

参考文献:

- [1] YIN Xing-Liang. Principle of Aero-Optics[M]. Beijing: China Astronautics Press(殷兴良. 气动光学原理. 北京: 中国宇航出版社), 2003.
- [2] Robert E Childs. Prediction and control of turbulent aero-optical using large eddy simulation[A]. 2nd Annual AIAA SDIO Interceptor Technology Conference. AIAA 93-2670 [C]. Albuquerque. 1993.1
- [3] Wolfe W L; SUN Zai-long, HE Qi-yu, CHEN Guang-yu, et al. Infrared Manual (Vol.4)[M]. Tianjin: Infrared and Laser Engineering Editorial Board(W.L. 沃尔夫; 孙再龙, 何启予, 陈光余, 等. 红外手册(第四分册). 天津: 《红外与激光工程》编辑部), 1980. 339-358.
- [4] LI Xiao-tong. Design of Geometry-Optics and Optics[M]. Zhejiang University Press(李晓彤. 几何光学和光学设计. 杭州: 浙江大学出版社), 1997. 157-166.
- [5] Richardson M B, Clark R L. Prediction of image degradation through a turbulent medium [A]. SPIE[C]. 1987, 788. 75-85.
- [6] Pond J E, Welh C T, Sutton G W. Side mounted IR window aero-optic and aerothermal analysis[A]. SPIE[C]. 1999, 3705. 266-275.
- [7] Michele Banish, Rod Clark, Alan Kathman. A validated code to predict the performance of onboard broadband optical seekers through a turbulent transonic flow[A]. AIAA SDIO Annual Interceptor Technology Conference. AIAA 92-2792[C]. Huntsville, 1992. 1-6.
- [8] ZHAO Yan, ZHANG Shi-jun, ZONG Yun-hua, et al. IBDA algorithm for image restoration in aero-optics[J]. Infrared and Laser Engineering (赵刻, 张世军, 宗云花, 等. 气动光学效应图像恢复 IBDA 算法研究. 红外与激光工程), 2004, 33(2): 169-173.

(上接第 675 页)

或者通过对光纤非线性偏振旋转的控制来选择高强度脉冲通过, 从而抑制调 Q 现象的产生。当然, 也可以采用具有小饱和通量的 SESAM。

3 结束语

利用新型的透过式半导体可饱和吸收镜对掺 Yb³⁺ 双包层光纤激光器进行锁模实验的研究, 获得调 Q 锁模脉冲输出。这种透过式半导体可饱和吸收镜的使用, 使得锁模光路比反射式吸收镜更加简单。在泵浦功率为 1.8 W 时, 激光平均输出功率 45 mW, 调 Q 包络半高宽 500 ns, 重复频率 110 kHz, 锁模脉冲重复频率 26.7 MHz。

参考文献:

- [1] Hofer M, Fermann M E, Goldberg L. High-power side-pumped passively mode-locked Er-Yb fiber laser[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1998, 10: 1247-1249.
- [2] Paschotta R, Haring R, Keller U, et al. Passively Q-switched 0.1 mJ fiber laser system at 1.53[J]. Optics Letters, 1999, 24: 388-390.
- [3] Leitner M, Glas P, Sandrock T, et al. Self-starting mode locking of a Nd:glass fiber laser by use of the third-order nonlinearity of low-temperature-grown GaAs[J]. Optics Letters, 1999, 24: 1567-1569.
- [4] Lefort L, Price J H V, Richardson D J, et al. Practical low-noise stretched-pulse Yb³⁺-doped fiber laser[J]. Optics Letters, 2002, 27: 291-293.
- [5] Luis A Gomes, Lasse Orsila, Tomi Jouhti, et al. Picosecond SESAM-based ytterbium mode-locked fiber lasers[J]. IEEE J of Selected Topics in Quantum Electronics, 2004, 10: 129-136.
- [6] Matei Rusu, Robert Herda, Oleg G, et al. Passively synchronized erbium (1550 nm) and ytterbium (1040 nm) mode-locked fiber lasers sharing a cavity[J]. Optics Letters, 2004, 29: 2246-2248.
- [7] JIA Yu-lei, WEI Zhi-yi, ZHENG Jia-an, et al. Diode-pumped self-starting mode-locked Nd:YVO₄ laser with semiconductor saturable absorber output coupler[J]. Chinese Physics Letters, 2004, 21(11): 2209-2211.
- [8] WANG Yong-gang, MA Xiao-yu, FU Sheng-gui, et al. Passive Q-switched modelocking of double-cladding Yb: fiber laser with ion-implanted GaAs[J]. Acta Physica Sinica (王勇刚, 马晓宇, 付圣贵, 等. 离子注入 GaAs 实现双包层掺镱光纤激光器被动调 Q 锁模. 物理学报), 2004, 53(6): 1810.
- [9] Kärtner F X, Brovelli L R, Kopf D, et al. Control of solid-state laser dynamics by semiconducting devices[J]. Opt Eng, 1995, 34: 2024-2036.
- [10] Hönninger C, Paschotta R, Morier-Genoud F, et al. Q-switching stability limits of CW passive modelocking[J]. J Opt Soc Am, 1999, 16(1): 46-56.