

# 基于半导体可饱和吸收镜的 1550 nm 被动锁模光纤激光器

刘鹏祖 侯 静 张 斌 陈金宝

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要** 设计了中心波长为 1550 nm 的高重复频率纳秒脉冲激光器。通过在法布里-珀罗(F-P)腔内加入半导体可饱和吸收镜(SESAM)作为被动锁模器件,采用全负色散光纤作为增益介质,在未加入任何脉冲压缩机制的情况下,在抽运功率为75 mW时获得了脉宽约1 ns,重复频率为10.74 MHz的稳定锁模脉冲激光输出,光谱中心波长为1550 nm,3 dB谱宽小于0.1 nm,在抽运功率为130 mW时得到最高输出功率20.5 mW,光-光转换效率大于33%。实验表明基于 SESAM 被动锁模的激光器在采用全负色散光纤时能产生纳秒级脉宽、高重复频率的脉冲输出,且锁模稳定。

**关键词** 激光器;被动锁模;半导体可饱和吸收镜;纳秒脉冲

**中图分类号** TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0702017

## 1550 nm Passively Mode-Locked Fiber Laser with a Semiconductor Saturable Absorber Mirror

Liu Pengzu Hou Jing Zhang Bin Chen Jinbao

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

**Abstract** A design of passively mode-locked fiber laser which can produce nanosecond pulses with high repetition frequency is presented. Inserting a semiconductor saturable absorber mirror (SESAM) in a Fabry-Perot (F-P) cavity, using all negative dispersion fiber, without any pulse compression mechanism, a pulse whose width is 1 ns and repetition frequency is 10.74 MHz is achieved at a pump power of 75 mW. The spectral analysis shows that the 3 dB width is smaller than 0.1 nm. When the pump power goes to 130 mW, a maximal power of about 20.5 mW is generated. The experiment indicates that the passively mode-locked fiber laser with an SESAM can obtain a nanosecond pulse with high repetition frequency when all negative dispersion fiber is used.

**Key words** lasers; passively mode-locked; semiconductor saturable absorber mirror; nanosecond pulse

**OCIS codes** 140.3510; 060.3510; 230.2285; 140.3520

## 1 引言

锁模光纤激光器已经成为光通信和光探测等诸多领域中的重要光源<sup>[1,2]</sup>。锁模技术有主动锁模和被动锁模两种。其中作为被动锁模方式,“8 字型”结构、非线性偏振旋转和半导体可饱和吸收镜(SESAM)现在已经被广泛用于超短脉冲的产生<sup>[3]</sup>。相比其他方法,基于 SESAM 的被动锁模技术有许多优点,比如自启动、性能稳定等,而且通过控制制备过程可灵活选择 SESAM 的饱和通量、恢复时间

等参数,这使得此类光纤激光器具有很高的灵活性<sup>[4]</sup>。如今,在固体和光纤激光器中,SESAM 已经被广泛用于脉冲的产生和保持,光谱范围可达900~2000 nm<sup>[5~7]</sup>。

SESAM 又称可饱和布拉格反射镜(SBR),是将半导体可饱和吸收体直接生长在布拉格反射镜上的器件,自1992年由 Keller 等<sup>[8]</sup>首次研制成功后,将其用于被动锁模激光器的研究相继展开<sup>[9,10]</sup>。以往基于 SESAM 的光纤激光器产生的 1550 nm 脉冲

收稿日期:2011-03-01; 收到修改稿日期:2011-04-05

作者简介:刘鹏祖(1986—),男,硕士研究生,主要从事光纤激光器等方面的研究。E-mail:lpzxinlan@gmail.com

导师简介:陈金宝(1970—),男,博士,研究员,主要从事高能激光等方面的研究。E-mail:kdchenjinbao@yahoo.com.cn

大多是皮秒和飞秒量级,纳秒脉冲常常是由半导体激光器产生的,重复频率一般为千赫兹量级,不能满足某些方面的需要。本文主要研究用 SESAM 被动锁模技术在光纤激光器中实现 1550 nm 的纳秒脉冲输出,且重复频率达到兆赫兹量级。

## 2 实验原理及装置

图 1 为基于 SESAM 的 1550 nm 被动锁模光纤激光器结构。该激光器为法布里-珀罗(F-P)腔型结构,反射率为 99.1% 的光纤布拉格光栅(FBG)作为反射镜之一,中心波长为 1549.94 nm,3 dB 带宽为 0.24 nm;980/1550 nm 波分复用器(WDM)用于将 980 nm 的抽运光耦合入谐振腔;增益介质为 3 m 长的掺铒光纤(EDF),模场直径为 5.62 μm,在 980 nm 处的吸收系数为 14.3 dB/m;耦合比为 50:50 的 2×2 耦合器作为输出耦合端;一组非球面镜用于将光纤发射的光准直并聚焦于 SESAM 上并使光原路返回。

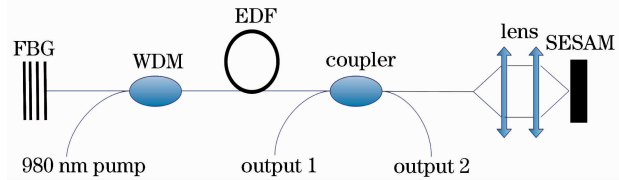


图 1 基于 SESAM 的被动锁模光纤激光器

Fig. 1 Passively mode-locked fiber laser with an SESAM

饱和吸收体的吸收率由腔内光强调制,二者关系可表示为<sup>[11]</sup>

$$A = A_0 / [1 + (I/I_{sat})],$$

式中  $A_0$  为小信号吸收率,  $I_{sat}$  为饱和光强,  $I$  表示腔内光强。具有 SESAM 的被动锁模激光器的锁模机制可描述为:强脉冲的吸收率低,被 SESAM 反射回腔内并被增益介质放大的多,弱脉冲则由于可饱和吸收体吸收而被抑制,如此经过多次循环,强脉冲不断被放大而使工作物质达到增益饱和,进入非线性放大阶段,脉冲前沿和中心部位被放大的多,后沿由于反转粒子数的消耗而被放大的少,其结果是脉冲变窄,最后输出一个高强度窄脉宽的脉冲序列。实验所用 SESAM 的高反射区(反射率大于 55%)为 1460~1600 nm,调制深度为 30%,饱和通量为 70 μJ/cm<sup>2</sup>,恢复时间为 10 ps,小信号吸收率  $A_0$  为 50%。

## 3 实验结果及分析

### 3.1 脉冲波形

当抽运功率增加至 8 mW 时出现调 Q 现象,继

续增加抽运功率(11.7 mW),调 Q 现象愈加明显,如图 2 所示;当功率增加至 44 mW 时出现连续锁模,图 3 为抽运功率为 75 mW 时的输出脉冲,脉冲重复频率为 10.74 MHz,脉冲宽度约为 1 ns(示波器探头的响应时间为 0.1 ns,带宽为 1 GHz),远大于 SESAM 恢复时间,这是因为谐振腔较长,导致腔内色散很大,使得脉冲被展宽。

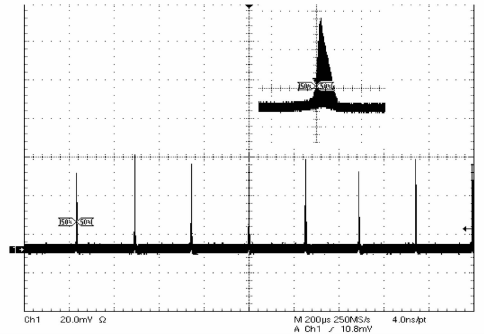


图 2 抽运功率为 11.7 mW 时的调 Q 锁模脉冲  
Fig. 2 Q-switched mode-locking pulse at a pump power of 11.7 mW

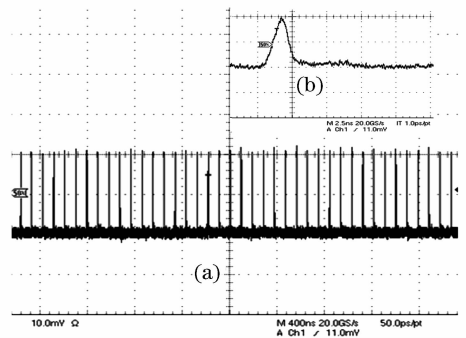


图 3 抽运功率为 75 mW 时的连续锁模脉冲  
Fig. 3 Continuous-wave mode-locking pulse at a pump power of 75 mW

### 3.2 输出光谱

图 4 是抽运功率为 75 mW 时的输出光谱,图中显示 1550 nm 峰的 3 dB 谱宽约为 0.1 nm,而光谱仪

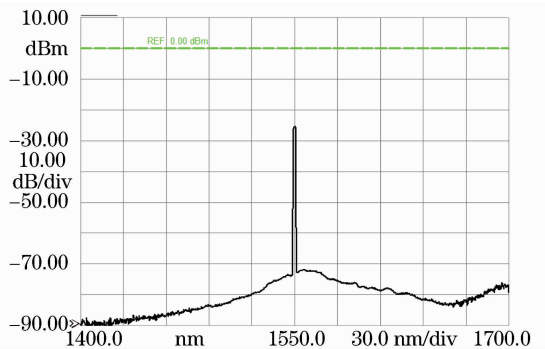


图 4 抽运功率为 75 mW 时的光谱形状  
Fig. 4 Spectral shape at a pump power of 75 mW

的分辨率也为0.1 nm,因此实际谱宽可能小于或等于0.1 nm.图5显示3种不同抽运功率下的光谱形状,对应的锁模状态分别是调Q、调Q锁模、连续锁模.光谱仪分辨率仍为0.1 nm,可以看出连续锁模时的光谱曲线最光滑,而且随着抽运功率的升高,锁模加强,谱线逐渐加宽,这与时域中随着锁模加强脉冲宽度变窄的现象正好吻合.

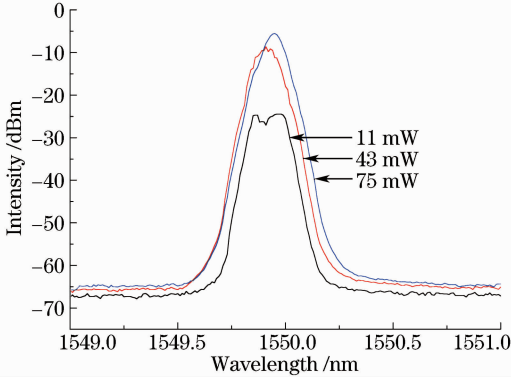


图5 抽运功率分别为11,43和75 mW时的光谱形状  
Fig. 5 Spectra at pump powers of 11, 43 and 75 mW

### 3.3 输出功率及斜率效率

随着抽运功率的提高,输出功率不断增加,当抽运功率为130 mW时得到最大输出功率20.5 mW.图6为实验中测量的50%输出端的输出功率与抽运功率的关系曲线.图中直线斜率为0.165,考虑到两个50%输出端都有激光输出且功率相近,换算成腔内功率,则激光器光-光转换效率为33%.

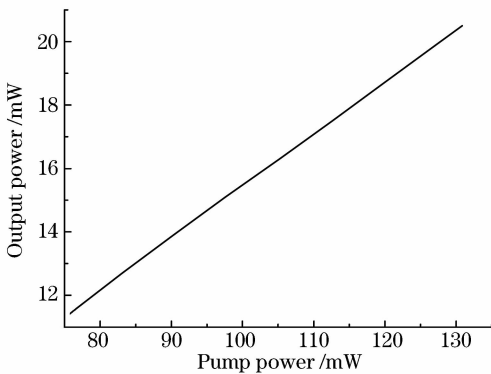


图6 输出功率与抽运功率的关系曲线  
Fig. 6 Relation between output power and pump power

## 4 结 论

研究了基于SESAM被动锁模的光纤激光器输出特性,通过采用全负色散光纤,在抽运功率为75 mW时产生了脉宽约1 ns,重复频率为10.74 MHz的稳定锁模1550 nm激光脉冲,3 dB谱宽小于0.1 nm,在抽运功率为130 mW时获得最大功率20.5 mW的脉冲输出,光-光转换效率约为33%.实验表明在基于SESAM被动锁模的F-P腔中使用全负色散光纤作为增益介质可实现纳秒脉冲输出,且相比半导体激光器,该结构产生的脉冲有较高重复频率.

## 参 考 文 献

- 1 Fan Ji, Li Xin, Hai Ming. Passively mode-locked fiber laser using SESAM [C]. *SPIE*, 2007, **6838**:683807
- 2 N. Russo, R. Duchowicz. High frequency pulse trains from a self-starting additive pulse mode-locked all-fiber laser [J]. *Opt. Commun.*, 2010, **283**(1):113~117
- 3 M. E. Fermann. Ultrafast Fiber Oscillators [M]. in G. Sucha, *Ultrafast Lasers*. New York: Marcel Dekker, 2003. Chap. 3
- 4 H. P. Li, X. L. Xu, D. S. Zhao *et al.*. Passively mode-locked femtosecond fiber laser using a SESAM [C]. *SPIE*, 2009, **7509**: 75090K
- 5 M. Rusu, S. Karirinne, M. Guina *et al.*. Femtosecond neodymium-doped fiber laser operating in the 894 ~ 909 nm spectral range [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(4): 1029~1031
- 6 O. 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
- 7 R. C. Sharp, D. E. Spock, N. Pan *et al.*. 190 fs passively mode-locked thulium fiber laser with a low threshold [J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(12):881~883
- 8 U. Keller, D. A. B. Miller, G. D. Boyd *et al.*. Solid-state low-loss intracavity saturable absorber for Nd:YLF lasers; an antiresonant semiconductor Fabry-Perot saturable absorber [J]. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(7):505~507
- 9 R. Herda, O. G. Okhotnikov. Dispersion compensation-free fiber laser mode-locked and stabilized by highcontrast saturable absorber mirror [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2004, **40** (7):893~899
- 10 O. Okhotnikov, A. Grudinin, M. Pessa. Ultra-fast fibre laser systems based on SESAM technology: new horizons and applications [J]. *New J. Phys.*, 2004, **6**(1):1~22
- 11 Wang Jin, Zhang Hongming, Zhang Yun *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