

## 透/反复合双饱和吸收体被动锁模光纤激光器

何广龙<sup>1</sup>, 徐莉<sup>1</sup>, 马晓辉<sup>1</sup>, 徐成阳<sup>1</sup>, 邹永刚<sup>1</sup>, 吴国盛<sup>2</sup>, 隋庆学<sup>2</sup>, 张志敏<sup>2</sup>, 金亮<sup>1\*</sup><sup>1</sup>长春理工大学高功率半导体激光国家重点实验室, 吉林 长春 130022;<sup>2</sup>陆军装甲兵驻长春地区军事代表室, 吉林 长春 130022

**摘要** 针对基于半导体可饱和吸收镜(SESAM)锁模光纤激光器脉冲底座宽和脉冲能量小的问题展开研究, 报道了一种基于线型腔结构的透/反复合双饱和吸收体(SA)被动锁模超短脉冲光纤激光器。通过增加透射式 SA 的方式, 增加光脉冲在腔内的一次振荡周期过程中通过透射式 SA 的次数, 提高了吸收体对光脉冲前后沿的吸收, 摆脱了因 SESAM 调制深度较低对脉冲宽度和单脉冲能量的影响, 降低了因抽运功率过大产生的色散和非线性效应对光脉冲的影响, 进一步提高了单脉冲能量。最终与相同调制深度的反射式单 SESAM 结构相比, 复合双 SA 锁模结构的脉冲宽度从 776 fs 缩短至 732 fs, 单脉冲能量从 2.08 nJ 提高到 2.49 nJ。

**关键词** 激光器; 光纤激光器; 双饱和吸收体; 调制深度; 透射

**中图分类号** TN29      **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP54.111405

## Passively Mode-Locked Fiber Laser Based on Transmission/Reflection Composite Double Saturable Absorber

He Guanglong<sup>1</sup>, Xu Li<sup>1</sup>, Ma Xiaohui<sup>1</sup>, Xu Chengyang<sup>1</sup>, Zou Yonggang<sup>1</sup>,  
Wu Guosheng<sup>2</sup>, Sui Qingxue<sup>2</sup>, Zhang Zhimin<sup>2</sup>, Jin Liang<sup>1</sup><sup>1</sup>State Key Laboratory of High-Power Semiconductor Lasers, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China;<sup>2</sup>Military Representative Office of Army Armored Forces in Changchun, Changchun, Jilin 130022, China

**Abstract** This paper studies the problem of wide pulse pedestal and low pulse energy of a single semiconductor saturable absorber (SESAM) mode-locked fiber laser, and reports a type of transmission/reflection composite double saturable absorber (SA) passively mode-locked ultrashort pulse fiber laser based on a linear cavity structure. By increasing the transmission of SA, the times of the light pulse passing through the transmissive SA increases in the process of one oscillation cycle. The absorbance of the absorber on the front and back edge of the optical pulse is improved. The effect of the SESAM lower modulation depth on the pulse width and single pulse energy is eliminated. The influence of dispersion and nonlinearity caused by excessive pump power is reduced, and the single pulse energy is further improved. Finally, compared to the single reflection SESAM structure with the same modulation depths, the pulse width of the composite double SA mode-locked structure is shortened from 776 fs to 732 fs and the single pulse energy is increased from 2.08 nJ to 2.49 nJ.

**Key words** lasers; fiber laser; double saturable absorber; modulation depth; transmission

**OCIS codes** 140.4050; 140.3510; 140.7090; 320.2250; 320.7110

## 1 引言

超短脉冲光纤激光器<sup>[1-3]</sup>具有峰值功率高、脉冲宽度窄、光束质量好等特点, 作为激光技术的一个重要研

**收稿日期:** 2017-05-08; **收到修改稿日期:** 2017-05-23

**作者简介:** 何广龙(1992—), 男, 硕士研究生, 主要从事非线性光学和光纤激光器方面的研究。E-mail: 596813965@qq.com

**导师简介:** 徐莉(1962—), 女, 研究员, 博士生导师, 主要从事高功率半导体激光器光纤耦合及工艺方面的研究。

E-mail: xuli@cust.edu.cn

\* 通信联系人。E-mail: namemichael@163.com

究方向,已广泛用于工业精细加工、精密测量、生物、医疗、光通信、军事等各个领域。目前,锁模技术是实现光纤激光器飞秒级超短脉冲输出的主要手段。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。相比于主动锁模光纤激光器,被动锁模光纤激光器只需在腔内加入非线性吸收材料,无需任何主动器件,且脉冲宽度较窄。目前采用的非线性吸收材料主要有半导体可饱和吸收镜(SESAM)、石墨烯、碳纳米管等,其中 SESAM 的制备技术较成熟,在制备过程中可根据需要灵活控制调制深度、恢复时间、饱和通量等关键参数。2011年,宋锐等<sup>[4]</sup>在激光器环形腔中加入了 700 m 长的单模光纤,用于延长谐振腔的腔长并提供全正色散,使用高浓度掺 Yb<sup>3+</sup> 光纤,实现了超低频率的全正色散的 SESAM 锁模激光器,为了实现自启动锁模,在腔内加入了带通滤波器,在 1060 nm 波段获得脉冲宽度 2 ns、脉冲能量 39 nJ、重频 281.5 kHz、平均功率 11 mW 的锁模脉冲激光输出。研究人员通常采用较低调制深度的 SESAM 实现被动锁模,使其易被漂白,有利于锁模脉冲的建立。但调制深度低会导致吸收体对脉冲前后沿的吸收减弱,无法进一步压缩脉冲,并且限制了抽运功率的提高,无法进一步提高单脉冲能量。

针对低调制深度 SESAM<sup>[5-11]</sup>对脉冲宽度和单脉冲能量的限制,本文采用了一种基于线型腔结构的透/反复合双饱和吸收体(SA)被动锁模超短脉冲光纤激光器。与通常采用单 SESAM 实现被动锁模相比,透射式 SA 的引入使得光脉冲在腔内的一次振荡周期过程中多次通过透射式 SA,提高了吸收体对光脉冲前后沿的吸收,可以有效压缩光脉冲宽度。另外,多个 SESAM 结构可有效抑制因脉冲能量过大导致的光脉冲分裂,提高单脉冲能量。

## 2 SESAM 锁模理论分析

SA 被动锁模激光的脉冲演化动力学过程可由 Haus<sup>[12-13]</sup>主方程描述:

$$T_R \frac{\partial A(T, t)}{\partial T} = \left( -iD \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} + i\delta |A|^2 \right) A(T, t) + \left\{ g - l + D_g \frac{\partial}{\partial t^2} [-q(t)] \right\} A(T, t), \quad (1)$$

式中  $A(T, t)$  为缓变场包络,  $T$  为记录脉冲演变的长期时间变量,  $t$  为腔内脉冲时域演变的时间变量;  $T_R$  为光在腔内的往返时间;  $D$  为腔内群色散延迟;  $\delta$  为自相位调制系数,  $g$  和  $l$  分别代表增益和损耗;  $D_g = g/\Omega_g^2$  为增益色散,  $\Omega_g$  表示增益带宽;  $q(t)$  为可饱和吸收损耗系数,其表达式为

$$q(t) = \frac{q_0}{1 + I/I_{\text{sat}}}, \quad (2)$$

式中  $q_0$  为小信号吸收系数,  $I_{\text{sat}}$  为饱和强度,  $I$  为腔内光束经向依赖的光强。SESAM 的反射比  $R$  取决于材料的吸收率  $q$ , 即  $R = 1 - q$ 。调制深度  $\Delta R$  小于小信号吸收率  $q_0$ , 这是由于非饱和损耗  $a_{\text{ns}}$  造成的,  $\Delta R = q_0 - a_{\text{ns}}$ 。对于 SA, 有:

$$\Delta R \approx 1 - e^{-2q_1} \approx 2q_1, \quad (3)$$

且:

$$\tau_p = \frac{1.07}{\Delta\Omega_g} \sqrt{\frac{g'}{\Delta R}}, \quad (4)$$

式中  $g'$  表示腔内单程饱和振幅增益系数,  $\Delta\Omega_g$  表示增益介质的光谱半宽度,  $q_1 < 1$  为吸收振幅损耗系数。通过(4)式可以看出随着  $\Delta R$  的提高, 脉冲宽度  $\tau_p$  减小。但调制深度过大时会产生调 Q 锁模, 影响脉冲稳定性。较低调制深度的 SESAM, 吸收体易被漂白, 有利于锁模脉冲的建立, 但对脉冲前后沿的吸收减弱, 无法进一步压缩脉冲。

为了抑制锁模过程中产生的调 Q 锁模效应, 要求腔内满足如下关系<sup>[14-15]</sup>:

$$E_p^2 > F_{\text{sat,L}} \cdot A_L \cdot F_{\text{sat,A}} \cdot A_A \cdot \Delta R, \quad (5)$$

式中腔内脉冲能量  $E_p = P_{\text{in}}/f$ ,  $P_{\text{in}}$  为腔内平均功率,  $f$  为脉冲重复频率;  $F_{\text{sat,L}} = h\nu/m\sigma$  为激光介质的饱和通量,  $h\nu$  表示单光子能量,  $h$  为普朗克常数,  $\nu$  为光子频率,  $\sigma$  为激光介质的受激发射截面,  $m$  为脉冲往返一次通过激光介质的次数;  $F_{\text{sat,A}}$  为 SESAM 的饱和通量;  $A_L$  和  $A_A$  分别为腔模在激光介质和 SESAM 上的光斑面积。从(5)式看出, 较高的腔内脉冲能量有助于抑制 Q 调制不稳定性, 因此需要大的小信号增益和小的腔内损耗, 可以通过增加抽运功率来提高单脉冲能量。

### 3 实验与分析

实验搭建的线型腔透/反复合双 SA 被动锁模光纤激光器如图 1 所示。抽运源为带尾纤的 976 nm 单模半导体激光器(LD),最大抽运功率为 500 mW,通过波分复用器(WDM)耦合进线型腔中。谐振腔另一端为光纤布拉格反射光栅(FBG),其中心波长为 1060 nm,反射带宽为 8 nm,反射率为 20%。掺镱光纤(YDF, SM-YSF-LO)作为增益介质,长度为 0.4 m,在 1064 nm 处纤芯峰值吸收率为 80 dB/m。实验采用 Batop 公司生产的 SA 和 SESAM,其中 SA 为透射式,调制深度  $\Delta R_1 = 5\%$ ,饱和恢复时间为 37 ps,饱和通量为  $300 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ ;SESAM 为反射式,调制深度  $\Delta R_2 = 10\%$ ,饱和恢复时间为 25 ps,饱和通量为  $70 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ ,非饱和损耗为 7%。

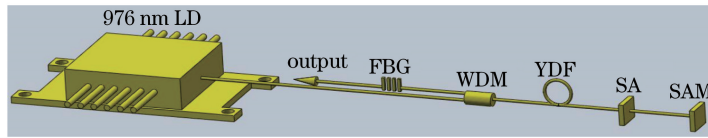


图 1 透/反复合双 SA 系统结构图

Fig. 1 Structure of transmission / reflection composite double SA system

初始激光光先经过 SA,透射后入射至 SESAM,再由 SESAM 反射后又经过 SA,这样在一次振荡周期过程中两次经过 SA,有效增加了系统的调制深度( $2\Delta R_1 + \Delta R_2 = 20\%$ ),增加了吸收体对光脉冲前后沿的吸收,图 2 为脉冲宽度和单脉冲能量随抽运功率的变化关系。

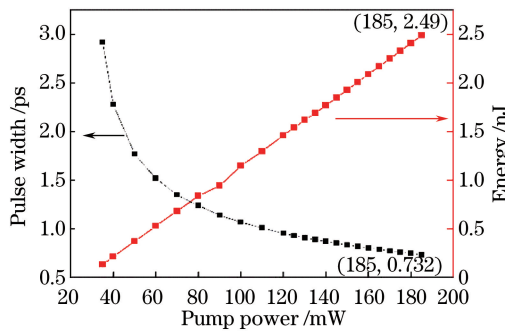


图 2 脉冲宽度和单脉冲能量随抽运功率的变化关系

Fig. 2 Pulse width and single pulse energy as a function of pump power

由图 2 可知,随着抽运功率的增大,锁模脉冲宽度逐渐减小,单脉冲能量逐渐增大。当抽运功率为 35 mW 时,系统形成锁模脉冲输出。在锁模初始,由于抽运功率较低,SESAM 不能达到饱和吸收,导致非饱和损耗增加,此时脉冲不稳定。随着抽运功率的提高,非饱和损耗越来越小,SESAM 逐渐达到吸收饱和,形成稳定的锁模振荡,单脉冲能量也随着抽运功率的增加逐渐提高。当抽运功率达到 185 mW 时,输出的光脉冲宽度的半峰全宽为 732 fs,单脉冲能量为 2.49 nJ,输出脉冲特性结果如图 3 所示。继续增加抽运功率,当抽运功率大于 185 mW 时,光脉冲的峰值功率随抽运功率增加,腔内非线性效应逐渐增强,在正色散<sup>[16]</sup>与非线性效应共同作用下脉冲啁啾增大。非线性效应所引入的啁啾无法被腔内的色散所平衡,此时腔内脉冲将发生光波分裂而无法实现稳定的脉冲输出。当抽运功率增大到 216 mW 时,系统形成如图 4 所示的多脉冲输出效应。

为了对比透/反复合双 SA 锁模结构与单反射式 SESAM 可饱和吸收锁模结构,实验沿用图 1 的实验结构,将透射式 SA 去掉,并将反射式 SESAM 替换为调制深度为 20% 的 SESAM(等效透/反复合式双 SA 结构,SAM 型号: SAM-1064-33-30ps-x),实验结果对比如图 5 所示。

由图 5(a)可知,与透/反复合式锁模结构相同,单反射式 SESAM 锁模结构在抽运功率不断增大时,其输出光脉冲宽度不断减小,单脉冲能量不断增大。当抽运功率为 30 mW 时,单 SESAM 结构形成稳定的锁模脉冲,如图 5(a)中 A 点所示。单 SESAM 结构的锁模阈值比透/反复合式锁模结构的低,这主要是由于在透/反复合式结构中透射式 SA 的引入使得系统插入损耗增加,所以相比调制深度为 20% 的单 SESAM 锁模

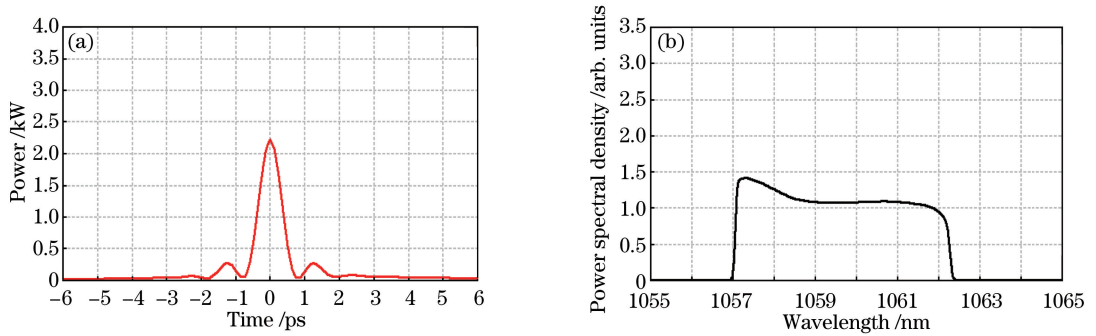


图3 输出脉冲特性。(a)输出脉冲图像;(b)光谱图

Fig. 3 Output pulse characteristics. (a) Output pulse image; (b) spectrum diagram

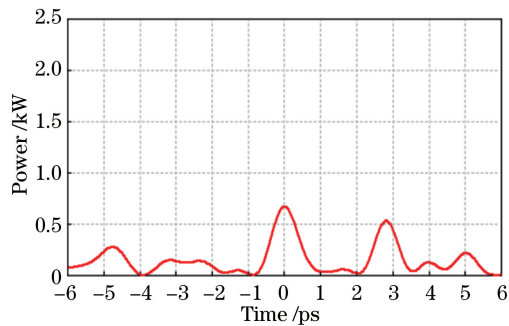
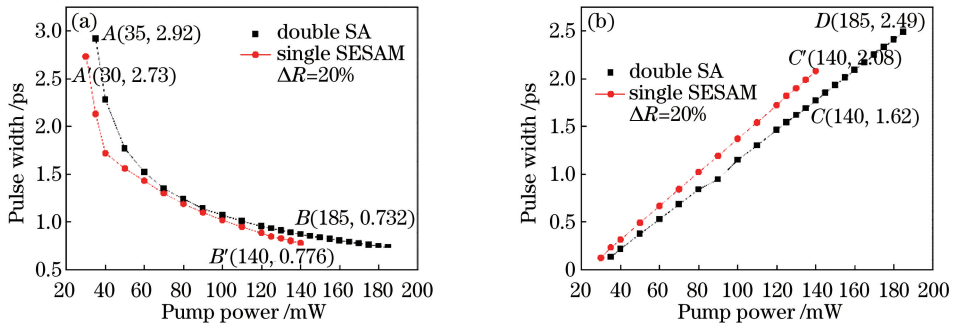


图4 双SA锁模结构在216 mW时形成多脉冲输出

Fig. 4 Multipulse output of double SA mode-locked structure at 216 mW

图5 双SA锁模结构与单SESAM( $\Delta R=20\%$ )结构实验结果对比。

(a)脉冲宽度和抽运功率的关系;(b)脉冲能量和抽运功率的关系

Fig. 5 Experimental results composition between double SA mode-locked structure and single SESAM ( $\Delta R=20\%$ ) structure.

(a) Relationship between pulse width and pump power; (b) relationship between pulse energy and pump power

结构,透/反复合式结构建立锁模的阈值更高,如图5(a)中A点所示。由于复合式结构插入损耗较大,随着抽运功率的增大,与透/反复合式锁模结构相比,单SESAM锁模结构具有更窄的脉冲宽度。根据(4)式可知,随着调制深度的增大,锁模产生的光脉冲宽度变窄,而透/反复合式结构中,激光光经过SA时形成光脉冲,再经过调制深度为10%的反射式SESAM时进一步对形成的光脉冲前后沿进行非线性吸收,并将光脉冲反射至调制深度为5%的透射式SA,而此时SA的电子和空穴并未完全复合,其透射率依然很大,不能对光脉冲的边沿进一步吸收,导致其光脉冲宽度略大。继续增大抽运功率到140 mW时,调制深度为20%的单SESAM结构得到的脉冲宽度为776 fs[图5(a)中B'点]、脉冲能量为2.08 nJ[图5(b)中C'点]的超短脉冲输出,略大于双SA结构的脉冲能量1.62 nJ[图5(b)中C点]。这主要是由于透/反复合式光纤激光器中引入透射式SA产生的插入损耗和多次经过SA产生的能量吸收造成的。继续增大抽运功率,由于腔内群速度色散(GVD)和自相位调制(SPM)的共同调制,在1064 nm波段处产生正啁啾效应,使得脉冲波形畸变,



严重展宽锁模光脉冲波形,且降低了单脉冲能量,单 SESAM 结构激光器已不能形成锁模,而透/反复合式双 SA 结构仍然可以形成稳定的锁模脉冲输出,脉冲能量不断增加。在抽运功率为 185 mW 时,得到的光脉冲宽度为 732 fs[图 5(a)中 B 点],单脉冲能量为 2.49 nJ[图 5(b)中 D 点]。与相同调制深度的单 SESAM 锁模结构相比,透/反复合式双 SA 锁模结构可有效抑制因抽运功率过大导致的多脉冲调制不稳定性,具有脉冲宽度窄、单脉冲能量高的特点。

最后,为了研究透射式 SA 对锁模系统的影响,实验将图 1 结构中透射式 SA 去掉,只保留调制深度为 10% 的 SESAM。由于其调制深度降低,最大抽运功率下降到 110 mW,得到脉冲宽度为 980 fs、脉冲能量为 1.51 nJ 的超短光脉冲输出,如图 6 中  $F'$ 、 $G'$  点所示。继续增大抽运功率,同样会引起多脉冲调制的不稳定。通过图 6 结果对比,透/反复合式双 SA 结构得到了比调制深度为 10% 的单 SESAM 锁模更好的结果。

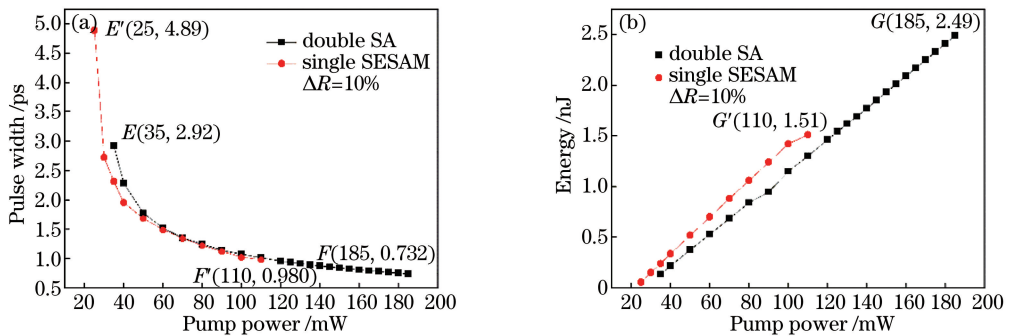


图 6 双 SA 锁模结构与单 SESAM( $\Delta R=10\%$ )结构实验结果对比。

(a) 脉冲宽度和抽运功率的关系; (b) 脉冲能量和抽运功率的关系

Fig. 6 Experimental results composition between double SA mode-locked structure and single SESAM ( $\Delta R=10\%$ ) structure.

(a) Relationship between pulse width and pump power; (b) relationship between pulse energy and pump power

为避免调 Q 锁模的产生,由(5)式计算得到的调制深度  $\Delta R$  与单脉冲能量的关系如图 7 所示。实验所用 SESAM 调制深度为  $\Delta R=20\%$ ,当单脉冲能量大于 1.9 nJ 时,才能有效抑制 Q 调制不稳定性。通过增加抽运功率,最终得到单脉冲能量为 2.08 nJ,对应图 7 中 H 点,在被动锁模区域内,不会产生调 Q 锁模现象。

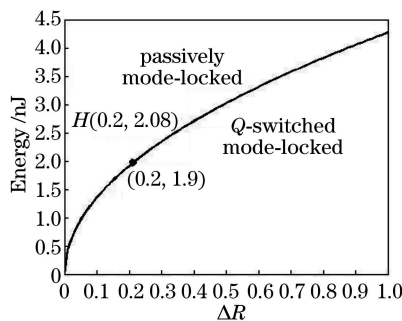


图 7 单 SESAM( $\Delta R=20\%$ )结构中  $\Delta R$  与单脉冲能量的关系

Fig. 7 Relationship between  $\Delta R$  and single pulse energy in single SESAM ( $\Delta R=20\%$ ) structure

## 4 结 论

报道了一种基于线型腔结构的透/反复合式双 SA 被动锁模超短脉冲光纤激光器。透/反复合式双 SA 结构使得光脉冲在腔内的一个振荡周期中多次通过吸收体,增加了吸收体对光脉冲前后沿的吸收,有效压缩了脉冲宽度,抑制了因抽运功率过大产生的多脉冲调制不稳定性,有效提高了单脉冲能量。与调制深度为 10% 和 20% 的单 SESAM 被动锁模相比,透/反复合式双 SA 被动锁模结构得到的光脉冲脉宽更窄、单脉冲能量更大。最终,实验采用调制深度为 5% 的透射式 SA 和调制深度为 10% 的反射式 SESAM 相结合的复合式结构分别代替调制深度为 10% 和 20% 的反射式单 SESAM 结构,实现了最大抽运功率从 140 mW 提高到 185 mW,脉冲宽度从 776 fs 缩短至 732 fs,单脉冲能量从 2.08 nJ 提高至 2.49 nJ。

## 参 考 文 献

- [1] Zhang B Y, Li G, Chen M, *et al.* Passive mode locking of a diode-end-pumped Nd:GdVO<sub>4</sub> laser with a semiconductor saturable absorber mirror[J]. *Optics Letters*, 2003, 28(19): 1829-1831.
- [2] Keller U. Recent developments in compact ultrafast lasers[J]. *Nature*, 2003, 424(6950): 831-838.
- [3] Zhou Binbin, Zou Yuwan, Li Dehua, *et al.* Experimental study of continuous-wave mode-locked picosecond Yb:LSO laser[J]. *Chinese J Lasers*, 2009, 36(7): 1806-1809.  
周斌斌, 邹育婉, 李德华, 等. 连续锁模皮秒 Yb:LSO 激光实验研究[J]. *中国激光*, 2009, 36(7): 1806-1809.
- [4] Song Rui, Chen Shengping, Hou Jing, *et al.* Ultralow repetition rate all-normal-dispersion passively mode-locked fiber laser based on SESAM[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23(9): 2315-2318.  
宋锐, 陈胜平, 侯静, 等. 超低频率全正色散半导体可饱和吸收镜被动锁模光纤激光器[J]. *强激光与粒子束*, 2011, 23(9): 2315-2318.
- [5] Tian W, Wang Z, Wei Z, *et al.* Generation of 61fs pulse from a diode-pumped Yb:LYSO laser with SESAM for mode-locking[C]. *CLEO: Science and Innovations*, 2014: 1-2.
- [6] Emaury F, Diebold A, Klenner A, *et al.* Frequency comb offset dynamics of SESAM mode-locked thin disk lasers[J]. *Optics Express*, 2015, 23(17): 21836-21856.
- [7] Saraceno C J, Heckl O H, Baer C R E, *et al.* SESAMs for high-power femtosecond modelocking: power scaling of an Yb:LuScO<sub>3</sub> thin disk laser to 23 W and 235 fs[J]. *Optics Express*, 2011, 19(21): 20288-20300.
- [8] Tan W D, Tang D Y, Xu X D, *et al.* Passive femtosecond mode-locking and cw laser performance of Yb<sup>3+</sup>:Sc<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub> [J]. *Optics Express*, 2010, 18(16): 16739-16744.
- [9] Chernysheva M A, Krylov A A, Arutyunyan N R, *et al.* SESAM and SWCNT mode-locked all-fiber thulium-doped lasers based on the nonlinear amplifying loop mirror[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2014, 20(5): 453-457.
- [10] Mary R, Choudhury D, Kar A K. Applications of fiber lasers for the development of compact photonic devices[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2014, 20(5): 1-13.
- [11] Lecaplain C, Ortaç B, Hideur A, *et al.* Passively mode-locked Yb-doped large-mode-area microstructure fiber laser[C]. *Conference on Lasers and Electro-Optics*, 2008: 699809.
- [12] Haus H. Theory of mode locking with a slow saturable absorber[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1975, 11(9): 736-746.
- [13] Haus H A. Theory of mode locking with a fast saturable absorber[J]. *Journal of Applied Physics*, 1975, 46(7): 3049-3058.
- [14] Kaertner F X, Brovelli L R, Kopf D, *et al.* Control of solid-state laser dynamics by semiconductor devices[J]. *Optical Engineering*, 1995, 34(7): 2024-2036.
- [15] Hönninger C, Paschotta R, Morier-Genoud F, *et al.* Q-switching stability limits of continuous-wave passive mode locking[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 1999, 16(1): 46-56.
- [16] Ge Yanqi, Luo Jiaolin, Zhang Shumin, *et al.* Transient process of dissipative soliton generation in normal dispersion fiber lasers[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(10): 1005006.  
葛颜绮, 罗娇林, 张书敏, 等. 正色散光纤激光器中耗散孤子形成的瞬态过程[J]. *中国激光*, 2013, 40(10): 1005006.