

双饱和吸收镜被动锁模脉冲动力学过程分析

韩克祯^{1,2} 侯佳¹ 杨克建¹ 张百涛¹ 何京良¹

(¹山东大学晶体材料国家重点实验室, 山东 济南 250100; ²山东理工大学理学院, 山东 淄博 255049)

摘要 利用两片半导体可饱和吸收镜 (SESAM) 实现了稳定的被动锁模激光运转, 获得了比单 SESAM 连续波锁模脉宽更窄、长时间运转稳定性更高的皮秒脉冲。理论上利用分步傅里叶变换法数值求解描述饱和吸收体被动锁模动力学过程的 Haus 主方程, 模拟了双 SESAM 被动锁模的脉冲演化过程, 分析了锁模激光脉冲形成过程与双 SESAM 可饱和吸收损耗系数 q_1 和 q_2 的关系, 并计算得到了锁模脉冲宽度和锁模稳定区域等参数。计算结果与实验结果较为吻合。

关键词 激光器; 被动锁模; 半导体可饱和吸收镜; 脉冲动力学; Haus 主方程; 全固态激光器

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0602002

Analysis of Pulse Dynamics for Passive Mode Locking with Dual Semiconductor Saturable Absorber Mirrors

Han Kezhen^{1,2} Hou Jia¹ Yang Kejian¹ Zhang Baitao¹ He Jingliang¹

(¹State Key Laboratory of Crystal Materials, Shandong University, Jinan, Shandong 250100, China)
(²School of Science, Shandong University of Technology, Zibo, Shandong 255049, China)

Abstract In this paper, dual semiconductor saturable absorber mirrors (SESAMs) are utilized to realize stable passively mode locked laser operation, and shorter and more stable picosecond pulses in long time are obtained compared with the case with single-SESAM mode locking. In theory, Haus master equation describing the mode locking dynamics of saturable absorber is numerically solved with split-step-Fourier transform method. The detailed dynamic pulse evolution process with dual-SESAM mode locking is simulated. The relationship between the pulse formation and two SESAM saturable absorption loss parameters q_1 and q_2 are analyzed. Also the mode locked pulse widths and stability region are calculated, and the numerical results are in agreement with the experimental results well.

Key words lasers; passive mode locking; semiconductor saturable absorber mirror; pulse dynamics; Haus master equation; all solid state lasers

OCIS codes 140.3480; 140.3580; 140.4050

1 引言

全固态被动锁模皮秒激光在材料加工、医疗、光谱学、远程通信、光原子钟等领域具有重要的应用^[1~3]。半导体可饱和吸收镜 (SESAM) 由于结构简单、可靠性高, 成为备受人们关注的被动锁模器件, 特别是随着半导体材料生长技术的日益成熟, 目前已广泛应用于被动锁模激光器中^[4~8]。通常情况下, 人们利用单片 SESAM 来实现激光的锁模运转。但是, 由于激光运转过程中 SESAM 上的热积累以及光损伤,

容易造成锁模激光运转不稳定。考虑到锁模激光形成过程中的光强起伏机制, 利用另一片 SESAM 实现对锁模不稳定性的抑制, 使双 SESAM 在锁模激光启动和稳定运转过程中实现互补, 从而起到稳定锁模激光运转的作用。然而, 双 SESAM 锁模的可行性不仅需要实验上进行验证, 而且从理论上研究其锁模动力学过程也显得尤为重要。Haus 主方程自 1975 年提出以来, 有效地用于研究锁模脉冲的动力学演化过程, 在各种锁模机制的研究中得到广泛应用^[9~14]。

收稿日期: 2013-03-01; **收到修改稿日期**: 2013-03-27

基金项目: 国家自然科学基金(11074148)资助课题。

作者简介: 韩克祯(1981—), 男, 博士研究生, 讲师, 主要从事全固态激光技术方面的研究。E-mail: kezhen_han@163.com

导师简介: 何京良(1957—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事全固态激光技术与器件及非线性光学等方面的研究。

E-mail: jlhe@sdu.edu.cn (通信联系人)

本文利用双 SESAM 实现了稳定的激光二极管 (LD) 抽运 Nd:YVO₄ 晶体被动锁模激光运转, 获得了比单 SESAM 连续波锁模脉宽更窄、稳定性更高的皮秒脉冲。理论上求解 Haus 主方程, 模拟了双 SESAM 被动锁模的脉冲演化过程, 计算得到了锁模脉冲宽度、锁模稳定区域等参数。计算结果与实验结果较为吻合。

2 实验设置及结果

LD 抽运 Nd:YVO₄ 晶体双 SESAM 被动锁模激光的实验设置如图 1 所示, 谐振腔采用 W 型腔。抽运源采用光纤耦合 808 nm AlGaAs 半导体激光器, 最高输出功率为 30 W。激光晶体 Nd:YVO₄ 尺寸为 3 mm×3 mm×5 mm, 掺 Nd 的原子数分数为 0.3%。晶体用铝箔包裹置于铜块中并通以循环水冷却, 温度设定为 20 ℃。抽运光经焦距为 25 mm 的耦合系统会聚到 Nd:YVO₄ 晶体, 光斑半径约为 200 μm。平面镜 M1 作为输入镜, 一面镀 808 nm 增透膜, 另一面镀 808 nm 高透膜和 1064 nm 高反膜。M2 和 M3 用作折叠腔镜, 曲率半径分别为 500 mm 和 200 mm。谐振腔腔长约为 1170 mm。可饱和吸收镜 SESAM1 是反射式可饱和吸收体, 兼做端镜; SESAM2 是透射式可饱和吸收体, 兼做激光输出耦合镜。两 SESAM 的具体参数如表 1 所示。

表 1 实验用 SESAM 参数

Table 1 Parameters of the SESAMs used in the experiment

	SESAM1	SESAM2
Modulation depth / %	0.4	1.7
Non-saturable loss / %	0.3	1
Saturation fluence / (μJ/cm ²)	90	90
Relaxation time / ps	~0.5	~1

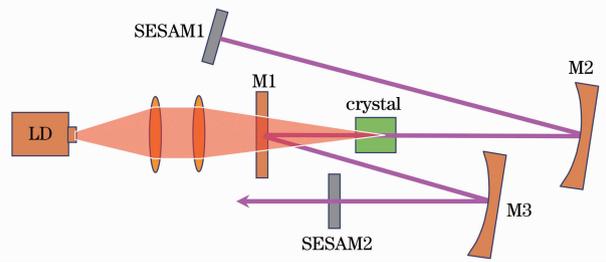


图 1 双 SESAM 锁模谐振腔示意图

Fig. 1 Schematic diagram of dual-SESAM mode locked laser cavity

利用双 SESAM 被动锁模时, 获得稳定连续波锁模运转所对应的抽运功率在 8.74~11.95 W 之间。当抽运功率为 9 W 时, 锁模激光输出功率为 2.6 W, 相应的光-光转换效率为 28.8%, 脉宽测量结果为 7.8 ps。脉冲重复频率为 128 MHz, 与腔长 1170 mm 对应。用功率计 (Coherent Inc. FieldMaxII-TO) 连续记录平均输出功率 50 h, 结果如图 2(a) 所示。从图中可以看出, 双 SESAM 锁模长时间运转稳定性较好。

为进行比较, 进行了单 SESAM 被动锁模实验。将图 1 中 SESAM1 换为对 1064 nm 反射率超过 99.9% 的平面反射镜。此时, 连续波锁模稳定运转对应的抽运功率区间为 6.33~8.32 W。当抽运功率为 7.7 W 时, 得到 2.2 W 的连续波锁模激光输出, 相应的光-光转换效率为 28.6%, 脉宽测量结果为 11.1 ps。运转 50 h 过程中的平均输出功率记录结果如图 2(b) 所示。从图中可以看到, 在连续波锁模运转 35.8 h 之后, 功率出现剧烈下降。此时, 激光器进入调 Q 锁模运转状态。

对比两种锁模运转发现, 双 SESAM 被动锁模与单 SESAM 相比, 具有锁模脉冲宽度窄、长时间运转稳定的优点。

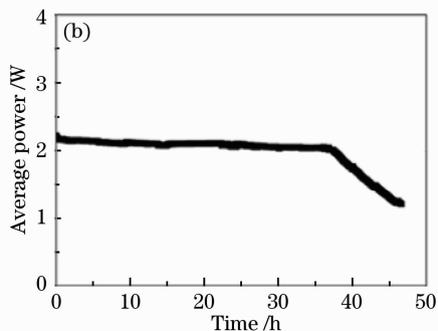
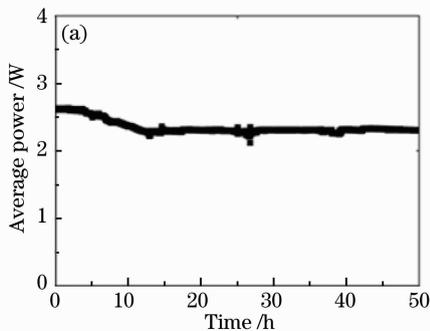


图 2 锁模激光运转 50 h 内的平均输出功率。(a) 双 SESAM 锁模激光; (b) 单 SESAM 锁模激光

Fig. 2 Average output powers of the mode-locked lasers within 50 h. (a) Dual-SESAM mode locked laser; (b) single-SESAM mode locked laser

3 SESAM被动锁模动力学过程数值分析

饱和吸收体被动锁模激光的脉冲演化动力学过程可由 Haus 主方程描述^[9, 10]：

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

式中 $A(T, t)$ 表示缓变场包络, T_R 为光在谐振腔内往返时间, D 代表腔内群色散延迟, δ 表示自相位调制系数, g 和 l 分别表示增益和损耗, $D_g = g/\Omega_g^2$ 表示增益色散 (Ω_g 代表增益带宽), $q(t)$ 表示 SESAM 的可饱和吸收损耗系数, 其与 $A(T, t)$ 的相互作用关系为

$$\frac{\partial q(T, t)}{\partial t} = -\frac{q - q_0}{T_A} - q \frac{|A(T, t)|^2}{E_A}, \quad (2)$$

式中 q_0 为 SESAM 的初始吸收系数, 其与调制深度满足关系式^[15] $\Delta R = 1 - \exp(-q_0) \approx q_0$, T_A 为 SESAM 的恢复时间(弛豫时间), E_A 为 SESAM 的饱和通量。为便于理解, 将谐振腔中的元件按照图 3 进行分布, 并利用分步傅里叶变换法数值求解(1)式和(2)式。

根据实验条件选定合适的参数 ($T_R = 7.8$ ns, $D = 300$ fs², $\delta = 0.5$ MW⁻¹, $D_g = 1.66 \times 10^{-25}$), 计算较弱的初始光信号在谐振腔内往返 9000 次过程中的变化, 得到光脉冲与两 SESAM 可饱和吸收损耗系数 q_1 和 q_2 的演化过程, 结果分别如图 4 和图 5 所示。由图可见, 较弱的光脉冲经历初始阶段的复杂演化后, 逐渐趋于稳定。

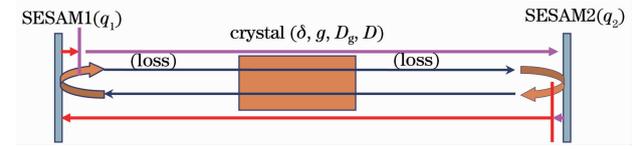
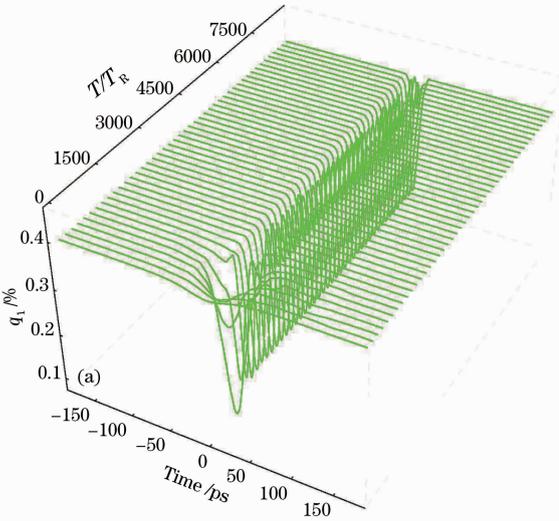


图 3 双 SESAM 锁模腔内各元件分布示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the elements distribution in dual-SESAM mode locking cavity

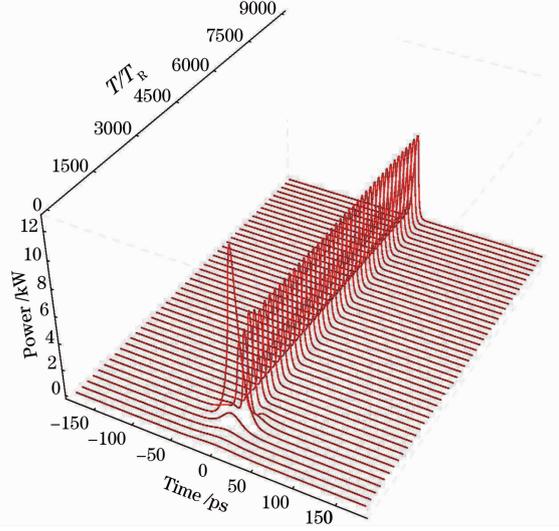


图 4 双 SESAM 锁模腔内光脉冲演化过程

Fig. 4 Evolution process of the dual-SESAM mode locked pulse in the cavity

为了更好地展示光脉冲与两 SESAM 饱和吸收损耗系数 q_1 和 q_2 的相互关系, 将光脉冲以及 SESAM 饱和吸收损耗 q_1 和 q_2 经过 100、800、900、1400、7700、9000 次往返后的情况分别放在同一幅图中列出, 如图 6 所示。由图可见, 开始时, 由于光信号较弱, 对双 SESAM 的漂白作用很弱 [图 6(a1)、(a2) 所示], 由

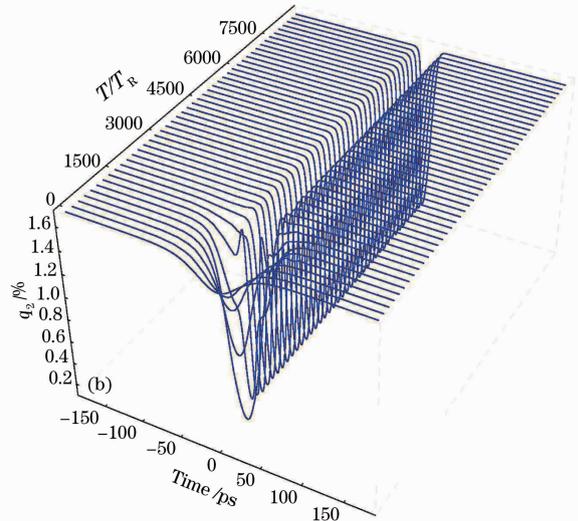


图 5 SESAM 可饱和吸收损耗系数 q_1 和 q_2 的演化过程

Fig. 5 Evolution process of the two saturable loss parameters q_1 and q_2

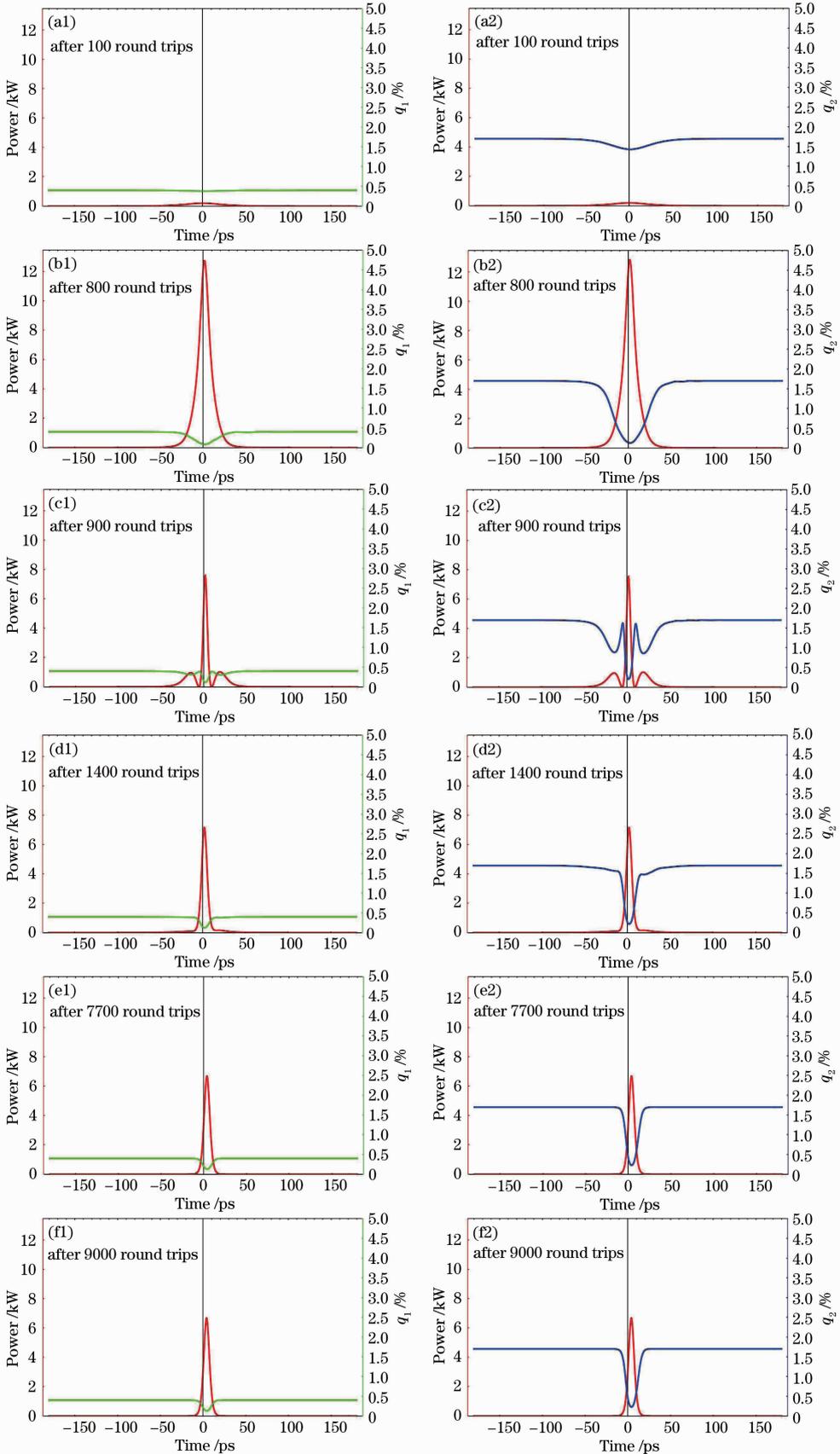


图 6 双 SESAM 锁模激光脉冲和 SESAM 饱和吸收损耗系数 q_1 、 q_2 的演化过程

Fig. 6 Evolutions of the dual-SESAM mode locked pulse and saturable loss parameters q_1 and q_2

于 SESAM 的吸收损耗较大,在腔内经历几百个往返之后,光强才得以积累变大[如图 6(b1)、(b2)所示]。此时,较大的光强使得两个 SESAM 得到漂白,出现明显的低损耗时间窗口,正是该时间窗口较好地压缩了脉冲宽度[如图 6(c1)、(c2)所示]。自此之后,锁模脉冲形状基本保持稳定[如图 6(d)、(e)、(f)所示]。在经过 9000 次腔内往返之后,锁模脉冲宽度约为 7.776 ps,与实验结果吻合较好。

作为对比,求解了描述单 SESAM 锁模动力学过程的 Haus 主方程。计算过程中将 SESAM1 用一平面高反射镜取代,锁模脉冲只在 SESAM2 处经受可饱和吸收损耗 q_2 。与双 SESAM 锁模情况下数值计算得到的 7.776 ps 的脉宽相比,单 SESAM 锁模得到的脉冲脉宽约为 8.31 ps,该数值计算结果表明双 SESAM 锁模可以获得更窄脉宽;对于双 SESAM 锁模,当腔内增益 g 处于 3.26%~3.34% 范围之内时,较弱的光脉冲经 9000 次往返能得到基本稳定的结果,而对于单 SESAM 锁模,相应的腔内增益 g 的稳定区间为 2.78%~2.82%,对比表明双 SESAM 锁模稳定区间要宽一些,这与实验中双 SESAM 稳定锁模比单 SESAM 稳定锁模的抽运光功率区间更大相吻合。

4 结 论

基于 LD 抽运 Nd:YVO₄ 晶体,实现了双 SESAM 被动锁模激光稳定运转。实验结果表明,与单 SESAM 被动锁模相比,双 SESAM 锁模得到的光脉冲脉宽更窄,稳定运转抽运功率区间更大,而且长时间运转稳定性更高。理论上数值求解了双 SESAM 和单 SESAM 被动锁模的 Haus 方程,分析了腔内脉冲演化过程及相关参数。理论计算与实验结果吻合得较好。

参 考 文 献

- 1 Fu Jie, Pang Qingsheng, Chang Liang *et al.*. Research on cavity-dumping mode-locked laser of picosecond at 10 kHz[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(3): 0314002
付洁,庞庆生,常亮等. 10 kHz腔倒空锁模皮秒激光器研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(3): 0314002
- 2 Zhang Bingyuan, Wang Guoju, He Jingliang *et al.*. Passively mode locking of Nd:YVO₄ laser with GRIN lens as optical coupler[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(7): 0714001
张丙元,王国菊,何京良等. 自聚焦透镜耦合激光二极管抽运 Nd:YVO₄锁模激光器的研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(7): 0714001
- 3 Wang Yonggang, Qu Zunshi, Liu Jie *et al.*. High power picosecond lasers mode locked with carbon based absorbers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(7): 0702001
王勇刚,曲遵世,刘杰等. 碳基吸收体被动锁模大功率皮秒激光器[J]. *中国激光*, 2012, **39**(7): 0702001
- 4 U. Keller, W. H. Knox, H. Roskos. Coupled-cavity resonant passive mode-locked Ti:sapphire laser[J]. *Opt. Lett.*, 1990, **15**(23): 1377~1379
- 5 N. Metzger, C. Leburn, A. Lagatsky *et al.*. Femtosecond pulse generation around 1500 nm using a GaInNAsSb SESAM[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(23): 18739~18744
- 6 C. J. Saraceno, O. H. Heckl, C. R. E. Baer *et al.*. SESAMs for high-power femtosecond modelocking: power scaling of an Yb:LuScO₃ thin disk laser to 23 W and 235 fs[J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(21): 20288~20300
- 7 F.-Q. Li, K. Liu, L. Han *et al.*. High-power 880-nm diode-directly-pumped passively mode-locked Nd:YVO₄ laser at 1342 nm with a semiconductor saturable absorber mirror[J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(8): 1485~1487
- 8 F. Fusari, A. Lagatsky, G. Jose *et al.*. Femtosecond mode-locked Tm³⁺ and Tm³⁺-Ho³⁺ doped 2 μm glass lasers[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(21): 22090~22098
- 9 H. Haus. Theory of mode locking with a slow saturable absorber[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1975, **11**(9): 736~746
- 10 H. A. Haus. Theory of mode locking with a fast saturable absorber[J]. *J. Appl. Phys.*, 1975, **46**(7): 3049~3058
- 11 H. A. Haus, J. G. Fujimoto, E. P. Ippen. Analytic theory of additive pulse and Kerr lens mode locking[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1992, **28**(10): 2086~2096
- 12 F. Kärtner, U. Keller. Stabilization of solitonlike pulses with a slow saturable absorber[J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(1): 16~18
- 13 F. Kärtner, J. A. der Au, U. Keller. Mode-locking with slow and fast saturable absorbers: what's the difference? [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 1998, **4**(2): 159~168
- 14 D. Kopf, F. Kärtner, K. Weingarten *et al.*. Pulse shortening in a Nd:glass laser by gain reshaping and soliton formation[J]. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(24): 2146~2148
- 15 C. Hönninger, R. Paschotta, F. Morier-Genoud *et al.*. Q-switching stability limits of continuous-wave passive mode locking[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1999, **16**(1): 46~56

栏目编辑: 张 腾