

双 SESAM 被动锁模超短脉冲光纤激光器

何广龙¹, 徐 莉¹, 金 亮^{1*}, 马晓辉¹, 吴国盛², 隋庆学², 张志敏²

(1. 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;

2. 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体 (Semiconductor Saturable Absorber Mirror, SESAM) 被动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, 设计了一种线型腔结构的双 SESAM 锁模超短脉冲光纤激光器。首先, 通过增加 SESAM 个数的方式使得光脉冲在谐振腔中的一个振荡周期内多次经过可饱和吸收体, 有效增加了可饱和吸收体对光脉冲前后沿的吸收, 抑制了因泵浦功率过大而产生的调 Q 锁模效应, 有助于压缩脉冲宽度、提高单脉冲能量, 摆脱了因 SESAM 调制深度较低而对压缩脉冲宽度和提高单脉冲能量造成的限制。其次, 通过在系统中引入一段正色散光纤, 降低了因峰值功率过高而引起的非线性效应, 进一步提高了脉冲能量。最后, 在相同调制深度及饱和通量条件下, 与单 SESAM 锁模相比, 双 SESAM 锁模光纤激光器输出脉冲宽度由 693 fs 降低到 449 fs, 缩短了 35.2%, 脉冲能量由 2.92 nJ 提高到 5.31 nJ, 上升 45%。

关键词: 超短脉冲; 双 SESAM; 调制深度; 被动锁模

中图分类号: TN29 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0505002

Double SESAM passively mode-locked ultrashort pulse fiber laser

He Guanglong¹, Xu Li¹, Jin Liang^{1*}, Ma Xiaohui¹, Wu Guosheng²,
Sui Qingxue², Zhang Zhimin²

(1. State Key Laboratory of High-Power Semiconductor Lasers, Changchun University
of Science and Technology, Changchun 130022, China;

2. Military Representative Office of Army Armored Forces in Changchun, Changchun 130022, China)

Abstract: Aiming at the problem of wide pulse pedestal and lower pulse energy of passively mode-locked fiber laser based on Semiconductor Saturable Absorber Mirror (SESAM), a double SESAM passively mode-locked ultrashort pulse fiber laser based on linear cavity structure was designed. Firstly, through increasing the number of SESAM, the optical pulse would pass through the SESAM repeatedly in one oscillating period in the cavity, the absorption of the absorber was improved to the pulse front and back edge, the Q mode-locked effect due to larger pump power was suppressed, contributed to pulse compression and raised the single pulse energy, the effect of the SESAM lower modulation depth on the pulse width and single pulse energy was eliminated. Secondly, the introduction of positive dispersion in

收稿日期: 2017-12-10; 修订日期: 2018-01-20

基金项目: 吉林省重点科技攻关项目 (20150204068GX)

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

通讯作者: 金亮 (1987-), 男, 助理研究员, 博士, 主要从事非线性光学和光纤激光器方面的研究。Email: namemichael@163.com

the system could reduce the nonlinear effect caused by the peak power, and further improving the pulse energy. Finally, compared with the single SESAM mode locking under the same modulation depth and saturation flux, the output pulse width of the double SESAM mode-locked fiber laser shorted 35.2%, from 693 fs to 449 fs, and the single pulse energy raised 45%, from 2.92 nJ to 5.31 nJ.

Key words: ultrashort pulse; double SESAM; modulation depth; passively mode-locked

0 引言

当前, 微制造技术的快速发展向加工尺度和精度提出了挑战, 需要将加工精度延伸至亚 μm 甚至 nm 量级, 并且实现真正意义上的三维立体微加工, 而传统的长脉冲和连续激光主要依靠聚焦产生的高温来烧蚀材料, 热扩散范围大, 加工精度有限。利用飞秒微加工技术有望克服上述传统激光加工技术所面临的困难。

目前, 锁模技术是实现飞秒级超短脉冲输出的主要手段, 而基于半导体可饱和吸收体(Semiconductor Saturable Absorber Mirror, SESAM) 被动锁模光纤激光器是最早广泛用于微加工领域的超短脉冲激光器^[1-5]。由于其结构简单、可靠性高, 在制备过程中可灵活控制调制深度、恢复时间、饱和通量等关键参数, 并且根据需要可加工集成在光纤端头上, 便于实现全光纤化, 成为备受人们关注的被动锁模器件。2009 年, 张弛^[6]等人基于 SESAM 锁模, 同时利用高掺 Yb^{3+} 大模场面积光子晶体光纤作为增益介质, 在 $1\ 037\ \text{nm}$ 处实现脉冲宽度 $367\ \text{fs}$, 脉冲能量 $29.3\ \text{nJ}$ 的脉冲输出。2014 年, CR Phillips 等人^[7]基于 SESAM 被动锁模, 同时利用 $\text{Yb}:\text{CaGdAlO}_4$ 进行色散管理实现孤子锁模, 在 $1\ 050\ \text{nm}$ 处实现脉宽 $114\ \text{fs}$, 脉冲能量 $9.73\ \text{nJ}$ 的锁模脉冲输出。为了降低锁模阈值, 研究人员通常采用较低调制深度^[8-9]的 SESAM 作为锁模器件, 使其易被漂白, 实现相位锁定。但因此对脉冲前后沿的吸收减弱, 无法进一步压缩脉冲, 并且调制深度低限制了泵浦功率的提高, 无法进一步提高脉冲能量。

针对低调制深度 SESAM^[10-11]对脉冲宽度和单脉冲能量的制约, 文中采用了一种线型腔结构双饱和吸收体被动锁模超短脉冲光纤激光器。通过在谐振腔中增加 SESAM 使得光脉冲在谐振腔内的一个

振荡周期中多次经过 SESAM, 增加了可饱和吸收体对光脉冲前后沿的吸收, 而且多个 SESAM 可有效抑制因脉冲能量过大导致的光脉冲分裂, 有助于压缩脉冲宽度和提高单脉冲能量。

1 SESAM 锁模理论分析

饱和吸收体被动锁模激光的脉冲演化动力学过程可由 Haus^[12]主方程描述:

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

式中: $A(T,t)$ 为缓变场包络; T_R 为光在腔内的往返时间; D 为腔内群色散延迟; δ 为自相位调制系数; g 和 l 分别为增益和损耗; $D_g = g/\Omega_g^2$ 增益色散 (Ω_g 表示增益带宽); $q(t)$ 为可饱和吸收损耗系数。 $q(t)$ 其表达式为:

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

式中: q_0 为小信号吸收系数; I_{sat} 为吸收体饱和光强; I 为腔内光束径向依赖的光强。SAM 的反射比 R 取决于材料的吸收率 q , 即 $R = 1 - q$ 。调制深度 ΔR 小于小信号吸收率 q_0 , 这是由于非饱和损耗 a_{ns} 造成的, $\Delta R = q_0 - a_{ns}$ 。引起非饱和损耗的主要原因是晶体缺陷。对于理想的可饱和吸收体:

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

且

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

式中: g 为腔内单程饱和振幅增益系数; $\Delta\Omega_g$ 为增益介质的光谱半宽度。其中 $q_1 < 1$, 为吸收振幅损耗系数。通过公式(2)、(4)可知, 随着 ΔR 的提高, 可饱和吸收体对光脉冲前后沿的吸收增加, 脉冲宽度 τ_p 减

小。因此,增大 SESAM 的调制深度可以增加吸收体对脉冲前后沿的吸收,但调制深度过大会引起非饱和和损耗,可能产生 Q 调制不稳定性。为了抑制 Q 调制不稳定性,ΔR 应满足关系式^[13]:

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

式中: $E_p = P_{in}/f$ 为腔内脉冲能量, P_{in} 为腔内平均功率, f 为脉冲重复频率; $F_{sat,L} = \frac{hv}{m\sigma}$ 为激光介质的饱和通量, hv 为单光子能量, σ 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; $F_{sat,A}$ 为 SESAM 的饱和通量; A_L, A_A 分别为腔模在激光介质和 SESAM 上的光斑面积。从公式(5)可知,较高的腔内脉冲能量有助于抑制 Q 调制不稳定性,因此需要通过增加泵浦功率提高信号增益,减小腔内损耗。

2 实验装置

实验搭建的线型腔双饱和吸收体被动锁模光纤激光器如图 1 所示。泵浦源为带尾纤的 976 nm 单模半导体激光器,最大泵浦功率为 500 mW,通过波分复用器(Wavelength Division Multiplexing, WDM)将泵浦光耦合进线型腔中。谐振腔另一端为光纤布拉格反射光栅(Fiber Bragg Grating, FBG),中心波长 1 060 nm,反射带宽 8 nm,反射率 20%。掺镱光纤(YDF, SM-YSF-LO)作为增益介质,长度为 0.3 m,在 1 064 nm 处纤芯峰值吸收率为 80 dB/m。光纤另一端与环形器相连接,插入损耗 0.3 dB。环形器另两端分别与 SAM1 和 SAM2 相连接,实验采用的反射式 SESAM 为 Batop 公司生产,高反区 1 010~1 120 nm,调制深度 14%,非饱和和损耗 8%,饱和和恢复时间 6 ps,饱和通量 60 μJ/cm²。

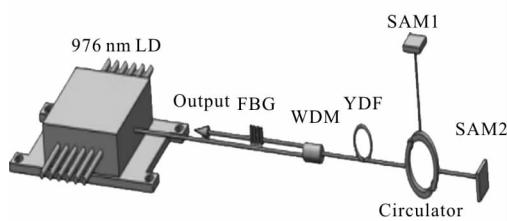


图 1 双 SESAM 被动锁模系统结构

Fig.1 Double SESAM passively mode-locked system structure

3 实验结果与分析

图 2 为脉冲宽度和单脉冲能量与泵浦功率的关

系。由图可知,锁模建立的泵浦阈值为 30 mW。随着泵浦功率的提高,形成振荡的模式增加,腔内光场的波动性分布增强,SESAM 形成非线性吸收,锁模效应建立,随着振荡次数的增加,脉冲宽度越来越窄,单脉冲能量随着泵浦功率的增加逐渐提高,脉冲对 SESAM 的漂白能力也越来越强。在泵浦功率为 310 mW 时,得到脉冲的半峰全宽为 447 fs(图 2 中 A 点所示),单脉冲能量 5.05 nJ(图 2 中 A' 点所示)。输出光谱宽度为 9 nm,如图 3 所示。

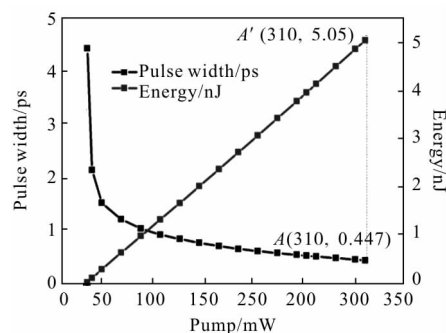
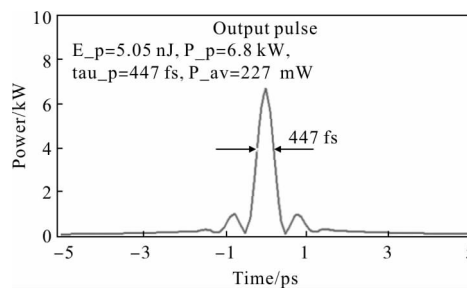
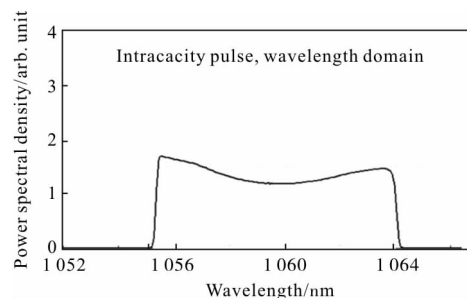


图 2 双 SESAM 脉冲宽度/单脉冲能量和泵浦功率关系
Fig.2 Relationship between the double SESAM pulse width /single pulse energy and pump power



(a) 输出光脉冲宽度

(a) Output pulse width



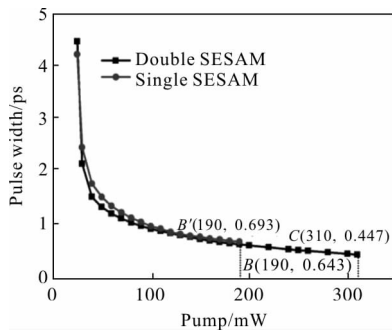
(b) 输出光谱

(b) Optical spectrum

图 3 双 SESAM 结构输出脉冲特性

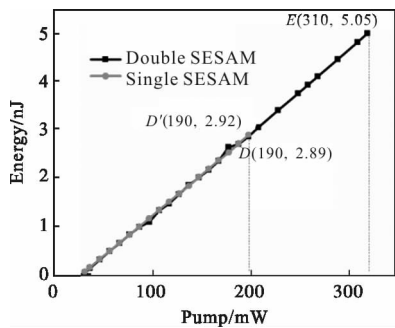
Fig.3 Double SESAM output pulse characteristics

为了与单 SESAM 线型腔结构进行对比, 实验建立了单 SESAM 被动锁模光纤激光器, 其结构与图 1 类似, 将 SESAM 锁模光纤激光器中的 SAM1 和环形器去掉, 其他光学器件参数相同。由实验得到, 单 SESAM 结构可承受的最大泵浦功率 190 mW, 对应脉冲宽度为 693 fs(图 4(a)B'点), 单脉冲能量 2.92 nJ(图 4(b)D'点), 如果继续增加腔内功率, 腔内纵模数量会增加, 振荡腔内的模式电场起伏不定, 不能产生稳定的锁模机制, 导致腔内产生不稳定的多脉冲, 如图 5 所示。



(a) 脉冲宽度和泵浦功率关系

(a) Relationship between pulse width and pump power



(b) 脉冲能量和泵浦功率关系

(b) Relationship between pulse energy and pump power

图 4 单 SESAM 结构与双 SESAM 结构输出特性对比
Fig.4 Comparison of output characteristics of single SESAM structure and double SESAM structure

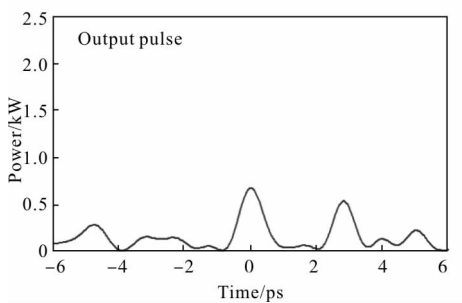


图 5 单 SESAM 在 200 mW 时多脉冲输出

Fig.5 Single SESAM 200 mW multipulse output

由图 4(a)可知, 在泵浦功率 30~190 mW 区间内, 双 SESAM 锁模结构的脉冲宽度较单 SESAM 锁模结构脉冲宽度窄。对于双 SESAM 结构, 由于光脉冲多次通过 SESAM, 对光脉冲前后沿进行有效的吸收, 减小了光脉冲宽度, 且 SESAM 多次吸收光脉冲可有效抑制腔内的啁啾效应, 抑制因泵浦功率过大造成的多脉冲不稳定性, 最终将泵浦功率由 190 mW 提高到了 310 mW。根据图 4(b)可知, 在泵浦功率小于 190 mW 时, 由于单 SESAM 锁模结构中无环形器介入, 使得其插入损耗减小, 得到的单脉冲能量略高于双 SESAM 锁模结构的单脉冲能量 2.89 nJ(图 4(b)D 点)。当泵浦增加到大于 190 mW 时, 泵浦功率的提高使得腔内非线性和色散效应增强, 群速度色散^[14](Group Velocity Dispersion, GVD) 和自相位调制^[15](Self-phase Modulation, SPM)共同调制, 在 1 064 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, 而在更高的泵浦功率条件下双 SESAM 结构仍然可以形成稳定的锁模脉冲输出, 脉冲能量随着泵浦功率的提高不断增加, 在泵浦功率为 310 mW 时, 脉冲宽度由 693 fs 降低到 447 fs(图 4(a)C 点), 单脉冲能量由 2.92 nJ 提高到 5.05 nJ(图 4(b)E 点)。与单 SESAM 锁模结构相比, 双 SESAM 锁模结构具脉冲宽度窄、单脉冲能量高的特点。

另外, 在双 SESAM 锁模结构中引入一段无源单模光纤可以增加腔内的正色散, 使得光脉冲正啁啾增大、光脉冲展宽, 抑制因光脉冲峰值功率过高而积累的非线性效应, 能够有效提高单脉冲能量, 减小了光脉冲分裂效应。实验得到的脉冲宽度和单脉冲能量随无源光纤长度的变化关系如图 6 所示。

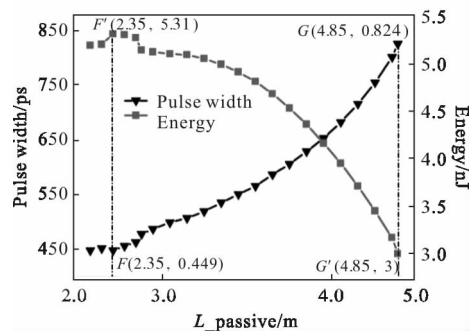


图 6 双 SESAM 结构脉冲宽度/单脉冲能量随无源光纤长度变化的关系

Fig.6 Relationship between the double SESAM pulse width/single pulse energy and passive fiber length

实验在泵浦功率 310 mW, 无源光纤长度 2.35 m 时得到的光脉冲宽度为 449 fs、单脉冲能量为 5.31 nJ (图 6 中 F, F' 点)。当无源光纤长度大于 2.35 m 时, 腔内正色散的增加使得啁啾效应变大, 光脉冲将部分能量转移到其他频率分量上, 使得光脉冲在时域上展宽和波形畸变, 甚至导致脉冲分裂而无法形成稳定的锁模脉冲输出。随着单模光纤长度的增加, 腔内啁啾累积严重, 使得单脉冲能量逐渐下降, 脉冲宽度逐渐增加。当无源光纤长度 4.8 m 时, 泵浦功率最大为 100 mW, 脉冲宽度 824 fs、单脉冲能量 3 nJ (图 6 中 G, G' 点), 因此在无源光纤长度为 2.35 m 时, 得到了脉冲宽度最短、单脉冲能量最大的光脉冲, 如图 6 中 F, F' 点所示。

最后, 为避免调 Q 锁模的产生, 由公式(5)可得 $\Delta R/\text{energy}$ 的关系, 如图 7 所示。

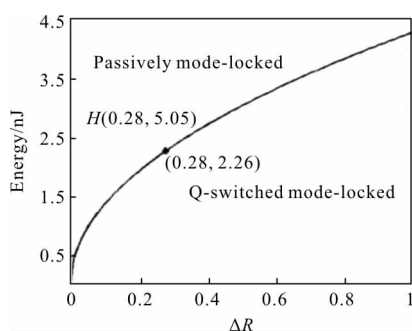


图 7 $\Delta R/\text{energy}$ 的关系

Fig.7 Relationship between the $\Delta R/\text{energy}$

实验所用图 1 结构, 系统的调制深度 ΔR 等效于 28% ($\Delta R = \Delta R_1 + \Delta R_2 = 28\%$), 根据公式(5), 当单脉冲能量大于 2.26 nJ 时才能有效抑制 Q 调制不稳定性。实验采用增加泵浦功率来增加脉冲能量, 最终得到单脉冲能量为 5.05 nJ, 从而抑制 Q 调制不稳定性, 见图 7 中 H 点, 在被动锁模的区域内。吸收体个数增多虽有利于其调制深度的增加, 但系统损耗将增加, 易产生调 Q 锁模, 且通过提高泵浦功率来提高单脉冲能量可能会损害吸收体。

4 结论

报道了一种线型腔结构的双 SESAM 被动锁模超短脉冲光纤激光器。与单 SESAM 被动锁模相比, 双 SESAM 锁模得到的光脉冲脉宽更窄, 单脉冲能量更大, 稳定运行时的泵浦功率范围更大。这

是由于引入另一个可饱和吸收体, 光脉冲在腔内一个振荡周期中通过吸收体的次数增加, 使得吸收体对脉冲前后沿的吸收增加, 有助于压缩脉冲宽度和提高单脉冲能量, 可有效抑制因泵浦功率过大导致的调 Q 锁模效应。脉冲宽度由 693 fs 缩短至 447 fs, 单脉冲能量由 2.92 nJ 提高至 5.05 nJ, 泵浦功率由 190 mW 提高到 310 mW。另外, 通过引入适当的正色散, 有效的提高了单脉冲能量, 抑制了光脉冲分裂效应。在泵浦功率 310 mW 时, 引入 2.35 m 长的无源单模光纤, 得到的脉冲宽度为 449 fs, 单脉冲能量为 5.31 nJ。

参考文献:

- [1] Keller U. Recent development in compact ultrafast lasers[J]. *Nature*, 2003, 424(6950): 831-838.
- [2] Yang K, Zhao S, He J, et al. Diode-pumped passively Q-switched and mode-locked Nd: GdVO₄ laser at 1.34 μm with V:YAG saturable absorber [J]. *Opt Express*, 2008, 16(25):20176-20185.
- [3] Zhao Jianchuan, Guo Ruhai, Sun Tao. Development history and trend analysis of shipborne laser weapons [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(2): 151-155. (in Chinese)
赵建川, 郭汝海, 孙涛. 舰载激光武器的发展历程及趋势分析[J]. *中国光学*, 2013, 6(2): 151-155.
- [4] Gao Jing, Yu Feng, Kuang Hongshen, et al. Generation of supercontinuum spectra from acousto-optic Q-switched nanosecond fiber lasers [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(5): 1138-1142. (in Chinese)
高静, 于峰, 匡鸿深, 等. 纳秒声光调 Q 光纤激光器产生超连续谱[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(5): 1138-1142.
- [5] Yang Zuoyun, Wang Dayong, Wang Yunxin, et al. Measurement method of the half-wave voltage of phase modulator based on the principal of laser phased array [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(3): 906-910. (in Chinese)
杨作运, 王大勇, 王云新, 等. 基于激光相控阵原理的相位调制器半波电压测量方法 [J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(3): 906-910.
- [6] Zhang Chi, Hu Minglie, Song Youjian, et al. An Yb-doped large-mode-area photonic crystal fiber mode-locking laser with free output coupler [J]. *Chinese Journal of Physics*, 2009, 58(11): 7727-7734. (in Chinese)
张驰, 胡明列, 宋有建, 等. 自由耦合输出的大模场面积光

- 子晶体光纤锁模激光器 [J]. 物理学报, 2009, 58(11): 7727-7734.
- [7] Phillips C R, Mayer A S, Klenner A, et al. SESAM modelocked Yb: CaGdAlO₄ laser in the soliton modelocking regime with positive intracavity dispersion [J]. *Optics Express*, 2014, 22(5): 6060.
- [8] Hohmuth R, Paunescu G, Lange C H, et al. Saturable absorber mirrors for passive mode-locking [J]. *Journal of Physics D Applied Physics*, 2001, 34(16): 2455-2464.
- [9] Lederer M J, Kolev V, Luther-Davies B, et al. The properties ion-implanted InGaAs single quantum well semiconductor saturable absorber mirrors for passive mode-locking [C]//Laser and Elector-optics Society, The 14th Annual Meeting of the IEEE, 2001: 969052.
- [10] Han Kezhen, Hou Jia, Yang Kejian, et al. Analysis of pulse dynamics for passive mode locking with dual semiconductor saturable absorber mirrors[J]. *Chinese J Laser*, 2013, 40(6): 0602002. (in Chinese)
韩克祯, 侯佳, 杨克建, 等. 双饱和吸收镜被动锁模脉冲动力学过程分析[J]. 中国激光, 2013, 40(6): 0602002.
- [11] Zhang Haiou, Cui Xuelong, Xu Jinlong, et al. CW mode-locking Yb:NaY (WO₄)₂ femtosecond laser with a semiconductor saturable absorber mirror[J]. *Chinese J Laser*, 2012, 39(11): 1102002. (in Chinese)
张海鸥, 崔雪龙, 徐金龙, 等. 基于半导体可饱和吸收镜锁模的 Yb:NaY(WO₄)₂ 飞秒激光器[J]. 中国激光, 2012, 39(11): 1102002.
- [12] Haus H. Theory of mode locking with a slow saturable absorber [J]. *Quantum Electron IEEE Journal of*, 1975, 11(9): 736-746.
- [13] Honninger 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.
- [14] Fan Dan, Chen Shufen, Gao Yuan, et al. Design and simulation of all-fiber ytterbium doped passively mode-locked laser with dispersion control [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(8): 2399-2403.
- [15] Hui Zhanqiang. Demonstration of 6×40 Gbit/s all-optical wavelength multicasting exploiting self-phase modulation in photonic crystal fiber [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(1): 222-227.