

doi:10.3788/gzxb20154407.0714001

LD 侧面泵浦半导体可饱和吸收镜被动锁模激光器

王茜, 王勇刚, 段利娜, 李璐, 王屹山

(中科院西安光学精密机械研究所 瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 西安 710119)

摘 要:利用半导体可饱和吸收镜锁模技术,在半导体激光侧面抽运 Nd:YAG 晶体固体激光器 Z 型腔结构中实现了连续锁模运转,获得输出功率 356 mW、重复频率 101 MHz、单脉冲能量 3.49 nJ、脉冲宽度 23.4 ps 和中心波长 1 064 nm 的皮秒锁模激光输出,测得光束质量 M^2 因子约 1.2。为了提升锁模脉冲的平均单脉冲能量,实验研究了声光调 Q 开关与半导体可饱和吸收镜同时作用的调 Q 锁模激光器,在提高锁模脉冲稳定性的同时,将锁模平均单脉冲能量提高到 406 nJ,为连续锁模脉冲的 116 倍。

关键词:固体激光器;被动锁模;调 Q 锁模;半导体可饱和吸收镜;声光调 Q 开关;Nd:YAG

中图分类号:TN248

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2015)07-0714001-5

LD Side-pumped Passive Mode-locked Nd:YAG Laser with Semiconductor Saturable Absorption Mirror

WANG Xi, WANG Yong-gang, DUAN Li-na, LI Lu, WANG Yi-shan

(State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

Abstract: In order to obtain picoseconds pulse output, a Nd:YAG laser passively mode-locked was proposed by a reflective semiconductor saturable-absorber mirror. Based on Z-type resonator, the laser output was obtained with repetition frequency of 101 MHz, pulses of 23.4 ps, central wavelength of 1 064 nm and average power of 356 mW, corresponding to 3.49 nJ pulse energy. The measured beam quality is about 1.2. In order to enhance the average single pulse energy of mode-locked pulse, Q-switched mode-locking operation was obtained by inserting an acousto-optic Q-switch, producing 364 mW pulses with 1.03 MHz repetition rate. The resulting 406 nJ pulse energy is 116 times larger than that from continuous mode-locking operation.

Key words: Solid state laser; Passive mode-locked; Q-switched and mode-locked; Semiconductor Saturable Absorption Mirror (SESAM); Acousto-optic Q-switch; Nd:YAG

OCIS Codes: 140.3480; 140.3530; 140.4050; 320.7090; 140.7090; 140.3580

0 引言

半导体可饱和吸收镜 (Semiconductor Saturable Absorption Mirror, SESAM) 是采用分子束外延 (Molecular Beam Epitaxy, MBE) 或者金属有机化学气相沉淀 (Metal Organic Chemical Vapor Deposition, MOCVD) 技术将半导体可饱和吸收体直接生长在半导体布喇格反射镜上形成的器件。1992 年, U. Keller 等^[1] 成功研制出 SESAM 并将其应用于锁模激光器。

随着半导体外延技术的发展与成熟, SESAM 已成为锁模激光器中理想的锁模元件。与主动锁模和染料被动锁模激光器相比, SESAM 被动锁模激光器具有结构简单、稳定性强、光束质量好等优点, 在工业、医疗、科研等领域有着广泛的应用^[2]。

国内外利用 SESAM 被动锁模特性, 在激光二极管 (Laser Diode, LD) 侧面抽运的多种 Nd³⁺ 激光器中实现了皮秒锁模激光脉冲输出。1999 年, 瑞典的 G. J. Spuhler 团队研究了侧泵 SESAM 被动锁模的研究^[3],

基金项目:国家自然科学基金(No. 61378024)资助

第一作者:王茜(1992-),女,硕士研究生,主要研究方向为超快固体激光器。Email:wangxi@opt.cn

导师(通讯作者):王勇刚(1973-),男,研究员,主要研究方向为饱和吸收体及超快激光器。Email:chinawygxjw@opt.ac.cn

收稿日期:2014-12-23;录用日期:2015-03-04

<http://www.photon.ac.cn>

实现了脉冲宽度 16 ps、光束质量 M^2 因子小于 1.05 的锁模激光输出;2000 年,该团队得到了 24.2 W 的锁模激光输出^[4]. 国内 SESAM 被动锁模激光器起步相对较晚,2003 年开始,由于端泵固体激光器更容易得到基横模,所以 SESAM 被动锁模多是在端泵上实现的^[10-12]. 但是端泵锁模存在成本高、泵浦功率低等缺点. 国内功率较高的 SESAM 被动锁模多是在侧泵结构中实现的^[5-9]. 2005 年,北京工业大学的张丙元利用三镜直腔结构实现了 2 W 的锁模激光输出^[5]. 2009 年,国防科技大学的许晓军采用折叠腔实验,实现了 9.5 W 的稳定锁模激光输出,脉宽约 26.4 ps,光束质量因子 M^2 约为 1.3^[8]. 但这些报道很少涉及对激光器的光束质量及稳定性的研究.

本文利用 LD 侧面泵浦 Nd:YAG 晶体,将国产 SESAM 作为锁模元件,在四镜 Z 型折叠激光腔中,实现了光束质量因子 M^2 约为 1.2 的稳定皮秒锁模激光输出,其脉冲宽度为 23.4 ps,重复频率为 101 MHz,单脉冲能量为 3.49 nJ(输出功率为 356 mW). 为了增加锁模的单脉冲能量,实验采取在谐振腔中插入声光调 Q 开关的方法实现调 Q 锁模脉冲输出,将平均单脉冲能量提高到 406 nJ.

1 实验装置

实验装置如图 1,由于条件所限,自制的锁模元件 SESAM 参量没有测量. 泵浦采用的是北京吉泰基业的 GTPC-75S 侧泵模块,工作电流 0~20 A,电压 24 V,泵浦光功率可达 75 W. 激光棒 Nd:YAG 晶体尺寸为 $\Phi 3 \text{ mm} \times 65 \text{ mm}$,晶体两端面成凹形,以补偿腔内热透镜效应. LD 侧泵采用北京博医康水冷装置(HX-2050)冷却,冷却水温控制在 21℃. 腔镜 M_2 和 M_3 是平凹镜,曲率半径分别为 500 mm 和 100 mm,凹面镀 1 064 nm 的高反膜. M_1 是透射率为 5% 平面输出镜.

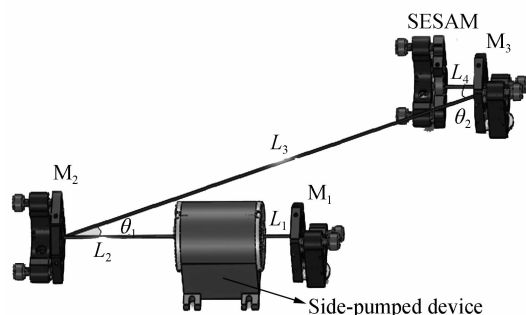


图 1 被动锁模侧泵 Nd:YAG 固体激光器

Fig. 1 Schematic of LD side-pumped passive mode-locked Nd:YAG laser with SESAM

实验采用 Z 型折叠腔,稳定锁模阈值条件为

$$E_P^2 \geq F_{\text{sat},A} A_{\text{eff},A} F_{\text{sat},L} A_{\text{eff},L} \Delta R \quad (1)$$

式中 E_P 为锁模后腔内单脉冲能量, $F_{\text{sat},L}$ 为增益介质的有效饱和通量, $A_{\text{eff},A}$ 、 $A_{\text{eff},L}$ 分别为 SESAM 和增益介质

上的光斑面积, ΔR 为调制深度, $F_{\text{sat},A}$ 为 SESAM 的饱和通量. 可知, SESAM 和增益介质上的光斑面积是主要的调节参量,所以在设计腔体时需注意控制两者的变化范围,并尽量实现独立调节.

快速设计 Z 型腔的方法为:1)采用 ABCD 传输矩阵^[13],根据谐振腔稳定条件设计一个简单的直线对称腔,两臂长分别为 120 mm. 2)在已经设计好的直线谐振腔中插入一个由两凹面全反镜 M_2 ($f_1 = 250 \text{ mm}$)、 M_3 ($f_2 = 50 \text{ mm}$)组成的望远镜系统,该结构可以根据参量计算出合适的放大率,直接选择相应的腔镜组进行实验;望远镜腔还可以在保持放大率不变的条件下,方便地改变腔镜焦距组合实现更长的腔体,对进一步降低重复频率,提高单脉冲能量和峰值功率有重要意义^[7-9]. 3)利用 ABCD 矩阵法分析 SESAM 表面光斑半径 w_A 及激光棒表面光斑半径 w_L 随各臂长的变化,对各臂长进行进一步调整. 臂长 L_1 的长度决定 L_2 的稳区范围, L_1 越小, L_2 稳区范围越大,所以 L_1 尽量取最小值,又因为后续要在 L_1 区间内加调 Q 开关,臂长 L_1 取值 120 mm; L_4 对稳区影响很大,适合微调,合适的选取 L_3 值可以决定 L_4 的范围; L_3 的取值影响着腔体的稳区范围和 w_L 的取值,根据谐振腔稳定条件以及锁模对 w_L 的要求,选取 $L_3 = 820 \text{ mm}$; 所以,最终选定稳区范围较大的 L_2 作为可调臂长.

图 2 为 SESAM 表面光斑半径 w_A 及激光棒表面

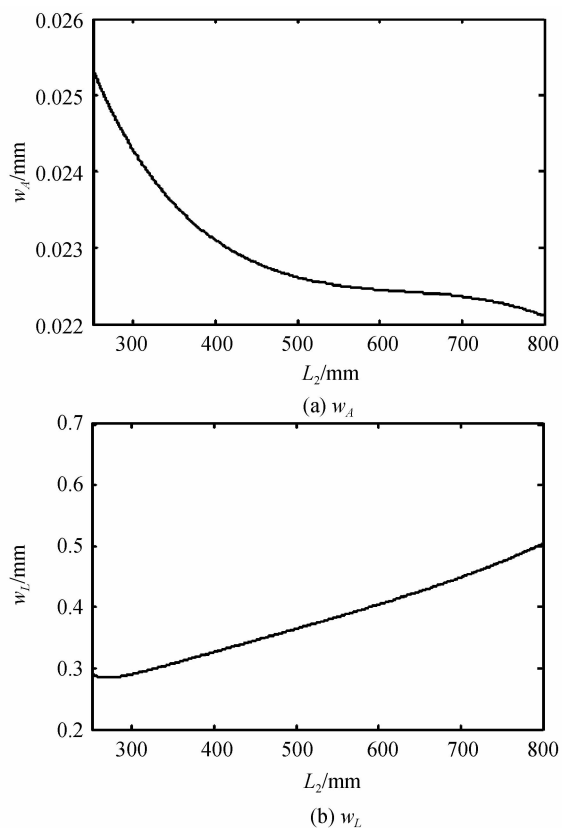


图 2 SESAM 表面光斑半径及激光棒激光晶体表面光斑半径随 L_2 变化规律

Fig. 2 The evolution of w_A and w_L versus L_2

光斑半径 w_L 随 L_2 的变化规律,在调整范围内 SESAM 表面光斑变化对锁模影响较大,而增益介质表面光斑变化对锁模影响较小,可以认为在不影响输出光功率及光束质量条件下实现 SESAM 表面光斑的单独调整.实验中通过微调 SESAM 位置,可实现其表面光斑大小连续可调,便于寻找合适的光斑尺寸以满足式(1)条件.考虑到谐振腔稳定条件以及锁模对 SESAM 和增益介质表面光斑面积的要求,选定臂长 $L_2=410\text{ mm}$, $L_4=55\text{ mm}$,则总腔长为 $1\ 470\text{ mm}$.为了减小象散,两折叠角尽可能小, θ_1, θ_2 均小于 8° .

实验中使用的仪器有 6 GHz 示波器 (Lecroy 8600A)、高速光电探测器 (DET10A/M, Thorlabs, Inc, USA)、光谱分析仪 (YOKOGAWA AQ6370, 分辨率 0.02 nm)、自相关仪 (APE/Pulse Check), 功率计 (2 W)、光束质量分析仪 (OPHIR Spiricon M^2 -200/200S-FU).

2 实验结果与分析

利用已设计的腔型结构进行实验.实验过程中,当泵浦电流提升至 6.8 A 时,开始出现稳定锁模波形,如图 3(a),其输出功率为 154 mW ,重复频率为 101.9 MHz ;继续加大泵浦电流,发现锁模脉冲频率不

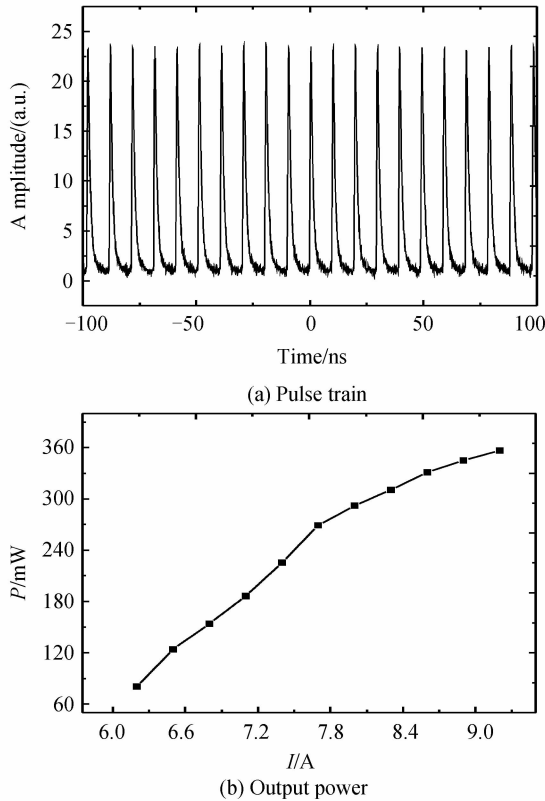


图3 连续锁模脉冲序列和稳定锁模激光器输出功率曲线
Fig. 3 Pulse train of the mode-locked laser and the evolution of output power versus the pump current

变,输出功率和脉冲峰值强度增加.当电流提升到 9.2 A 时,获得最大平均输出功率 356 mW ,单脉冲能量 3.49 nJ ;再次增加电流时,出现多脉冲调制现象.图 3(b)给出泵浦电流从 6.8 A 到 9.2 A 上升时,稳定锁模的平均输出功率变化曲线.

2.1 激光器性能表征

当泵浦电流 $I=9.2\text{ A}$ 时,激光器调制稳定锁模状态,用光谱分析仪测得激光器的输出谱线见图 4(a),

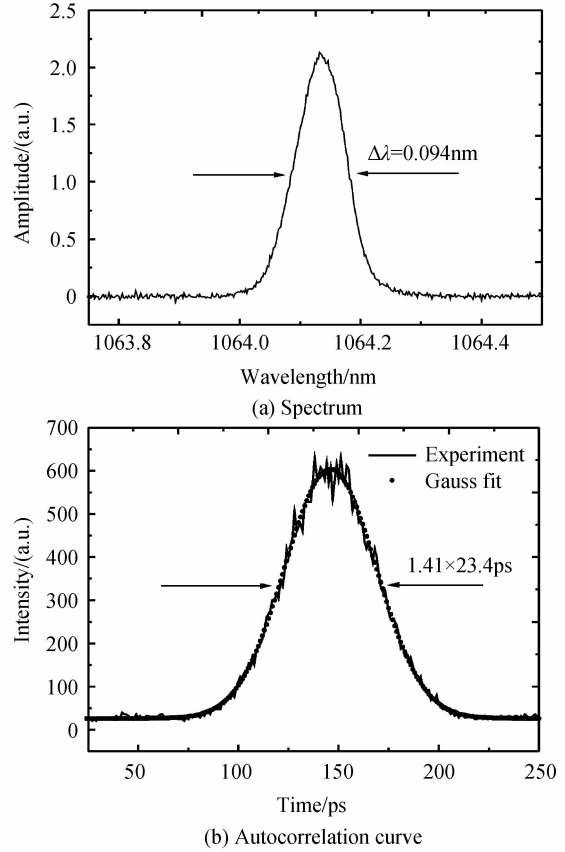


图4 激光输出光谱图和自相关曲线

Fig. 4 Spectrum of mode-locked pulses and autocorrelation curve

光谱中心波长为 $1\ 064.14\text{ nm}$,谱线宽度约 0.094 nm .根据傅里叶变换极限,其极限脉冲宽度为

$$\Delta\tau_p = \frac{0.315}{\Delta\nu} = \frac{0.315}{c\Delta\lambda} \lambda^2 \approx 12.6\text{ ps} \quad (2)$$

利用自相关仪测量得泵浦电流为 9.2 A 时激光器输出脉冲的自相关曲线见图 4(b),采用高斯拟合之后获得脉冲宽度为 23.4 ps ,与理想情况相比,实际脉冲较宽,可能是激光腔内器件色散导致.

为了了解锁模光束质量的好坏,用光束质量分析仪对输出激光的 M^2 因子进行了测量.测得泵浦电流 $I=9.2\text{ A}$ 时,光斑图形及二次曲线拟合如图 5.由图 5 可以看出,锁模后,激光器输出光斑模式为基模,光束质量 M^2 因子近似为 1.2 ($M_x^2=1.22; M_y^2=1.20$).

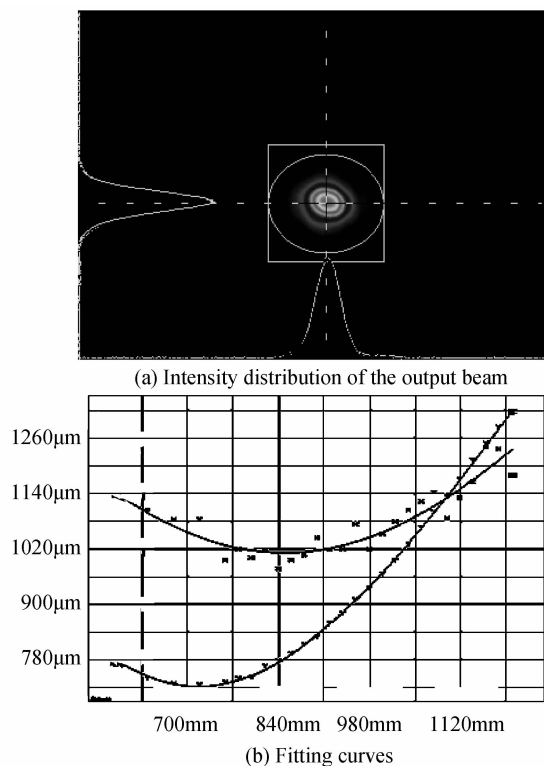


图5 实验测得光斑及二次曲线拟合

Fig. 5 Intensity distribution of the output beam and fitting curves

2.2 激光器的稳定性

尽管激光器实现了连续锁模,但在实验中发现,示波器上的脉冲波形在大时间尺度下仍存在一定起伏,因此对脉冲输出的稳定性进行了研究分析.

1) 脉冲上下抖动率.当泵浦电流为 9.2 A 时,激光器处于稳定锁模状态,观察示波器在 $10 \mu\text{s}/\text{div}$ 时间尺度上所显示的波形,发现波形在大时间尺度下仍存在无规则的起伏,根据示波器在 $10 \mu\text{s}/\text{div}$ 时间尺度上的伏值显示,可算出脉冲上下抖动率为 0.94%.

2) 输出功率稳定性.当锁模处于稳定状态时,保持泵浦电流 $I=9.2 \text{ A}$ 不变,不再进行任何操作,将激光器放置 8 h,利用功率计对输出光功率进行测量.实验发现在 8 h 内,脉冲幅值在一定范围内降低,平均输出功率也相应从 356 mW 下降到 280 mW.由此可知,激光器稳定性有待进一步改进.

3) 孔光阑限模.由于锁模脉冲波形在大时间尺度上有一定起伏,稳定性较差,在谐振腔里放置一个孔径为 0.2 mm 的小孔光阑,再微调光路使激光器处于稳定锁模状态,测得的波形图相比不加小孔的波形更加稳定,表明小孔光阑起到了限模作用.

3 声光调 Q 锁模

为了提高锁模的单脉冲能量,在锁模谐振腔中放入声光调 Q(型号:QS027-4S4G-U5-ST1)开关,进行调 Q 开关和 SESAM 同时作用的调 Q 锁模实验^[14-16].

首先,将声光调 Q 器件放入谐振腔的输出镜和侧泵装置之间,加大泵浦电流到 6.8 A,微调光路,使激光器维持之前的连续锁模状态.然后,打开声光调制器驱动电源,将调 Q 驱动频率设置为 10 kHz,微调腔镜,获得调 Q 锁模脉冲,如图 6(a).此时,输出脉冲的特点是:一个大脉冲由多个小脉冲组成;大脉冲整体表现为调 Q 状态,脉冲宽度约为 $1 \mu\text{s}$,其调制的脉冲周期受驱动频率控制;小脉冲整体为锁模状态,脉冲宽度约为 30 ps,其调制的脉冲周期受腔长控制.继续加大泵浦电流,激光器仍处于稳定调 Q 锁模状态,锁模脉冲的频率与脉冲宽度保持不变,输出功率不断增加.当电流为 9.2 A 时,获得最大平均输出功率为 418 mW,重复频率为 1.03 MHz,此时,一个大脉冲包络内约包含有 100 个小脉冲,单脉冲能量为 406 nJ,约为锁模脉冲的 116 倍.图 6(b)给出了泵浦电流从 6.8 A 上升到 9.5 A 时,调 Q 锁模的平均输出功率变化曲线.

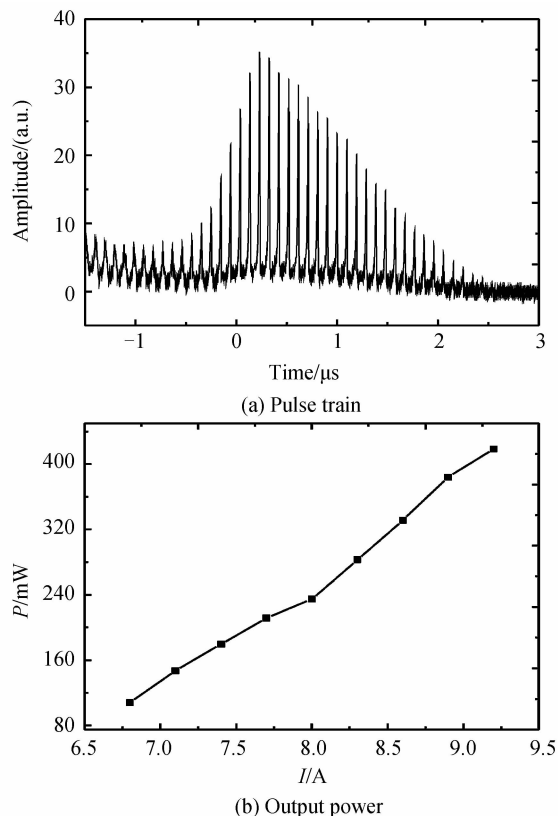


图6 声光调 Q 锁模波形和声光调 Q 锁模功率输出曲线
Fig. 6 Pulse train of the acousto-optic Q-switched and mode-locked laser and the evolution of output power versus the pump current

4 结论

本文利用国产 SESAM,在 LD 侧面泵浦 Nd:YAG 激光器中进行了被动锁模实验和声光调 Q 与 SESAM 同时作用的调 Q 锁模实验.首先利用 SESAM 在腔长 1.47 m 的 Z 型折叠腔中,获得了脉冲宽度为

23.4 ps, 光束质量 $M_x^2 = 1.22$, $M_y^2 = 1.20$ 的连续锁模脉冲, 但是单脉冲能量较低, 为 3.49 nJ. 而主被动联合锁模克服了这一缺点, 实验利用声光调 Q 开关与 SESAM 同时调制脉冲, 获得了稳定性较好的调 Q 锁模激光输出, 平均单脉冲能量为 406 nJ, 是连续锁模脉冲的 116 倍.

参考文献

- [1] KELLER U, MILLER D A B, BOYD G D, *et al.* Solid-state low-loss intracavity saturable absorber for Nd : YLF lasers: an antiresonant semiconductor Fabry-Perot saturable absorber [J]. *Optics Letters*, 1992, **17**(7): 505-507.
- [2] 姚建铨. 全固态激光及非线性光学频率变换技术[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 457.
- [3] SPUHLER G J, PASEHOTTA R, KELLER U, *et al.* diode-pumped passively mode-locked Nd : YAG laser with 10W average power in a diffraction limited beam[J]. *Optics Letters*, 1999, **24**(8): 528-530.
- [4] SPUHLER G J, SUDMEYER T, PASEHOTTA R, *et al.* Passively mode-locked high-power Nd : YAG lasers with multiple laser heads[J]. *Applied Physics B*, 2000, **7**(1): 19-25.
- [5] ZHANG Bing-yuan, CHEN Meng, LING Gang, *et al.* Study on diode-side-pumped mode-locked laser with semiconductor saturable absorber mirror[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(1): 59-62.
张丙元, 陈檬, 李港, 等. 激光二极管侧面抽运 Nd : YAG 锁模激光器的研究[J]. 光学学报, 2005, **25**(1): 59-62.
- [6] YU Y Z, YAO J Q. SESAM mode-locked YAG laser with LD side pumping module[C]. SPIE, **5627**, 2005.
- [7] ZHANG Hai-kun, XU Jin-long, HUANG Hai-tao, *et al.* Passively CW mode-locked Nd : YAG picoseconds laser with a partially reflective semiconductor saturable-absorber mirror [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, **37**(9): 2401-2403.
张海鹏, 徐金龙, 黄海涛, 等. 透射式 SESAM 实现 Nd : YAG 连续波锁模皮秒脉冲激光[J]. 中国激光, 2010, **37**(9): 2401-2403.
- [8] LI Xiao, WANG Yong-gang. Passively mode-locked side-pumped Nd : YAG laser with SESAM [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(11): 3103-3107.
李霄, 王勇刚. 半导体可饱和吸收镜被动锁模侧面抽运 Nd : YAG 激光器研究[J]. 光学学报, 2009, **29**(11): 3103-3107.
- [9] CHEN Meng, ZHANG Bing-yuan, LI Gang, *et al.* Study on SESAM passively-mode-locked Nd : YAG laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2004, **31**(6): 646-648.
陈檬, 张丙元, 李港, 等. 半导体可饱和吸收镜被动锁模 Nd : YAG 激光器的研究[J]. 中国激光, 2004, **31**(6): 646-648.
- [10] YI Li-na, CHEN Meng, WANG Deng-shun, *et al.* Study on LD-end-pumped SESAM mode-locking Nd : YAG laser[J]. *Laser Journal*, 2002, **23**(6): 11-13.
伊丽娜, 陈檬, 王登顺, 等. LD 端泵 Nd : YAG/SESAM 锁模激光器的研究[J]. 激光杂志, 2002, **23**(6): 11-13.
- [11] CAI Zhi-qiang, WEN Wu-qi, YAO Jian-quan, *et al.* Continuous-wave passively mode-locked diode end-pumped Nd : YVO₄ laser with a semiconductor saturable absorber mirror [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2005, **32**(6): 734-738.
蔡志强, 温午麒, 姚建铨, 等. 半导体可饱和吸收镜连续被动锁模端面抽运 Nd : YVO₄ 激光器[J]. 中国激光, 2005, **32**(6): 734-738.
- [12] QIN Wan, DU Chen-lin. Research of end-pumped 4-mirror folded cavity Nd : YVO₄ laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(5): 780-784.
秦琬, 杜晨琳. 端面抽运四镜折叠腔 Nd : YVO₄ 激光器的研究[J]. 光子学报, 2007, **36**(5): 780-784.
- [13] WANG Chun-yu, ZHU Xiao-lei, LU Yu-tian. Pumping intensity distribution in LDA side pumped solid state lasers [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(6): 961-965.
王春雨, 朱小磊, 陆雨田. LD 侧面泵浦固体激光器泵浦光分布模拟[J]. 光子学报, 2007, **36**(6): 961-965.
- [14] MO Shuang, QU Yan-chen, REN De-ming, *et al.* The experiential research on an active-passive mode-locked Nd : YAG Laser[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, **37**(8): 722-724.
莫霜, 曲彦臣, 任德明, 等. 主被动调 Q 锁模 Nd : YAG 激光器的实验研究[J]. 激光与红外, 2007, **37**(8): 722-724.
- [15] REN De-ming, BAI Yan. Experiment on Q-switched and active mode-locking Nd : YAG picoseconds' laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, **41**(4): 885-888.
任德明, 白岩. 调 Q 主动锁模 Nd : YAG 皮秒激光器实验[J]. 红外与激光工程, 2012, **41**(4): 885-888.
- [16] ZHANG L, GUO L, XIONG B, *et al.* LD side-pumped high beam quality passive Q-switched and mode-locked Nd : YAG laser based on SESAM[J]. *Laser Physics*, 2010, **20**(9): 1798-1801.