

文章编号: 0253-2239(2009)03-0738-05

# 激光二极管抽运 $\text{Cr}^{4+}:\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 自锁模自调 Q 激光器

张海鹏<sup>1</sup> 陈秀峰<sup>2</sup> 王培吉<sup>1</sup> 张中士<sup>1</sup> 赵圣之<sup>3</sup> 杨克建<sup>3</sup> 相方超<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 济南大学理学院, 山东 济南 250022; <sup>2</sup> 中材高新材料股份有限公司, 山东 淄博 255000)

<sup>3</sup> 山东大学信息科学与工程学院, 山东 济南 250100

**摘要** 采用光纤耦合半导体激光抽运, 实现了  $\text{Cr}^{4+}:\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$  自锁模自调 Q 激光器 1.06  $\mu\text{m}$  激光输出。当抽运功率超过阈值 2.83 W 时, 激光器便运转在调 Q 锁模状态, 其锁模调制深度达到 80% 以上。当抽运功率最大为 5.72 W 时, 平均输出功率为 233 mW, 相应调 Q 包络的单脉冲能量为 16.5  $\mu\text{J}$ , 调 Q 包络的脉冲宽度大约为 120 ns。调 Q 包络中锁模脉冲之间的间隔为 2.8 ns, 这与光子在谐振腔内的往返时间相一致, 对应的重复率为 357 MHz, 锁模脉冲宽度估计为 560 ps。利用双曲正割函数, 考虑腔内光子数密度的空间高斯分布、增益介质的受激辐射寿命和饱和吸收体的激发态寿命对激光特性的影响, 建立了描述  $\text{Cr}^{4+}:\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$  晶体自调 Q 自锁模动力学过程的速率方程组。数值求解该方程组, 与实验结果符合较好。

**关键词** 激光器; 自锁模; 自调 Q;  $\text{Cr}^{4+}:\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$  晶体; 速率方程

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20092903.0738

## Laser Diode-Pumped Self-Mode-Locking Laser with a Self Q-Switched $\text{Cr}^{4+}:\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ Laser

Zhang Haikun<sup>1</sup> Chen Xiufeng<sup>2</sup> Wang Peiji<sup>1</sup> Zhang Zhongshi<sup>1</sup> Zhao Shengzhi<sup>3</sup>  
Yang Kejian<sup>3</sup> Xiang Fangchao<sup>1</sup>

<sup>1</sup> School of Sciences, University of Jinan, Jinan, Shandong 250022, China

<sup>2</sup> Sinoma Advanced Materials Co., Ltd, Zibo, Shandong 255000, China

<sup>3</sup> School of Information Science and Engineering, Shandong University, Jinan, Shandong 250100, China

**Abstract** Simultaneous self-mode-locking and self-Q-switching in a laser diode-pumped  $\text{Cr}^{4+}:\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$  laser is presented. More than 80% modulation depth of self-mode-locking has been achieved at the threshold pump power. A maximum average output power of 233 mW was generated at the maximum incident pump power of 5.72 W, corresponding to a maximum pulse energy of 16.5  $\mu\text{J}$  for a single self-Q-switched pulse. The typical Q-switched envelope duration containing the mode-locked pulse trains was found to be around 120 ns and the repetition rate for the self-mode-locked pulse trains within the self-Q-switched pulse envelope was about 357 MHz. The width of the self-mode-locked pulse was estimated to be less than 560 ps. Using a hyperbolic secant function method, we introduced a rate equation model not only considering the Gaussian distribution of the intracavity photon density and the influences of the continuous pump rate, but taking into account the stimulated radiation lifetime of the active medium as well as the excited-state lifetime of the saturable absorber. Numerically solving the set of equation, the theoretical calculations are in good agreement with the experimental results.

**Key words** lasers; self-mode-locking; self-Q-switching;  $\text{Cr}^{4+}:\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$  crystal; rate equation

## 1 引 言

半导体激光(LD)抽运的被动调 Q 锁模激光器具有结构紧凑、高脉冲重复频率、宽的光谱和高的峰值功率等优点, 被广泛应用在激光通信、遥感和非线性

性光学等领域<sup>[1~9]</sup>。Cr:YAG 具有物化性能稳定、抗损伤阈值高等特点, 已被广泛用来做各种 Nd 类激光器的被动调 Q 开关。近年来发现这种晶体还具有很强的激发态吸收(ESA), 其第二激发态弛豫

收稿日期: 2008-07-25; 收到修改稿日期: 2008-10-10

基金项目: 国家自然科学基金(60578010)和济南大学科研基金(XKY0717)资助项目。

作者简介: 张海鹏(1978—), 男, 硕士, 讲师, 主要从事激光物理与技术等方面的研究。E-mail: ss\_zhanghk@ujn.edu.cn

时间仅为 100 ps 左右,因此当腔内光强足够大,使得激发态饱和,则可以实现被动锁模<sup>[10,11]</sup>。采用双掺  $\text{Cr}^{4+}:\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$  的优点是,它作为增益介质的同时还可以作为饱和吸收体实现自锁模,使谐振腔的结构大为简化。最近人们利用  $\text{Cr}^{4+}:\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$  作为增益介质兼作饱和吸收体,发现当腔内光强为  $2000 \text{ W/cm}^2$  时便可以实现自调 Q 自锁模运转,而当腔内光强达到  $3 \times 10^4 \text{ W/cm}^2$  左右时,可获得调制深度超过 90% 的自调 Q 自锁模输出<sup>[12]</sup>。然而所得到的调 Q 包络脉宽为毫秒量级,而且未给出相应的理论分析。

本文从理论上研究了 LD 抽运  $\text{Cr}^{4+}:\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$  自锁模自调 Q  $1.06 \mu\text{m}$  激光,并进行了实验验证。考虑腔内光子数密度的空间高斯分布、增益介质的受激辐射寿命以及饱和吸收体的激发态寿命对激光特性的影响,建立了描述  $\text{Cr}^{4+}:\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$  自调 Q 自锁模激光的耦合速率方程组。数值求解该方程组得到的理论结果与实验结果相符。

## 2 实验装置及结果

实验装置如图 1 所示。抽运源选用带光纤耦合的半导体激光器(FAP-I system Coherent Inc. U. S. A.),光纤直径  $800 \mu\text{m}$ ,最高输出功率  $16 \text{ W}$ ,  $22 \text{ }^\circ\text{C}$  时的中心波长为  $807.5 \text{ nm}$ ,经聚焦系统后抽运光光斑半径为  $220 \mu\text{m}$ ,远场半角为  $18^\circ$ 。增益介质  $\text{Cr}^{4+}:\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$  晶体的尺寸为  $4 \text{ mm} \times 4 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ ,在抽运波长  $808 \text{ nm}$  处的吸收系数为  $3.5 \text{ cm}^{-1}$ ,在  $1064 \text{ nm}$  处吸收系数为  $0.59 \text{ cm}^{-1}$ 。激光晶体一端镀  $808 \text{ nm}$  增透膜和  $1064 \text{ nm}$  高反膜,作为谐振腔的抽运端镜,另一端镀  $1064 \text{ nm}$  高透膜。 $\text{Cr}^{4+}:\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$  晶体用锡箔包紧置于紫铜块中通过水循环和温控半导体致冷片致冷,温度控制在  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 。实验选用 MAX 500AD 激光功率计(Coherent Inc., USA)测量输出功率,用  $500 \text{ MHz}$  数字存储示波器 TDS620B(Tektronix Inc. U. S. A.)和快速硅 PIN 光电二极管测量输出锁模脉冲信号。

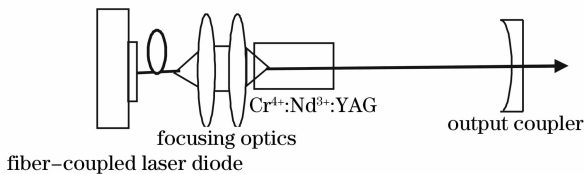


图1 LD抽运  $\text{Cr}^{4+}:\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$  激光器实验装置图

Fig. 1 Experimental setup of laser diode-pumped

$\text{Cr}^{4+}:\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$  laser

调节腔长等于  $40 \text{ cm}$ ,采用反射率为 85% 的输出镜测得  $\text{Cr}^{4+}:\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$  自调 Q 自锁模激光器的阈值为  $2.83 \text{ W}$ 。当抽运功率超过阈值,激光器便一直处于调 Q 锁模状态。图 2 示出了阈值附近获得的调制深度为 80% 的调 Q 锁模脉冲波形,相应调 Q 包络的脉冲宽度大约为  $120 \text{ ns}$ 。调 Q 包络中的锁模脉冲之间的间隔为  $2.8 \text{ ns}$ ,这与光子在谐振腔内的往返时间相一致,对应的重复率为  $357 \text{ MHz}$ 。由图 2 可见,锁模脉冲的上升时间  $t_{\text{measure}}$  为  $1.3 \text{ ns}$ 。实验中使用的快速硅 PIN 光电二极管的上升时间  $t_{\text{probe}}$  为  $1 \text{ ns}$ ,示波器的上升时间可由  $t_{\text{oscilloscope}} \times W_b = 0.35 \sim 0.4$  给出,其中  $W_b = 500 \text{ MHz}$  为示波器的频宽。根据实验测量值和相关参量,利用  $t_{\text{measure}} = \sqrt{t_{\text{real}}^2 + t_{\text{probe}}^2 + t_{\text{oscilloscope}}^2}$  可以估算出锁模脉冲的实际上升时间为  $450 \text{ ps}$ 。假定锁模脉冲为对称脉冲,根据锁模脉冲的实际宽度约为实际上升时间的 1.25 倍,锁模脉冲宽度估计为  $560 \text{ ps}$ 。

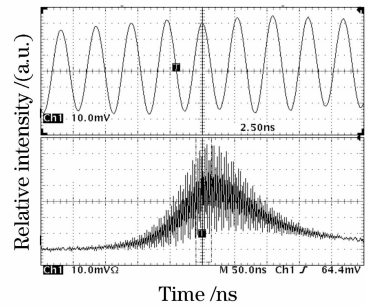


图2 实验获得的阈值附近的调 Q 锁模脉冲波形  
Fig. 2 Temporal traces of the self-mode-locked pulses at the threshold pump power

图 3 给出了平均输出功率和调 Q 包络的重复频率与抽运功率的变化关系。可以看出,平均输出功率和重复频率均随抽运功率线性增加,在最高抽

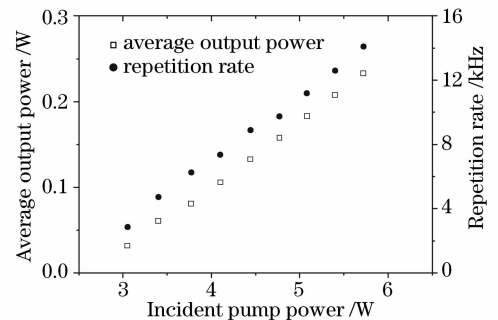


图3 平均输出功率和重复频率与抽运功率的关系  
Fig. 3 Dependence of the average output power and the repetition rates of the Q-switched pulse train on the incident pump power

运功率为 5.72 W 时,获得的输出功率为 233 mW。根据抽运功率与重复率,可以得到调 Q 包络的脉冲能量,如图 4 中的点所示,单脉冲能量随抽运功率的增大而增大,在抽运功率为 5.72 W 时,获得调 Q 包络的单脉冲能量为 16.5  $\mu\text{J}$ 。

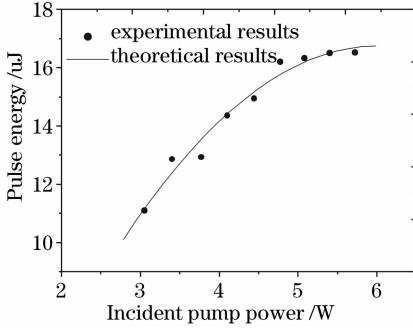


图 4 调 Q 包络单脉冲能量与抽运功率的关系

Fig. 4 Theoretical and experimental dependence of the pulse energy of the self-Q-switched green pulse train on the incident pump power

### 3 理论分析与讨论

当腔内增益达到第二阈值时,激光器的运转进入非线性放大阶段。在这一阶段,较弱的脉冲被抑制掉,强脉冲使饱和和吸收体漂白,并被迅速地压缩、放大。锁模脉冲在谐振腔内经过几次往返后,脉冲

宽度不再被压缩,此时的脉冲光强分布可写为<sup>[13]</sup>

$$\phi(r, t) = \sum_{k=0}^{\infty} \Phi_k f(t - t_k) \exp(-2r^2/\omega_1^2) = \phi(0, t) \exp(-2r^2/\omega_1^2), \quad (1)$$

式中  $\phi(0, t) = \sum_{k=0}^{\infty} \Phi_k f(t - t_k)$ ,  $t_k = kt_r$ ,  $\Phi_k$  为谐振腔内往返  $k$  次后锁模脉冲光子数密度的相对幅度,  $t_r = 2[n_1 l + (L_p - l)]/c$  为光子在腔内的往返时间,  $l$  和  $n_1$  分别是增益介质的长度和折射率,  $L_p$  是谐振腔的物理长度,  $c$  是光速,  $\omega_1$  为腔内平均 TEM<sub>00</sub> 模式半径。  $f(t) = \frac{1}{2\sigma c \tau_p} \text{sech}^2\left(\frac{t}{\tau_p}\right)$  为描述从噪声到锁模脉冲演变过程的双曲正割函数<sup>[14]</sup>, 满足  $\int_{-\infty}^{\infty} c \sigma f(t) dt = 1$ , 其中  $\sigma$  为增益介质的受激发射截面,  $\tau_p$  与基频光锁模脉冲宽度  $\tau$  的关系为  $\tau = 1.76\tau_p$ 。

因此,腔内光子往返  $k$  次时的平均光子数密度空间分布为

$$\phi_k(r, t) = \Phi_k f(t) \exp(-2r^2/\omega_1^2). \quad (2)$$

考虑腔内光子数密度、激活介质反转粒子数密度、饱和吸收体基态粒子数密度以及抽运光的空间分布,建立了描述 Cr<sup>4+</sup>:Nd<sup>3+</sup>:YAG 自调 Q 自锁模动力学过程的速率方程组

$$\Phi_k = \Phi_{k-1} \exp\left\{\frac{2}{\pi\omega_1^2} \int_0^{\infty} \left\{2\sigma_m(r, t_k) l \frac{\omega_1^2}{\omega_G^2} \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega_G^2}\right) - 2\sigma_g n_{s1}(r, t_k) l_s \frac{\omega_1^2}{\omega_G^2} \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega_G^2}\right) - 2\sigma_c [n_{s0} - n_{s1}(r, t_k)] l_s \frac{\omega_1^2}{\omega_G^2} \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega_G^2}\right) - \left[L + \ln\left(\frac{1}{R}\right)\right] \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega_1^2}\right)\right\} 2\pi r dr\right\}, \quad (3)$$

$$\frac{dn(r, t)}{dt} = R_{in}(r) - \sigma c n(r, t) \phi_G(r, t) - \frac{n(r, t)}{\tau}, \quad (4)$$

$$\frac{dn_{s1}(r, t)}{dt} = \frac{n_{s0} - n_{s1}(r, t)}{\tau_s} - \sigma_g c n_{s1}(r, t) \phi_G(r, t), \quad (5)$$

式中  $n(r, t_k)$  和  $n_{s1}(r, t_k)$  分别是腔内光子往返  $k$  次时的增益介质反转粒子数密度和饱和吸收体基态粒子数密度,

$$R_{in}(r) = \frac{P_{in} \exp(-2r^2/\omega_p^2) [1 - \exp(-\alpha l)]}{h\nu_p \pi \omega_p^2 l}$$

为抽运速率,  $P_{in}$  为抽运功率,  $\alpha$  为增益介质对抽运光的吸收系数,  $\omega_p$  为抽运光在增益介质中的平均半径,  $h\nu_p$  为抽运光的单光子能量,  $n_{s0}$  为饱和吸收体内总的粒子数密度, 与饱和吸收体的小信号透过率  $T_0$  的关系为  $T_0 = \exp(\sigma_g n_{s0} l)$ ,  $\sigma_g$  和  $\sigma_c$  分别为饱和

吸收体的基态、激发态吸收截面,  $\tau$  为增益介质的受激发射寿命,  $\tau_s$  为饱和吸收体的激发态寿命,  $R$  是输出耦合镜的反射率,  $L$  是谐振腔的损耗。  $\phi_G(r, t) = (\omega_1^2/\omega_G^2) \phi(0, t) \exp(-2r^2/\omega_G^2)$  是增益介质处的光子数密度,  $\omega_G$  是增益介质处的 TEM<sub>00</sub> 模式半径。  $\omega_G$  和  $\omega_1$  可以利用 ABCD 传输矩阵理论计算得到, 计算所需的相关参量见表 1。

将(1)式代入(4)式, (5)式, 并在 0 到  $t_k$  区间上对时间积分, 可得

$$n(r, t_k) = \exp\left(-\frac{t_k}{\tau}\right) \prod_{m=0}^{k-1} \exp\left[-\frac{\omega_1^2}{\omega_G^2} \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega_G^2}\right) \Phi_m\right] - \left\{ R_{\text{in}}(r) \exp\left(\frac{t_k}{\tau}\right) \int_0^{t_k} \prod_{m=0}^{k-1} \exp\left[\frac{\omega_1^2}{\omega_G^2} \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega_G^2}\right) \Phi_m\right] dt + n_i \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega_p^2}\right) \right\}, \quad (6)$$

$$n_{s1}(r, t_k) = \exp\left(-\frac{t_k}{\tau_s}\right) \left\{ \prod_{m=0}^{k-1} \exp\left[-\frac{\omega_1^2}{\omega_G^2} \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega_G^2}\right) \Phi_m\right] \right\}^\alpha \times \left\{ \frac{n_{s0}}{\tau_s} \int_0^{t_k} \exp\left(\frac{t}{\tau_s}\right) \left\{ \prod_{m=0}^{k-1} \exp\left[-\frac{\omega_1^2}{\omega_G^2} \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega_G^2}\right) \Phi_m\right] \right\}^{-\alpha} dt + n_{s0} \right\}, \quad (7)$$

式中  $\alpha = \frac{\sigma_g}{\sigma}$ ,  $n_i = \frac{\ln(1/T_0^2) + \ln(1/R) + L}{2\alpha l}$  为增益介质的初始反转粒子数密度。

考虑基频光在腔内的双向传输,基频光的平均输出功率为

$$P(t) = \frac{1}{A} \int_0^\infty \left[ \frac{c h \nu A_N \phi(r, t)}{2} \right] 2\pi r dr = \frac{h\nu A}{4\sigma_p} \sum_{k=0}^\infty \Phi_k \operatorname{sech}^2\left(\frac{t - t_k}{\tau_p}\right), \quad (8)$$

式中  $A = \frac{1}{2} \pi \omega_1^2$ 。将(8)式对时间积分,可以得到调 Q 包络的脉冲能量

$$E = \int_0^\infty P(t) dt = \frac{h\nu A}{4\sigma} \sum_{k=0}^\infty \Phi_k. \quad (9)$$

利用表 1 给定的数值,并设定初始值  $\phi_0$ ,由(3)式,(6)式和(7)式便可以计算出  $\phi_k$ ,将结果代入(9)式,便可以得到整个调 Q 锁模包络的脉冲能量与抽运功率的关系,如图 4 中的实线所示,所得理论计算结果与实验结果符合较好。图 5 示出了 5.72 W 抽运功率下调 Q 锁模脉冲波形的理论计算值,相应的

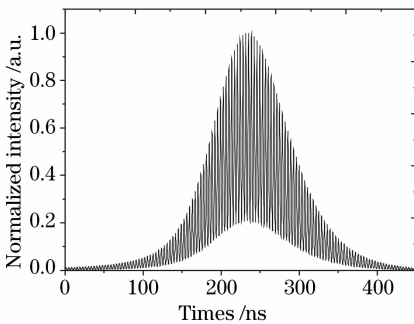


图 5 抽运功率为 5.72 W 时理论计算得到的调 Q 锁模脉冲包络

Fig. 5 Calculated results for the temporal traces of the self-mode-locked pulses at the pump power of 5.72 W

调 Q 包络脉冲宽度为 120 ns。进一步计算发现,理论上得到的调 Q 锁模包络的脉冲宽度随抽运功率几乎不变,这与实验结果一致。

表 1 LD 抽运  $\text{Cr}^{4+}:\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$  自锁模自调 Q 激光器参量  
Table 1 Parameters of LD-pumped self-mode-locking laser with a self Q-switched  $\text{Cr}^{4+}:\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$  laser

Symbol	Value	Symbol	Value
$\sigma$	$2.35 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$	$L$	0.05
$\sigma_g$	$4.3 \times 10^{-18} \text{ cm}^2$	$L_p$	40 cm
$\tau$	210 $\mu\text{s}$	$\omega_p$	300 $\mu\text{m}$
$\tau_s$	3.4 $\mu\text{s}$	$\omega_G$	260 $\mu\text{m}$
$n_1$	1.806	$n_{s0}$	$5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$
$l$	0.5 cm	$R$	0.85

## 4 结 论

实现了  $\text{Cr}^{4+}:\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$  自锁模自调 Q 激光器 1.06  $\mu\text{m}$  激光输出。当抽运功率超过阈值,激光器便运转在调 Q 锁模状态,其锁模调制深度达到 80% 以上。当抽运功率为 5.72 W 时,平均输出功率为 233 mW,相应调 Q 包络的单脉冲能量为 16.5  $\mu\text{J}$ ,调 Q 包络的脉冲宽度大约为 120 ns。其中锁模脉冲的重复率为 357 MHz,锁模脉冲宽度估计为 560 ps。考虑腔内光子数密度的空间高斯分布、增益介质的受激辐射寿命和饱和吸收体的激发态寿命对激光特性的影响,建立了描述  $\text{Cr}^{4+}:\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$  晶体自调 Q 自锁模动力学过程的速率方程组。数值求解该方程组,与实验结果符合较好。

## 参 考 文 献

- Junying Wang, Quan Zheng, Qinghua Xue *et al.*. Diode-pumped, Cr:YAG passively Q-switched and mode-locked Nd:YVO<sub>4</sub>/KTP green laser[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, **1**(10): 604~605
- Shudi Pan, Lin Xue, Xiouwei Fan *et al.*. Diode-pumped passively Q-switched mode-locked Nd:YLF laser with uncoated GaAs saturable absorber[J]. *Opt. Commun.*, 2007, **272**(1): 178~181

- 3 B. Y. Zhang, G. Li, M. Chen *et al.*. Passive mode-locking of a diode-pumped Nd:GdVO<sub>4</sub> laser with a semiconductor saturable absorber mirror[J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(19): 1829~1831
- 4 S. J. Zhang, E. Wu, H. F. Pan *et al.*. Passive mode locking in a diode-pumped Nd:GdVO<sub>4</sub> laser with a semiconductor saturable absorber mirror[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 2004, **40**(5): 505~508
- 5 Qinan Li, Sumei Wang, Shifeng Du *et al.*. Self-Q-switched and mode-locked 946 nm Cr, Nd:YAG laser[J]. *Opt. Commun.*, 2008, **281**(8): 2184~2188
- 6 Jian Wu, Hua Cai, Xiaohong Han *et al.*. Multi-pulse operation of a Kerr-lens mode-locked femtosecond laser [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(1): 76~78
- 7 Zhong Ming, Wang Qi, Wang Yuezhu *et al.*. Er:glass laser with LaMgAl<sub>11</sub>O<sub>19</sub>:Co<sup>2+</sup> passive Q-switch[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2): 287~290  
钟 鸣,王 骐,王月珠 等. LaMgAl<sub>11</sub>O<sub>19</sub>:Co<sup>2+</sup> 被动调 Q 钕玻璃激光器研究[J]. *光学学报*, 2007, **27**(2): 287~290
- 8 Wang Jing, Zhang Hongming, Zhang Jun *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,张无垠 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
- 9 Ye Hui, Xu Wencheng, Liu Songhao. Dispersion measurement for optical fiber in ring cavity using fiber laser sideband spectrum [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(7): 1323~1326  
叶 辉,徐文成,刘颂豪. 利用光纤激光器光谱边带效应测量光纤色散[J]. *光学学报*, 2008, **28**(7): 1323~1326
- 10 Y. F. Chen, S. W. Tsai. Simultaneous Q-switching and mode-locking in a diode-pumped Nd:YVO<sub>4</sub>-Cr<sup>4+</sup>:YAG laser[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 2001, **37**(4): 580~586
- 11 S. P. Ng, D. Y. Tang, J. Kong *et al.*. Quasi-cw diode-pumped Nd:GdVO<sub>4</sub> laser passively Q-switched and mode-locked by Cr<sup>4+</sup>:YAG saturable absorber[J]. *Opt. Commun.*, 2005, **250**(1~3): 168~173
- 12 C. Li, P. Li, D. Li *et al.*. Diode-pumped self Q-switched and mode-locking Nd<sup>3+</sup>:Cr<sup>4+</sup>:YAG laser[J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2004, **21**(2): 313~315
- 13 Y. F. Chen, S. W. Tsai, S. C. Wang *et al.*. A diode-pumped higher power Q-switched and self-mode-locked Nd:YVO<sub>4</sub> laser with a LiF:F<sub>2</sub> saturable absorber[J]. *Appl. Phys. B*, 2001, **73**(2): 115~118
- 14 P. Mukhopadhyay, M. Alsous, K. Ranganathan *et al.*. Analysis of laser-diode end-pumped intracavity frequency-doubled, passively Q-switched and mode-locked Nd:YVO<sub>4</sub> laser [J]. *Appl. Phys. B*, 2004, **79**(6): 713~720