

文章编号: 0253-2239(2010)03-0797-05

双调 Q Nd : GdVO₄ 激光器的脉宽控制

张海鹏¹ 席道明¹ 王 静¹ 张中士¹ 赵圣之² 杨克建²

(¹ 济南大学理学院, 山东 济南 250022
² 山东大学信息科学与工程学院, 山东 济南 250100)

摘要 采用激光二极管(LD)抽运 *c* 轴切割的 Nd:GdVO₄ 晶体, 声光调制器作为主动调 Q 开关, Cr⁴⁺:YAG 饱和吸收体作为被动调 Q 开关, 实现了声光 Cr⁴⁺:YAG 主被动双调 Q 1.06 μm 激光运转。实验结果表明, 通过改变声光调制器和 Cr⁴⁺:YAG 饱和吸收体在谐振腔内的位置, 可以有效地控制脉冲宽度, 同时获得了双调 Q 激光的单脉冲能量、峰值功率的变化范围。根据 ABCD 矩阵传输理论计算得出的腔内模式半径沿腔轴的变化关系, 考虑腔内振荡光强的空间高斯分布以及声光调制的渡越时间, 给出了 LD 抽运声光 Cr⁴⁺:YAG 主被动双调 Q 激光的耦合速率方程组, 理论计算与实验结果相符。

关键词 激光技术; 激光二极管抽运; 声光调 Q 开关; Cr⁴⁺:YAG; 脉冲宽度; 高斯分布; 速率方程组

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103003.0797

Control of the Pulse Duration in a Diode-Pumped Doubly Q-Switched Nd : GdVO₄ laser

Zhang Haikun¹ Xi Daoming¹ Wang jing¹ Zhang Zhongshi¹
Zhao Shengzhi² Yang Kejian²

(¹ School of Sciences, University of Jinan, Jinan, Shandong 250022, China
² School of Information Science and Engineering, Shandong University, Jinan, Shandong 250100, China)

Abstract By simultaneously using both active and passive Q-switched in the same cavity, a diode pumped doubly Q-switched *c*-cut Nd:GdVO₄ laser was realized with acoustic-optic (AO) modulator and Cr⁴⁺:YAG saturable absorber. The technique to control the pulse duration has been studied. With varying the positions of the saturable absorber and the modulator, the pulse durations are varied, respectively. The average output power, the pulse duration and the peak power versus the position were obtained. Using the ABCD matrix method, the intracavity radii along the cavity axis were calculated. Mean while, a rate equation model is introduced to theoretically analyze the results obtained in the experiment, in which the Gaussian spatial distribution of the intracavity photon density and the AO turnoff time including the transit time are taken into account. The numerical calculations of the rate equations, are consistent with the experimental results.

Key words laser technique; laser-diode pump; acoustic-optic Q-switch; Cr⁴⁺:YAG; pulse duration; Gaussian spatial distribution; rate equations

1 引 言

激光二极管(LD)抽运的调 Q 激光器具有全固化、体积小和抽运效率高等特点, 在激光通讯、遥感探测、军事和医疗等领域有广泛的应用前景。被动调 Q 一般采用饱和吸收体, 如 Cr⁴⁺:YAG、GaAs

等^[1~3], 主动调 Q 一般采用声光或电光调制^[4~6]。脉冲宽度是调 Q 激光器的主要参数之一, 在某些应用中要求能对脉宽进行控制和调整, N. D. Lai 等^[7]和李桂秋等^[8]通过改变激光在饱和吸收体中的半径和抽运光在激光晶体中的半径, 分别研究了

收稿日期: 2009-08-02; 收到修改稿日期: 2009-10-09

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

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

$\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 被动调 Q 1.06 μm 激光和倍频绿激光的脉宽控制。在一谐振腔内同时使用两种调 Q 称为双调 Q, 结果表明双调 Q 激光能够使脉冲宽度变窄、峰值功率增大^[9~11]。目前, 有关主被动双调 Q 激光脉宽控制的研究报道较少。由于切割方向不同, 晶体的吸收发射截面等参数有很大差异, 从而导致不同的激光特性。目前对 a 轴切割 $\text{Nd}:\text{GdVO}_4$ 的研究工作比较多, 而对 c 轴切割 $\text{Nd}:\text{GdVO}_4$ 晶体激光特性的理论与实验研究相对较少。虽然 c 轴切割的 $\text{Nd}:\text{GdVO}_4$ 晶体的发射截面 ($1.2 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$) 小于 a 轴切割的发射截面 ($7.6 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$), 具有较高的激光阈值, 但其内部损耗要小得多, 使其斜效率远远高于 a 轴切割 $\text{Nd}:\text{GdVO}_4$ 晶体^[12]。应用到调 Q 激光器中, c 轴切割的 $\text{Nd}:\text{GdVO}_4$ 激光器输出的激光脉冲具有较短的脉冲宽度和较高的峰值功率。

本文采用 LD 抽运 c 轴切割的 $\text{Nd}:\text{GdVO}_4$ 晶体, 声光调制器作为主动调 Q 开关, $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 饱和吸收体作为被动调 Q 开关, 实现了声光- $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 主被动双调 Q 1.06 μm 激光运转。

2 实验装置及结果

实验采用平凹腔结构, 如图 1 所示。谐振腔的腔长为 17 cm。腔镜 M_1 是曲率半径为 500 mm 的凹面镜, 一端镀 808 nm 增透膜, 另一端镀 808 nm 高透、1064 nm 高反的双色介质膜, 作为谐振腔的后反镜; 输出镜 M_2 是对 1064 nm 反射率为 85% 的平面镜。激光工作物质是 c 轴切割 $\text{Nd}:\text{GdVO}_4$ 晶体, 尺寸为 4 mm \times 4 mm \times 5 mm, 它的一个表面镀 808 nm 和 1064 nm 增透膜, 另一个表面镀 1064 nm 增透膜, 晶体紧靠 M_1 放置。 $\text{Nd}:\text{GdVO}_4$ 晶体用铝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 $^\circ\text{C}$ 。 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 和声光 (AO) 调制器同时放入谐振腔内, 小信号透射率为 91% 的 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体两面镀 1064 nm 增透膜, 置于靠近输出镜的地方。 QSGSU-6Q 声光调制器, 其作用长度为 24 mm, 两端镀 1064 nm 增透膜, 衍射效率为 85%。抽运源选用带光纤耦合的半导体激光器 (FAP-I system Coherent

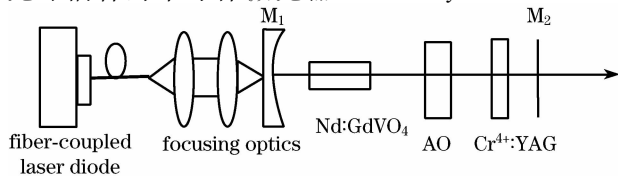


图 1 实验装置图
Fig. 1 Experimental setup

Inc. USA), 光纤直径 800 μm , 最高输出功率 16 W, 22 $^\circ\text{C}$ 时的中心波长 807.5 nm, 经聚焦系统后抽运光光斑半径为 220 μm , 远场半角为 18 $^\circ$ 。用 SP300I 光谱仪测量激光光谱, 用 EPM 2000 功率计和 TDS620B 存储示波器分别测量输出激光的功率和脉冲宽度。

首先, 调节抽运功率为 4.9 W, 固定声光调制器到腔镜 M_2 的距离 Z_2 等于 9 cm, 使 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体在谐振腔的直臂内沿轴向移动, $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 到腔镜 M_2 的距离 Z_1 的变化范围为 0~7 cm。然后, 固定 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 紧贴腔镜 M_2 , 使声光调制器在激光腔的直臂内沿轴向移动, 此时 Z_2 的变化范围为 2~9 cm。图 2 中的点给出了脉冲宽度随 Z_1 和 Z_2 的变化关系。图 3 中的点给出了平均输出功率随 Z_1 和 Z_2 的变化关系。由图 2 和图 3 可见, 改变声光调制器和 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 饱和吸收体在谐振腔内的位置, 能使脉宽和平均输出功率随之发生变化, 并且在平均输出时功率最大, 即光光转换效率最高时, 可获得最小脉宽。实验所选用的声光重复频率为 5 kHz, 远小于 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 饱和吸收体被动调 Q 的重复频率, 所以双调 Q 激光的重复频率由声光的重复频率决定。由图 2 和图 3, 并依据脉冲激光的重复频率, 便

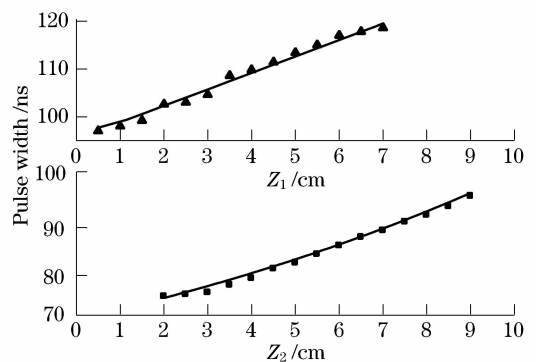


图 2 脉冲宽度随 Z_1 和 Z_2 的变化关系
Fig. 2 Pulse width versus Z_1 and Z_2

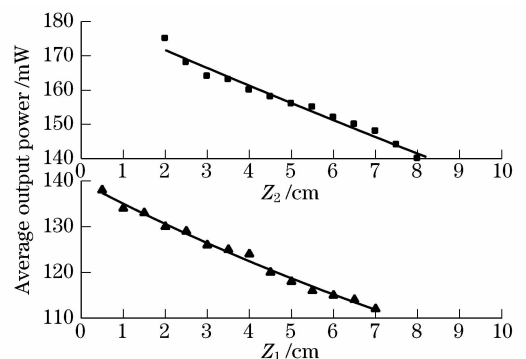


图 3 平均输出功率随 Z_1 和 Z_2 的变化关系
Fig. 3 Average output power versus Z_1 and Z_2

可计算单脉冲的能量进而计算出峰值功率。图4表明了双调Q激光的峰值功率随 Z_1 和 Z_2 的变化关系。当抽运功率为4.9 W, $Z_1=0, Z_2=2$ cm时获得的最短脉冲宽度为75.6 ns。图5中的实线给出实验获得的脉冲波形。图6给出了实验获得的光谱曲线。

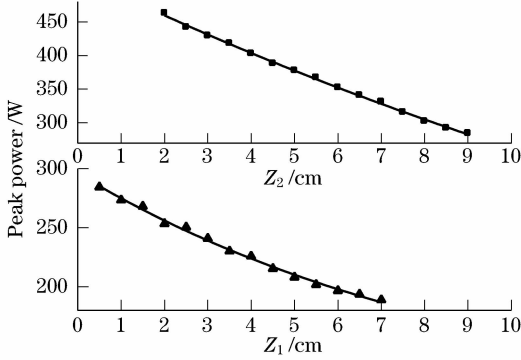


图4 峰值功率随 Z_1 和 Z_2 的变化关系

Fig. 4 Peak power versus Z_1 and Z_2

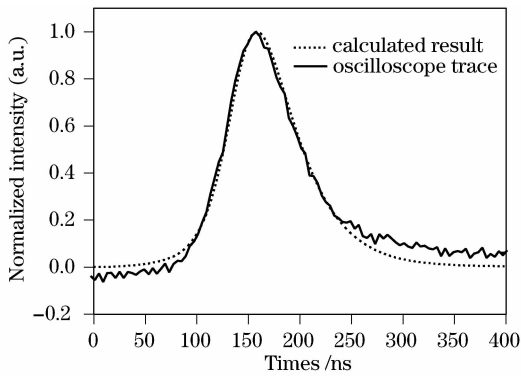


图5 实验得到的脉冲波形与理论波形比较

Fig. 5 Comparison of the experimentally observed pulse profile to theoretical prediction

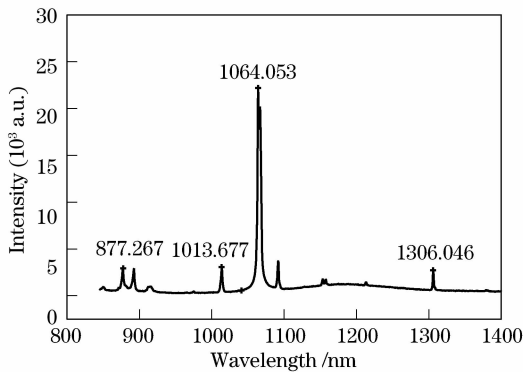


图6 实验得到的光谱曲线

Fig. 6 Optical spectra for the doubly Q-switched Nd:GdVO₄ laser

3 理论分析

3.1 腔内光子数密度的空间分布

如果激光运行在基横模状态,腔内光子数密度 $\phi(r,t)$ 可以写为

$$\phi(r,t) = \phi(0,t) \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega_l^2}\right), \quad (1)$$

式中 $\phi(0,t)$ 为激光谐振腔纵轴上的光子数密度, r 表示空间某点到激光谐振腔纵轴的垂直距离, t 为时间, ω_l 为基横模的平均腰斑半径,它主要由激光谐振腔的腔型结构决定。考虑腔内光子数密度沿激光谐振腔的纵向分布,在激活介质Nd:GdVO₄晶体、Cr⁴⁺:YAG饱和吸收体和声光调制器处的光子数密度 $\phi_G(r,t), \phi_S(r,t), \phi_A(r,t)$ 可以表示为^[13]

$$\phi_i(r,t) = \frac{\omega_i^2}{\omega_l^2} \phi(0,t) \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega_i^2}\right), i=G, S, A \quad (2)$$

式中 $\omega_G, \omega_S, \omega_A$ 分别为基横模在以上三处的半径, $\phi_G(0,t), \phi_S(0,t)$ 和 $\phi_A(0,t)$ 为以上三处激光谐振腔纵轴上的光子数密度。

采用端面抽运可以提高抽运效率,但是抽运光通常集中在激活介质的中央部位,晶体吸收的抽运能量有相当一部分转换为热能,存储在晶体内部而形成不均匀的温度分布场,导致了光通过晶体的相位差不均匀,相位差以抛物线型分布,这样使得激活介质产生薄透镜效应,其焦距为^[13]

$$f_T = \frac{2\pi K_c}{dn/dT + \alpha_T n_1} \frac{\omega_p^2}{\zeta P_{in} \eta}, \quad (3)$$

式中 ω_p 为抽运光在晶体中的有效平均抽运半径, $\eta = 1 - \exp(-\alpha l)$ 为晶体对抽运光的吸收率, α 为晶体对808 nm抽运光的吸收系数, l 是激活介质的长度, $K_c, dn/dT, \alpha_T$ 分别为激活介质的热导率、热致折射率梯度和热膨胀系数, n 为晶体折射率, P_{in} 为抽运功率。对于 c 轴切割的Nd:GdVO₄晶体: $\alpha_T = 3.5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}, K_c = 11.7 \times 10^{-3} \text{ W}/(\text{mm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}), dn/dT = 4.7 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}, \zeta = 0.24$ 。

如果将腔镜 M_2 作为参考平面,并忽略激活介质到腔镜 M_1 之间的距离,同时考虑激活介质的薄透镜效应,根据ABCD矩阵理论,可以得到基横模在腔镜 M_2 处的半径 ω_0 ,以及 $\omega_G, \omega_S, \omega_A$ 的表达式

$$\omega_0 = \left(\frac{\lambda}{\pi}\right)^{\frac{1}{2}} \frac{\left[2L_c \left(1 - \frac{L_c}{f_T} - \frac{L_c}{R_1}\right)\right]^{\frac{1}{2}}}{\left[1 - \left(1 - \frac{2L_c}{f_T} - \frac{2L_c}{R_1}\right)^2\right]^{\frac{1}{4}}}, \quad (4)$$

式中 R_1 为凹面镜 M_1 的曲率半径, $L_c = 2[n_1 l + n_2 l_s + n_3 d + (L_p - l - l_s - d)]$ 为谐振腔中的光学长度, c 为真空中的光速, n_1, n_2, n_3 分别为激活介质、Cr⁴⁺

:YAG 饱和吸收体和声光晶体的折射率, L_p 为谐振腔物理长度, l_s 为 Cr^{4+} :YAG 饱和吸收体的长度, d 为声光晶体的长度。

$$\omega_G = \omega_0 \left[1 + \left(\frac{\lambda L_p}{\pi \omega_0} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (5)$$

$$\omega_S = \omega_0 \left[1 + \left(\frac{\lambda Z_1}{\pi \omega_0} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (6)$$

$$\omega_A = \omega_0 \left[1 + \left(\frac{\lambda Z_2}{\pi \omega_0} \right)^2 \right]^{1/2}. \quad (7)$$

$$\int_0^\infty \frac{d\phi(r,t)}{dt} 2\pi r dr = \int_0^\infty \left\{ \frac{1}{t_r} \left[2\sigma n(r,t) l \phi_G(r,t) - 2\sigma_g n_{s1}(r,t) l_s \phi_S(r,t) - 2\sigma_e \times [n_{s0} - n_{s1}(r,t)] l_s \phi_S(r,t) - \delta_a(t) \phi_A(r,t) - \ln\left(\frac{1}{R}\right) \phi(r,t) - L \phi(r,t) \right] + \frac{\Omega}{4\pi} \frac{n(r,t)}{\tau} \right\} 2\pi r dr, \quad (8)$$

$$\frac{dn(r,t)}{dt} = R_{in} \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega_p^2}\right) - \sigma c n(r,t) \phi_G(r,t) - \frac{n(r,t)}{\tau}, \quad (9)$$

$$\frac{dn_{s1}(r,t)}{dt} = \frac{[n_{s0} - n_{s1}(r,t)]}{\tau_s} - \sigma_g n_{s1}(r,t) c \phi_S(r,t), \quad (10)$$

式中 $n(r,t)$ 为激活介质中的反转粒子数密度, $n_{s1}(r,t)$ 和 n_{s0} 是 Cr^{4+} :YAG 饱和吸收体基态和总的粒子数密度; $t_r = 2L_c/c$ 为光在谐振腔中往返一周的时间; l_s 与 Cr^{4+} :YAG 饱和吸收体小信号透射率 T_0 满足关系式 $T_0 = \exp(-\sigma_g n_{s0} l_s)$, σ_g 和 σ_e 分别为 Cr^{4+} :YAG 基态、激发态吸收截面; R 为输出耦合镜的反射率, L 为谐振腔的损耗; σ 为激活介质的受激发射截面, τ 为激活介质的受激辐射寿命, τ_s 为 Cr^{4+} :YAG 饱和吸收体的激发态寿命; Ω 为自发辐射立体角; $R_{in} = P_{in} [1 - \exp(-\alpha l)] / h\nu_p \pi \omega_p$ 表示抽运功率为 P_{in} 的单位体积内的抽运速率, $h\nu_p$ 为抽运光的单光子能量。 $\delta_a(t)$ 是声光 Q 开关的损耗函数, 定义为^[14]

$$\delta_a(t) = \delta_a \exp\left[-\left(\frac{t}{t_{s1} + t_{s2}}\right)^2\right], \quad (11)$$

式中 δ_a 为声光 Q 开关的衍射损耗, t_{s1} 为关断时间, $t_{s2} = \omega_A/v$ 为超声波渡越时间, v 为超声波在声光晶体中的传播速度。

从(9)式和(10)式可以得到关于 $n(r,t)$ 和 $n_{s1}(r,t)$ 的表达式, 将它们及(1)式和(2)式代入(8)式中, 即可得到 $\phi(0,t)$ 随时间 t 变化的微分方程。利用表 1 中的数据, 数值求解该式可以从理论上得到声光 Cr^{4+} :YAG 主被动双调 Q 激光输出的脉冲宽

3.2 速率方程

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和抽运光的空间分布, 并考虑声光调制器的开关关断时间和渡越时间, 描述 Nd:GdVO₄ 晶体声光和 Cr^{4+} :YAG 双调 Q 激光运转的速率方程组可以表示为^[7,9]

度。由前面的分析可知, ω_S 随 Cr^{4+} :YAG 饱和吸收体在谐振腔内的不同位置 Z_1 的改变而改变, ω_A 随声光调制器在谐振腔内的不同位置 Z_2 而发生变化。因此(8)式能反映出脉宽与 ω_S 和 ω_A 的关系, 即通过改变 Z_1 和 Z_2 便能实现对脉宽的控制。图 2 中的实线给出了固定 $Z_1=0$ 和抽运功率为 4.9 W 时脉宽随 Z_2 的变化关系, 以及固定 $Z_2=9$ cm 和抽运功率为 4.9 W 时脉宽随 Z_1 的变化关系。当抽运功率固定为 4.9 W 时, 理论所得的平均输出功率和峰值功率随 Z_1 和 Z_2 的变化关系如图 3、图 4 中的实线所示。图 5 中的点给出了当抽运功率为 4.9 W, $Z_1=0$, $Z_2=2$ cm 时, 理论计算所得的脉冲宽度为 76 ns 的脉冲波形。图 2~图 5 表明, 理论值与实验结果相吻合。

表 1 双调 Q Nd:GdVO₄ 激光器参量

Table 1 The parameters of a doubly Q-switched Nd:GdVO ₄ laser			
Quantity/Unit	Value	Quantity/Unit	Value
σ/cm^2	1.2×10^{-19}	l/cm	0.5
σ_g/cm^2	4.3×10^{-18}	l_s/cm	0.11
σ_e/cm^2	8.2×10^{-18}	d/cm	2.4
n_{s0}/cm^2	2.0×10^{17}	L	0.08
$\tau/\mu\text{s}$	90	α/cm^{-1}	5.49
τ_s/cm^2	3.2	L_p/cm	17
n_1	2.19	$v/(\text{mm}/\mu\text{s})$	5
n_2	2.183	t_{s1}/ns	14
n_3	1.6	$\omega_p/\mu\text{s}$	220
δ_a	0.85	$\Omega/4\pi$	10^{-6}
R	85%		

4 结 论

通过改变声光调制器和 Cr⁴⁺:YAG 饱和吸收体在谐振腔内的位置, 实现了声光 Cr⁴⁺:YAG 主被动双调 Q 激光的脉宽控制, 同时获得了单脉冲能量、峰值功率的变化范围。根据 ABCD 矩阵传输理论计算得出的腔内模式半径沿腔轴的变化关系, 考虑腔内振荡光强的空间高斯分布以及声光调制的渡越时间, 给出了主被动双调 Q 激光的耦合速率方程组, 理论计算与实验结果相符。

参 考 文 献

- 1 K. Sparlosu, W. Chen, R. Stultz *et al.*. Dual Q-switching and laser action at 1.06 and 1.4 μm in a Nd³⁺:YAG-Cr⁴⁺:YAG oscillator at 300 K[J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(10): 814~816
- 2 T. T. Kajava, A. L. Gaeta. Q-switching of a diode-pumped Nd:YAG laser with GaAs[J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(16):1244~1246
- 3 Yang Kejian, Zhao Shengzhi, He Jingliang *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
- 4 M. Bass. Electrooptic Q-switching of the Nd:YVO₄ laser without an intracavity polarizer[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1975, **11**(12): 938~941
- 5 H. Plaessmcmn, K. S. Mada, C. E. Rich *et al.*. Subnanosecond pulse generation from diode-pumped acousto-optically Q-switched solid-state lasers[J]. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(33):6616~6619
- 6 Gong Mali, Lu Chengqiang. Acousto-optically Q-switched 1342 nm laser with Nd:YVO₄ Crystals[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(3): 502~506
- 巩马理, 陆成强. 声光调 Q 的 Nd:YVO₄ 晶体 1342 nm 激光器[J]. *光学学报*, 2008, **28**(3): 502~506
- 7 N. D. Lai, M. Brunel, F. Bretenaker *et al.*. Control of the pulse duration in one- and two-axis passively Q-switched solid-state lasers[J]. *Eur. Phys. J. D.*, 2002, **19**(3): 403~41
- 8 Li Guiqiu, Zhao Shengzhi, Yang Kejian *et al.*. Control of the pulse width in a passively Q-switched intracavity frequency doubling Nd:YVO₄/KTP green laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(1): 1~5
- 李桂秋, 赵圣之, 杨克建 等. 内腔倍频被动调 Q Nd:YVO₄/KTP 绿光的脉宽控制[J]. *中国激光*, 2006, **33**(1): 1~5
- 9 Jing An, Shengzhi Zhao, Guiqiu Li *et al.*. Doubly passively Q-switched intracavity-frequency-doubling Nd³⁺:YAG/KTP green laser with GaAs and Cr⁴⁺:YAG saturable absorber[J]. *Opt. Engng.*, 2006, **45**(12): 124202-1-6
- 10 S. Zhao, J. Zhao, G. Li *et al.*. Doubly Q-switched laser with electric-optic modulator and GaAs saturable absorber [J]. *Laser Phys. Lett.*, 2006, **3**(10): 471~473
- 11 K. Yang, S. Zhao, G. Li *et al.*. Doubly passively self-Q-switched Cr⁴⁺:Nd³⁺:YAG laser with a GaAs output coupler in a short cavity[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 2007, **43**(2), 109~115
- 12 Zhao Shengzhi, Li Guiqiu, Yang Kejian *et al.*. Double Q-switched c-cut Nd:GdVO₄/KTP green laser with acoustic-optic modulator and GaAs saturable absorber[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, **37**(2): 205~207
- 赵圣之, 李桂秋, 杨克建 等. 声光-GaAs 双调 Q c-Nd:GdVO₄/KTP 激光特性[J]. *红外与激光工程*, 2008, **37**(2): 205~207
- 13 Kejian Yang, Shengzhi Zhao, Guiqiu Li *et al.*. Diode-pumped, passively Q-switched Nd:GdVO₄ green laser with periodically poled KTP and Cr⁴⁺:YAG saturable absorber[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2006, **23**(4): 671~675
- 14 Zhang Xiaojie, Yang Jie, Han Rucong *et al.*. Acousto optic-dye double Q-switched laser: theory and experiments[J]. *Chinese J. Lasers*, 1992, **19**(4):241~246
- 张小洁, 杨杰, 韩汝聪 等. 声光-染料双调 Q 激光器的理论与实验研究[J]. *中国激光*, 1992, **19**(4): 241~246