

基于 LiNbO₃ 晶体电光调 Q 的 Cr,Tm,Ho:YAG 激光器输出特性分析

闫光¹ 冯国英¹ 杨火木¹ 阴明¹ 姚轲¹ 赵鸿² 周寿桓^{1,2}

(¹四川大学电子信息学院, 川 成都 610064)
(²华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘要 搭建了以布儒斯特角切割 LiNbO₃ 晶体作为电光调 Q 元件的 Cr,Tm,Ho:YAG 激光器,测量了静态时腔内 LiNbO₃ 晶体的放置角度对激光器输出能量以及偏振特性的影响。研究发现,当 LiNbO₃ 晶体以布儒斯特角放置时,Cr,Tm,Ho:YAG 激光器效率最高,输出激光的 p 分量最大,线偏振特性最好,这对电光调 Q 是有利的。电光调 Q 时,测量了不同抽运电压下的输出能量、脉冲宽度及脉冲波形,当重复频率为 2 Hz 时、脉冲能量为 25 mJ,最小脉宽达 265 ns,脉冲峰值功率达 94.3 kW,脉冲波形呈光滑的近高斯分布。

关键词 激光器;Cr,Tm,Ho:YAG 激光器;LiNbO₃ 晶体;电光调 Q;布儒斯特角

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.011401

Output Properties of Cr,Tm,Ho:YAG Laser Based on Electro-Optical Q Switching of LiNbO₃ Crystal

Yan Guang¹ Feng Guoying¹ Yang Huomu¹ Yin Ming¹ Yao Ke¹
Zhao Hong² Zhou Shouhuan^{1,2}

(¹College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University,
Chengdu, Sichuan 610064, China)
(²North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

Abstract Cr,Tm,Ho:YAG laser system based on Q switching of LiNbO₃ with Brewster angle cut ends is developed. The influence of the angle by which the LiNbO₃ crystal is placed on the output energy and polarization properties at free running regime is measured. The experimental results indicate that when the LiNbO₃ crystal is placed in the Brewster angle, the laser will achieve the highest efficiency. Furthermore, the output beam has the largest p component and the best linear polarization properties, which are beneficial to the Q switching of Cr,Tm,Ho:YAG laser. The output energy, pulse width and pulse profile of Cr,Tm,Ho:YAG laser at various lamp voltages at Q switching regime are investigated. The maximum pulse energy of 25 mJ and the minimum pulse width of 265 ns at the repetition rate of 2 Hz are achieved, and the peak power is up to 94.3 kW. The pulse profile presents nearly smooth Gaussian distribution.

Key words lasers; Cr,Tm,Ho:YAG laser; LiNbO₃ crystal; electro-optical Q switching; Brewster angle

OCIS codes 140.3070; 310.5448; 260.1180

1 引言

Cr,Tm,Ho:YAG(CTH:YAG)激光器的输出波长在 2 μm 附近,非常接近水的吸收峰 1.93 μm,在手

收稿日期: 2012-09-15; **收到修改稿日期**: 2012-09-21; **网络出版日期**: 2012-11-10

基金项目: 国家自然科学基金(60890200,10976017)和固体激光技术国家级重点实验室基金资助课题。

作者简介: 闫光(1989—),女,硕士研究生,主要从事激光输出特性控制等方面的研究。

E-mail: yg490513150@126.com

导师简介: 冯国英(1969—),女,教授,博士生导师,主要从事新型激光技术方面的研究。

E-mail: guoqing_feng@scu.edu.cn

术中具有穿透深度浅、损伤范围小的优点^[1,2],同时也是 CO₂ 气体中低损耗窗口,大气透过性好^[3],因而广泛应用于医疗、军事等领域。国内外学者对 CTH:YAG 激光器进行了广泛的研究^[1~19]。Storm 等^[4]在 1988 年研究了 CTH:YAG 激光器在调 Q 状态下的激光特性;1990 年 Quarles 等^[5]采用漫反射腔,获得 2 J 的输出能量,斜率效率为 4.5%。黄莉蕾等^[3]在 1998 年实现了 CTH:YAG 激光器单脉冲能量为 1.4~0.8 J、斜率效率为 2%~4% 的激光输出。2005 年陈慧敏等^[10]提出双路 CTH:YAG 激光器的设计方案,在 20 Hz 重复频率下,获得 35.4 W 输出功率,光纤末端输出功率为 22.4 W,总的耦合效率为 64%;2006 年他们又提出基于平面的四路 CTH:YAG 激光器合光设计方案,在 30 Hz 重复频率下,获得直接输出功率 50.17 W,光纤末端输出功率为 35.65 W,总的耦合效率为 71%^[11]。2006 年姚育成等^[1]在重复频率为 1 Hz 的情况下,得到单脉冲能量 4.5 J,5 Hz 情况下平均功率 15 W 的激光输出;2007 年他们建立了 CTH:YAG 激光器运转的理论模型^[2]。2009 年林志锋等^[13]研究了激光二极管(LD)抽运的单纵模 CTH:YAG 激光器,实现了最大输出功率为 31 mW 的单纵模激光输出。2009 年刘沛沛等^[14,16]采用高漫反射陶瓷聚光腔,在重复频率为 10 Hz 时,获得最大平均功率 23.5 W,在重复频率为 5 Hz 下,获得最大脉冲能量 2.58 J,还实现了 CTH:YAG 激光器最大单脉冲能量 5.11 J 的输出。2011 年李哲等^[19]利用电光调 Q 技术,并采用波片对 CTH:YAG 激光热退偏进行补偿,当调 Q 频率为 3 Hz 时,实现了 480 mJ,50 ns 的高能量窄脉冲输出。

但是以布儒斯特角放置的 LiNbO₃ 晶体作为电光调 Q 元件的 CTH:YAG 激光器,相关报道却很少。本文首先搭建了 CTH:YAG 激光器,在腔内放置以布儒斯特角切割的 LiNbO₃ 晶体,并改变其放置角度,测量了 LiNbO₃ 晶体放置角度对输出能量及偏振特性的影响。采用布儒斯特角放置的 LiNbO₃ 晶体作为电光调 Q 元件,实验测量了 CTH:YAG 激光器在调 Q 时的输出能量、脉宽以及脉冲波形,当调 Q 频率为 2 Hz 时,获得了脉冲能量为 25 mJ,脉冲宽度 265 ns 的激光输出。

2 实验方案

实验装置如图 1 所示, LiNbO₃ 晶体的两个端面针对 2.1 μm 激光以布儒斯特角进行切割,即图中 α 角的大小等于 LiNbO₃ 晶体针对 2.1 μm 激光的布儒斯特角。同时,光束以布儒斯特角入射到 LiNbO₃ 晶体表面。棒状 CTH:YAG 增益介质长为 20 cm,采用单个氙灯进行侧面抽运,系统采用循环水冷,冷却水温度恒定为 20.5 °C。谐振腔后反射镜采用平面镜,输出镜是透射率为 20% 的平面镜。

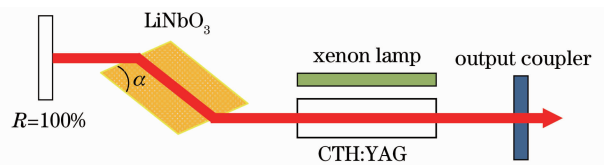


图 1 CTH:YAG 激光器实验装置

Fig. 1 Experimental layout of CTH:YAG laser oscillator

3 实验结果

3.1 CTH:YAG 激光器的静态输出特性

采用图 1 所示的实验方案,搭建了谐振腔长为 38 cm 的 CTH:YAG 激光器。LiNbO₃ 晶体以布儒斯特角放置在 CTH:YAG 激光器腔内,当抽运重复频率为 2 Hz 时,使用 Ophir 公司的 PE25-SH 型号能量计,实验测得不同抽运电压下激光器的输出能量曲线,如图 2 中曲线 1 所示,此时激光器的阈值电压为 857 V。将 LiNbO₃ 晶体在水平面偏转小角度(约 0.5°,顺时针方向)后,得到的输出能量如图 2 中曲线 2 所示。可见随着电压的升高,输出能量基本呈线性增大。LiNbO₃ 晶体偏转之后,激光器阈值变大,阈值电压为 900 V;腔内损耗增大,激光器效率降低。

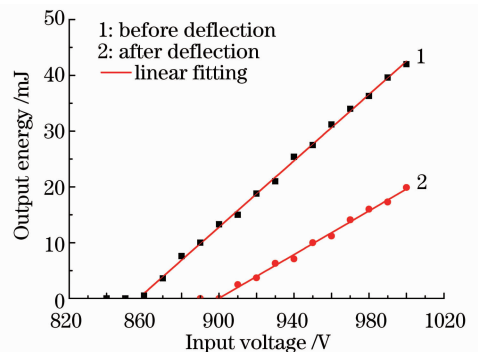


图 2 静态下 LiNbO₃ 晶体偏转前后激光器的输出能量曲线

Fig. 2 Dependence of the output energy on input voltage before and after the deflection of LiNbO₃ crystal at free-running regime

在能量计前放置红外检偏器 P_0 ，其检偏方向为 0° 时的通光面对应输出 p 光的透过方向，此时， LiNbO_3 晶体以布儒斯特角放置在 CTH:YAG 激光器腔内。调节抽运电压，可以测得输出激光的偏振特性曲线如图 3(a) 所示。当以同样方式偏转 LiNbO_3 晶体 (约 0.5° ，顺时针方向) 后，测得抽运电压分别为 920 V 和 950 V 时输出光的偏振特性，并将其与 LiNbO_3 晶体以布儒斯特角放置时相比较，如图 3(b) 所示。

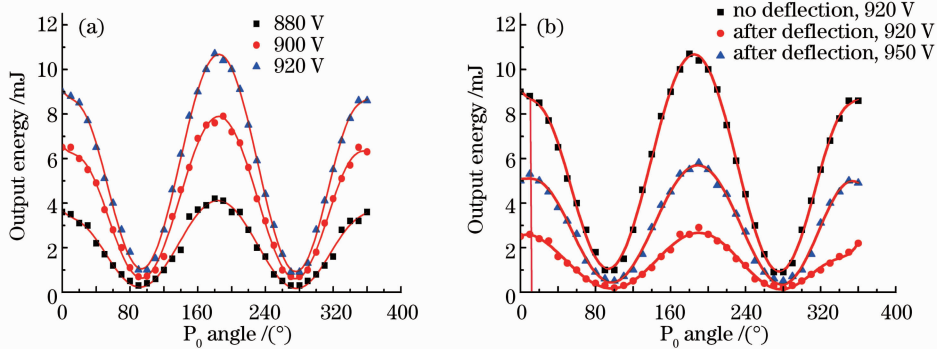


图 3 (a) 静态下不同抽运电压时输出激光的偏振态和 (b) 将 LiNbO_3 晶体在水平面偏转小角度与以布儒斯特角放置时偏振态的对比图

Fig. 3 (a) Output polarization characteristics under various lamp voltages at free-running regime; (b) comparison of output polarization characteristics as LiNbO_3 crystal is deflected by a small angle and placed at Brewster angle at free-running regime

由图 3(a) 可见，红外检偏器 P_0 在 0° 位置都是极大值，对应 p 光透过方向； 90° 位置都是极小值，对应 s 光的透过方向。这是由于 LiNbO_3 晶体是以布儒斯特角放置，由布儒斯特定律可知，在 LiNbO_3 晶体入射面，入射光中大多数 s 光被反射，透过的绝大部分是 p 光，光束通过 LiNbO_3 晶体两个面后，导致输出几乎为线偏振光。

由图 3(b) 可见， LiNbO_3 偏转后，输出能量的最大值并不在 p 光方向，这是由于当入射光偏离了布儒斯特角，通过 LiNbO_3 晶体后，s 光分量增大，腔内的 s 光的振荡增强，因此输出激光中 s 分量增大，导致激光输出的最大值不在 p 光方向，而是产生偏移，输出激光的线偏特性变差。另外，在抽运电压为 920 V 时， LiNbO_3 偏转后，偏振输出能量整体下降。

由图 2 及图 3 可见，由于入射光偏离了布儒斯特角，s 光在腔内形成较弱的振荡，消耗掉部分上能级粒子数，致使 p 光可用反转粒子数减少。由于 s 光往返损耗较大，且 LiNbO_3 晶体偏转后，在晶体表面会有部分 p 光也反射掉，使得 p 光损耗也增大，因此总的往返损耗增大，激光器阈值升高，偏振输出能量降低。这对激光器的偏振输出以及调 Q 是不利的。因此，应尽量将 LiNbO_3 晶体在腔内以布儒斯特角放置。

静态时，如图 1 所示， LiNbO_3 晶体以布儒斯特角放置，谐振腔长为 38 cm，当重复频率为 2 Hz 时，采用 Princeton Instruments 公司的 Acton SP2750 型中红外光谱仪，测得在不同抽运电压下输出的 CTH:YAG 激光光谱，如图 4(a) 所示，中心波长在 $2.1 \mu\text{m}$ 。同时，使用 Kolmar Technologies Infrared Detector 公司的 KMPV-0.1-J1-DC 型探测器测量输出激光的脉宽，并用 Tektronix 公司 DPO4032 型示波器显示，得到静态

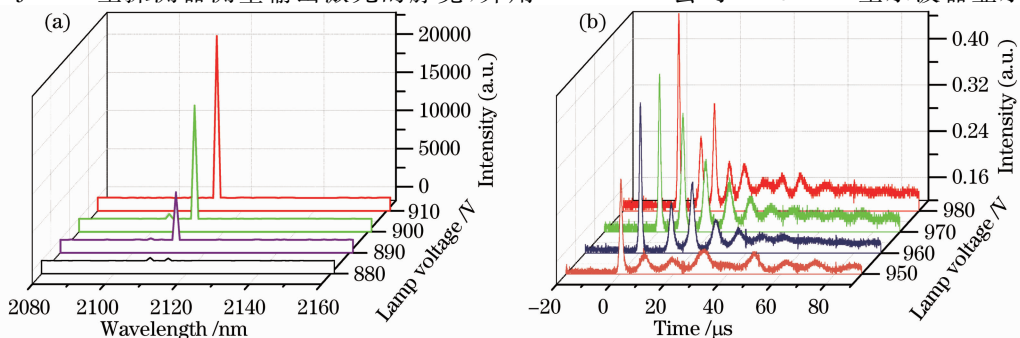


图 4 静态时不同抽运电压下 CTH:YAG 激光器的 (a) 输出激光光谱和 (b) 脉冲波形

Fig. 4 (a) Output spectrum and (b) pulse profile of CTH:YAG laser under various lamp voltages at free-running regime

时的波形,如图 4(b)所示,可见静态波形有明显的弛豫振荡,随着抽运电压的增大,脉冲尖峰和弛豫振荡越来越强,第一个脉冲尖峰的宽度为 $1\sim 2\ \mu\text{s}$ 。

3.2 CTH:YAG 激光器的动态输出特性

采用外接信号发生器对调 Q 延时以及 LiNbO₃ 晶体所加的电压进行控制,观察到延时和晶体外加电压分别为 $700\ \mu\text{s}$ 、 $2029\ \text{V}$ 时输出能量最高。重复频率为 $2\ \text{Hz}$ 时,在不同的抽运电压下,测得 CTH:YAG 激光器输出能量及脉宽如图 5 所示。

可见,在电光调 Q 下,随着抽运电压的增大,输出能量基本呈线性增大,同时输出激光脉宽逐渐变小,当抽运电压为 $1000\ \text{V}$ 时,输出脉冲能量为 $25\ \text{mJ}$,输出脉宽为 $265\ \text{ns}$ 。在不同的抽运电压下,激光脉冲波形如图 6 所示,可见电光调 Q 后和静态下脉冲波形[图 4(b)]相比,脉宽明显变窄,脉冲波形呈光滑的近高斯分布。在图 6 时间范围外,激光时域上除了电光调 Q 后的主脉冲,还有一个小的低峰脉冲。当抽运电压为 $950\ \text{V}$ 时,电光调 Q 下输出激光光斑直径为 $1.25\ \text{mm}$ 。

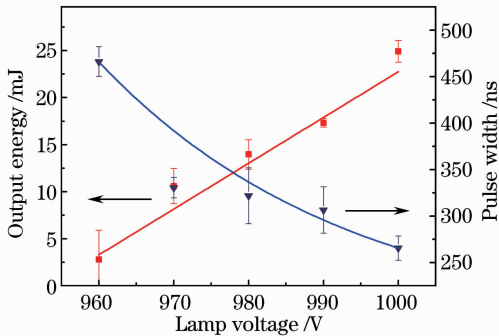


图 5 电光调 Q 时输出能量和脉冲脉宽随抽运电压的变化曲线

Fig. 5 Output energy and pulse width versus pump lamp voltage at electro-optical Q-switching regime

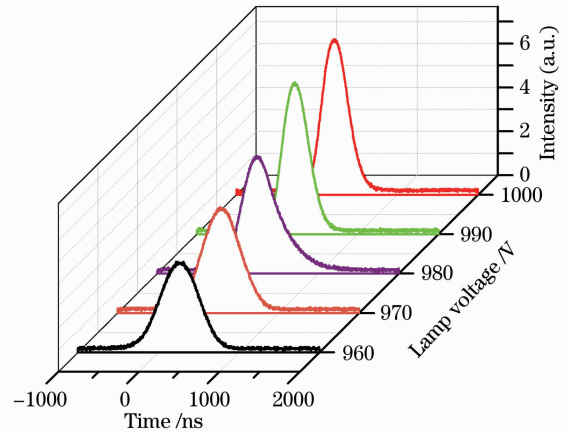


图 6 电光调 Q 下重复频率为 $2\ \text{Hz}$ 时的脉冲波形

Fig. 6 Pulse profile under different pump lamp voltages at $2\ \text{Hz}$ in Q-switching regime

4 结 论

实现了腔内含布儒斯特角切割 LiNbO₃ 晶体的 CTH:YAG 激光器,得到 $2.1\ \mu\text{m}$ 的近红外激光输出,并对 LiNbO₃ 晶体的放置角度所引起的输出能量、阈值特性及偏振特性的变化进行了详细的实验研究。结果表明,静态时腔内 LiNbO₃ 晶体应该以布儒斯特角放置,改变 LiNbO₃ 晶体的放置角度,将导致输出能量下降,阈值增大,效率降低,输出激光的线偏振性变差。

将 LiNbO₃ 晶体以布儒斯特角放置,对 CTH:YAG 激光器进行电光调 Q,测量了不同抽运电压时的输出能量、脉冲宽度以及脉冲波形。得到随着抽运电压的增大,输出能量线性增大,脉冲宽度逐渐减小,输出脉冲波形呈光滑的近高斯分布。在调 Q 频率为 $2\ \text{Hz}$ 时,获得了脉冲能量为 $25\ \text{mJ}$,脉冲宽度 $265\ \text{ns}$ 的激光输出,峰值功率达 $94.3\ \text{kW}$ 。

参 考 文 献

- 1 Yao Yuncheng, Li Zhengjia, Huang Chuyun *et al.*. Research and design of Cr, Tm, Ho: YAG lasers[J]. *Appl. Laser*, 2006, **26**(4): 239~242
姚育成, 李正佳, 黄楚云 等. Cr, Tm, Ho: YAG 激光器的研究及设计[J]. *应用激光*, 2006, **26**(4): 239~242
- 2 Yao Yucheng, Li Zhengjia, Huang Chuyun *et al.*. Theoretical simulation of Cr, Tm, Ho: YAG laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(7): 1351~1355
姚育成, 李正佳, 黄楚云 等. Cr, Tm, Ho: YAG 激光器的理论模拟[J]. *光子学报*, 2007, **36**(7): 1351~1355
- 3 Huang Lilei, Ji Yuanxin. The spectra and laser-emission in Cr, Tm, Ho: YAG crystal[J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 1998, **9**(3): 214~216
黄莉蕾, 纪元新. Cr, Tm, Ho: YAG 晶体的光谱及其激光特性[J]. *光电子 • 激光*, 1998, **9**(3): 214~216

- 4 M. E. Storm. Laser characteristics of a Q-switched Ho: Tm: Cr: YAG[J]. *Appl. Opt.*, 1988, **27**(20): 4170~4172
- 5 G. J. Quarles, A. Rosenbaum, C. L. Marquardt *et al.*. Efficient room-temperature operation of a flash-lamp-pumped, Cr, Tm: YAG laser at 2.01 μm [J]. *Opt. Lett.*, 1990, **15**(1): 42~44
- 6 D. Bruneau, S. Delmonte, J. Pelon. Modeling of Tm, Ho: YAG and Tm, Ho: YLF 2 μm lasers and calculation of extractable energies[J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(36): 8406~8419
- 7 D. G. Lancaster, J. Dawes. Thermal-lens measurement of a quasi steady-state repetitively flashlamp-pumped Cr, Tm, Ho: YAG laser[J]. *Opt. Laser Technol.*, 1998, **30**(2): 103~108
- 8 K. S. Lim, C. W. Lee, S. T. Kim *et al.*. Infrared to visible up-conversion in Cr, Tm, Ho: YAG[J]. *J. Lumin.*, 2000, **87-89**: 1008~1010
- 9 Chen Huimin, Liu Lei, Li Jiase. Experimental research of Cr, Tm, Ho: YAG in different frequency[J]. *Laser Technology*, 2004, **28**(1): 39~41
陈慧敏, 刘磊, 李家泽. 重频 Cr, Tm, Ho: YAG 激光器输出特性的实验研究[J]. 激光技术, 2004, **28**(1): 39~41
- 10 Chen Huimin, Liu Lei, Li Jiase *et al.*. High-power Cr, Tm, Ho: YAG pulse lasers pumped by xenon-lamp[J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2005, **16**(4): 433~435
陈慧敏, 刘磊, 李家泽. 氙灯泵浦的高功率 Cr, Tm, Ho: YAG 脉冲激光器[J]. 光电子·激光, 2005, **16**(4): 433~435
- 11 Chen Huimin, Li Ping, Yan Xiaopeng *et al.*. The design of high power Cr, Tm, Ho: YAG laser using multi-route techniques [J]. *Laser Journal*, 2008, **27**(5): 30~31
陈慧敏, 栗苹, 闫晓鹏等. 多路 Cr, Tm, Ho: YAG 激光器合光路的设计[J]. 激光杂志, 2008, **27**(5): 30~31
- 12 Yang Kai, Bai Jintao. Theoretical and Experimental Research of 2 μm Cr, Tm, Ho: YAG Solid Lasers[D]. Xi'an: Northwest University, 2008
杨凯, 白晋涛. 2 μm Cr, Tm, Ho: YAG 固体激光器的理论与实验研究[D]. 西安: 西北大学, 2008
- 13 Lin Zhifeng, Zhang Yunshan, Gao Chunqing *et al.*. Experimental investigation of LD-pumped Cr, Tm, Ho: YAG single longitudinal mode microchip laser[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, **58**(3): 1689~1693
林志锋, 张云山, 高春清等. LD 抽运 Cr, Tm, Ho: YAG 微片激光器单纵模运转特性的研究[J]. 物理学报, 2009, **58**(3): 1689~1693
- 14 Liu Peipei, Long Jingyu, Yang Kai *et al.*. High-power medical CTH: YAG pulse laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(9): 2184~2187
刘沛沛, 龙井宇, 杨凯等. 医用高功率 CTH: YAG 脉冲激光器[J]. 光子学报, 2009, **38**(9): 2184~2187
- 15 Long Jingyu. Theoretical and Experimental Research of Solid Infrared Lasers[D]. Xi'an: Northwest University, 2009
龙井宇. 固体红外激光器理论与实验研究[D]. 西安: 西北大学, 2009
- 16 Long Jingyu, Liu Peipei, Yang Kai *et al.*. High average power flashlamp-pumped Cr, Tm, Ho: YAG laser at room temperature[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(5): 1037~1041
龙井宇, 刘沛沛, 杨凯等. 高平均功率室温运转闪光灯抽运 Cr, Tm, Ho: YAG 激光器[J]. 中国激光, 2009, **36**(5): 1037~1041
- 17 K. Yang, H. Bromberger, H. Ruf *et al.*. Passively mode-locked Tm, Ho: YAG laser at 2 μm based on saturable absorption of intersubband transitions in quantum wells[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(7): 6537~6544
- 18 Guo Jiawei, Li Tong, Niu Ruihua *et al.*. Analysis of the effective inversion reduction factor of Cr, Tm, Ho: YAG laser[J]. *Laser & Infrared*, 2010, **40**(12): 1310~1315
郭嘉伟, 李彤, 牛瑞华等. Cr, Tm, Ho: YAG 激光器有效反转减少因子的数值模拟分析[J]. 激光与红外, 2010, **40**(12): 1310~1315
- 19 Li Zhe, Wang Li, Yang Jingwei *et al.*. High energy electro-optically Q-switched Cr, Tm, Ho: YAG laser at room temperature[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(6): 0603007
李哲, 王礼, 杨经纬等. 480 mJ, 2 μm 高能室温运转电光调 Q Cr, Tm, Ho: YAG 激光器[J]. 中国激光, 2011, **38**(6): 0603007