

文章编号: 0258-7025(2010)09-2318-05

小型高光束质量电光调 Q 重复频率激光器

易亨瑜 叶一东 周志强 黄珊 黄祖鑫 田小强 王文东 李建民 张凯

(中国工程物理研究院应用电子学研究所, 绵阳 四川 621900)

摘要 为了达到野外使用要求,采用变反射率镜(VRM)非稳腔和折叠腔方式,研制了高光束质量的小型脉冲激光器。分析了 VRM 腔参数对输出激光束特性的影响,针对高光束质量输出要求,通过计算,选择出适合的谐振腔参数。为了实现小型化和免调整特性,采用角锥棱镜作为折叠棱镜,设计了腔内线偏振光振荡的角锥棱镜激光谐振腔。根据理论分析结果,进行了实验研究。结果显示,在氙灯抽运下注入电能 32.4 J,实现重复频率(1~10 Hz)单脉冲能量输出,获得了高光束质量、高动静比的基模光斑。在 3 Hz 重复频率下,脉冲能量为 320.2 mJ,脉宽 8.3 ns,光束质量为 1.27,Q 开关效率为 95.5%,电-光转换效率为 0.99%。

关键词 激光器;YAG 激光器;变反射率镜;光束质量;谐振腔

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103709.2318

High Beam-Quality Q-Switched Repetitive Mini Laser

Yi Hengyu Ye Yidong Zhou Zhiqiang Huang Shan Huang Zuxin Tian Xiaoqiang
Wang Wendong Li Jianmin Zhang Kai

(Institute of Applied Electronic, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

Abstract A Q-switched repetitive mini laser is developed by requirement of high beam-quality. The interrelations between the parameters of variable reflectivity mirror (VRM) and con-focal unstable resonator and their effects on laser intensity distributions are analyzed. A suit of resonator parameters is obtained to meet high beam-quality of outputting. In order to develop a mini adjust-free laser, a folded resonator is designed, where a cube corner prism is used as the folded mirror. Because linearly polarized light exists in the resonator, the laser can be run with an electro-optic Q-switch in a special polarization azimuth. Based on these theory analyses, an amount of experiments have been done. Using a xenon flash lamp with 32.4 J as the pump energy, single pulse laser output of high beam-quality and high dynamic to static ratio light spot is obtained, and its repetitive frequency is 1~10 Hz. When the laser works at the repetitive frequency of 3 Hz, an energy of 320.2 mJ, pulse width of 8.3 ns output beam is achieved, and its efficiency of the Q-switch is 95.5%, while the electro-optical efficiency is 0.99%.

Key words lasers; YAG laser; variable reflectivity mirror; beam quality; resonator

1 引言

在一些大振动、大温差的恶劣环境中使用时,对激光器的体积、重量等各项指标的要求非常苛刻,因此这类激光器的研制目标就是减小体积、减轻重量、提高使用可靠性。采用激光二极管(LD)抽运方式,虽然可提高抽运效率,但因抽运波长随温度漂移十分灵敏,控制不好可能不出光,故需要对其温度进行精密控制,导致 LD 抽运激光器(DPL)的体积、功耗、系统复杂程度都大为增加;另外在较小输出能量下,DPL 的成本远高于灯抽运激光器。因此小型灯

抽运固体激光器目前在恶劣环境中仍有良好的应用前景^[1,2]。

为了提高测距范围,要求激光器输出的光束发散角应尽量小,同时输出能量尽可能高,即需要考虑激光器的光束质量和效率这两个重要指标,因此选用变反射率镜(VRM)非稳腔腔型^[3~8]。VRM 非稳腔具有平滑的输出光束轮廓、良好的模式辨别力、扰动稳定性和大的模体积等优点,可以获得大功率高光束质量的激光输出。文献[9]在理论上分析了 VRM 腔输出模式。对于脉冲激光器,激光器输

收稿日期: 2010-04-26; 收到修改稿日期: 2010-07-12

作者简介: 易亨瑜(1969—),男,博士,高级工程师,现从事激光技术方面的研究。E-mail: yihengyu1@sina.com

出效率又包括了电-光转换效率和 Q 开关效率(即动静比)。一般情况下灯抽运激光器的动静比为 40%~70%^[10],文献[11]采用卡塞格林非稳腔结构实现了高达 75%的激光器动静比。为了便于外场运行,激光器应小型化和具有免调整特性,因此采用角锥棱镜作为折叠棱镜,设计电光调 Q 角锥棱镜激光谐振腔。根据测距的要求,本文通过理论分析,计算出适宜的腔参数,在此基础上开展灯抽运激光器调 Q 实验研究,得到了 320 mJ 以上的高光束质量模式输出,Q 开关效率达到 95.5%,基本满足激光测距系统的性能指标。

2 谐振腔设计

2.1 VRM 腔设计

高斯型 VRM 在实际加工中便于实现,其反射率可表示为

$$R(r) = R_{\max} \exp[-2(r/\omega_m)^n], \quad (1)$$

式中 R_{\max} 为中心最大反射率, r 为径向距离, ω_m 为高斯函数的“腰半径”, n 为高斯函数的阶数。

常用正分支共焦非稳腔设计 VRM 腔,其结构如图 1 所示。谐振腔腔长为 l ,输出耦合腔镜曲率半径 R_2 ,口径为 d ;全反腔镜曲率半径 R_1 ,口径为 D ;则环状输出光束外直径为 D ,内直径为 d 。

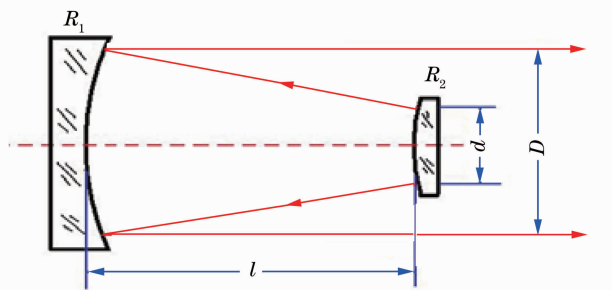


图 1 共焦非稳腔

Fig. 1 Con-focal unstable resonator

当输出镜采用均匀反射率镜时,输出镜为硬边光阑,忽略衍射损耗,则谐振腔放大率 M_0 和腔输出透射率 T 分别为

$$M_0 = D/d; \quad T = 1 - 1/M_0^2. \quad (2)$$

当输出镜采用 VRM 时,就形成了 VRM 腔。此时除原非稳腔输出透射率外,还有输出镜不完全反射,所以腔输出透射率为

$$T = 1 - R_{\text{avg}}/M^2, \quad (3)$$

式中 M 为 VRM 腔的放大率, R_{avg} 为 VRM 腔的平均反射率。

由(2),(3)式可以得到,在同等条件下 M 与硬

边情况下 M_0 之间关系为:

$$M^2 = M_0^2 R_{\text{avg}}. \quad (4)$$

对于共焦型 VRM 腔,根据正分支非稳腔放大率 M 与谐振腔镜曲率半径的关系,谐振腔反射镜的曲率半径为^[12]

$$R_2 = \frac{-2l}{M-1}; \quad R_1 = \frac{2Ml}{M-1}. \quad (5)$$

实际工作中,为补偿 YAG 棒引起的热透镜效应(热透镜焦距为 f 时),全反腔镜曲率半径的实际取值应修正为

$$\frac{1}{R_{1\text{eff}}} = \frac{1}{R_1} - \frac{1}{f}. \quad (6)$$

入射到 VRM 镜上腔内光束的光腰半径 ω_i 为

$$\omega_i = \omega_m \sqrt[n]{M^n - 1}, \quad (7)$$

式中 ω_i 取值应尽量提高增益介质的填充因子,并且还要降低口径衍射的影响。理论研究表明,增益介质口径边缘处的光场强度与中心最大的光场强度比值为 0.2%~13%时,可以忽略激光棒口径带来的衍射效应的影响^[3]。VRM 腔的近场光场分布为

$$I_n(r) = [1 - R(r)] I_0 \exp[-2(r/\omega_i)^n], \quad (8)$$

式中 I_0 为腔内初始光场,利用傅里叶变换,由光场的近场分布可得到远场分布。检验高斯变反射率镜取值是否满足谐振腔近场光强平顶分布条件

$$R_{\max} \leq 1/M^2. \quad (9)$$

2.2 折叠式角锥棱镜谐振腔

测距激光器工作在调 Q 方式。为了便于外场环境使用,必须减少激光器体积,同时提高使用可靠性,因此采用角锥棱镜作为谐振腔折叠镜。由于角锥棱镜存在退偏效应,不能全口径直接运用角锥棱镜。如图 2 所示,谐振腔内振荡光束通过角锥棱镜底面 A_0 进入其侧面 A_1 ,依次反射到另两侧面 A_2 , A_3 ,最后通过底面 A_0 出射。这样入射的线偏振光被角锥棱镜反射后仍然是线偏振光,因此适用于电光调 Q 方式。

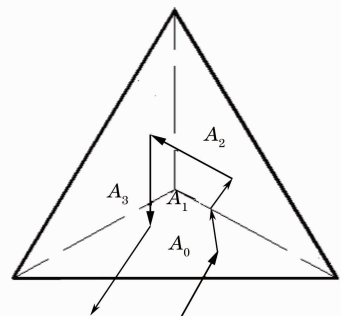


图 2 角锥棱镜内部光路图

Fig. 2 Ray trace in a cube corner prism

利用琼斯矩阵,可以建立角锥棱镜腔的偏振模型,分析其偏振特性,如图3所示。可以看出存在一个特殊的入射偏振方位角,以此偏振方位角入射时,出射光琼斯分量的相位差为 0° ,即出射光仍为线偏振光。通过分析计算得到此方位角为 -16.1° ,详细分析见文献[13]。

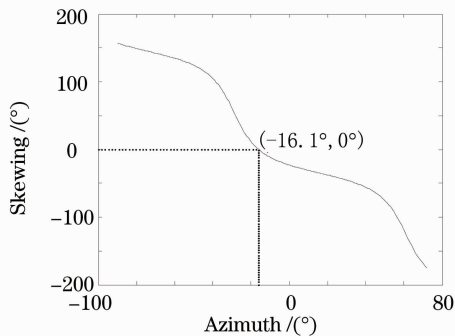


图3 激光器出射激光琼斯分量的相位差
随入射光的偏振方位角的变化

Fig. 3 Skewing of output laser's Jones component
versus azimuth of incident linearly polarized light

利用角锥棱镜单个入射区域存在特殊偏振方位角的特性来构建如图4所示的激光谐振腔,并将输出镜和全反镜固定在同一个镜框上,这样即使镜框和角锥棱镜由于机械振动而产生扰动也不会对激光器的输出造成影响。

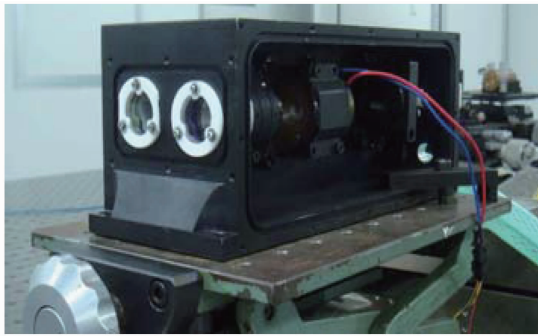


图4 角锥棱镜激光器实物图
Fig. 4 Photo of our laser

3 输出模式分析

考虑到测距激光器性能指标要求,选择横截面积为 $7\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 的Nd:YAG棒。根据稳定谐振腔最佳输出透射率和往返损耗率关系^[14,15],以及目前的实验元件,结合脉冲激光器的研制经验,为了获得较大的脉冲能量,取稳定腔输出透射率 $T=90\%$ 。对于二阶高斯型VRM,则有 $R_{\text{avg}} = R_{\text{max}}\sqrt{\pi}/2$,由(3)和(9)式关系得到 $M\approx 1.8$ 。高斯输出镜曲率半径通常选取为容易加工的数值,选取高

斯输出镜曲率半径 $R_2 = -1500\text{ mm}$,高斯半径 $\tau\omega_m = 2.5\text{ mm}$,中心反射率 $R_{\text{max}} = 30\%$ 。根据(6)和(9)式,再考虑到YAG棒的热透镜效应,得到VRM非稳腔长 $l=600\text{ mm}$,1064 nm波长平凹全反镜的凹面曲率半径 $R_1 = 3500\text{ mm}$ 。根据(1)和(9)式可以计算出不同高斯镜对应的归一化激光近场光强剖面分布。分别取高斯镜中心反射率 $R_{\text{max}} = 100\%$, 80% , 60% , 30% ,得到光束近场光强 I_n 分布如图5所示,其剖面将出现不同程度的中空形态。可以看到,当高斯镜中心反射率为 $R_{\text{max}} = 30\%$ 时,输出光束呈平顶分布。此时高斯镜面上的反射率 R 分布如图6所示。

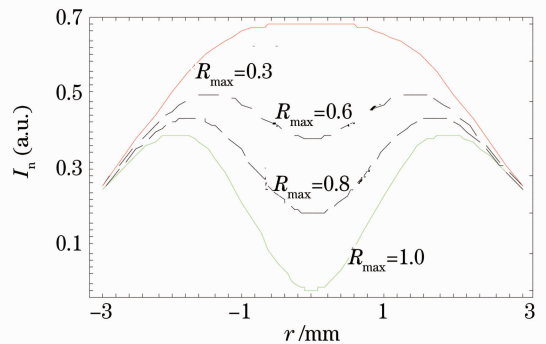


图5 不同高斯镜对应的激光近场光强分布
Fig. 5 Intensity profiles of near-field beam

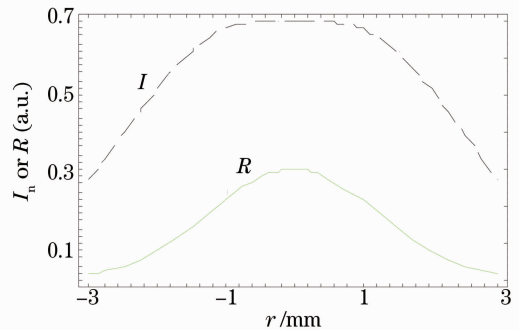


图6 平顶分布下的VRM反射率分布
Fig. 6 One kind of the reflectivity profile of VRM

4 实验测量

对于Nd掺杂原子数分数为1.1%,外形尺寸为 $\phi 7\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 的Nd:YAG棒,以KDP晶体作为Q开关,采用角锥棱镜作为谐振腔折叠镜,建立VRM非稳腔激光器的实验测试装置如图7(a)所示。采用折叠腔方式实现激光器的小型化。为了对激光输出性能进行分析,利用EPM2000型能量计测量脉冲能量,由Newfocus公司的快速光电探测器和Angilent54832B数字示波器组成探测单元,对

激光脉冲宽度进行测量,并利用自行研制的光束质量分析仪测量远场光束质量。当激光器工作电压为 700 V 时,激光输出脉冲能量为 2.87 mJ。在小能量

输出下对谐振腔内楔镜进行调节,调节完毕后光束近场光斑分布如图 7(b)所示,与文献[9]的理论分析结果一致,其原因可能是热效应所致。

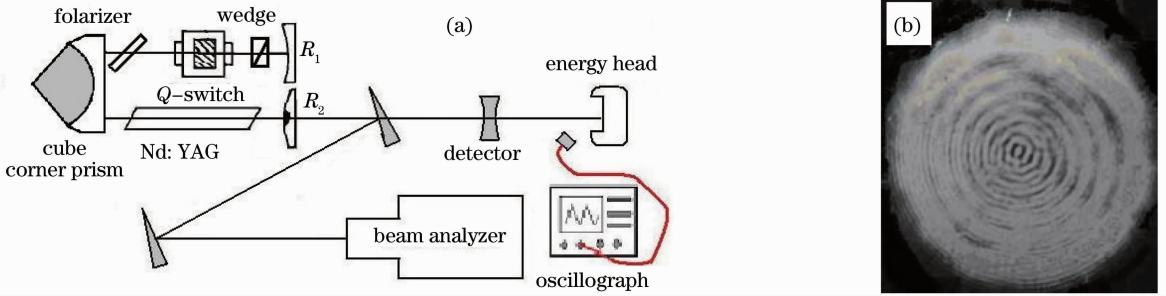


图 7 (a)实验测试布局图;(b)近场光强分布

Fig. 7 Experimental setup sketch (a) and intensity profiles of near-field beam(b)

当电压逐渐增加时,激光输出脉冲能量近似呈线性增大。当激光器工作在 1~6 Hz 频率下,激光器热效应变化不明显,远场光束变化不明显。根据外场使用设计指标,激光器工作电压限制为 900 V,电源输出 32.4 J,对激光器输出性能进行实验测试。

调 Q 脉冲输出。F 为 3 Hz 和 10 Hz 时激光器输出脉冲能量分别为 320.2 mJ 和 324.5 mJ,光束远场光强分布如图 8 所示。

1) 当激光器自由振荡时,频率 F 在 3 Hz 和 10 Hz 下,激光器输出脉冲能量分别是 335 mJ 和 367 mJ。此时激光脉宽约为数百微秒。

经实验测试得到,在 3 Hz 下运行,激光器的光束质量和脉冲宽度分别为 $\beta = 1.27427$, $t_p = 8.307$ ns;在 10 Hz 下运行,激光器的光束质量和脉冲宽度分别为 $\beta = 2.0951$, $t_p = 7.569$ ns。通过计算,在 3 Hz 下 Q 开关效率为 95.5%,总的电-光转换效率为 0.99%;在 10 Hz 下 Q 开关效率为 88.4%,总的电-光转换效率为 1.00%。

2) 打开 Q 开关电源,根据理论分析角度,同时观测激光脉宽对 KDP 晶体角度进行调节,实现

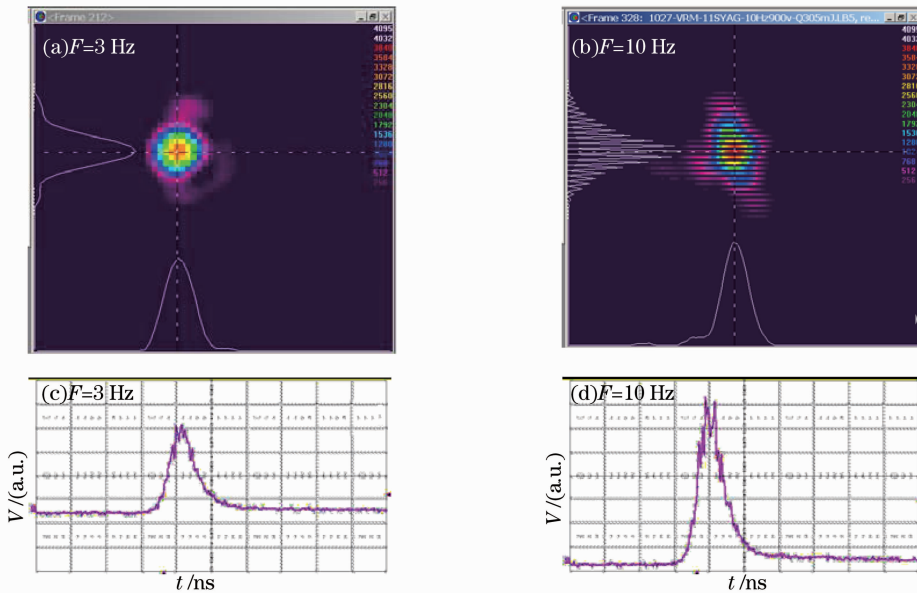


图 8 调 Q 方式下不同重复频率时的远场光强分布(a),(b)和脉冲宽度(c),(d)

Fig. 8 Intensity profiles of far-field beam (a)(b), and its pulse width (c)(d) at different repetition rates

5 结 论

介绍了 VRM 共焦非稳腔参数对激光输出特性的影响,利用折叠式角锥棱镜谐振腔,研制了电光调

Q 方式的 Nd:YAG 灯抽运激光器,获得了高光束质量的基模输出。在 3 Hz 重复频率下,脉冲能量为 320.2 mJ,脉宽 8.3 ns,光束质量为 1.27,Q 开关效

率为 95.5%，电-光转换效率为 0.99%，基本满足激光测距系统的性能指标。目前该激光器已用于激光测距中，性能稳定。

致谢 感谢王卫民、庞毓同志的讨论。

参 考 文 献

- Jin Yujian, Wang Pengfei, Pan Hu. 10 Hz 100 mJ Q-switched miniature solid laser without water cool [J]. *Laser & Infrared*, 2003, **33**(4): 255~257
金煜坚, 王鹏飞, 潘 虎. 10 Hz Q 开关 100 mJ 小型无水冷却激光器[J]. *激光与红外*, 2003, **33**(4): 255~257
- Gao Hongwen, Sun Chuandong, Chen Zhi *et al.*. Experimental study on stability of output of lamp-pumped laser [J]. *Acta Photonicsa Sinica*, 2003, **32**(11): 1306~1307
高宏文, 孙传东, 陈 智等. 灯泵浦激光器输出激光稳定性实验研究[J]. *光子学报*, 2003, **32**(11): 1306~1307
- Gilbert L. Bourdet. Numerical simulation of a high average-power diode-pumped ytterbium-doped YAG laser with an unstable cavity and a super-Gaussian mirror [J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(6): 1018~1027
- Degang Deng, Xiaoyong Fu, Youwei Tian *et al.*. Far-field intensity distribution of beam generated by Gaussian mirror resonator [J]. *Opt. Commun.*, 2005, **248**: 185~189
- Yin Ye, Xiao Jun, Yu Haiwu *et al.*. Developments of resonators with variable reflectivity mirrors [J]. *Optics & Optoelectronics Technology*, 2007, **5**(1): 31~34
尹 焯, 肖 峻, 於海武等. 变反射率镜非稳腔的研究进展[J]. *光学与光电技术*, 2007, **5**(1): 31~34
- Chen Xiaoyan, Zhao Gang, Wang Yuzhi. Study on miniature Cr⁴⁺:YAG Q-switched repetitively conductive cooling (Ce,Nd):YAG laser [J]. *Laser Technology*, 2000, **24**(2): 115~118
陈肖燕, 赵 刚, 王欲知. 小型 Cr⁴⁺:YAG 调 Q 重频热传导冷却(Nd,Ce):YAG 激光器研究[J]. *激光技术*, 2000, **24**(2): 115~118
- Bao Zhaorigetu, Zhou Shouhuan, Zhao Haixia *et al.*. High beam quality 1.57 μm OPO [J]. *Chinese. J. Lasers*, 2003, **30**(5): 395~397
包照日格图, 周寿桓, 赵海霞等. 高光束质量 1.57 μm 的光参量振荡器[J]. *中国激光*, 2003, **30**(5): 395~397
- Pei Bo, Zhou Shouhuan, Shen Ke. Tunable VRM unstable resonator Ti:Al₂O₃ laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(7): 804~807
裴 博, 周寿桓, 沈 柯. 变反射率镜非稳腔可调谐 Ti:Al₂O₃ 激光器[J]. *光学学报*, 2001, **21**(7): 804~807
- Ling Dongxiang, Fu Yunchang, Fan Zebin. Matrix analysis of eigen mode-fields of the circular plano-concave resonator with a Gaussian-reflectivity mirror [J]. *Chinese. J. Lasers*, 2003, **30**(1): 25~28
凌东雄, 伏云昌, 樊则宾. 高斯型变反射率圆镜平凹腔本征模场的矩阵分析[J]. *中国激光*, 2003, **30**(1): 25~28
- Wang Hao, Wang Qingpu, Zhang Xingyu *et al.*. La₃Ga₅SiO₁₄ as active electro optic Q-switch in a pulsed Nd:LiYF₄ laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(7): 939~942
王 浩, 王青圃, 张行愚等. La₃Ga₅SiO₁₄ 电光调 Q 的 Nd:LiYF₄ 激光器研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(7): 939~942
- G. Giuliani, Y. K. Park, R. L. Byer. Radial birefringent element and its application to laser resonator design [J]. *Opt. Lett.*, 1980, **5**: 491~493
- W. Koehner. *Solid-State Laser Engineering* [M]. Beijing: Science Press, 2002
W. 克希耐尔. *固体激光工程* [M]. 北京, 科学出版社, 2002
- Li Jianmin, Ye Yidong, Liao Yuan *et al.*. Analysis of polarization characteristic of corner-cube folded resonator [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, **22**(7): 1495~1499
李建民, 叶一东, 廖 原等. 折叠式角锥棱镜谐振腔的偏振特性分析[J]. *强激光与粒子束*, 2010, **22**(7): 1495~1499
- J. J. Degnan. Theory of the optimally coupled Q-switched laser [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1989, **25**(2): 214~220
- Zhang Xingyu, Zhao Shengzhi, Wang Qingpu. General expression of the output energy of a pulsed solid state laser [J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 1999, **10**(5): 408~410
张行愚, 赵圣之, 王青圃. 固体脉冲激光器输出能量的普遍表达式[J]. *光电子·激光*, 1999, **10**(5): 408~410