

914 nm LD 抽运高效率腔倒空电光调 Q 激光器

周丹丹, 尹兴良, 王煜, 姜梦华, 惠勇凌, 雷甸, 李强*

北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124

摘要 高重复频率大能量窄脉宽激光器在激光成像、激光加工、精密测量等领域中得到广泛应用。采用电光腔倒空技术和双棒串接结构,通过减小热透镜效应的影响并保证振荡光与抽运光的良好模式匹配,实现了高效率、大能量、窄脉宽 1064 nm 线偏振脉冲激光输出。以偏硼酸钡(BBO)普克尔盒作为电光开关,采用低吸收系数的 914 nm 光纤耦合半导体激光器端面抽运 Nd:YVO₄ 晶体,提高了激光器的热稳定性。在重复频率 7 kHz 的条件下,当谐振腔腔长为 450 mm,晶体吸收功率为 79.6 W 时,获得了脉冲宽度为 5 ns,最大平均输出功率为 35 W,单脉冲能量为 5 mJ 的稳定脉冲激光输出,对应的光-光转换效率为 44%。

关键词 激光器; 电光腔倒空; 914 nm 波长; 高转换效率

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0101014

High-Efficiency Electro-Optical Cavity-Dumped Q-Switched Laser Pumped by LD at 914 nm

Zhou Dandan, Yin Xingliang, Wang Yu, Jiang Menghua,
Hui Yongling, Lei Hong, Li Qiang

Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

Abstract High repetition rate, large energy and narrow pulse width laser is widely used in the frontier fields of laser imaging, laser machining and precision measurement. Using the technology of electro-optical cavity-dumped and double rod series structure, which reduces the thermal lens effect and ensures the good matching mode of oscillation light and the pump light, the 1064 nm linearly polarized laser output with high efficiency, large energy and narrow pulse width is realized. Using the barium boron oxide (BBO) Pockels cell as electro-optical switch, and the 914 nm fiber-coupled semiconductor laser with low absorption coefficient is used to pump the Nd:YVO₄ crystal. Thus the thermal stability of the laser is improved. At the repetition rate of 7 kHz and the crystal absorption power of 79.6 W, a stable pulse laser output with a pulse width of 5 ns, maximum average output power of 35 W, and a single pulse energy of 5 mJ is obtained, and the corresponding optical conversion efficiency is 44%.

Key words lasers; electro-optical cavity-dumped; 914 nm wavelength; high conversion efficiency

OCIS codes 140.3480; 140.3530; 140.3538

1 引 言

高重复频率、大能量、窄脉宽的激光脉冲在激光加工、精密测量、信息技术等前沿领域均得到了广泛的应用。一般的激光调 Q 技术很难同时满足这三

者的要求,如半导体激光抽运的微片激光器,虽然可以产生几纳秒甚至几十皮秒的激光脉冲^[1-2],但其单脉冲能量很小,一般在微焦耳量级^[2]。典型的调 Q 激光器,如灯抽运或者半导体激光抽运的声光或电光调 Q 激光器,虽然能在高重复频率下产生大能量

收稿日期: 2017-08-07; 收到修改稿日期: 2017-10-09

基金项目: 国家自然科学基金(61378023)、国家重大科研装备研制项目(ZDYZ2013-2)、北京市自然科学基金(4112005, 4174085)

作者简介: 周丹丹(1991—),女,硕士研究生,主要从事固体激光器方面的研究。E-mail: zdzhoudana@163.com

导师简介: 雷甸(1970—),男,博士,副教授,主要从事固体激光技术方面的研究。E-mail: leihong@bjut.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: ncltlq@bjut.edu.cn

的激光脉冲,但由于其脉冲宽度与激光增益、脉冲重复频率等因素有关,致使其脉宽很难做到很窄,产生的脉宽一般在几十纳秒或者上百纳秒^[3-6]。

腔倒空技术是一种能有效产生高重复频率、大能量、窄脉宽激光输出的调 Q 技术。与一般的调 Q 激光器不同,它是在激光腔的两端使用 100% 反射镜对激光器进行 Q 开关转换。在循环功率的峰值时,迅速把输出镜的反射率从 100% 降为 0,即将所有的光能从腔内迅速倒出腔外,该技术的优点是其产生的激光脉冲的宽度主要是谐振腔腔长的函数,而不是激光增益介质特性的函数^[7]。从理论上讲,只要 Q 开关的开关速度足够快,那么腔倒空输出的调 Q 激光脉宽就等于激光在腔内的往返渡越时间。

2006 年,德国研究人员利用 888 nm 光纤耦合 LD 激光器双端抽运 Nd:YVO₄,在 108 W 抽运功率注入下,实现了重复频率为 50 kHz、平均功率为 47 W、脉宽为 6 ns 的激光输出,最高光-光转换效率为 45%^[8]。2014 年,中国科学院光电技术研究所的研究人员采用 880 nm 连续波端面抽运 Nd:YVO₄,在 30 W 抽运功率注入下,实现了重复频率为 500 kHz、脉宽为 6 ns、平均功率为 10 W 的脉冲激光输出,光-光转换效率为 33%^[9]。2015 年,济南大学的研究人员利用 808 nm LD 抽运 Nd:YVO₄,在 25 W 抽运功率注入下,实现了重复频率 5 kHz、脉宽 3.1 ns、单脉冲能量 1.3 mJ 的脉冲激光输出,光-光转换效率为 27.6%^[10]。对已有的研究现状分析可知,高效率腔倒空脉冲激光输出主要得益于两方面:1)Nd:YVO₄晶体在 888 nm 波长处的吸收率较小,它可以在减小端面热应力的同时减小晶体热透镜效应的影响,使激光器在高功率抽运下有更大的模式匹配范围;2)抽运光与振荡光的良好模式匹配,文献[8]通过双端抽运及加凸面镜的方式来增大激光模体积以实现抽运光与振荡光的模式匹配,但是其存在的风险是返回的抽运光容易对抽运源造成损坏^[11]。而采用低吸收率的 914 nm 波长作为抽运源,可在减小热效应的同时进一步提高量子效率^[12],2009 年,Sangla 等^[13]报道了利用 914 nm 抽运 Nd:YVO₄晶体激光器,当抽运光功率为 14.8 W 时,获得了 11.5 W 的 1064 nm 连续激光输出,斜率效率达 80.7%。文献[13]中对掺杂原子分数为 1.5%的 Nd:YVO₄晶体分别采用两种不同偏振抽运光进行抽运,实验测得 Nd:YVO₄晶体两个轴的吸收系数分别为 $\alpha_c = 0.65 \text{ cm}^{-1}$ 和 $\alpha_a = 0.46 \text{ cm}^{-1}$ 。

采用非偏振的抽运光时,Nd:YVO₄晶体的吸收系数为 $\alpha = 0.58 \text{ cm}^{-1}$,近似等于两个轴的吸收系数的平均值,即 Nd:YVO₄晶体在 914 nm 处可认为近似呈非偏振吸收,从而使晶体内部热分布更均匀。因此,要进一步获得大能量、高效率的激光脉冲就需要在高抽运功率下减小热透镜效应的影响,并可以通过实现振荡光与抽运光的良好模式匹配来提高光-光转换效率。

本文提出了一种高效率、大能量、窄脉宽的腔倒空电光调 Q 激光器。该激光器采用 914 nm 光纤耦合半导体激光器端面抽运 Nd:YVO₄s 晶体,在对抽运波长吸收系数较低的情况下,采用增加增益介质长度的方法,使晶体能够充分吸收抽运光。同时,由于该各向异性晶体在 914 nm 处呈非偏振吸收特性,使晶体内部热分布更均匀,降低热透镜效应的影响,并通过实现振荡光与抽运光的良好模式匹配最终实现了高效率激光输出。实验在脉冲重复频率为 7 kHz、抽运功率为 100 W、晶体吸收功率为 79.6 W 的条件下,实现了最大平均输出功率为 35 W、单脉冲能量为 5 mJ、脉冲宽度为 4 ns、光-光转换效率为 44%的稳定脉冲激光输出。

2 实验装置及原理

LD 抽运 Nd:YVO₄腔倒空电光调 Q 激光器采用 Z 型腔结构,实验装置如图 1 所示。LD 抽运源的重复频率为 7 kHz、脉宽为 100 μs ,为芯径 400 μm 的光纤耦合的 914 nm 半导体激光器。抽运光经扩束倍率为 3 的扩束准直镜耦合到晶体中,抽运光束腰直径为 1.2 mm。激光晶体采用两块掺杂原子分数均为 0.7%的 Nd:YVO₄晶体,晶体两端都镀有 914 nm 和 1064 nm 的增透膜。晶体沿 a 轴切割,单个晶体尺寸为 3 mm×3 mm×30 mm,用铝箔包裹放置在紫铜热沉中,水循环冷却温度设置为 22 $^{\circ}\text{C}$ 。M1 是镀有 914 nm 增透膜和 1064 nm 高反膜的 45 $^{\circ}$ 平面双色镜(914 nm 处透射率大于 90%,1064 nm 处反射率大于 99.9%),M2 和 M3 是镀有 1064 nm 高反膜的平面镜。1/4 波片通过旋转可以调节腔内的偏振态,普克尔盒采用偏硼酸钡(BBO)晶体,端面均镀有 914 nm 和 1064 nm 增透膜,通光口径为 2.8 mm。BBO 晶体作为电光 Q 开关的突出优点是插入损耗较小、消光比高、抗激光损伤阈值高,适合在高重复频率下使用。

在腔倒空的实验过程中,增益介质放置为 s 偏振方向,从而使其吸收抽运源发射出来的激光并产

生 s 偏振光,经薄膜偏振片完全反射,再通过 1/4 波片变成圆偏振光。给普克尔盒加上 1/4 波电压,圆偏振光经过普克尔盒后变成 p 偏振光,之后经高反镜 M3 反射后再一次经过普克尔盒和 1/4 波片,从而成为 s 偏振光,此时谐振腔处于储能状态。当谐

振腔内的反转粒子数达到最大时,撤掉普克尔盒的 1/4 波电压,此时 s 偏振光仅是两次通过 1/4 波片而变成 p 偏振光,并会通过偏振片完全透射出去,即谐振腔的能量会一次性倒出腔外,从而形成激光巨脉冲。

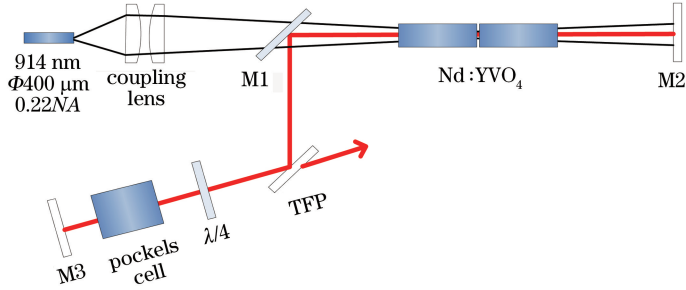


图 1 大能量、窄脉宽腔倒空激光器结构示意图

Fig. 1 Schematic of high energy and narrow pulse width cavity laser

3 实验结果与讨论

高功率端面抽运固体激光器的模式匹配要求增益介质上振荡光的基模半径略小于抽运光光斑半径^[14]。在该激光器中,最大抽运光功率为 100 W,图 2 是考虑到热透镜效应,根据 ABCD 传输矩阵计算得到的不同腔长时激光晶体内振荡光基模半径随抽运功率的变化关系。从图 2 可以看出,腔长为 150,450,750 mm 时,激光晶体内振荡光基模半径分别为 0.3,0.42,0.54 mm。

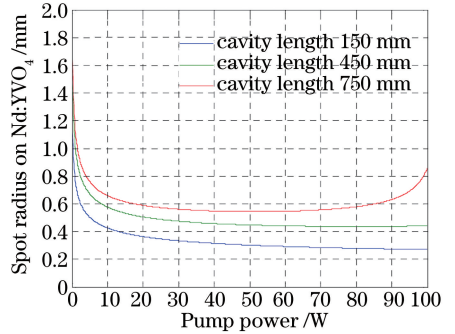


图 2 激光晶体内基模半径随抽运功率的变化规律

Fig. 2 Variation of TEM₀₀ radius with the pumped power

首先对激光器在连续运行状态下的输出功率进行测量,实验结构如图 3 所示,其中 M1 与晶体前端面距离为 20 mm,腔长分别为 150,450,750 mm 时,M1 到输出镜 M4 间的距离分别为 25,175,325 mm,晶体后端面与腔镜 M2 之间的距离分别为 45,195,345 mm,实验中采用优化选定输出耦合率为 50% 的输出镜,实验结果如图 4 所示。从图 4 可以看出,当腔长为 450 mm 时,激光器的输出功率最高,斜效率最大,当晶体吸收功率为 79.6 W 时(原子分数为

0.7% 的 Nd:YVO₄ 的吸收系数为 0.28 cm⁻¹),获得最大平均输出功率为 47.7 W,对应的光-光转换效率为 60%。这是由于当腔长为 450 mm 时,激光晶体内振荡光基模半径与抽运光束腰半径 0.6mm 的比值接近 0.7:1,可以实现高功率端面抽运情况下振荡光与抽运光的良好模式匹配^[15]。另外,当腔长为 450 mm 时,振荡光基模半径随抽运功率的变化不明显,这就保证了激光器谐振腔的稳定性。

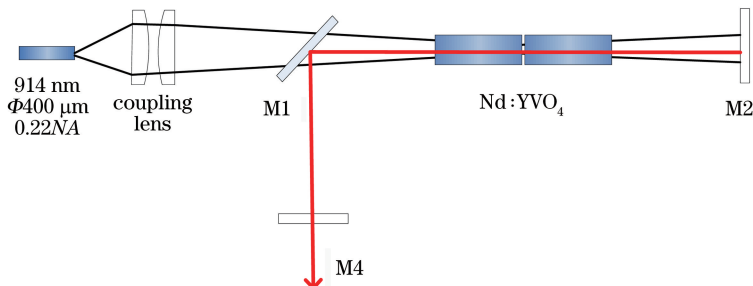


图 3 激光器连续运行结构示意图

Fig. 3 Schematic of continuous operation of laser

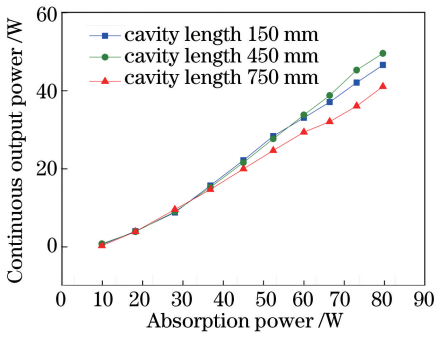


图 4 不同腔长时连续激光输出功率随晶体吸收功率的变化
Fig. 4 Variation of output power with the absorption power at different cavity lengths

然后,对腔长为 450 mm 时腔倒空工作状态下的输出功率进行测量。当各器件调至最佳状态后,旋转 1/4 波片使谐振腔处于高损耗状态,此时没有激光从 TFP 输出。将普克尔盒加入谐振腔内,给普克尔盒加上高压驱动信号并调节普克尔盒的方向使激光器工作在腔倒空状态,对该状态下重复频率为 7 kHz 时的平均输出功率进行测量。图 5 描述了激光器在腔倒空工作状态下的输出功率及光-光转换效率随晶体吸收功率的变化规律,当晶体吸收功率为 79.6 W 时,获得最大平均输出功率为 35 W、最大单脉冲能量为 5 mJ 的激光输出,对应的光-光转换效率为 44%。

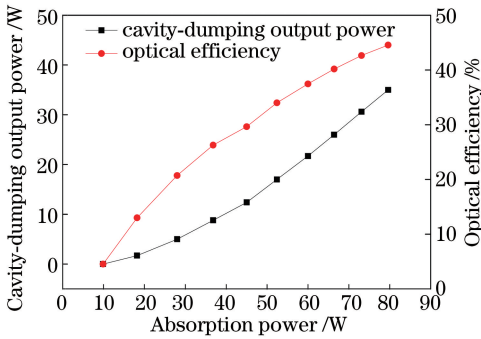


图 5 腔倒空激光输出功率及光-光转换效率随晶体吸收功率的变化

Fig. 5 Variation of cavity-dumping output power and optical conversion efficiency with the absorption power

从图 5 可以看出,腔倒空工作状态下激光器的平均输出功率随吸收抽运功率的提高而增加,这主要是由于增加抽运功率后激光器上能级积聚的粒子数也增加,提高了激光器输出的平均功率,另外,由于激光器在小于 100 W 的抽运功率范围内受热透镜效应影响较小,振荡光基模半径与抽运光半径处于良好模式匹配状态,其光-光转换效率也随吸收抽运功率的提高而增加。实验中采用低吸收系数波长

抽运,同时增加增益介质的长度,不仅提高了量子效率,而且晶体内部热分布更均匀,减小了热透镜效应的影响,提高了激光器的热稳定性,在保证振荡光与抽运光实现良好模式匹配的情况下,最终实现了高效率稳定脉冲激光输出。

图 6 为腔倒空工作状态下测量所得的光脉冲序列图,可以看出腔倒空工作状态下的激光脉冲非常稳定。单个脉冲的波形图如图 7 所示,其脉冲宽度取脉冲波形的半峰全宽,为 4 ns。从图 8 可以看到,最大峰值功率为 1 MW。

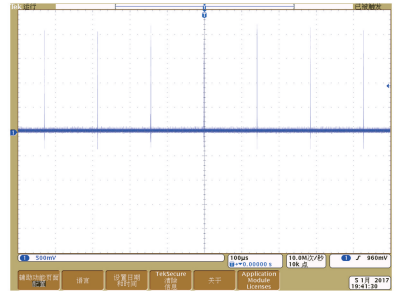


图 6 重复频率为 7 kHz 时的腔倒空输出脉冲序列图
Fig. 6 Output pulse sequence of the cavity at the repetition rate of 7 kHz

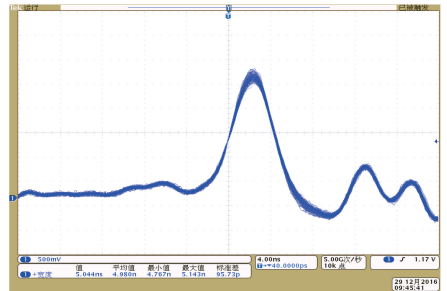


图 7 重复频率为 7 kHz 时的单脉冲波形图
Fig. 7 Single pulse waveform at the repetition rate of 7 kHz

输出激光光束质量因子 $M^2 = 1.58$,图 8 为输出激光的光束质量及远场光斑形状,测光束质量的具

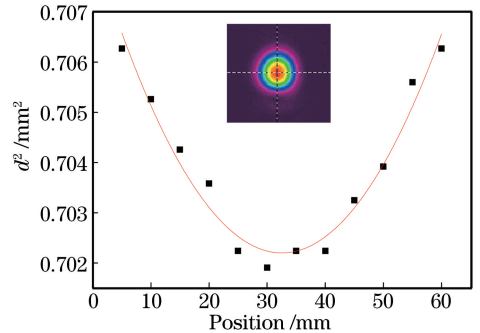


图 8 腔倒空激光器输出光束质量及远场光斑形状
Fig. 8 Output beam quality and far field spot shape of cavity dumped laser

体方法是在偏振片后加入衰减片对光束进行衰减,再加入焦距 200 mm 的透镜对光束进行压缩,然后通过 CCD 分别测出光束束腰前后对称位置光斑的直径,拟合求得光束质量因子。

4 结 论

提出了一种 914 nm LD 端面抽运的高效率、大能量、窄脉宽电光腔倒空 Nd:YVO₄ 激光器。利用腔倒空电光调 Q 技术和双棒串接结构,通过采用 914 nm 低吸系数波长抽运增益介质,一方面提高了量子效率,另一方面在该情况下增加增益介质的长度使热分布更均匀,减小热透镜效应的影响,提高了激光器的热稳定性。同时,在保证高功率抽运情况下振荡光与抽运光的良好模式匹配的情况下,实现了高效率稳定脉冲激光输出。实验在脉冲重复频率 7 kHz 的条件下,当晶体吸收功率为 79.6 W 时,获得了脉冲宽度 5 ns、单脉冲能量 5 mJ 的 1064 nm 稳定线偏振激光输出,对应的光-光转换效率为 44%。

参 考 文 献

- [1] Zayhowski J J, Mooradian A. Microchip lasers[J]. *Optical Materials*, 1999, 11(2): 427-446.
- [2] Braun B, Kärtner F X, Zhang G, *et al.* 56 ps passively Q-switched diode-pumped microchip laser[J]. *Optics Letters*, 1997, 22(6): 381-383.
- [3] Dong J, Liu X S, Si H Y, *et al.* 350 mJ LD side-pumped Q-switched Nd:YAG laser without water cooling[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(11): 1101005.
董剑, 刘学胜, 司汉英, 等. 350 mJ LD 侧面抽运 Nd:YAG 无水冷调 Q 激光器[J]. *中国激光*, 2016, 43(11): 1101005.
- [4] Huang H T, Li M, Jin L, *et al.* Passively Q-switched 1 μm solid-state laser using gold nanorod as saturable absorber[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(7): 0703021.
黄海涛, 李敏, 金琳, 等. 金纳米棒饱和吸收体 1 μm 被动调 Q 固体激光器[J]. *中国激光*, 2017, 44(7): 0703021.
- [5] Zhang J, Yu Y J, Jiang C Y, *et al.* Experiment comparison of acousto-optical Q-switching and RTP electro-optical Q-switching of high repetition frequency Nd:YVO₄ laser[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(2): 0205002.
张健, 于永吉, 姜承尧, 等. 高重复 Nd:YVO₄ 声光调 Q 与 RTP 电光调 Q 激光器实验对比分析[J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(2): 0205002.
- [6] Hao H Y, Li L, Yang Y T, *et al.* Experimental reasearch on multi-peak phenomena of acousto-optic Q-switched fiber laser output pulse[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(6): 0601005.
郝海洋, 李莉, 杨亚婷, 等. 声光调 Q 光纤激光器输出脉冲多峰现象的实验研究[J]. *中国激光*, 2016, 43(6): 0601005.
- [7] Peng X, Asundi A, Chen Y. Study of the mechanical properties of Nd:YVO₄ crystal by use of laser interferometry and finite element analysis[J]. *Applied Optics*, 2001, 40(9): 1396-1403.
- [8] McDonagh L, Wallenstein R. 47 W, 6 ns constant pulse duration, high-repetition-rate cavity-dumped Q-switched TEM₀₀ Nd:YVO₄ oscillator[J]. *Optics Letters*, 2006, 31(22): 3303-3305.
- [9] Shi Z H, Liu X S, Huang Y T, *et al.* 500 kHz, 6 ns high repetition rate electro-optic cavity dumped Nd:YVO₄ laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(10): 1002006.
石朝辉, 刘学松, 黄玉涛, 等. 500 kHz, 6 ns 高重复频率电光腔倒空 Nd:YVO₄ 激光器[J]. *中国激光*, 2014, 41(10): 1002006.
- [10] Cui X L, Zhang H K, Zhang F, *et al.* 3 ns RTP electro-optic cavity-dumped and Q-switched laser[J]. *Journal of Shandong Jiaotong University*, 2015, 23(1): 83-86.
崔雪龙, 张海鹏, 张峰, 等. 3 ns RTP 电光腔倒空调 Q 激光器[J]. *山东交通学院学报*, 2015, 23(1): 83-86.
- [11] Chang L, Yang C, Yi X J, *et al.* 914 nm LD end-pumped 31.8 W high beam quality E-O Q-switched Nd:YVO₄ laser without intracavity polarizer[J]. *Laser Physics*, 2012, 22(9): 1369-1372.
- [12] Waritanant T, Major A. Thermal lensing in Nd:YVO₄ laser with in band pumping at 914 nm[J]. *Applied Physics B*, 2016, 122: 135.
- [13] Sangla D, Balembois F, Castaing M, *et al.* Highly efficient Nd:YVO₄ laser by direct in-band diode pumping at 914 nm[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(14): 2159-2161.
- [14] Liu J H, Lü J H, Lu J R, *et al.* Mode matching in high-power laser-diode-array end-pumped Nd:YVO₄ solid-state lasers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, 20(2): 186-189.
刘均海, 吕军华, 卢建仁, 等. 高功率端面抽运 Nd:YVO₄ 固体激光器模匹配的研究[J]. *光学学报*, 2000, 20(2): 186-189.
- [15] Liu C, Ge J H, Xiang Z, *et al.* Influence of spherical aberration of the thermal lens effect on the mode profile of a large-volume TEM₀₀-mode resonator[J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, 57(3): 1704-1708.
刘崇, 葛剑虹, 项震, 等. 热透镜的球差效应对大基模体积激光谐振腔模式的影响[J]. *物理学报*, 2008, 57(3): 1704-1708.