

LD抽运1 kHz电光调Q 946 nm Nd:YAG激光器

黄 晶^{1,2} 胡秀寒^{1,2} 陈卫标¹

¹中国科学院上海光学精密机械研究所空间激光信息传输与探测技术重点实验室, 上海 201800

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 对激光二极管(LD)端面抽运的Nd:YAG晶体产生946 nm激光输出的热效应及输出特性进行了实验对比。实验测量了晶体的端面温度以及热焦距,当吸收抽运光功率达到10 W时,掺杂原子数分数1.0%的端帽键合Nd:YAG晶体端面温度为25.9 °C,约为相同掺杂浓度下普通晶体的1/3。且相同条件下,端帽键合Nd:YAG晶体能有效缓解热透镜效应。利用波片补偿电光晶体热退偏的方法,实现了频率为1 kHz电光调Q 946 nm激光输出。在抽运功率为10.4 W时,使用掺杂原子数分数为0.5%的端帽键合Nd:YAG晶体作为增益介质,获得最大输出功率为311 mW,脉冲宽度为17 ns的电光调Q 946 nm激光输出,功率不稳定性为2.7%。最大输出功率分别是同等条件下使用掺杂原子数分数1.0%的端帽键合Nd:YAG晶体的2倍以及普通Nd:YAG晶体的3倍。

关键词 激光器; Nd:YAG激光器; 准三能级; 电光调Q

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0602008

LD-Pumped Electro-Optically Q-Switched 946 nm Nd:YAG Laser with Pulse Repetition Rates of 1 kHz

Huang Jing^{1,2} Hu Xiuhan^{1,2} Chen Weibiao¹

¹Key Laboratory of Space Laser Communication and Detection Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Comparative studies on the thermal effect and laser performance of diode-end-pumped Nd:YAG crystals at 946 nm are presented. The temperature of end surfaces and thermal lensing of crystals are measured. When the absorbed pumping power reaches 10 W, the end surface temperature of the atomic fraction of 1.0% doped composite crystal is 25.9 °C, which is only 1/3 of that of 1.0% non-composite crystal. Moreover, the composite crystal can relieve the thermal lensing effect under the same condition. A compensation of the thermal effects in electro-optical crystals is achieved by employing a quarter-wave plate, which allows for the production of an electro-optically Q-switched 946 nm Nd:YAG laser at 1 kHz. A maximum output power of 350 mW and 17 ns pulse duration laser is achieved with the atomic fraction of 0.5% doped composite crystal under the incident pumping power of 10.4 W. The power stability is 2.7%. The maximum output power is more than three times higher than that of a non-composite crystal and two times than that of a atomic fraction of 1.0% doped composite crystal.

Key words lasers; Nd:YAG laser; quasi-three level; electro-optically Q-switched

OCIS codes 140.3580; 140.3480; 140.3530; 140.3540

1 引 言

蓝光激光在数据存储、激光显示、激光医疗及激光水下通信和探测等领域有着广泛的应用前景^[1]。获得蓝光最常用的一种方法是对掺Nd³⁺准三能级产生的900 nm附近的基频光倍频。如倍频Nd:YAG准三能级946 nm激光可以产生473 nm蓝光激光。然而准三能级脉冲激光器的报道主要为被动调Q^[2-3]以及主动调Q

收稿日期: 2015-01-09; 收到修改稿日期: 2015-02-24

作者简介: 黄 晶(1986—),女,博士研究生,主要从事全固态激光技术方面的研究。E-mail: hj8611@163.com

导师简介: 陈卫标(1969—),男,研究员,博士生导师,主要从事固体激光器技术及先进激光雷达系统等方面的研究。

E-mail: wbchen@mail.shcnc.ac.cn(通信联系人)

中的声光调 $Q^{[4-5]}$,对电光(E-O)调 Q 报道并不多见。2000年,Lutz等^[6]首次报道了重复频率为2.5 Hz的电光调 Q Nd:YAG准三能级激光器,获得了最大输出能量为24 mJ,脉宽为35 ns的946 nm激光输出。2006年,Nava等^[7]利用有双块RTP晶体的普克尔盒进行电光调 Q ,在重复频率为100 Hz时获得了脉冲能量为3.2 mJ的946 nm激光输出。目前所报道的Nd:YAG晶体输出946 nm电光调 Q 激光器的最高重复频率不超过100Hz,千赫兹以上的研究未见报道。准三能级激光器中的热效应是阻碍其实现高重频、高功率运转的主要原因。另外,准三能级激光器还存在激光发射截面小、激光下能级再吸收等固有缺陷,也增大了千赫兹电光调 Q 946 nm Nd:YAG激光器的实现难度。

本文对比了激光二极管(LD)端面抽运下,3种不同的Nd:YAG晶体产生946 nm激光的热效应及输出特性。通过红外热像仪测量晶体的端面温度,并使用谐振腔稳定法测量晶体的热透镜焦距。实验结果表明,采用端帽键合的Nd:YAG晶体可以有效缓解热效应。利用波片补偿电光晶体热退偏的方法,实现了1 kHz电光调 Q 946 nm激光的输出,并从实验上对比了3种Nd:YAG晶体在空腔及电光调 Q 运转下的激光输出特性。

2 激光晶体热效应对比

为了选取合适的Nd:YAG晶体用于实现1 kHz 946 nm电光调 Q 激光器,实验中分别使用了3种晶体作为增益介质。图1(a)为直径为4 mm,长为5 mm的普通Nd:YAG晶体,Nd³⁺掺杂原子数分数为1.0%。图1(b)和(c)是两块端帽键合Nd:YAG晶体,Nd³⁺掺杂浓度分别为1.0%和0.5%。晶体尺寸均为4 mm×4 mm×11 mm,掺杂区域长度为5 mm,两端非掺杂区域长度均为3 mm。3块晶体镀膜相同,两端面都镀有对808 nm、946 nm和1064 nm的增透膜。晶体包裹在钢箔中,并放置于紫铜热沉中冷却,水冷温度设置在13 ℃。

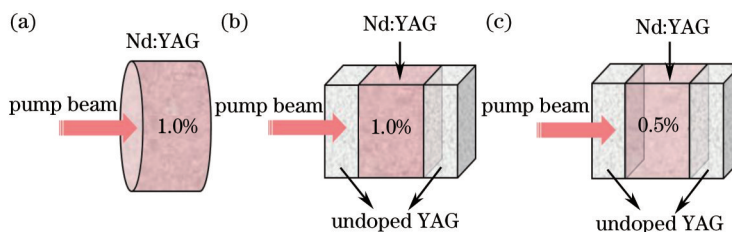


图1 3种晶体结构。(a) 掺杂原子数分数为1.0%的普通Nd:YAG晶体;(b) 掺杂原子数分数为1.0%的端帽键合Nd:YAG晶体;(c) 掺杂原子数分数为0.5%的端帽键合Nd:YAG晶体

Fig.1 Three types of laser crystal with different structures. (a) Atomic fraction of 1.0% doped non-composite Nd:YAG crystal; (b) atomic fraction of 1.0% doped composite Nd:YAG crystal; (c) atomic fraction of 0.5% doped composite Nd:YAG crystal

2.1 端面温度

实验中首先利用红外热像仪(FLIR T620)测量了3种晶体在LD抽运下的端面温度随吸收抽运功率的变化,如图2所示。808 nm的抽运源为光纤耦合输出的LD,光纤芯径大小为400 μm,数值孔径为0.22。抽运脉宽为200 μs,重复频率为1 kHz。抽运光经由1:1的耦合系统耦合进Nd:YAG晶体中,因此激光晶体中的抽运光斑约为200 μm。掺杂Nd³⁺原子数分数分别为1.0%和0.5%的Nd:YAG晶体对808 nm抽运光的吸收系数分别为4.6和2.3 cm⁻¹。从图2中可以看出,相同的吸收抽运功率下,两块端帽键合晶体的端面温度没有明显

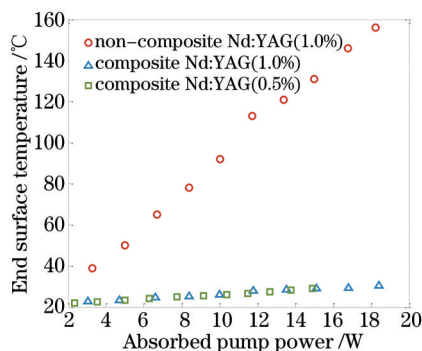


图2 测量得到的普通Nd:YAG晶体和端帽键合Nd:YAG晶体的端面温度
Fig.2 Measured end surface temperature of the composite and non-composite crystals

的差异。其原因是端帽键合晶体前端是一段未掺杂区域,不会吸收抽运光产生热量。而普通Nd:YAG晶体的端面温度随吸收抽运功率的增加而增大,当吸收抽运光功率达到10 W时,其端面温度达到92.4 °C,如图3(a)所示。而相同掺杂浓度(1.0%)下的端帽键合Nd:YAG晶体的端面温度仅为25.9 °C,如图3(b)所示,大约为普通晶体的1/3。这意味着相比于普通晶体,采用端帽键合晶体可以极大地降低端面温度,并有效缓解激光介质端面热应力和热形变的影响,提高激光的输出性能^[8]。

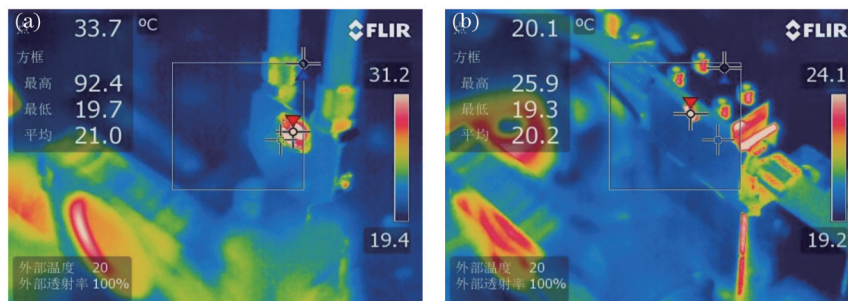


图3 红外热像仪测量的吸收抽运光功率为10 W时晶体的端面温度。(a) 掺杂原子数分数为1.0%的普通Nd:YAG晶体;
(b) 掺杂原子数分数1.0%的端帽键合Nd:YAG晶体

Fig.3 Measured end surface temperature of crystals by an infrared camera. (a) Atomic fraction of 1.0% doped non-composite Nd:YAG crystal; (b) atomic fraction of 1.0% doped composite Nd:YAG crystal

2.2 热透镜焦距

图4所示为3种晶体在不同吸收抽运功率下的热透镜焦距,图中实线为对测量数据点的曲线拟合。实验采用谐振腔稳定法^[9]测量激光晶体的热焦距,将激光功率突然下降时的谐振腔长度认为是此抽运功率下的热透镜焦距。抽运源与激光介质如前所述,入射平面镜镀有对808 nm高透膜以及946 nm高反膜,出射平面镜对946 nm的透射率为2.8%。同时,为了抑制1064 nm起振,两腔镜还镀有对1064 nm高透膜。从图中可以看出,3种晶体的热焦距都随抽运功率的增大而减小,热透镜效应愈加明显。在相同掺杂原子数分数为1.0%下,端帽键合晶体的热焦距明显小于普通晶体。而两种不同掺杂浓度的端帽键合晶体在相同的吸收抽运功率下,热焦距也相差不多。

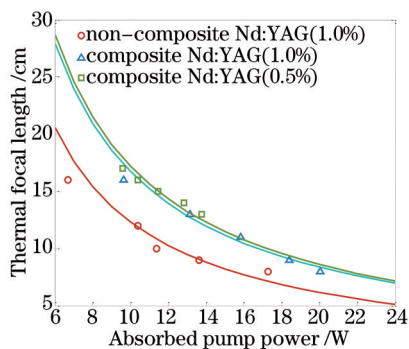


图4 测量得到的普通Nd:YAG晶体和端帽键合Nd:YAG晶体的热焦距

Fig.4 Measured thermal focal length of the composite and non-composite crystals

3 实验装置

电光调Q 946 nm Nd:YAG激光器的实验装置如图5所示。抽运源、耦合系统以及激光晶体均如前所述。实验中采用凸凹非稳腔来补偿激光晶体中的热效应^[10]。入射平凸镜的曲率半径为-157 mm,镀有对808 nm的高透膜以及对946 nm的高反膜。出射平凹镜的曲率半径为125 mm,对946 nm的透射率为8.6%。此外,两腔镜均镀有对1064 nm高透膜以抑制四能级激光的起振。由于单块RTP晶体存在自然双折射,因此需用双块RTP晶体补偿双折射来构成电光Q开关^[11]。P₁为λ/4波片,与起偏器一起用于加压式调Q。P₂也为λ/4波片,与P₁不同的是,其光轴平行于激光偏振方向^[12],用来补偿电光晶体中的热退偏。在高重频高功率的激光器中,电光晶体会对激光有线性吸收,而产生温度梯度,尽管吸收系数不大,但对热退偏非常敏感^[13],尤

其是在热效应相对严重的准三能级激光器中。在实验中也观察到电光晶体的退偏。当谐振腔中放入起偏器,出射偏振光,将未加电压的电光晶体放入腔内,会出现激光功率逐渐降低直至消失的现象。而采用1/4波片 P_2 补偿后,可以较好的补偿电光晶体的热退偏,使激光功率稳定输出,为后续调 Q 实验提供了前提。

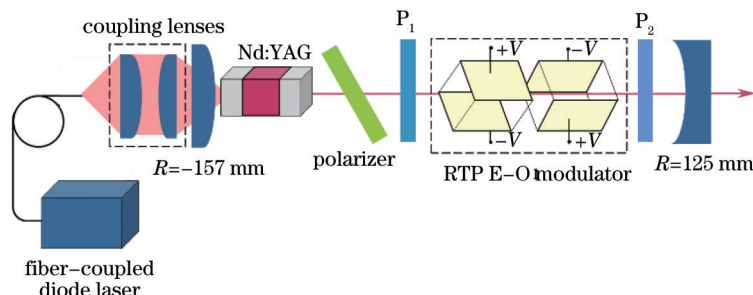


图5 二极管端面抽运的Nd:YAG电光调 Q 946 nm激光器

Fig.5 Experimental setup of a diode-end-pumped Nd:YAG E-O Q -switched 946nm laser

4 实验结果与分析

图6为准三能级Nd:YAG 946 nm激光器的空腔功率对比。除了增益介质不同外,其他实验条件相同。从实验结果看,在抽运功率小于13 W时,掺杂原子数分数0.5%、1.0%的端帽键合晶体和普通晶体的输出斜效率分别为23.3%、21.4%和11.6%。两块端帽键合晶体的输出斜效率差别不大,但普通晶体相比于同样掺杂浓度下的端帽键合晶体,斜效率降低了45.8%。当抽运功率大于13 W后,掺杂原子数分数0.5%的端帽键合晶体作为增益介质的激光器输出功率依然呈上升趋势,在最大抽运功率为22.3 W时,946 nm的输出功率达到4.34 W。但是掺杂原子数分数为1.0%的端帽键合晶体和普通晶体的输出功率均随着抽运功率的增大而减小,激光输出性能变差,这主要是因为较高掺杂浓度的激光介质使得准三能级激光器再吸收效应严重^[14],另外,抽运光的局部吸收过强也导致更为严重的热透镜效应。

图7所示为重复频率1 kHz时,电光调 Q Nd:YAG准三能级激光器输出946 nm脉冲的激光功率随抽运功率的变化。由于调 Q 运转下热效应更加严重,导致腔内功率密度过高。因此为了避免腔内元器件损伤,最大抽运功率不超过11 W。从图中可以看出,在最高抽运功率为10.4 W时,掺杂原子数分数0.5%、1.0%的端帽键合晶体和普通晶体的平均输出功率分别为311、136和86 mW。低掺杂的端帽键合晶体的输出功率约为高掺杂端帽键合晶体的2.3倍,为普通晶体的3.6倍。虽然在空腔运转下,两块端帽键合晶体在低抽运功率下的输出斜效率相差不多,但是在热效应更为严重的千赫兹电光调 Q 准三能级激光器中,高掺杂浓度的晶体由于吸收更多的抽运光使得其他上转换过程更加严重,如激光器的能量上转换和激发态再吸收等,这些过程都消耗了反转粒子数,增大了热负载^[15]。

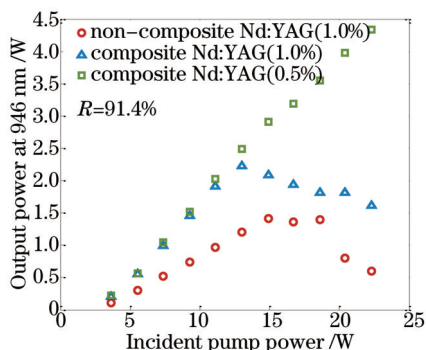


图6 准三能级Nd:YAG 946 nm激光器的空腔功率随抽运功率的变化

Fig.6 Output power versus incident pumping power for Nd:YAG in a long-pulse mode

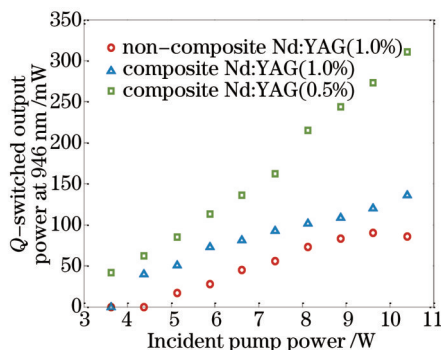


图7 电光调 Q 946 nm Nd:YAG激光器平均功率与抽运功率的变化关系

Fig.7 Average output power of E-O Q -switched 946 nm Nd:YAG laser versus incident pump power

图 8(a)所示为采用掺杂原子数分数为 0.5%的端帽键合 Nd:YAG 晶体作为激光增益介质,电光调 Q 946 nm 脉冲输出功率为 311 mW 时的脉冲序列,频率为 1 kHz,图 8(b)表示脉冲宽度为 17 ns。需要说明的是,如果在实验中对输出镜透射率等参数进行优化,将有可能提高 946 nm 电光调 Q 激光器输出功率,并进一步压缩脉冲宽度。另外,对该激光器的功率不稳定性进行了测量,在重复频率为 1 kHz 下,最高输出功率为 311 mW 的 946 nm 激光在 20 min 内的功率变化如图 9 所示,功率不稳定性为 2.7%。

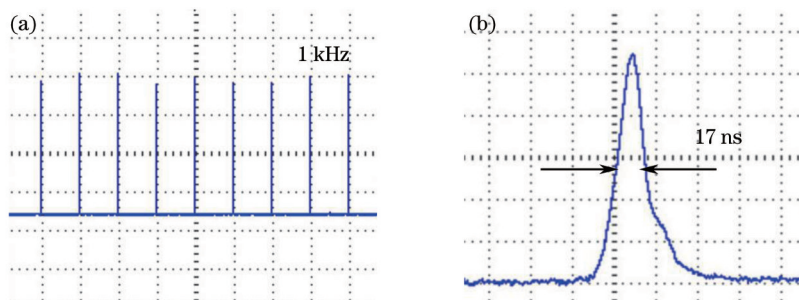


图 8 电光调 Q 946 nm 激光器输出功率 311 mW 时对应的(a)脉冲序列和(b)脉冲宽度

Fig. 8. (a) Pulse train and (b) pulse profile of E-O Q-switched 946 nm Nd:YAG laser at output power of 311 mW

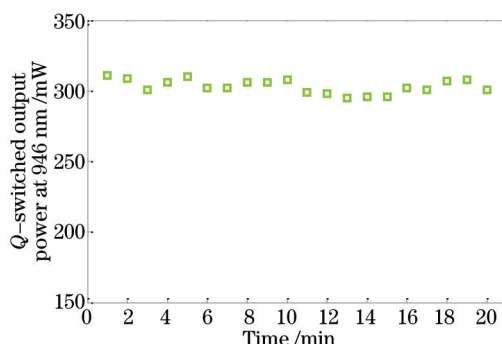


图 9 电光调 Q 946 nm Nd:YAG 激光器功率不稳定性测量

Fig.9 Power instability measurement of E-O Q-switched 946 nm Nd:YAG laser

5 结 论

采用三种不同结构及参数的 Nd:YAG 晶体作为增益介质,对比研究了 LD 端面抽运下 946 nm 激光的热效应及输出特性。利用红外热像仪测量晶体的端面温度,并使用谐振腔稳定法测量晶体的热透镜焦距。实验结果表明,采用端帽键合 Nd:YAG 晶体可以有效缓解热效应,当吸收抽运光功率达到 10 W 时,掺杂原子数分数为 1.0%的端帽键合 Nd:YAG 晶体端面温度为 25.9 °C,约为相同掺杂浓度下的普通晶体的 1/3。利用波片补偿电光晶体热退偏的方法,实现了频率 1 kHz 电光调 Q 946 nm 激光输出。在抽运功率为 10.4 W 时,使用掺杂原子数分数为 0.5%的端帽键合 Nd:YAG 晶体作为增益介质,获得最大输出功率为 311 mW,脉冲宽度为 17 ns,频率为 1 kHz 电光调 Q 946 nm 激光,功率不稳定性为 2.7%。其最大输出功率分别是同等条件下使用掺杂原子数分数为 1.0%的端帽键合 Nd:YAG 晶体的 2 倍以及普通 Nd:YAG 晶体的 3 倍。如在实验中对输出镜透射率等参数进行优化,将有可能提高 1 kHz 946 nm 电光调 Q 激光器的输出功率,并进一步压缩脉冲宽度。

参 考 文 献

- 1 Yin Hao, Zhu Siqi, Yang Qiguo, *et al.*. Research on LD-end-pumped 457 nm laser with straight type cavity[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(2): 0202003.
尹 浩,朱思祁,阳其国,等. LD 抽运直腔式 457 nm 蓝光激光器的实验研究[J]. 中国激光, 2013, 40(2): 0202003.
- 2 Wang Jiaxian, Ling Chaodong, Han Lei. Nanocrystalline silicon film passively Q-switched laser diode pumped Nd:YAG/LBO blue laser[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(6): 1564-1568.
王加贤,凌朝东,韩 磊. 纳米硅薄膜被动调 Q 的激光二极管抽运 Nd:YAG/LBO 蓝光激光器[J]. 中国激光, 2010, 37(6): 1564-1568.

- 3 Li P, Zhang H, Chen X, *et al.*. Diode-pumped Nd: YAG ceramic laser at 946nm passively Q -switched with a Cr^{4+} : YAG saturable absorber[J]. Optics & Laser Technology, 2012, 44(3): 578-581.
- 4 F Chen, X Yu, J Guo, *et al.*. Diode-pumped acousto-optically Q -switched high-repetition-rate Nd: YAG lasers at 946 and 473 nm by intracavity frequency-doubling[J]. Laser Physics, 2012, 22(1): 81-86.
- 5 R Yan, X Yu, X Li, *et al.*. Theoretical and experimental investigation of actively Q -switched Nd: YAG 946 nm laser with considering ETU effects[J]. Appl Phys B, 2012, 108(3): 591-596.
- 6 Y Lutz, D Rytz, C Gaudillat. Pulsed blue-light generation by the frequency doubling of the ${}^4\text{F}_{3/2}$ to ${}^4\text{I}_{9/2}$ transition in Nd: YAG and Nd: YAlO₃[J]. Applied Physics B, 2000, 70(4): 479-482.
- 7 E Nava, C Mariottini, M Tobia, *et al.*. Diode-pumped Nd: mixed-garnet laser with emission at 943 nm for water vapor dial[C]. Proceedings of the Sixth International Conference on Space Optics, 2006, 621: 134.
- 8 Dong Jun, Wang Guangyu, Ren Yingying. Advances in passively Q -switched solid-state lasers based on composite materials[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(6): 0601003.
董俊, 王光宇, 任滢滢. 基于复合材料的被动调 Q 固体激光器的研究进展[J]. 中国激光, 2013, 40(6): 0601003.
- 9 Yang Jingwei, Wang Li, Wu Xianyou, *et al.*. Numerical simulation and experimental study on thermal effect of 2.94 μm Er: YAG laser[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(6): 0614002.
杨经纬, 王礼, 吴先友, 等. 2.94 μm Er: YAG 激光热效应数值模拟及实验研究[J]. 光学学报, 2012, 32(6): 0614002.
- 10 Magni V. Resonators for solid-state lasers with large-volume fundamental mode and high alignment stability[J]. Applied Optics, 1986, 25(1): 107-117.
- 11 Feng Yutong, Zhu Xiaolei, Tang Hao, *et al.*. Characteristics of RbTiOPO₄ electro-optic Q -switch operation at high repetition rate[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(3): 617-621.
冯宇彤, 朱小磊, 唐昊, 等. 磷酸钛氧铷高重复率电光调 Q 特性[J]. 中国激光, 2010, 37(3): 617-621.
- 12 Clarkson W A, Felgate N S, Hanna D C. Simple method for reducing the depolarization loss resulting from thermally induced birefringence in solid-state lasers[J]. Optics Letters, 1999, 24(12): 820-822.
- 13 Khristov I P, Tomov I V, Saltiel S M. Self-heating effects in electro-optic light modulators[J]. Optical and Quantum Electronics, 1983, 15(4): 289-295.
- 14 Gong Ke, Wu Keying, He Shufang, *et al.*. 473 nm single-frequency operation of corner cube based solid-state non-planar ring cavity [J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(12): 3049-3051.
巩轲, 吴克瑛, 何淑芳, 等. 角锥型全固态非平面环形激光器 473 nm 单频运转[J]. 光子学报, 2009, 38(12): 3049-3051.
- 15 Ding Xin, Zhang Haiyong, Sheng Quan, *et al.*. High efficiency Nd: YVO₄ laser in-band pumped from high stark level of ground state at 914 nm[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(7): 702008.
丁欣, 张海永, 盛泉, 等. 914 nm 基态高斯塔克能级共振抽运的高效率 Nd: YVO₄ 激光器[J]. 中国激光, 2013, 40(7): 702008.

栏目编辑: 宋梅梅