

传导冷却结构紧凑型高功率纳秒级激光器

谢 银^{1,2} 孟俊清¹ 祖继峰¹ 陈卫标¹

¹中国科学院上海光学精密机械研究所上海市全固态激光器与应用技术重点实验室, 上海 201800

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 报道了一种基于被动调Q Nd:YAG微片结构的主振荡功率放大和Nd:YVO₄板条多程放大的激光器。主振荡级采用Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG被动调Q微片激光器,在重复频率为1 kHz时,输出单脉冲能量为82 μJ、脉冲宽度为1 ns的近衍射极限的激光输出。为了实现信号光在Nd:YVO₄中获得5次放大,设计采用了多程往返光路。得到最大单脉冲能量为2.3 mJ,脉宽为1 ns的激光输出,峰值功率大于2 MW,光束质量M²因子为M_x²=2.48和M_y²=1.24。该激光器结构简单、紧凑,采用传导冷却进行散热,适用于空间激光,在15℃~32℃的范围内,输出能量波动小于4%。

关键词 激光器;主振荡功率放大器;多程放大;被动调Q;Nd:YAG;Nd:YVO₄

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0902005

Conduction Cooling and Compact, High Peak-Power, Nanoseconds Pluse Lasers

Xie Yin^{1,2} Meng Junqing¹ Zu Jifeng¹ Chen Weibiao¹

¹Shanghai Key Laboratory of All Solid-state Laser and Applied Techniques, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

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

Abstract A master oscillator power amplifier (MOPA) structure based on Nd:YAG microchip and Nd:YVO₄ slab is reported. The master oscillator is a passive Q-switched Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG microchip laser, and the seed laser with pulse energy of 82 μJ and pulse width of 1 ns is obtained when the repetition frequency is 1 kHz. In the amplifier, an output pulse energy of 2.3 mJ with peak powers reaching 2 MW and pulse width of 1 ns is obtained while the oscillator provides the amplifier with a 82 μJ input. Meanwhile, the M² factor of beam quality is measured to be 2.48 at x direction and 1.24 at y direction. This laser system is compact and air-cooled, the fluctuation of output energy is below 4% when the temperature ranges from 15 °C to 32 °C.

Key words lasers; master oscillator power amplifier; multipass amplification; passive Q-switched; Nd:YAG; Nd:YVO₄

OCIS codes 140.3280; 140.3530; 140.3540; 140.3580

1 引言

近年来,随着激光遥感技术的发展,光子计数法测距及激光三维成像越来越多地应用于空间对地观测以及深空探测中。这些空间应用急需发展峰值功率达到兆瓦以上、结构紧凑、高效率 and 长寿命的传导冷却型全固态激光器^[1-3]。激光二极管(LD)端面抽运的被动调Q微片全固态激光器具有光束质量好、结构紧凑、可靠性高和脉宽窄等特点,适合空间应用。然而这种激光器输出能量仅能达到百微焦,难以满足空间对地观测的需求。采用主振荡功率放大器(MOPA)结构的激光器可以很好地解决上述问题。

收稿日期: 2015-03-27; 收到修改稿日期: 2015-04-27

作者简介: 谢 银(1990—),男,硕士研究生,主要从事全固态激光器方面的研究。E-mail: xieyin513922@siom.ac.cn

导师简介: 孟俊清(1975—),研究员,硕士生导师,主要从事固体激光技术方面的研究。

E-mail: jmqmeng@siom.ac.cn(通信联系人)

近年来国内外在这方面都做了大量的研究^[4-8]。Dergachev等^[7]设计了一种Nd:YLF板条四级放大的MOPA激光器,实现了重复频率为1 kHz,峰值功率为5.5 MW的激光输出,脉宽为10 ns。Nawata等^[8]采用侧面抽运Nd:YVO₄掠入射式多程放大,在重复频率为0.33~1.0 MHz时,实现了峰值功率为2.8~6.8 MW的输出。陆云峰等^[4]设计了一种光纤-固体混合放大MOPA系统,得到了重复频率为120 kHz,峰值功率为1.5 MW的激光输出。但上述研究方案的结构复杂,由于空间环境的特殊性对激光器的寿命、质量、体积和热管理都有着特殊要求,很难用于空间的应用。

本文设计了一种高峰值功率纳秒级MOPA激光器,主振荡级采用Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG被动调Q微片激光器,经过Nd:YVO₄多程板条放大后,得到最大单脉冲能量2.3 mJ,脉宽1 ns的激光稳定输出,其峰值功率大于2 MW,重复频率为1 kHz。该激光器结构简单、紧凑,采用传导冷却进行散热,满足空间激光的应用要求。

2 实验装置

高峰值功率纳秒级MOPA激光器实验装置如图1所示,主振荡级采用Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG被动调Q微片激光器,放大级为Nd:YVO₄多程板条放大结构。振荡级输出的种子激光通过光束耦合系统以一定角度进入放大级,在M1和M2间多次反射通过增益介质得到放大。耦合系统由三个透镜组成,分别为R=12 mm的平凹球面透镜1、R=20 mm的平凸球面透镜2和R=100 mm的平凸球面透镜3。该实验装置中,主振荡级的尺寸长度为40 mm,宽为20 mm,高为25 mm,放大级的尺寸为长30 mm×40 mm×25 mm(长×宽×高),经过耦合系统后的整个MOPA结构尺寸为100 mm×50 mm×25 mm(长×宽×高),结构简单紧凑,通过实验底板传导冷却散热。

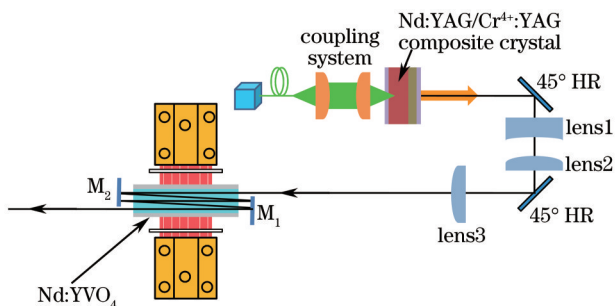


图1 激光器装置图

Fig.1 Experimental setup of laser

2.1 Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG 振荡级

如图1所示,振荡级采用Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG被动调Q。晶体由Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG两端各键合1 mm厚未掺杂的YAG组成,晶体两端抛光成平行平面,构成平-平腔结构的激光谐振腔。靠近Nd:YAG一侧的YAG表面镀808 nm的增透(AR)膜和1064 nm的高反(HR)膜作为激光前腔镜;靠近Cr⁴⁺:YAG一侧的YAG表面镀808 nm的高反膜和透射率T=40%(1064 nm)膜作为激光后腔镜。Nd:YAG的掺杂原子数分数为1.1%,厚度为5 mm。被动调Q晶体Cr⁴⁺:YAG厚度为1 mm,在1064 nm波段处的初始透射率为T₀=60%(1064 nm),此处调Q晶体使用较高的初始透射率可以避免激光对晶体表面的膜造成损伤^[9-10]。

实验使用带尾纤输出的808 nm激光二极管作为抽运源,光纤的芯径为200 μm,数值孔径为0.22。抽运

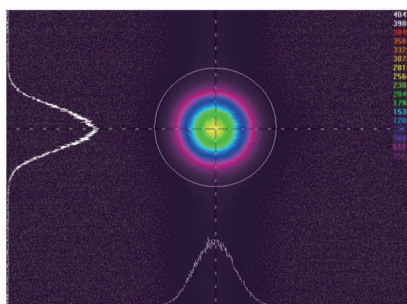


图2 振荡级近场光斑

Fig.2 Near-field beam profile of laser oscillator

光经过抽运耦合系统准直和聚焦后入射到Nd:YAG晶体上,抽运光斑直径约为160 μm。抽运耦合系统中两透镜的焦距均为11 mm。

受电源最大占空比限制,实验中采用重复频率为1 kHz、脉冲宽度为200 μs的脉冲抽运方式对激光器进行抽运。在激光二极管平均输出功率为910 mW时,得到单脉冲能量为82 μJ、脉冲宽度为1 ns的稳定脉冲输出。采用Spiricon公司生产的M²激光光束分析仪对输出光斑进行测量,得到两个方向的光束质量因子分别为M_x²=1.19和M_y²=1.11,其光斑如图2所示。

2.2 Nd:YVO₄放大级

如图1所示,放大采用Nd:YVO₄板条多程放大。放大级以一个多程折叠光路结构为核心,主要由两平面反射镜M₁,M₂构成,反射镜表面镀有1064 nm的高反膜(反射率R>99.5%)。激光在M₁,M₂之间多次反射并通过增益介质得到放大,调整种子光入射的角度可以改变激光通过增益介质的次数。

Nd:YVO₄板条的掺杂原子数分数为0.8%,长度为12 mm,宽度为4 mm,厚度为2 mm,通光方向为2×4 mm截面,并在晶体两侧面(尺寸为12×2 mm面)键合1 mm宽未掺杂的YVO₄,目的是为了有效利用增益区,并且消除边缘的衍射效应。4 mm的吸收长度可以吸收抽运能量的96%以上。晶体两端面(尺寸为2 mm×4 mm面)镀对1064 nm的增透膜,两侧面镀对808 nm和1064 nm的增透膜。两个激光二极管(LD)分别从晶体两个侧面靠近抽运,晶体通过紫铜热沉底座传导冷却却散热,整个放大级的尺寸为30 mm×40 mm×25 mm(长×宽×高)。激光二极管为单个bar条,每个LD的平均功率最高为100 W,重复频率为1 kHz,抽运脉宽为100 μs,发光面的长度为10 mm,微柱透镜快轴准直后的发散角为8 mrad。

2.3 数值计算

对放大级的放大能力进行理论分析。放大级的抽运源为快轴准直的单LD bar,可假设抽运光沿板条长度和厚度方向光强均匀分布,沿板条宽度方向为指数式吸收。建立如图3所示坐标系,沿宽度方向x轴取值为[-2,2],厚度方向y轴取值为[-1,1]。采用单阵列LD bar抽运时,抽运光分布可表示为^[11]

$$I(x,y) = \sqrt{2/\pi} \times \frac{I_0}{\omega_p(x)} \times \exp\left[-\frac{2y^2}{\omega_p(x)^2} - \alpha b\right], \quad (1)$$

式中x、y为所研究点的坐标,I₀为一参考值,可通过对抽运功率归一化而求得。α为吸收系数,等于掺杂原子数分数和Nd³⁺离子吸收截面的乘积,b为晶体内光束传播的距离,ω_p(x)为x处的光束半径。

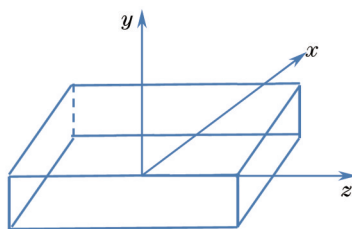


图3 基于板条建立的坐标系

Fig.3 Coordinates based on slab

模拟计算得到y=0平面内单侧边抽运和双侧边抽运时的抽运光分布如图4所示。可以看出单侧抽运的

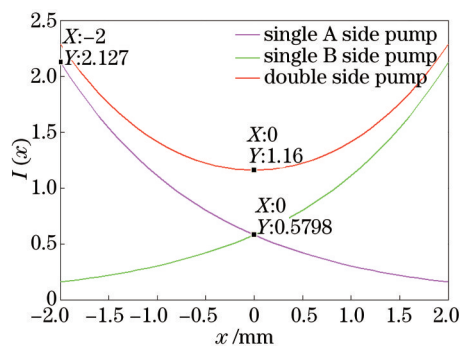


图4 抽运光分布

Fig.4 Distribution of pump light

抽运光强分布很不均匀,在板条中心 $x=0$ 处抽运光的吸收效率约为 75%。双侧边抽运时,板条中心处的抽运光约占总抽运光的 50%,提高了抽运光的均匀性。由此可以预见在单侧边抽运下,仅在靠近抽运光的区域才会有较好的增益。

假设信号光光斑直径为 d ,沿激光光路把 Nd:YVO₄ 内部吸收的抽运能量分为 i 等份,假设每一个增益单元内抽运能量密度均匀,依次计算信号光通过每一个增益单元的小信号增益,最终得到信号光通过增益介质后的增益与抽运的关系。小信号增益系数 g_0 为

$$g_0 = E_{\text{store}} / (E_{\text{sat}} \cdot V_i), \quad (2)$$

式中 E_{store} 为第 i 个微元体的储能(单位为 mJ), V_i 为微元体的体积(单位为 mm³), l 为沿光路方向微元体的长度(单位为 mm), E_{sat} 为饱和能量密度(单位为 mJ/mm²),对于 Nd:YVO₄, $E_{\text{sat}}=1.2$ mJ/mm²。考虑到抽运耦合效率 η_c 、斯托克斯效率 η_s 、量子效率 η_q 、交叠因子 η_b 、存储效率 η_{st} 、抽运吸收效率 η_a 等,增益介质的储存能量 E_{store} 可表示为

$$E_{\text{store}} = \eta_c \cdot \eta_s \cdot \eta_q \cdot \eta_b \cdot \eta_{st} \cdot \eta_a \cdot E_p, \quad (3)$$

式中 E_p 为抽运能量。利用 Frantz-Nodvik 方程^[12]计算信号光通过微元体后的能量:

$$E_{\text{out}} = E_{\text{sat}} \cdot A_{\text{active}} \cdot \ln \left\{ 1 + \left[\exp \left(\frac{E_{\text{in}}}{E_{\text{sat}} \cdot A_{\text{active}}} \right) - 1 \right] \cdot \exp (g_0 \cdot l) \right\}, \quad (4)$$

式中 E_{in} 为入射到第 i 个微元体的信号光能量, A_{active} 为信号光横截面积(单位为 mm²)。放大级的增益为

$$G_{\text{gain}} = E_{\text{out}} / E_{\text{in}}, \quad (5)$$

信号光单脉冲能量为 82 μJ,光束整形后光斑直径为 0.3 mm,理论计算得到 5 程放大后单脉冲能量 E_{out} 与抽运能量 E_p 的变化曲线如图 5 所示,晶体两侧抽运。

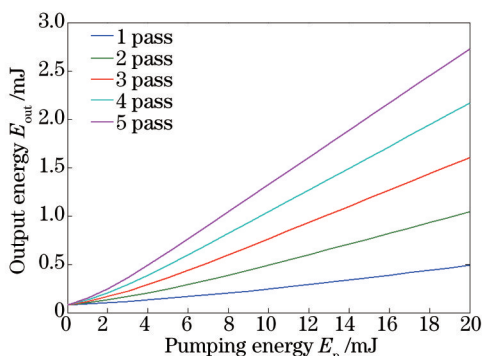


图 5 放大后输出单脉冲能量 E_{out} 随抽运能量 E_p 的变化

Fig.5 Output energy of amplifier versus pumped energy

计算结果表明,在双侧抽运下,输出单脉冲能量最大为 2.728 mJ,由(5)式计算得到增益约为 33.27。

3 实验结果与讨论

单侧边抽运的实验结果如图 6 所示,当信号光从靠近抽运光一侧进入晶体进行放大时,此时具有较高的增益,激光迅速得到放大,多程折叠后在远离抽运光一侧增益较弱,放大趋于饱和。当信号光从抽运光吸收弱的一侧进入放大时,在前 2 程由于增益较弱,放大效果不明显,多程折叠后到达增益强区,激光迅速得到放大,这与之前的分析是吻合的。在单侧边抽运下,若要得到理想的放大结果需要充分利用增益强区。

在双侧边抽运情况下,调节光束耦合系统及反射镜 M_1 、 M_2 得到明晰的五程放大,测量结果如图 7 所示。放大后的激光能量随抽运的增大而增加,在抽运电流为 90 A 时,5 程放大后输出单脉冲能量约为 2.3 mJ,增益为 28.75,能量提取效率为 11.5%。与理论计算结果基本吻合,但是得到的放大器的提取效率较低,且随着抽运功率的增加输出能量趋于饱和。分析原因,认为是由于振荡级输出激光能量较小,对应的能量通量小,无法提取放大器晶体中更多的能量。提高注入信号的能量密度,该放大级结构可以得到更高的提取效率。

放大后输出的激光脉冲波形如图 8 所示,脉宽为 1 ns。采用 Spiricon 公司生产的 M^2 激光光束分析仪对输

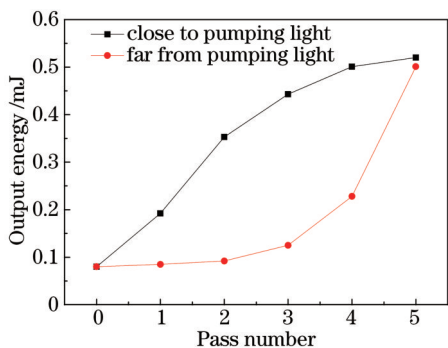


图6 单侧抽运放大后的能量随放大次数的变化

Fig.6 Output energy after amplification versus pass number with one side pump

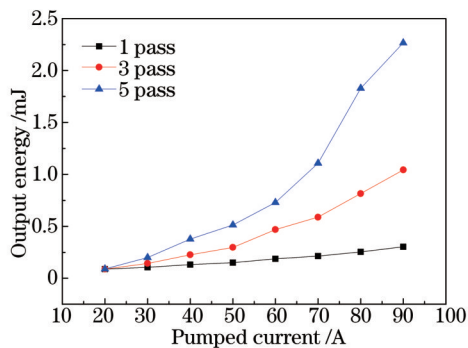


图7 双侧抽运放大后的能量随抽运电流的变化

Fig.7 Output energy of amplifier versus pumped current with double side pump

出光斑进行测量,得到两个方向的光束质量因子分别为 $M_x^2=2.48$ 和 $M_y^2=1.24$,如图9所示。由测量时光斑形状推测,光束质量恶化的主要原因是激光光束在传播过程中 x 方向遭遇硬边光阑,发生了衍射,可以通过改变激光光束的通光口径改善光束质量。而在该结构中,晶体的尺寸在限制激光光束的通光口径方面起主要作用,因此,可以增大晶体的尺寸以改善激光器输出的光束质量。

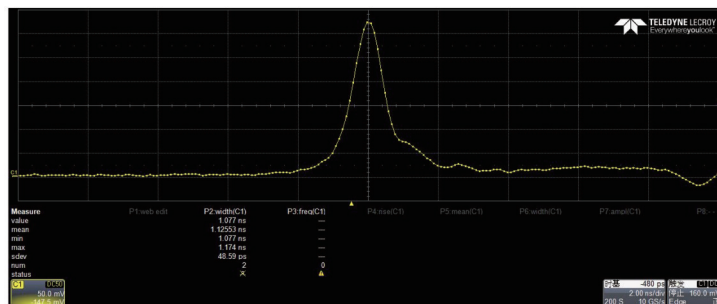


图8 放大后的脉冲波形

Fig.8 Pulse profile after amplification

进一步测量了激光器输出能量的温度稳定特性,整个MOPA结构采用传导冷却进行温控,温度在 $15\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 32\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的范围内变化,测量激光器输出能量和中心波长的变化。结果如图10所示,可以看出该激光器温度稳定性很好,中心波长随温度变化的平均漂移量为 $0.017\text{ nm}/^{\circ}\text{C}$,输出能量在 $2.25\sim 2.33\text{ mJ}$ 之间变化,抖动为 3.4% 。

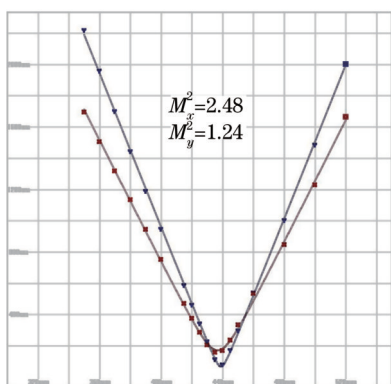


图9 五程放大后的输出光束质量

Fig.9 Output beam quality after five pass amplification

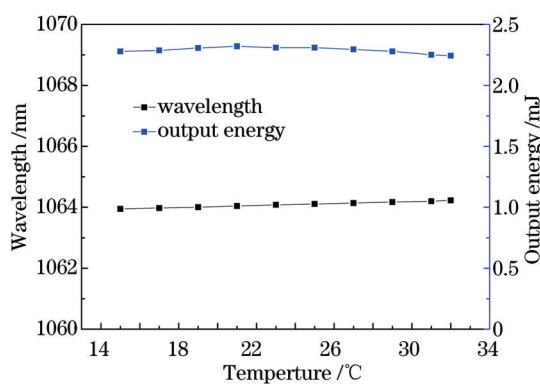


图10 激光器输出能量和中心波长随温度变化曲线

Fig.10 Output energy and wavelength of laser versus temperature

4 结论

设计了一种基于被动调 Q Nd:YAG 微片结构的主振荡级与 Nd:YVO₄板条多程放大的MOPA激光器。主振荡级采用 Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG 被动调 Q 微片激光器,实现了 1 kHz 、 $82\text{ }\mu\text{J}$ 、 1 ns 的近衍射极限的激光输出。经过 Nd:YVO₄多程板条放大后,得到最大单脉冲能量为 2.3 mJ ,脉宽为 1 ns 的激光稳定输出,其峰值功率大

于 2 MW, 重复频率为 1 kHz。该激光器结构简单、紧凑, 采用传导冷却进行散热, 适用于空间激光的应用, 在 15 °C~32 °C 的范围内, 输出能量波动小于 4%。

参 考 文 献

- 1 A W Yu, M A Krainak, M A Stephen, *et al.*. Spaceflight laser development for future remote sensing applications[C]. SPIE, 8182: 818204.
- 2 Yu Zhenzhen, Hou Xia, Zhou Cuiyun. Progress and current state of space-borne laser altimetry[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(2): 020006.
于真真, 侯霞, 周翠芸. 星载激光测高技术发展现状[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(2): 020006.
- 3 Yan Fanjiang, Zheng Yongchao, Tao Yuliang. Analysis and prospects of laser technology of space-borne range measurement system [J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2012, 33(4): 70-77.
颜凡江, 郑永超, 陶宇亮. 星载激光测距系统中激光器技术分析及发展展望[J]. 航天返回与遥感, 2012, 33(4): 70-77.
- 4 Lu Yunfeng, Wang Yi, Liu Bin, *et al.*. 1.5 MW peak power, fiber-solid hybrid amplification MOPA lasers[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(2): 0202009.
陆云峰, 王毅, 刘斌, 等. 1.5 MW 峰值功率光纤-固体混合放大 MOPA 激光系统[J]. 中国激光, 2015, 42(2): 0202009.
- 5 Gao Qingsong, Hu Hao, Pei Zhenping, *et al.*. Design and experiment study of all-solid slab laser amplifier with laser power of 10 kW [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(2): 0202001.
高清松, 胡浩, 裴正平, 等. 10 kW 级固体板条激光放大器设计与实验研究[J]. 中国激光, 2012, 39(2): 0202001.
- 6 Yu Zhenzhen, Hou Xia, Zhou Qunli, *et al.*. VCSEL pumped compact wide-temperature Nd:YAG laser and grazing-incidence amplifier [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(6): 0602003.
于真真, 侯霞, 周群立, 等. 垂直腔面发射激光器抽运小型宽温 Nd:YAG 激光器及掠入射式放大器的研究[J]. 中国激光, 2013, 40(6): 0602003.
- 7 Dergachev A, Flint J H, Isyanova Y, *et al.*. Review of multipass slab laser systems[J]. Selected Topics in Quantum Electronics, IEEE Journal of, 2007, 13(3): 647-660.
- 8 Nawata K, Okida M, Furuki K, *et al.*. Sub-100 W picosecond output from a phase-conjugate Nd:YVO₄ bounce amplifier[J]. Optics Express, 2009, 17(23): 20816-20823.
- 9 Mao Xiaojie, Bi Guojiang, Deng Mingfa, *et al.*. 200 kHz, 8 ns passively Q-switched high peak power Nd:YAG laser[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(S1): 20-23.
毛小洁, 秘国江, 邓明发, 等. 200 kHz, 8 ns 被动调 Q 高峰值功率 Nd:YAG 激光器[J]. 中国激光, 2010, 37(S1): 20-23.
- 10 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.
- 11 Wang Chunyu, Zhu Xiaolei, Lu Yutian. Pumping intensity distribution in LDA side pumped solid state lasers[J]. Acta Photonica Sinica, 2007, 36(6): 961-965.
王春雨, 朱小磊, 陆雨田. LD 侧面抽运固体激光器抽运光分布模拟[J]. 光子学报, 2007, 36(6): 961-965.
- 12 W Koechner. Solid-State Laser Engineering[M]. Beijing: Science Press, 2002: 133-138.
W 克希耐尔. 固体激光工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 133-138.

栏目编辑: 宋梅梅