

引用格式: ZHONG Jian-qi, QU Ya-chen, ZHANG Xiao-jing, *et al.* High-temperature LDAs Pumped Compact Nd : YAG Laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, **48**(12): 1214002

钟健麒, 曲雅臣, 张晓静, 等. 高温 LDAs 泵浦紧凑型 Nd : YAG 激光器[J]. 光子学报, 2019, **48**(12): 1214002

高温 LDAs 泵浦紧凑型 Nd : YAG 激光器

钟健麒¹, 曲雅臣², 张晓静², 杨博达¹, 金亮¹, 马晓辉¹, 邹永刚¹

(1 长春理工大学 高功率半导体国家重点实验室, 长春 130022)

(2 河南平原光电有限公司, 河南 焦作 410800)

摘要:设计了一套紧凑型高温激光二极管阵列端面泵浦电光调 Q Nd : YAG 激光器. 为使激光器整体结构紧凑, 以高温激光二极管阵列作为泵源以有效地降低 Nd : YAG 激光器散热压力. 利用 Ansys 软件对高温激光二极管阵列工作时的温度场进行模拟. 使用基于 K9 玻璃材质的导光锥将泵浦光耦合进 Nd : YAG 晶体内部. 利用 Traceproc 软件模拟了导光锥前后端面的光场分布. 采用 5 mm × 5 mm × 40 mm、掺杂浓度为 1.0 at.% 的 Nd : YAG 晶体作为增益介质, 利用 Ansys 软件对 200 μs, 250 μs 泵浦脉宽条件下的晶体内部温度场分布进行模拟并计算了激光器工作时的热透镜焦距. 结果表明, 本文设计的紧凑型激光器可以实现稳定的脉冲激光输出. 在重复频率 20 Hz, 泵浦源电压脉冲宽度 250 μs、300 μs 条件下, 获得了单脉冲能量 44.1 mJ 和 50.2 mJ 的单脉冲输出, 对应脉冲宽度分别为 18.3 ns 和 21.3 ns, 斜效率为 12.35% 和 12.24%.

关键词: 固体激光器; 高温激光二极管; Nd : YAG 晶体; 电光调 Q; 准连续泵浦

中图分类号: TN248.1

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20194812.1214002

High-temperature LDAs Pumped Compact Nd : YAG Laser

ZHONG Jian-qi¹, QU Ya-chen², ZHANG Xiao-jing², YANG Bo-da¹,

JIN Liang¹, MA Xiao-hui¹, ZOU Yong-gang¹

(1 *National Key Laboratory on High Power Semiconductor Laser, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China*)

(2 *Opto-Electronic Group Henan Pingyuan Optics Electronics CO.LTD., Jiaozuo, Henan 410800, China*)

Abstract: A compact electro-optical Q-switched 1 064 nm Nd : YAG laser end-pumped by high temperature Laser Diode Arrays (LDAs) was demonstrated. In order to achieve the compactness, high-temperature LDAs were used as the pumping source because it can effectively reduce the heat dissipation need within the system. The temperature field of the high temperature LDAs was simulated using Ansys. Lens duct made out of K9 glass was used as the coupling lens to couple the pumped light into the Nd : YAG crystal. The light field distribution before and after the coupling lens was simulated by Traceproc software. The gain medium was a 5 mm × 5 mm × 40 mm Nd : YAG with a doping concentration of 1.0 at.%. The internal temperature field distribution of the crystal under 200 μs and 250 μs pump pulse width was simulated by Ansys, and the focal length of the thermal lens during laser operation was calculated. The experiment results show that this compact laser can achieve stable pulsed laser output. With a repetition frequency of 20 Hz and the pump source voltage pulse widths of 250 μs and 300 μs,

基金项目: 国家自然科学基金 (Nos. 61804014, 61805023, 61804013, 11474038), 吉林省科技发展计划项目 (Nos. 20180519018JH, 20190302052GX), 吉林省教育厅“十三五”科学技术项目 (No. JJKH20190543KJ)

第一作者: 钟健麒 (1994-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为固体激光器方面的研究. Email: 312077932@qq.com

导师 (通讯作者): 邹永刚 (1982-), 男, 研究员, 博士, 主要研究方向为光电子激光技术及应用. Email: zouyng@cust.edu.cn

收稿日期: 2019-07-11; **录用日期:** 2019-09-10

<http://www.photon.ac.cn>

output pulsed energy of 44.1 mJ and 50.2 mJ were achieved corresponding to the pulse durations of 18.3 ns and 21.3 ns. The slope efficiency were 12.35% and 12.24%, respectively.

Key words: Solid state laser; High temperature laser diode; Nd: YAG crystal; Electro-optical Q-switch; Quasi-continuous pumped

OCIS Codes: 140.3290; 140.3530; 140.3538; 140.3580

0 引言

激光二极管阵列(Laser Diode Arrays, LDAs)泵浦 Nd: YAG 脉冲激光器具有峰值功率高、脉冲宽度短和光束质量高等优点^[1-6],被广泛应用于激光雷达,材料加工等方面^[7-10].电光调 Q 的开启时间短,消光比高,能够用于实现大能量、高峰值功率脉冲激光输出^[11-13].

大能量 Nd: YAG 激光器可分为侧面泵浦^[14]和端面泵浦^[15]两种方式.侧面泵浦能够提供较大的泵浦能量,但由于受到泵浦光吸收路径长度限制,吸收效率相对较低,而且热效应严重从而导致输出光束质量较差.2016年,北京工业大学的董剑等^[16]报道了一台侧面抽运 Nd: YAG 调 Q 激光器,在 LD 抽运功率 15 kW,重复频率 10 Hz 时,获得了脉冲能量 350 mJ、脉冲宽度为 9.7 ns 的激光输出,对应的光-光转换效率为 13.3%,在水平、垂直方向的光束质量分别为 7.7 和 12.3.相对于侧面泵浦,端面泵浦结构简单,激光晶体的吸收效率高,激光输出模式好.2018年,中航工业六一三研究所光电控制技术重点实验室的万玮华等^[17]采用高功率的 LD 端面泵浦结构,光-光转化效率最大能达到 20%以上.2019年,哈尔滨工业大学徐立伟等^[18]采用端面泵浦 Nd: YAG 晶体,通过电光调 Q 获得了最大单脉冲能量为 3 mJ,脉冲宽度为 6.5 ns,对应的峰值功率为 462 kW,光束品质因数为 1.6 的激光输出.

随着半导体激光器技术的发展,多波长 LDAs 与高温 LDAs 泵浦 Nd: YAG 技术成为新的发展趋势.多波长 LDAs 泵浦技术是通过拓展 LDAs 的波长数量,使激光晶体在一定温度范围内,对泵浦光的吸收效率保持相对稳定.2018年,北京工业大学彭超等^[19]采用峰值功率为 4 kW 多波长 LDAs,利用导光管将泵浦光耦合至 Nd: YAG 晶体内,在 25~55℃ 内可获得 37~74 mJ 的脉冲输出,对应重复频率为 5~20 Hz.高温 LDAs^[20-21]由于其工作温度较高($\geq 50^\circ\text{C}$),对激光器整体散热要求较低,因此 LDAs 可以在较宽的温度范围内工作.2016年,武汉军械士官学校光电技术研究所的刘旭等^[22]采用高温 LDAs 作为抽运源,实现了重复频率 55 Hz,连续工作 6 min 脉冲能量 85.7 mJ,脉冲宽度 10.8 ns 光束发散角为 2.8 mrad,电光效率为 4.3%的高温全固态激光器.

本文采用高温型 LDAs 作为泵浦源.为将 LDAs 激光耦合至 Nd: YAG 晶体内,设计了一种基于 K9 玻璃材质的导光锥端泵耦合系统.通过端面泵浦 Nd: YAG 晶体,在重复频率 20 Hz,泵源电压脉冲宽度 250 μs 、300 μs 条件下获得了单脉冲能量 44.1 mJ 和 50.2 mJ 的单脉冲输出,对应脉冲宽度分别为 18.3 ns 和 21.3 ns,斜效率为 12.35% 和 12.24%.

1 实验装置

Nd: YAG 激光器的实验装置如图 1 所示,主要由四部分构成,分别为 LDAs,导光锥,谐振腔与 Nd:

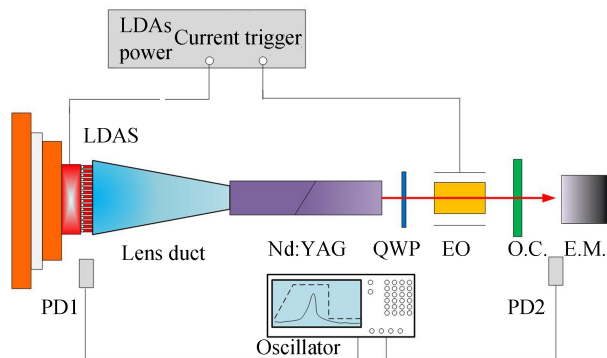


图 1 实验装置示意图
Fig.1 The experimental setup

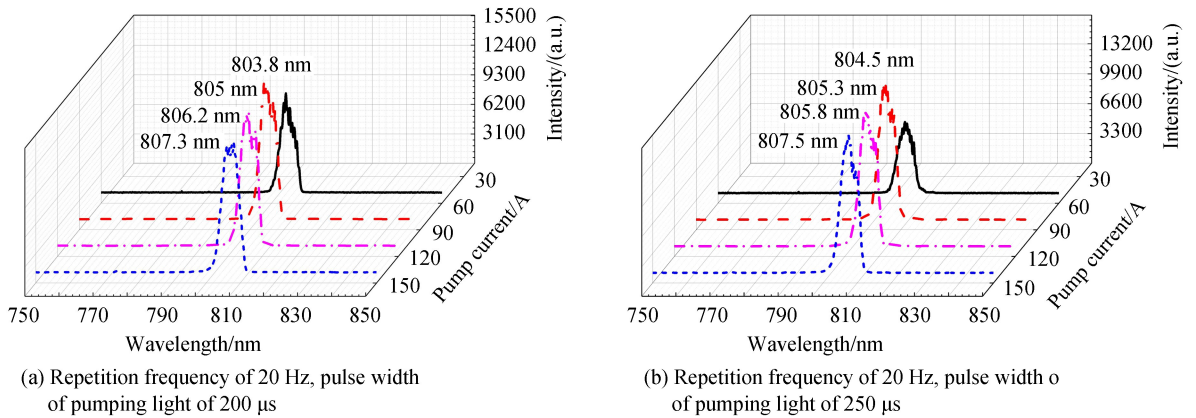


图 2 高温 LDAs 光谱图
Fig.2 The spectrum of high temperature LDAs

YAG 激光晶体.实验所用 LDAs 由 16 个 Bar 条构成,Bar 条间距为 0.43 mm,在工作温度 55℃ 时,输出波长在 ~808 nm.采用直径为 200 μm 的光纤棒在 LDAs 快轴方向压缩发散角,快轴压缩后发散角小于 5°,中心波长随着温度与泵浦电流的升高产生红移,如图 2 所示.在工作温度 55℃,脉冲宽度 250 μs,泵浦电流为 50 A 时中心波长为 804.5 nm,泵浦电流为 150 A 时中心波长为 807.5 nm,谱线宽度 3 nm.

LDAs 泵源的泵浦电流与输出能量曲线如图 3 所示.由于 Nd:YAG 上能级寿命为 ~240 μs,所以 LDAs 脉冲宽度分别设为 250 μs 和 300 μs,LDAs 采用准连续工作方式.在重复频率在 20 Hz 时,从图 3 可以看出随着泵浦能量的增加,输出脉冲能量线性增加.电压脉冲宽度分别为 200 μs 和 250 μs 时的最大输出脉冲能量为 353 mJ 和 447 mJ.

使用 Ansys 软件对室温与高温两种工作环境下的泵源进行仿真,结果如图 4.在环境温度分别为 20℃ 和 55℃ 条件下,60 s 后泵源最高温度分别为 86℃ 和 87℃ 基本达到热平衡状态,温度差分别为 66℃ 和 32℃.根据热量计算公式 $Q = C \cdot M \cdot \Delta T$,在比热容和物体质量相同的情况下,温差越大所产生的热量越大.因此采用高温 LD 作为抽运源可有效减少 Nd:YAG 激光器的温控压力.

为将泵浦光均匀耦合至 Nd:YAG 晶体,采用基于 K9 玻璃材质导光锥将 LDAs 光束耦合至 Nd:YAG 晶体.导光锥的长度为 40 mm,入射面尺寸为 14 mm×14 mm,出射面尺寸为 4 mm×4 mm,楔角为 7.1°.使用 Tracepro 对导光锥进行模拟,如图 5 所示.可以看出 LDAs 经导光锥出射后的光场分布较为均匀,这有利于泵浦光与激光的模式匹配,提高了输出激光的强度和光束质量.通过软件模拟计算,发散角为 35.02°,耦合效率为 88.4%.

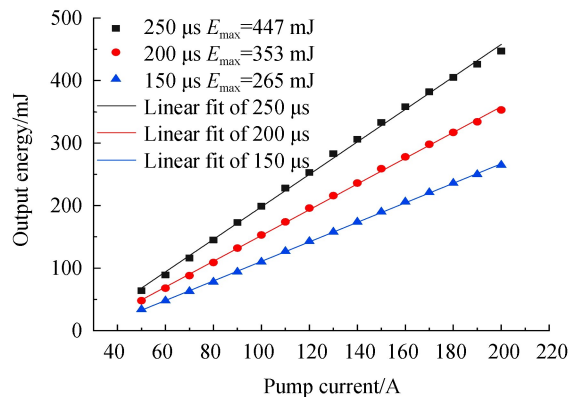
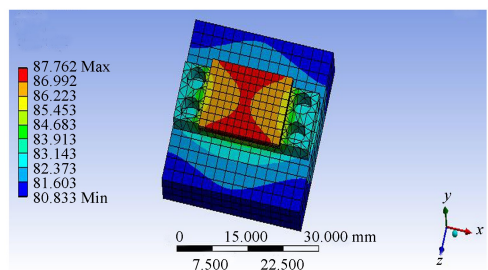
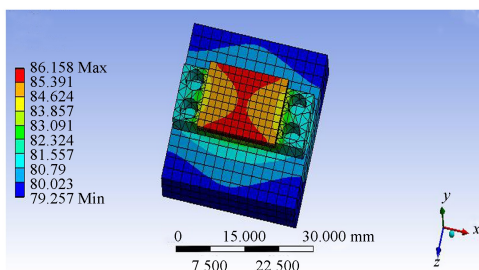
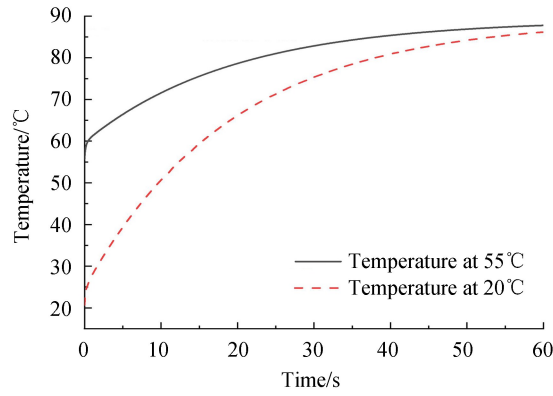


图 3 泵浦电流与输出能量曲线
Fig.3 Output energy versus current in the different pulse width



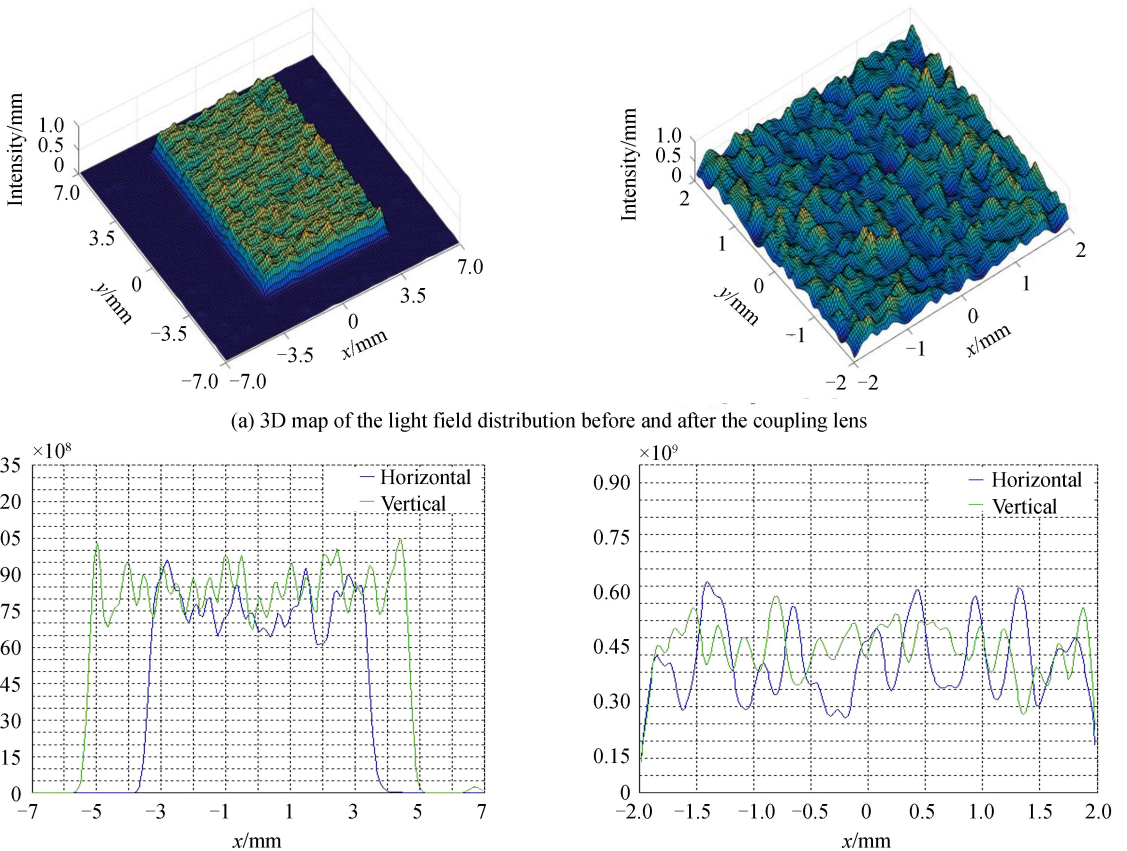
(a) Temperature field distribution (initial temperature 20°C) (b) Temperature field distribution (initial temperature 55°C)



(c) Diagram of time-temperature relation

图4 LDAs泵源动态热学模拟计算

Fig.4 Dynamic thermal simulation of LDAs



(a) 3D map of the light field distribution before and after the coupling lens

(b) Sectional view of the light field distribution before and after the coupling lens

图5 导光锥光场分布模拟计算

Fig.5 Light distribution simulation of the coupling lens

增益介质采用掺杂浓度为 1.0at.% 的 Nd : YAG 晶体,晶体整体尺寸为 5 mm×5 mm×40 mm,前端面镀有 1 064 nm 高反膜,后端面镀有 808 nm 和 1 064 nm 增透膜.在晶体中部以布儒斯特角进行切分.晶体侧面使用钢箔包裹并由铜夹具固定.

使用 Ansys 软件对处于不同泵浦条件下的晶体热场分布进行模拟.在重复频率 20 Hz,电压脉冲宽度 200 μ s、250 μ s 条件下晶体热场分布、轴向以及径向的温度变化如图 6 所示.通过对比发现随着电压脉冲宽度的增大,晶体温度开始上升热透镜效应加剧.使用 Matlab 软件对晶体热透镜焦距进行计算,结果如图 7 所示.在重复频率 20 Hz,脉冲宽度 250 μ s 时热透镜焦距为 452.4 mm,处于谐振腔之外,激光器可以稳定运行.

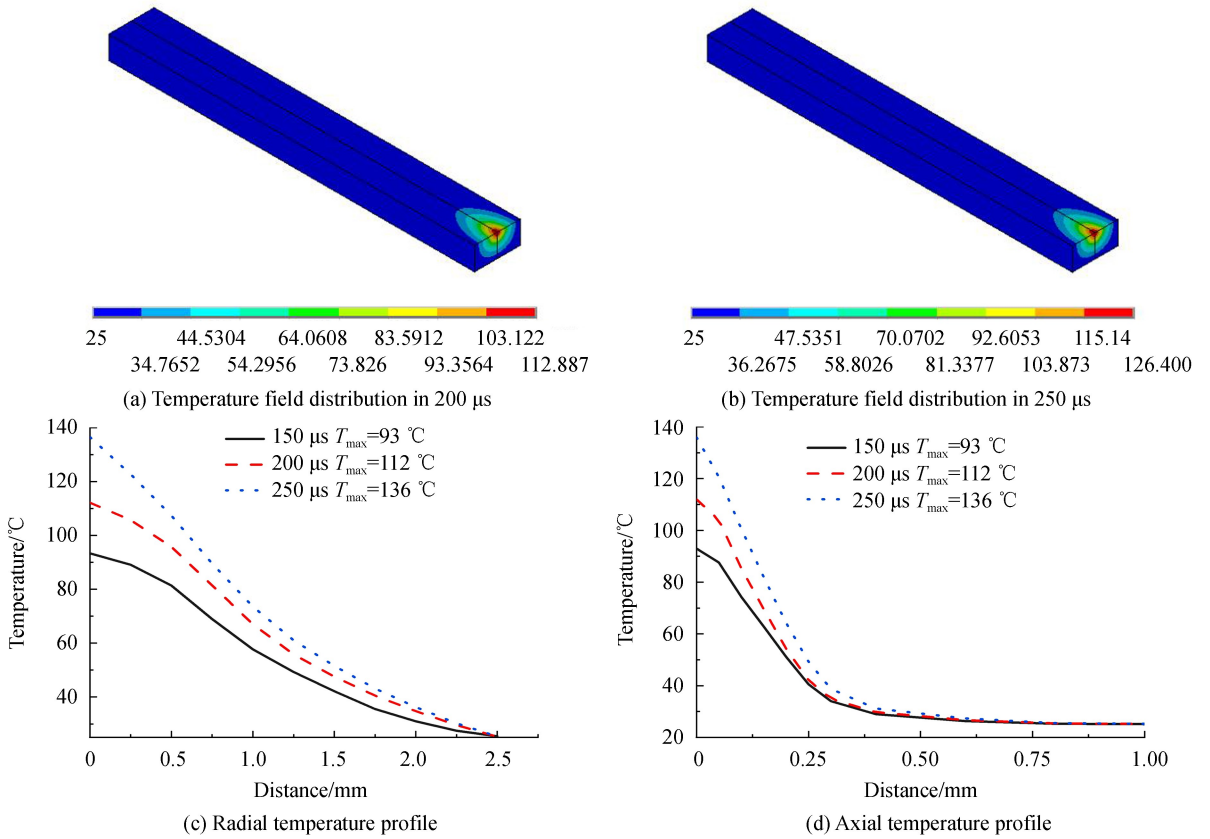


图 6 晶体内热场分布模拟计算
Fig.6 Simulation of the thermal field distribution in crystal

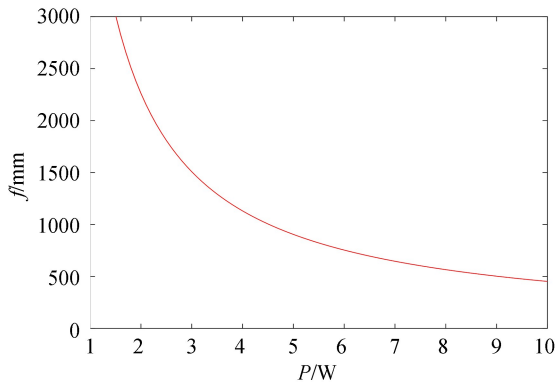


图 7 晶体热透镜焦距
Fig.7 The focal length of the thermal lens

实验采用平腔结构,谐振腔腔长约为 150 mm,从泵源到输出镜距离约为 200 mm.输出镜与镀全反膜的晶体后端面构成封闭稳定的谐振腔.利用激光晶体、1/4 波片结合 DKDP 晶体进行电光调 Q 可以实现升压模式电光调 Q 脉冲激光输出.

2 实验结果与讨论

LDAs 端面泵浦 Nd:YAG 晶体获得的输出结果如图 8 所示.随着泵浦能量的增加,输出脉冲能量线性增加,随着电压脉冲宽度增大,输出脉冲能量呈线性增加,激光器处于稳定工作状态.

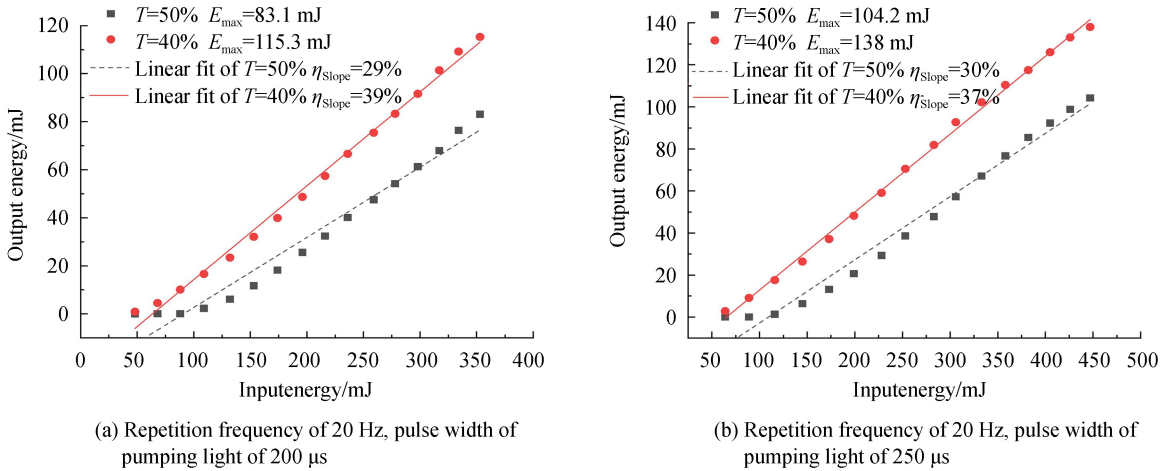


图8 直接泵浦晶体的输出特性
Fig.8 Output characteristics of directly pumped crystals

LDAs 在重复频率为 20 Hz, 脉冲宽度 200 μ s, 输出镜透过率为 40% 和 50% 时, 最大输出脉冲能量分别为 115.3 mJ 和 83.1 mJ, 对应的斜效率分别为 33.6% 和 28.1%。在脉冲宽度 250 μ s 时, 输出脉冲能量分别为 138 mJ 和 104.2 mJ, 对应的斜效率分别为 30.7% 和 26.8%。

相对于声光 Q 开关, 电光 Q 开关具有关断效率高、开关速度快并且有效入射孔径大等优点。而准连续泵浦工作的固体激光器增益较大、对输出激光的脉冲宽度窄, 无法采用声光调 Q。因此为获得大能量、短脉冲激光输出, 采用消光比为 500 : 1 的 DKDP 电光 Q 开关实现调 Q。

Nd : YAG 激光器电光调 Q 输出结果如图 9 所示。如图 9(a) 所示, 脉冲宽度为 250 μ s, 输出镜透过率为 50% 时, Nd : YAG 激光器输出最大单脉冲能量为 25.1 mJ, 对应的脉冲宽度为 19.5 ns, 斜效率为 8.31%, 光-光转换效率为 5.61%。将输出透镜更换 40% 透过率时, Nd : YAG 激光器输出最大单脉冲能量为 44.1 mJ, 脉冲宽度为 18.3 ns, 斜效率为 12.35%, 光-光转换效率为 9.8%, 此时, Nd : YAG 输出的激光光斑为 6 mm \times 5.5 mm, 发散角为 1.2 mrad。

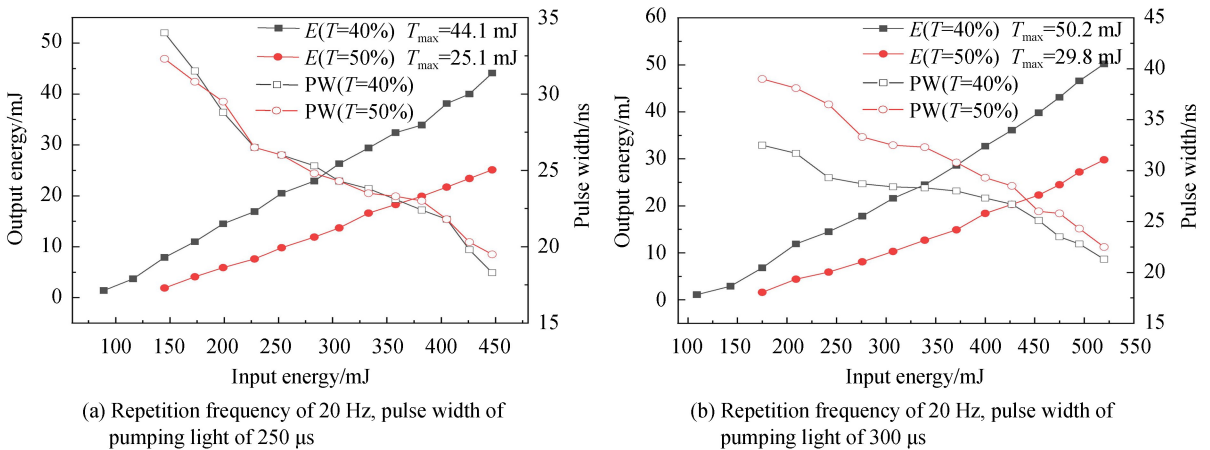


图9 Nd : YAG 激光器调 Q 时输出结果
Fig.9 Output results of Nd : YAG laser with an electro Q-switch

输出耦合镜透射率低时, 对于谐振腔损耗较小, 所以阈值较低。对于 $T = 40\%$ 输出透镜腔内光子提取效率不如 $T = 50\%$ 输出透镜, 但由于进入晶体内的泵浦光功率低, 对于具有较大输出损耗的透镜, 腔内无法提供足够的光子密度, 从而使 $T = 50\%$ 的输出透镜无法产生更高的激光功率。若将进入激光晶体内的泵浦光功率提高至 3 kW 时, 对应的最大输出功率应在 $T = 50\%$ 或更高, 对应的斜效率更高。因此, 针对于本实验中的峰值泵浦功率仅为 1.73 kW, 最佳透过率位于 $T = 40\%$ 。当继续提高输出透射率时, 由于无法提供更高的反转粒子, 从而导致激光输出功率降低, 使斜效率降低。

如图 9(b)所示,当泵浦源重复频率为 20 Hz,脉冲宽度为 300 μs ,泵浦光最大输入能量为 520 mJ,输出镜透过率为 40%时,最大单脉冲能量为 50.2 mJ,脉冲宽度为 21.3 ns,斜效率为 12.24%,光-光转换效率为 9.65%,此时,Nd:YAG 输出激光光斑尺寸为 7.5 mm \times 7 mm,发散角为 1.5 mrad.与 250 μs 脉冲宽度相比,发散角增大,主要是由于泵浦能量升高使热透镜效应加剧导致的。

在相同输出镜透过率,相同重复频率下,300 μs 泵浦脉冲宽度的输出能量高于 250 μs 泵浦脉冲宽度.300 μs 泵浦脉宽略高于 Nd:YAG 晶体的上能级寿命,在激光器工作时,可以获得更多的反转粒子数从而输出能量更高的脉冲激光。

3 结论

设计了一套紧凑型高温 LDAs 端面泵浦 Nd:YAG 激光器,采用高温条件下工作 LDAs 降低温控系统的制冷压力,缩小制冷系统体积使激光器更加紧凑.激光器从泵源到输出镜整体结构约 200 mm.利用布儒斯特角切割的 Nd:YAG 晶体作为增益介质实现线偏振光输出.当输出镜 $T=40\%$,泵浦电压脉冲宽度 250 μs 时,获得了 138 mJ 的激光输出,斜效率 30.7%.加入调 Q 器件,在重复频率 20 Hz,泵源电压脉冲宽度 250 μs 、300 μs 条件下获得了单脉冲能量 44.1 mJ 和 50.2 mJ 的单脉冲输出,对应脉冲宽度分别为 18.3 ns 和 21.3 ns,斜效率 12.35%和 12.24%.实验结果表明高温 LDAs 泵浦 Nd:YAG 激光器可以获得稳定的调 Q 激光输出,是实现免水冷、小型化、轻量化的有效途径。

参考文献

- [1] LU Yi-xin, BAI Yang, BAI Bing, *et al.* MgO:LN electro-optic crystal cavity-dumped Nd:YAG laser for short pulse width and high peak power at 1 kHz[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, **46**(8): 0814001.
卢一鑫,白杨,白冰,等.1kHz 窄脉宽高峰值功率 MgO:LN 电光腔倒空 Nd:YAG 激光器[J].光子学报,2017, **46**(8): 0814001.
- [2] LI Bin, SUN Bing, MU Huai-yu. High-efficiency generation of 355 nm radiation by a diode-end-pumped passively Q-switched Nd:YAG/Nd:YVO₄ laser[J]. *Applied Optics*, 2016, **55**(10):2474-2477
- [3] GUO Hong-jun, DUAN Yan-min, ZHANG Jing, *et al.* Investigation on passively Q-switch output characteristics of Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG/YAG composite crystal laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(2): 0214002.
郭俊宏,段延敏,张静,等.Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG/YAG 键合晶体调 Q 激光输出特性研究[J].光子学报,2018, **47**(2): 0214002.
- [4] TAUER J, KOFLER H, WINTNER E. Millijoule Q-switched Nd:YAG laser operating at 946 nm[J]. *Laser Physics Letters*, 2010, **7**(4):280-285.
- [5] HUANG Y P, HUANG Y J, CHO C Y, *et al.* Influence of output coupling on the performance of a passively Q-switched Nd:YAG laser with intracavity optical parametric oscillator[J]. *Optics Express*, 2013, **21**(6):7583-7589.
- [6] YAN R, YU X, MA Y, *et al.* LD end-pumped doubly Q-switched Nd:YAG 946 nm Laser[J]. *Journal of Russian Laser Research*, 2019, **40**(1):100-104.
- [7] JI Cheng-li, TAO Zong-ming, HU Shun-xing, *et al.* Effective lidar ratio of cirrus cloud measured by three-wavelength lidar[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, **43**(8):268-274.
季承荔,陶宗明,胡顺星,等.三波长激光雷达探测卷云有效激光雷达比[J].中国激光,2016, **43**(8):268-274.
- [8] SONG Yue-hui, SHI Gao-dong, LI Shi-chun, *et al.* Design of wavelength tunable lidar system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, **46**(10):1001001.
宋跃辉,石高栋,李仕春,等.波长可调谐激光雷达系统设计[J].光子学报,2017, **46**(10):1001001.
- [9] CHEN Zhu-Jiang, ZHANG Ya-jun. Demonstration of measuring sea fog with an SNSPD-based Lidar system[J]. *Scientific Reports*, 2017, **7**(1): 15113.
- [10] LU Li-bin, WANG Hai-peng, GUAN Ying-chun, *et al.* Laser microfabrication of biomedical devices[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, **44**(1):65-79.
卢立斌,王海鹏,管迎春,等.激光微加工技术制备生物医用器械的现状与进展[J].中国激光,2017, **44**(1):65-79.
- [11] ZHANG Jian, YU Yong-ji, JIANG Cheng-yao, *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):107-111.
张健,于永吉,姜承尧,等.高重频 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):107-111.
- [12] DAI Qin, SHI Rui-xin, CUI Jian-feng, *et al.* Pulse LD pump EO-Q switched DUV laser[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2016, **37**(4): 463-466.
岱钦,史瑞新,崔建丰,等.脉冲 LD 泵浦电光调 Q 深紫外激光器[J].发光学报,2016, **37**(4):463-466.

- [13] TANG Hao, ZHU Xiao-lei, MENG Jun-qing, *et al.* High repetition rate short pulse width LGS electro-optic Q-switch Nd:YVO₄ Laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **30**(1): 137-141.
唐昊,朱小磊,孟俊清,等.高重复频率窄脉宽 LGS 电光调 Q Nd:YVO₄ 激光器[J].光子学报,2010,**30**(1):137-141.
- [14] CHANG L, YANG C, YI X J, *et al.* 914 nm LD end-pumped 31.8 W high beam quality E-OQ-switched Nd:YVO₄ laser without intracavity polarizer[J]. *Laser Physics*, 2012, **22**(9): 1369-1372.
- [15] CAO Ming-zhen, LIU Xue-sheng, XU Ai-dong, *et al.* LD side-pumped Nd:YAG solid-state amplifier without water-cooler[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(5): 0514003.
曹明真,刘学胜,徐爱东,等.无水冷 LD 侧面泵浦 Nd:YAG 固体激光放大器[J].光子学报,2018,**47**(5):0514003.
- [16] DONG Jian, LIU Xue-sheng, SI Han-ying, *et al.* 350 mJ LD side-pumped Q-switch Nd:YAG laser without water cooling[J]. *Chinese Journal of Laser*, 2016, **43**(11): 39-45.
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):39-45.
- [17] WAN Wei-hua, QIU Zhen-an, HAO Pei-yu, *et al.* A kHz and high-energy laser device with narrow pulse width[J]. *Electronics Optics & Control*, 2018, **25**(4): 74-77.
万玮华,仇振安,郝培育,等.一种 kHz、窄脉宽、高能量激光器的研究[J].电光与控制,2018,**25**(4):74-77.
- [18] XU Li-wei, WU Wen-tao, LI Ying-yi, *et al.* A 6.5 ns gain-switched electro-optical Q-switched Nd:YAG laser by 885 nm laser diode pulsed-end pumping[J]. *Laser Physics Letters*, 2019, **16**: 045001.
- [19] PENG Chao, LIU Xue-sheng, SI Han-ying, *et al.* Multi-color laser diode array end-pump Nd:YAG pulsed laser[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2018, **39**(2): 162-168.
彭超,刘学胜,司汉英,等.多波长半导体激光阵列端泵 Nd:YAG 脉冲激光器[J].发光学报,2018,**39**(2):162-168.
- [20] CHEN Hong-tai, CHE Xiang-hui, XU Hui-wu, *et al.* Study on high-power laser diodes as pumping source at high operation temperature[J]. *Chinese Journal of Laser*, 2010, **37**(11): 2799-2802.
陈宏泰,车相辉,徐会武,等.高工作温度抽运用大功率激光二极管研究[J].中国激光,2010,**37**(11):2799-2802.
- [21] BACCHIN G, FILY A, QIU B, *et al.* High temperature and high peak-power 808nm QCW bars and stacks[C]. SPIE, 2010, **7583**: 75830P.
- [22] LIU Xu, CHENG Yong, WAN Qiang, *et al.* High temperature laser diode pumped all-solid-state laser[J]. *Chinese Journal of Laser*, 2016, **43**(7): 34-39.
刘旭,程勇,万强,等.高温激光二极管抽运全固态激光器[J].中国激光,2016, **43**(7):34-39.