

# 350 mJ LD 侧面抽运 Nd:YAG 无水冷调 Q 激光器

董剑<sup>1</sup> 刘学胜<sup>1\*</sup> 司汉英<sup>2</sup> 彭超<sup>1</sup> 刘友强<sup>1</sup> 曹明真<sup>1</sup> 王智勇<sup>1</sup>

<sup>1</sup>北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124

<sup>2</sup>中国电子科技集团第五十三研究所, 辽宁 锦州 121000

**摘要** 研制了一台无水冷激光二极管(LD)侧面抽运高能量、高光束质量全固态 Nd:YAG 调 Q 激光器。激光器采用半导体制冷器(TEC)进行整体冷却,有利于激光器的小型化、便携化。实验使用的 Nd:YAG 晶体棒尺寸为  $\phi 7 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ , 掺 Nd 的原子数分数为 1.1%, LD 抽运的最大峰值功率为 15 kW。在 10 Hz 重复频率下获得最大脉冲能量为 350 mJ、脉冲宽度为 9.7 ns、光-电转换效率为 6.7%、能量稳定度小于 5% 的 1064 nm 激光输出,水平和垂直方向的光束质量  $M^2$  分别为 7.7 和 12.3。

**关键词** 激光器; Nd:YAG 激光器; 高能量; 激光二极管侧面抽运

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.1101005

## 350 mJ LD Side-Pumped Q-Switched Nd:YAG Laser Without Water Cooling

Dong Jian<sup>1</sup> Liu Xuesheng<sup>1</sup> Si Hanying<sup>2</sup> Peng Chao<sup>1</sup> Liu Youqiang<sup>1</sup>

Cao Mingzhen<sup>1</sup> Wang Zhiyong<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

<sup>2</sup>The 53rd Research Institute of China Electronic Technology Group Corporation, Jinzhou, Liaoning 121000, China

**Abstract** A LD side-pumped, high-energy, high-beam-quality, Q-switched all-solid-state Nd:YAG laser without water cooling is developed. The laser is integrally cooled by using a thermoelectric cooler (TEC), which is conducive to the miniaturization and portability of laser. The dimension of Nd:YAG crystal rod used in experiment is  $\phi 7 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$  and the Nd atom number fraction is 1.1%. The maximum peak power of LD pumping is 15 kW. The laser output at 1064 nm with the maximum pulse energy of 350 mJ, pulse width of 9.7 ns, optical-electrical conversion efficiency of 6.7% and energy stability less than 5% is obtained at 10 Hz repeat frequency. The beam qualities  $M^2$  of horizontal and vertical directions are 7.7 and 12.3, respectively.

**Key words** lasers; Nd:YAG lasers; high energy; laser diode side pump

**OCIS codes** 140.3580; 140.3480; 140.3530

## 1 引言

在材料加工、打孔、焊接及倍频转换等应用上高功率、高光束质量的 LD 抽运全固态激光器非常具有吸引力,尤其是调 Q 获得的高峰值功率激光器<sup>[1-6]</sup>。近几年高功率 bar 条的价格逐渐降低<sup>[7]</sup>,LD 抽运的全固态激光器逐渐取代闪光灯抽运的固体激光器<sup>[8]</sup>。Nd:YAG 晶体有较长的上能级寿命(230  $\mu\text{s}$ )、良好的热机械特性和光学特性,常作为高峰值功率调 Q 激光的增益介质<sup>[9]</sup>。通常,高功率全固态激光器采用水冷却,庞

收稿日期: 2016-07-01; 收到修改稿日期: 2016-08-07

基金项目: 北京市教委面上项目(KM201310005019)

作者简介: 董剑(1990—),男,硕士研究生,主要从事大功率半导体抽运的全固态激光器方面的研究。

E-mail: dj759759759@emails.bjut.edu.cn

导师简介: 王智勇(1970—),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事大功率高光束质量半导体激光技术方面的研究。

E-mail: zywang@bjut.edu.cn

\* 通信联系人。E-mail: liuxuesheng@bjut.edu.cn

大的水箱导致激光器使用、运输十分困难,而半导体制冷器(TEC)冷却是小型化、便携式激光器理想的冷却方法。2007年,刘旭等<sup>[10]</sup>报道了单脉冲能量为66.2 mJ、重复频率为30 Hz、光束发散角为0.6 mrad、能量稳定度为3%的调Q激光器。激光器采用侧面半圆柱面LD阵列与热沉交错分布的抽运方式,实现了整体抽运,达到了热传导均匀的效果,并使用了TEC进行整体冷却。同年,凌铭等<sup>[11]</sup>报道了TEC冷却的最大输出能量为98 mJ、脉宽为10~12 ns的LD侧面抽运Nd:YAG调Q脉冲激光器。2009年,陈薪羽等<sup>[12]</sup>报道了使用TEC冷却的最大输出能量为151 mJ、脉宽为8.48 ns、重复频率为20 Hz、发散角小于3 mrad、光-光转换效率为12.6%的1064 nm Nd:YAG调Q激光器。2013年,Bezyazychnaya等<sup>[13]</sup>报道了重复频率为30 Hz、最大输出能量为210 mJ的Nd:YAG调Q激光器,他们在晶体棒外侧镀了一层薄的散射膜层,可以使晶体棒被均匀地抽运。散射膜层外是一个蓝宝石管,在发挥散热作用的同时可将抽运光会聚到晶体棒。

一般来说,抽运功率、晶体棒的热效应、谐振腔的参数等都是影响激光器输出的主要因素。以往关于无水冷LD抽运全固态激光器的研究,由于受到抽运功率及高抽运功率带来的晶体热效应的影响,输出的单脉冲能量都不是很高。

本文分析了激光器工作过程中Nd:YAG晶体棒热焦距的变化,以及谐振腔工作时的变化过程。在提高抽运功率的同时设计了一个高效的抽运-散热一体化的LD模块,并采用精确控温的温控模块以抑制晶体棒的热效应。通过优化谐振腔的参数设计制作了一台TEC冷却、高能量、高电-光效率的LD侧面抽运Nd:YAG调Q激光器。在LD抽运电流为80 A、抽运脉宽为200 μs的条件下,获得了最大能量为350 mJ、脉宽为9.7 ns、重复频率为10 Hz、能量稳定度为5%的1064 nm激光输出,光-光效率达到13.3%,在水平、垂直方向的光束质量 $M^2$ 分别为7.7和12.3。

## 2 理论分析

在连续、高平均功率的固体激光器中,热透镜效应是影响谐振腔激光模式的最主要因素。由晶体棒表面散热造成的热梯度使晶体棒的径向折射率发生梯度变化,故可将晶体棒等效成一个焦距随抽运能量变化的透镜。平行平面腔可以等效为一种特殊的大曲率半径镜谐振腔( $R_1=R_2=\infty$ ),其有效利用了激活材料的体积,对扰动十分敏感,在包含激光晶体的有源腔中十分有效。由于热致的热透镜效应,激光腔中的晶体棒等效为一个凸透镜,使平-平腔成为一种损耗小的稳定腔。Koechner<sup>[14]</sup>建立了一种包含端面镜以外的其他光学元件构成的谐振腔分析所需的理论,适用于腔内有一个薄透镜的谐振腔。就一级近似而言,由于热透镜效应,晶体棒可等效为一个凸透镜。

通过由2个反射镜构成的等效谐振腔来描述腔内有光学元件的谐振腔的光束特性,平-平腔原理图如图1所示。Nd:YAG晶体棒可等效为一个薄透镜(透镜的热焦距为 $f$ ,由抽运能量决定)<sup>[15]</sup>。热透镜主平面到晶体棒端面的距离为

$$h = \frac{l}{2n}, \quad (1)$$

式中 $l$ 是Nd:YAG晶体棒的几何长度, $n$ 是其折射率。全反镜 $M_1$ 、输出耦合镜 $M_2$ 到晶体棒的距离分别是 $d_1$ 、 $d_2$ ,则 $M_1$ 、 $M_2$ 到热透镜主平面的距离可表示为

$$L_1 = d_1 + h, \quad (2)$$

$$L_2 = d_2 + h. \quad (3)$$

等效谐振腔的传输矩阵可由ABCD法则表示为<sup>[16]</sup>

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - DL_2 & L_1 + L_2 - DL_1L_2 \\ -D & 1 - DL_1 \end{pmatrix}, \quad (4)$$

则参数 $g_1$ 和 $g_2$ 可表示为

$$g_1 = 1 - DL_1, \quad (5)$$

$$g_2 = 1 - DL_2, \quad (6)$$

且满足约束稳定条件

$$0 < g_1g_2 < 1. \quad (7)$$

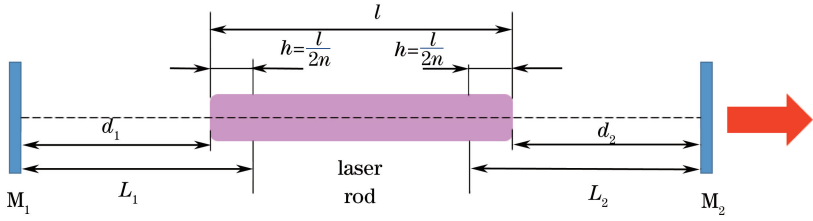


图 1 平-平腔原理图

Fig. 1 Schematic diagram of plane-parallel resonator

令  $g_1g_2 = 1$  或  $g_1g_2 = 0$ , 得到 4 个临界值:

$$D_1 = 0, \tag{8}$$

$$D_2 = \frac{1}{L_1}, \tag{9}$$

$$D_3 = \frac{1}{L_2}, \tag{10}$$

$$D_4 = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2}, \tag{11}$$

且  $g_1, g_2$  的  $g$  参数图上工作点的直线运动方程可表示为

$$g_1 - 1 = (g_2 - 1) \frac{L_1}{L_2}. \tag{12}$$

为保证激光器输出不同参数的激光, 谐振腔需工作在不同的工作状态, 但要避免谐振腔的非稳态工作。实验中使  $L_1, L_2$  近似相等 ( $L_1 \approx L_2 = L$ ), 则谐振腔的  $g$  参数稳定图如图 2 所示。初始  $D_1 = 0$  时, 谐振腔工作在 A 点; 开始抽运时, 热效应晶体棒可等效为一个焦距随抽运功率变化的热厚透镜; 随抽运能量的增加, 谐振腔的工作状态到达 B 点, 此时  $D_2 = D_3 = \frac{1}{L}$ ; 当  $D_4 = \frac{1}{2L}$ , 谐振腔到达另一个临界稳腔工作点, 达到最大输出状态。

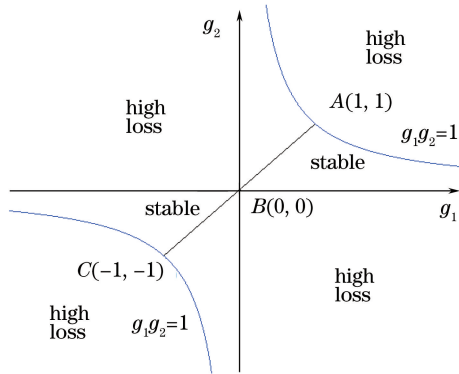


图 2 谐振腔的  $g$  参数稳定图

Fig. 2 Stability diagram of  $g$  parameter of the resonator

### 3 实验装置

实验装置如图 3 所示。为了与 Nd:YAG 晶体的吸收线宽匹配, 选择波长为 808 nm、谱线宽度小于 3 nm 的 LD 阵列作为抽运源。为减小激光器体积, LD 阵列和 Nd:YAG 晶体棒集成一个 LD 模块, 其由 5 个相似的部分组成, 横截面如图 4 所示。每一个 LD 阵列由 30 个 bar 条组成, 每一个 bar 条输出的最大峰值功率是 100 W。这些总峰值功率为 15 kW 的 LD 阵列由一个外部电源驱动, 电源抽运频率在 1~15 Hz 可调, 抽运脉宽在 100~250  $\mu$ s 可调。Nd:YAG 晶体棒尺寸是  $\phi 7 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ , 掺 Nd 的原子数分数为 1.1%, 晶体棒两端镀了 1064 nm 的增透膜, 6 个铜夹具在固定晶体棒的同时也对晶体棒进行散热。在 LD 模块下端, 用导

热硅脂粘附了 2 个最大功率为 66 W 的 TEC 冷却片对 LD 模块进行散热。TEC 由一个精度为 0.01 °C 的外部电源单独供电,一个 p 光、s 光的透射率分别为 99.52%、0.123% 的布儒斯特片作为起偏器。调 Q 晶体是两面都镀有增透膜的 KD\*P 晶体,其通光孔径为 10 mm。镀有 1064 nm 增透膜的 1/4 波片用来改变激光的偏振方向,谐振腔的后腔镜是一个 1064 nm 全反镜,输出耦合镜的透射率为 75%,总腔长为 280 mm。

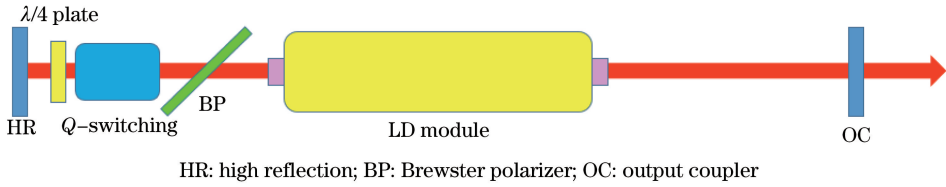


图 3 Nd:YAG 全固态激光器实验装置示意图

Fig. 3 Experimental device diagram of Nd:YAG all-solid-state laser

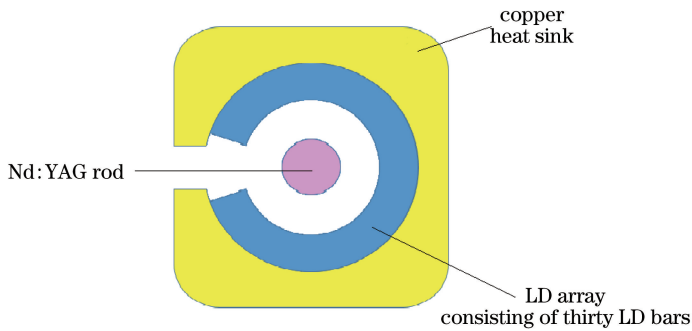


图 4 LD 模块的横截面图

Fig. 4 Cross-section of LD module

## 4 实验结果及讨论

实验开始阶段对 1064 nm 激光自由振荡的特性进行了测试,选用的后腔镜是一个 1064 nm 的全反镜,输出耦合镜的透射率为 75%,激光器腔长为 280 mm。在抽运脉宽为 200  $\mu$ s 的条件下,通过调节抽运电流得到了不同电流时的自由振荡激光输出能量,如图 5 所示(由于 TEC 不断吸收和放出热量,激光器输出能量也随温度变化而周期性振荡。实验中测得 5 组振荡中的最高能量,并将其平均值作为实验结果)。由图 5 可见:在 5 Hz、120 A 的抽运条件下得到了最大能量输出 1.45 J;不同重复频率下输出能量基本随抽运电流的增加线性增长;相同的抽运电流下,激光输出能量随频率增加逐渐减小,此现象是因为随着频率的增加,激光晶体的热负载越来越强,热透镜效应越来越严重,导致输出能量减小。

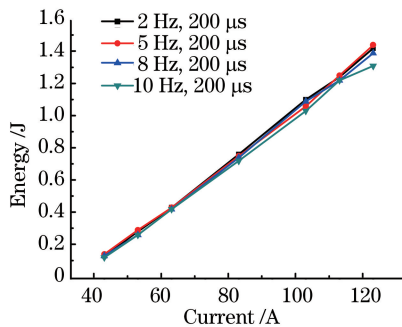


图 5 输出能量随抽运电流的变化曲线

Fig. 5 Change curves of output energy with pumping current

将布儒斯特片、Q 开关及 1/4 波片分别加入光路并调节到共轴,1064 nm 调 Q 激光的输出特性如图 6 所示。由图 6(a)可见,抽运电流从 40 A 增加到 60 A 时输出能量快速增长;随抽运电流的进一步增加,输出能量增长速度变慢,输出曲线在 80 A 时趋近饱和。由图 6(b)可见,抽运电流从 40 A 增加到 60 A 时激光脉

宽逐渐减小;随抽运电流的进一步增加,脉宽稳定在 10 ns;电流从 40 A 开始增加时增益介质内的反转粒子数不断增加,导致激光输出特性不断变化,当电流增加到 60 A 时反转粒子数逐渐饱和。另一方面,抽运电流的不断增加使晶体棒的热效应不断增强,光斑形状改变,输出能量受到了限制。

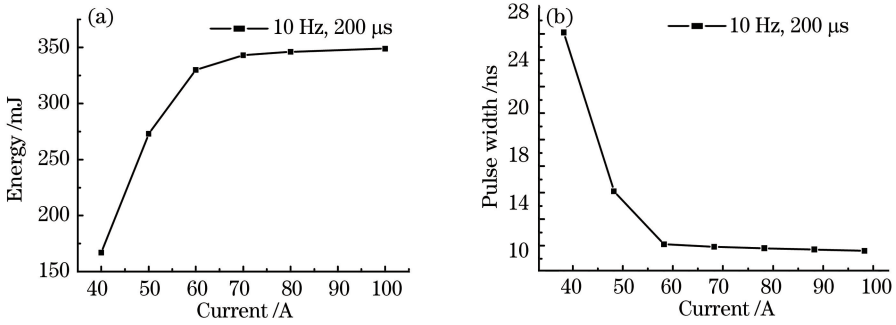


图 6 不同抽运电流下调 Q 激光的输出特性。(a)输出能量;(b)脉宽

Fig. 6 Output characteristics of Q-switched laser with different pumping currents. (a) Output energy; (b) pulse width

对最佳输出耦合镜的透射率进行了研究,输出镜取不同透射率( $T=65\%, 70\%, 75\%, 80\%, 85\%, 91\%, 98\%$ )对应的输出特性如图 7 所示,抽运电流的脉宽是  $200 \mu\text{s}$ 。由图 7(a)可见: $T=98\%$ 时损耗过大没有得到调制输出; $T=65\%$ 时得到的输出不超过 200 mJ; $T=70\%, 91\%$ 时得到的输出不超过 250 mJ; $T=75\%, 80\%, 85\%$ 时得到的输出能量没有明显区别。由图 7(b)可见: $T=75\%$ 时脉宽比另两个透射率的要窄; $T$  比较低( $65\%, 70\%$ )时激光器阈值比较高,一部分能量以自发辐射的形式损耗了。 $T$  比较高( $91\%, 98\%$ )时,由于所有光学器件都不是理想的,存在消光比;当 Q 开关没打开时,s 光的阈值很低,导致存储能量损失。

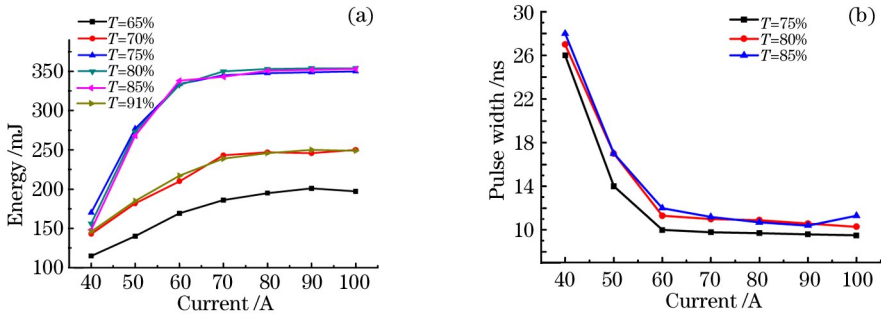


图 7 不同透射率输出耦合镜下的输出特性。(a)输出能量;(b)脉宽

Fig. 7 Output characteristics of OC with different transmissivities. (a) Output energy; (b) pulse width

对不同腔长 260, 280, 300 mm 时的输出特性进行了测量,相应的输出激光脉宽没有明显改变,其能量输出特性如图 8 所示。3 种腔长的输出能量随抽运电流变化的曲线相似,280 mm 腔长时的输出能量高一些。抽运电流为 80 A、重复频率为 10 Hz、抽运脉宽为  $200 \mu\text{s}$  时得到了输出能量为 335~350 mJ 的 1064 nm 激光输出,能量输出的稳定度为 5%。在输出镜后 150 mm 处测得光斑直径为 6.73 mm。

对 TEC 温控的影响进行了测试,实验采用一个精度为  $0.1 \text{ }^\circ\text{C}$  的 TEC 控制源。输出能量的变化幅度很大,在 80 A 抽运电流下输出能量在 300~350 mJ 之间振荡。而后使用一个精度为  $0.01 \text{ }^\circ\text{C}$  的温控源进行测试,输出能量的稳定性得到了增强,在 80 A 抽运电流下输出能量在 335~350 mJ 之间振荡。LD 的输出功率和中心波长都随温度变化而改变,所以更精确的温控系统是提高整个激光器稳定性的关键环节。

整体的光-光转换效率及电-光转换效率可表示为

$$e_{oo} = \frac{Ef}{I\eta_{PI}n_{bars}}, \quad (13)$$

$$e_{eo} = e_{oo}\eta_{eo}, \quad (14)$$

式中  $E$  是输出能量,  $f$  是频率,  $I$  是抽运电流,  $\eta_{PI}$  是  $P-I$  的比值,  $n_{bars}$  是 bar 的数量,  $\eta_{eo}$  是 bar 的电-光转换效率比。把  $\eta_{PI}=1.1$  及经验数值  $\eta_{eo}=50\%$  代入(14)式,得出整体的光-光转换效率及电-光转换效率分别为 13.3%和 6.7%。

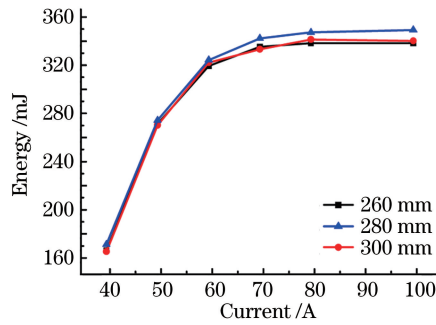


图 8 不同腔长下的输出特性

Fig. 8 Output characteristics for different cavity lengths

通过一个聚焦镜把输出光束耦合进一个 CCD 相机对光束质量进行检测。如图 9 所示,激光光束在水平、垂直方向的光束质量参数  $M^2$  分别是 7.7 和 12.3。用一个光电探头对脉宽进行测量,探头的另一端接近示波器,测量结果如图 10 所示,脉宽为 9.7 ns。

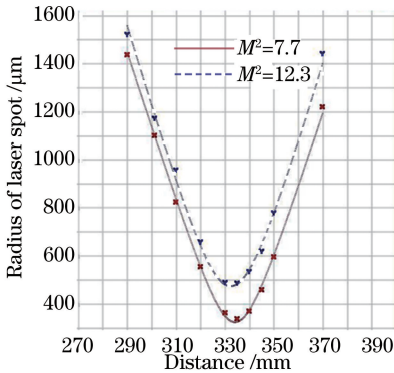


图 9 光束质量测量结果

Fig. 9 Measurement results of beam quality

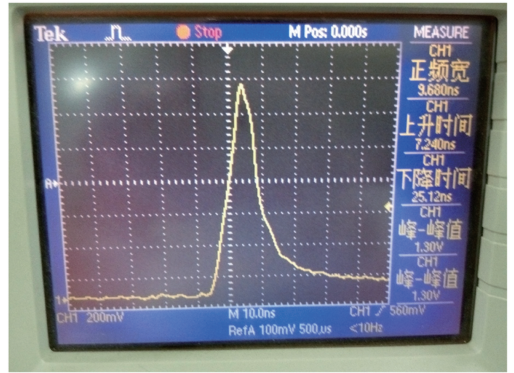


图 10 脉宽测量结果

Fig. 10 Measurement result of pulse width

## 5 结 论

报道了一台 TEC 冷却 LD 侧面抽运的 Nd:YAG 调 Q 全固态激光器。通过比较不同腔长及不同输出镜透射率,得到了最佳的谐振腔参数,最后选定透射率为 75% 的输出耦合镜,谐振腔腔长为 280 mm。在抽运电流为 80 A、重复频率为 10 Hz、抽运脉宽为 200  $\mu$ s 的条件下,获得了最大能量输出为 350 mJ、脉宽为 9.7 ns 的 1064 nm 激光输出。整体光-电转换效率大于 6.7%,在水平、垂直方向的光束质量  $M^2$  分别为 7.7 和 12.3。此次实验由于结构的散热因素,光束在水平、垂直方向上的光束质量有一定差距,整体光束质量并没有达到十分理想的状态。今后将通过进一步优化改进得到更好的激光输出。高能量无水冷的全固态调 Q 激光器有效缩小了激光器的体积,为其小型化和便携化提供了一种现实、有效的方案。其还可以作为种子源进行多级放大,得到单脉冲能量更高的无水冷激光器,从而得到更广泛的实际应用。

## 参 考 文 献

- Ma Y, Li X, Yu X, *et al.* High-repetition-rate and short-pulse-width electro-optical cavity-dumped YVO<sub>4</sub>/Nd:GdVO<sub>4</sub> laser[J]. Appl Opt, 2014, 53(14): 3081-3084.
- Liu Q, Yan X P, Fu X, *et al.* High power all-solid-state fourth harmonic generation of 266 nm at the pulse repetition rate of 100 kHz[J]. Laser Phys Lett, 2009, 6(3): 203-206.
- Zendian W, Jabczynski J K, Kwiatkowski J. High peak power Nd:YAG laser pumped by 600 W diode laser stack[J]. Optics & Laser Technology, 2008, 40(3): 441-444.
- Cheng H P H, Jensen O B, Tidemand-Lichtenberg P, *et al.* Efficient quasi-three-level Nd:YAG laser at 946 nm pumped by a tunable external cavity tapered diode laser[J]. Opt Commun, 2010, 283(23): 4717-4721.

- 5 Kofler H, Schwarz E, Wintner E. Experimental development of a monolithic passively Q-switched diode-pumped Nd:YAG laser[J]. *European Physical Journal D*, 2010, 58(2): 209-218.
- 6 Sun W J, Wang Q P, Liu Z J, *et al.* An efficient 1103 nm Nd:YAG/BaWO<sub>4</sub> Raman laser[J]. *Laser Phys Lett*, 2011, 8(7): 512-515.
- 7 Wang Lijun, Ning Yongqiang, Qin Li, *et al.* Development of high power diode laser [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2015, 36(1): 1-19.  
王立军, 宁永强, 秦 莉, 等. 大功率半导体激光器研究进展[J]. *发光学报*, 2015, 36(1): 1-19.
- 8 Fujikawa S, Furuta K, Yasui K. 28% electrical-efficiency operation of a diode-side-pumped Nd:YAG rod laser[J]. *Opt Lett*, 2001, 26(9): 602-604.
- 9 Zhang S B, Cui Q J, Xiong B, *et al.* High electrical-to-green efficiency high stability intracavity-frequency-doubled Nd:YAG-LBO QCW 532 nm laser with a straight cavity[J]. *Laser Phys Lett*, 2010, 7(10): 707-710.
- 10 Liu Xu, Wang Xiaobing, Cheng Yong, *et al.* Design of diode pumped all-solid-state laser for SLA[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(6): 794-797.  
刘 旭, 王小兵, 程 勇, 等. 星载激光测高的半导体泵浦全固化激光器设计[J]. *红外与激光工程*, 2007, 36(6): 794-797.
- 11 Ling Ming, Wu Zhichao, Tan Chunxue, *et al.* LD side-pumped Nd:YAG Q-switched laser without water cooling[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(s1): 288-291.  
凌 铭, 吴志超, 谭春雪, 等. LD 侧面泵浦 Nd:YAG 无水冷调 Q 脉冲激光器[J]. *红外与激光工程*, 2007, 36(s1): 288-291.
- 12 Chen Xinyu, Jin Guangyong, Yu Yongji, *et al.* Electro-optic Q-switched of double LDA alternate symmetric side-pumped Nd:YAG laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(11): 3098-3102.  
陈薪羽, 金光勇, 于永吉, 等. 双激光二极管阵列侧面交错抽运的电光调 Q Nd:YAG 激光器[J]. *光学学报*, 2009, 29(11): 3098-3102.
- 13 Bezyazychnaya T V, Bogdanovich M V, Grigor'Ev A V, *et al.* Transversally diode-pumped Q-switched Nd:YAG laser with improved power and spatial characteristics[J]. *Opt Commun*, 2013, 308(11): 26-29.
- 14 Koehler W. *Solid-state laser engineering*[M]. New York: Springer, 2002: 221.
- 15 Liu X S, Wang Z Y, Yan X, *et al.* A high-energy good-beam-quality krypton-lamp-pumped Nd:YAG solid-state laser with one pump cavity[J]. *Chin Phys Lett*, 2008, 25(2): 521-523.
- 16 Siegman A E. *Lasers*[M]. Mill Valley: University Science Books, 1986.