

文章编号:1001-5078(2016)01-0039-05

· 激光器技术 ·

# 基于内循环水冷系统的小型化电光调 Q 激光器

韩金樑,王 超,王宇恒,吴春婷,金光勇  
(长春理工大学理学院,吉林 长春 130022)

**摘 要:**报道了一种基于内循环水冷系统的 10 MW 级高峰值功率窄脉宽小型化电光调 Q Nd : YAG 激光器。采用机电一体内循环水冷结构,有效地减小了激光器体积,整机尺寸为 320 mm × 150 mm × 150 mm。当 LD 泵浦源能量为 800 mJ 时(注入电流为 100 A),获得了 137 mJ 的静态激光输出,光-光转换效率为 17.1%;电光调 Q 后在驱动频率为 30 Hz 的条件下,获得了 100 mJ,脉宽 9.9 ns 的激光输出,光-光转换效率为 12.5%,动静比为 73%。激光器连续工作 1.5 h 不稳定性小于 3%。

**关键词:**10 MW;电光调 Q;窄脉宽;小型化

**中图分类号:**TN248 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2016.01.007

## Small electro-optical Q-switched laser based on liquid cooling system of internal recycle

HAN Jin-liang, WANG Chao, WANG Yu-heng, WU Chun-ting, JIN Guang-yong  
(College of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

**Abstract:** A miniature electro-optical Q-switched Nd : YAG laser with high peak power of 10 MW and narrow width is presented based on the liquid cooling system of internal recycle. By means of the mechatronics integration and liquid cooling system of internal recycle structure, the volume of the laser can be reduced effectively, and the whole size of that is 320 mm × 150 mm × 150 mm. Static laser output energy of 137 mJ was acquired at a pumping energy of 800 mJ (input current is 100 A), and the optical-optical conversion efficiency is 17.1%. At electro-optical Q-switched repetition of 30 Hz, the laser output energy of 100 mJ, pulse width of 9.9 ns and optical-optical conversion efficiency of 12.5% are obtained. The ratio of dynamic state to static case is 73%. The energy instability of the laser is found to be lower than 3% after 1.5 h of continuous operation.

**Key words:** 10 MW; electro-optical Q-switched; narrow width; miniaturization

### 1 引 言

全固态激光器(DPL)具有体积小、高效率、寿命长、稳定性好、光束质量高等特点,被广泛的应用于材料加工、光纤通信、医疗以及军事等领域<sup>[1-2]</sup>。工程应用需要 LD 泵浦小型化激光系统,目前主要采用的可行性方案是通过无水冷却结构减小激光器整

机尺寸,但是这种结构往往因为散热性能较差,无法使激光器长时间稳定的运行,实际应用中局限性较大。通过水冷的方式可以对激光器有效散热,目前科研、民用以及军用等方面大多采用此方法,但是传统水冷激光器受困于水冷机的体积,无法满足小型化应用的需求。因此在实际应用中,这种尺寸介于

作者简介:韩金樑(1990-),男,硕士生,主要从事激光物理与新型激光器等方面的研究。E-mail:724644513@qq.com

通讯作者:金光勇(1971-),男,研究员,博士生导师,博士,主要从事激光物理与新型激光器,激光毁伤机制及非线性光学频率变换技术等方面的研究。E-mail:jgycust@163.com

收稿日期:2015-04-27;修订日期:2015-05-14

无水冷激光器和传统水冷激光器之间的小型化可使便携式、高稳定性的激光器具有广阔的应用前景。

本文介绍了一种 LD 环形阵列侧面泵浦电光调 Q 激光器的整机结构以及激光器实验研究。设计采用机电一体内循环水冷结构,通过小型内循环水冷系统进行散热,减少激光器热效应的影响,整机尺寸设计为 320 mm × 150 mm × 150 mm。在 LD 泵浦源能量为 800 mJ 时,静态时获得了 137 mJ 的激光输出,光-光转换效率为 17.1%;电光调 Q 后在重频为 30 Hz 的条件下,获得了 100 mJ,脉宽为 9.9 ns 的激光输出,光-光转换效率为 12.5%,动静比约为 73%,连续工作时间可以超过 1.5 h,便于实际工程化应用。

## 2 理论分析

LD 泵浦固体激光器中,由光生热原理可知 LD 泵浦源是主要的热源,对于激光器的热管理主要考虑泵浦源模块的温控以及激光晶体的散热。

首先讨论激光晶体的热管理。在 LD 泵浦固体激光器中,一般可以认为热量与激光输出能量的比值为 0.85 ~ 1.1 之间<sup>[3]</sup>,本激光器在重频为 30 Hz 的情况下,激光输出能量为 100 mJ,因此激光晶体内部热量近似为 3 W。晶体的热量是通过与热沉接触进行散热,我们需要计算热沉结构能否将激光晶体内部 3 W 的热量全部散去。

激光晶体棒采用的是  $\phi 4 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$  的 Nd:YAG 晶体,设激光晶体到整体热沉热量传递的额定功率为  $P_{NT}$ ,使用傅里叶定律的两平板间传递模型计算  $P_{NT}$ ,可以表示为:

$$P_{NT} = qA_{NT} \quad (1)$$

其中,  $A_{NT}$  表示激光晶体和热沉之间的接触面积;  $q$  表示激光晶体与热沉之间的热传递系数,可以表示为:

$$q = \frac{T_2 - T_1}{b_1/k_1 + b_2/k_2} \quad (2)$$

其中,  $T_1$  和  $T_2$  分别表示热沉初始温度和晶体吸热后温度;  $b_1$  和  $b_2$  分别表示热沉和晶体的厚度;  $k_1$  和  $k_2$  分别表示热沉和晶体的热传导率。已知  $b_1 = 0.25 \text{ cm}$ ,  $b_2 = 0.2 \text{ cm}$ ,  $k_1 = 0.65 \text{ W/cm} \cdot \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $k_2 = 0.13 \text{ W/cm} \cdot \text{ }^\circ\text{C}$ 。设初始温度  $T_1$  为  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ,则晶体吸热后温度  $T_2$  可以表示为:

$$T_2 = T_0 + Q/c\rho V \quad (3)$$

其中,  $T_0$  表示晶体初始温度;  $Q$  表示晶体吸收的热

量;  $c$  表示晶体比热容;  $\rho$  表示晶体密度;  $V$  表示晶体体积。已知  $c = 0.59 \text{ J/g} \cdot \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\rho = 4.56 \text{ g/cm}^3$ 。

将上述已知参数分别带入公式(1)、(2)、(3)可以得到  $P_{NT} = 3 \text{ W}$ ,即散热功率与泵浦生热功率相同,因此证明了激光晶体内部的热沉积可以在单位时间内传递到热沉进行散热。

下面讨论 LD 热沉的热管理。设泵浦源的产热功率为  $P_h$ ,泵浦源介质密度为  $\rho_{LD}$ ,比热容为  $c_{LD}$ ,质量为  $m$ ,初始温度为  $T_0$ ,冷却面温度为  $T_h$ ,传热系数为  $h$ ,接触面积为  $A$ ,我们需要求解经过多长时间,泵浦源的温度趋于稳定。

首先计算泵浦源泵浦激光晶体所产生的热量:

$$Q = P_h \quad (4)$$

其次计算升温  $\Delta T_1$ :

$$\Delta T_1 = \frac{Q}{c_{LD}m} \quad (5)$$

根据热传导有:

$$\phi_1 = -AK(T_0 + \Delta T_1 - T_h) \quad (6)$$

因此得到此时晶体总的热量:

$$Q = Q + (P_h - \phi_1)\Delta t \quad (7)$$

接下来需要重复上述计算过程,从而得到:

$$Q = Q + (P_h - \phi_i)\Delta t \quad (8)$$

当重复  $N$  次之后,  $\Delta T_N \rightarrow 0$ ,就可以得到泵浦源温度稳定时所需要的时间,可以表示为:

$$t = \sum_i^N \Delta t_i \quad (9)$$

稳定时的温度:

$$T = T_0 + \sum_i^N \Delta T_i \quad (10)$$

我们通过 Matlab 对 LD 热沉温度的影响参数进行模拟分析,模拟结果如图 1 所示。

从图 1(a)中可以看出,随着 LD 产热功率的提高,LD 热沉温度达到稳定时对应的温度也就越高,温度稳定的时间越长。当 LD 产热功率较小时,热沉温度达到稳定时所需的时间越短,温升也就越小,这也是小功率激光器易于实现温控的原因。从图 1(b)中可以看出,当冷却面温度较低时,LD 热沉温度升温较小,随着冷却面温度的升高,热沉温度达到稳定时所需要的时间也就越长,对应的稳定温度也就越高,温升的幅度也就越大。因此降低冷却面温度是实现 LD 温控的一个重要因素。从图 1(c)中可以看出,接触面越大,有利于 LD 热沉的温控,因此适当增加接触面积能够有效的减小热沉的温升。

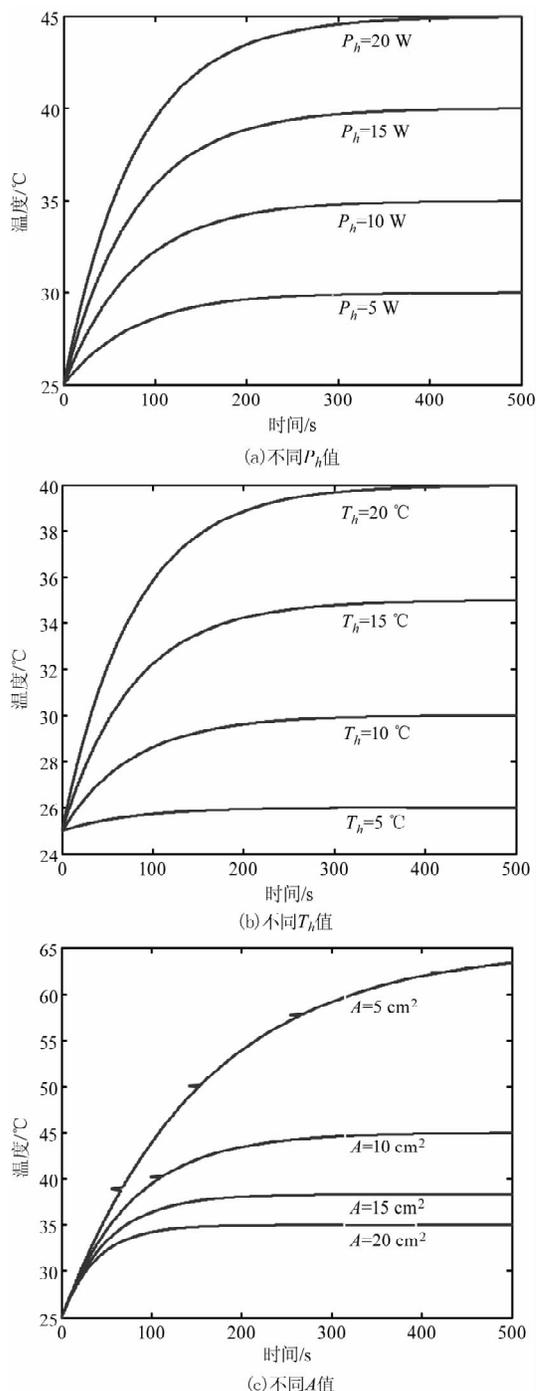


图1 不同参数对 LD 热沉温度的影响

Fig.1 The influence of LD heat sink temperature with different parameters

### 3 实验装置

图2为LD泵浦固体激光器实验装置图。激光谐振腔采用平-平腔结构,由全反镜和输出镜构成。腔内分别放置双棒串接激光模块<sup>[4]</sup>、偏振片、电光调Q晶体。图3为整机结构图。

激光晶体棒采用的是 $\phi 4\text{ mm} \times 25\text{ mm}$ 的Nd:YAG晶体。由于在一定范围内激光晶体的掺杂浓度越高,泵浦光吸收效率越好,光功率密度分布

越接近高斯分布,有利于提高输出激光效率以及提高光束质量<sup>[5]</sup>,因此,本设计方案采用的是掺杂浓度为1at% Nd:YAG晶体。

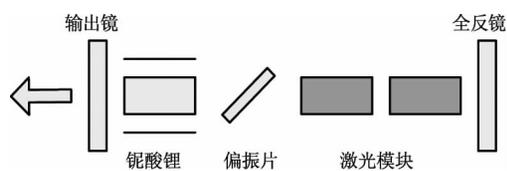


图2 LD泵浦固体激光器实验装置图

Fig.2 Experiment setup of a LD-pumped solid-state laser

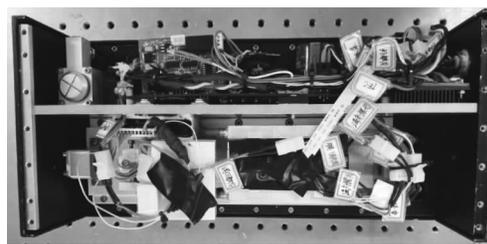


图3 整机结构图

Fig.3 Whole structure of the laser

泵浦源采用LD环形阵列泵浦结构,如图4所示。单热沉模块布30个峰值功率为100W LD bar条,不经过光学耦合系统,直接可以对激光晶体进行泵浦。采用环形阵列泵浦结构,可以使激光晶体内的增益场与谐振腔基膜实现较好的模式匹配,从而提高激光能量提取效率。

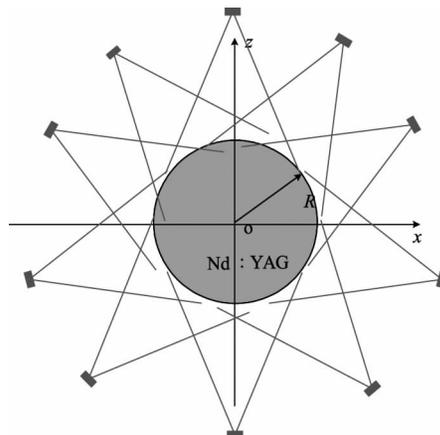


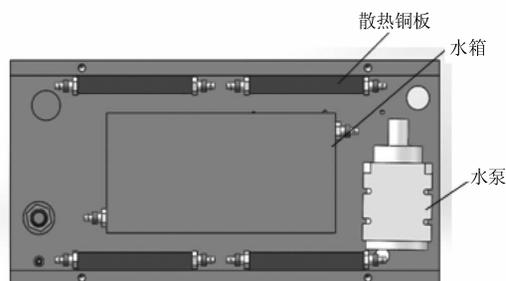
图4 LD环形侧面泵浦激光晶体示意图

Fig.4 Diagram of annular LD side-pumped crystal rod

为了获得高峰值功率窄脉宽的激光输出,本文采用电光调Q的技术手段,选择的电光调Q晶体为铌酸锂(LN)晶体<sup>[6]</sup>。使用LN晶体进行电光调Q时,通常采用对LN晶体施加横向电压的方式,并且分为横向加压和横向退压两种方式。横向加压即激光泵浦的初始阶段对LN晶体加压,Q开关处于开门状态,再进行退压使Q开关处于关门状态;横向退压即激光泵浦的初始阶段对LN晶体加压使Q开

关处于关门状态,再通过退压使 Q 开关处于开门状态。对比两种调 Q 方式,相对来说横向退压的方式其 Q 开关结构相对简单,光路调节也相对容易,因此本文将采用 LN 晶体横向退压的方式。

LD 侧面泵浦激光晶体的过程中,激光晶体和 LD 泵浦模块会形成大量热积累,从而造成输出激光的能量不稳定,光束质量差,光-光转换效率低,甚至造成激光器件的损伤,因此需要设计合理的散热系统。具体散热结构如图 5 所示,设计采用传导冷却的方式,将 TEC 制冷片冷端紧贴在 LD 热沉上,热端紧贴散热板上。通过水泵使冷却水能够自主循环,水流带走散热板的热量,通过 4 块散热铜板与空气之间的热传导对水温进行散热,从而使激光器不受散热因素的影响能够长时间稳定的工作。



(a) 内循环水冷系统示意图



(b) 内循环水冷系统实物图

图 5 内循环水冷系统

Fig. 5 The liquid cooling system of internal recycle

假设室温为  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , TEC 制冷片温控设定为  $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 模拟激光器运行时水循环温度随时间的变化关系如图 6 所示。从图中可以看出,初始阶段水循环温度变化较大,200 s 之后温度变化逐渐趋于稳定。出现这种变化的主要原因是,初始阶段,TEC 供电冷端迅速降温,热端升温较高,所以水循环温度变化很大。随着水温继续升高,热量通过 4 块散热铜板进行散热,由于与室温温差逐渐增大,因此与空气之间产生热交换,激光器运行 200 s 之后,水流传递出的热功率与整机散热功率相同,因此水循环系统温度趋于稳定。通过图 6 的模拟结果可以知道,本文采用的内循环水冷结构可以对整机进行有效散热,从而使激光器可以稳定工作。

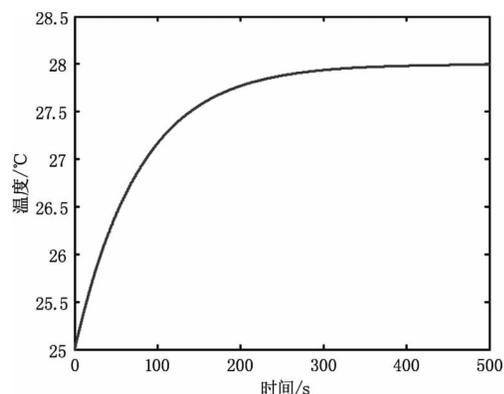


图 6 水循环温度随时间的变化

Fig. 6 Variation of water circulation temperature with time

#### 4 实验结果及分析

为了能够准确得到激光器的光-光转换效率,首先需要测量 LD bar 条泵浦光能量与注入电流之间的关系。采用 NOVA II 能量计以及 OPHIR 能量计探头对输出激光的能量进行测量,电源则采用自行研制的小体积高功率激光电源。由于输出镜透过率对于激光在腔内振荡会产生很大的影响,过小的透过率极易损坏 LN 晶体,因此实验采用透过率为 92% 输出镜进行实验测量。

图 7 所示的即为泵浦光能量与注入电流之间的关系图。通过图 7 我们可以看出,注入电流与泵浦光输出能量成正比例关系,当注入电流为 100 A 时得到最大的泵浦光输出能量为 800 mJ。

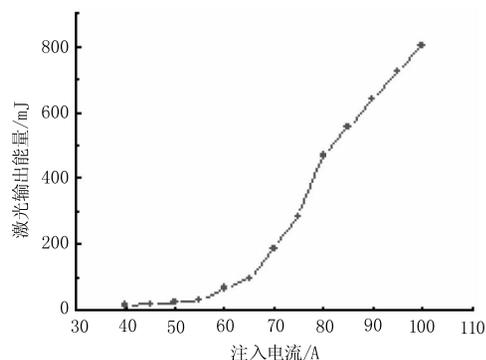


图 7 泵浦能量与注入电流之间的关系

Fig. 7 Pump energy vs injection current

如图 8 所示,在注入电流为 100 A,获得了最高输出能量为 137 mJ 的静态激光,光-光转换效率为 17.1%;重频为 30 Hz 时,获得了最高输出能量为 100 mJ 的动态激光,光-光转换效率为 12.5%,动静比为 73%。通过 THORLABS DET10A 型脉宽探测器以及 Tektronix DPO3054 型示波器测量输出激光脉冲宽度,电光调 Q 后可以得到脉宽为 9.9 ns 的输出激光,如图 9 所示。

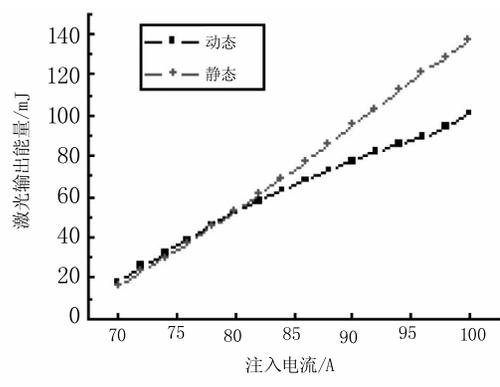


图8 激光输出能量与注入电流之间的关系

Fig. 8 Laser output energy vs injection current

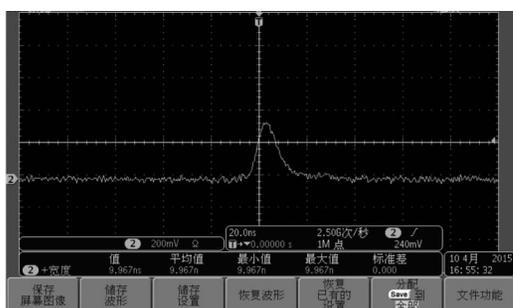


图9 激光脉宽波形图

Fig. 9 Waveform of laser pulse width

采用 Starlab 软件对输出激光的稳定性进行测量,检测输出激光在 1.5 h 范围内的变化情况。经过测量得到输出激光不稳定性小于 3%,连续工作 1.5 h 未出现输出能量急速下降的情况,整机稳定性良好,能够达到长时间稳定工作的要求。图 10 所示为激光能量在 1.5 h 范围内的变化情况。

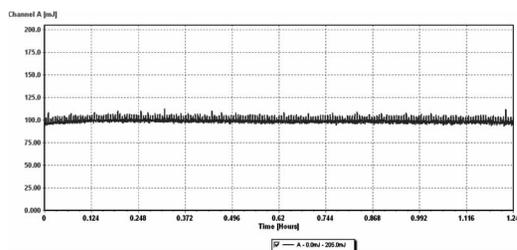


图10 激光能量稳定性

Fig. 10 The stability of laser energy

## 5 结论

本文介绍了一种基于内循环水冷结构的高峰值功率、全固态、小型化 Nd : YAG 激光器,整机尺寸为

320 mm × 150 mm × 150 mm。获得了 137 mJ 的静态输出激光,光 - 光转换效率为 17.1%;电光调 Q 后在重频为 30 Hz 的条件下获得了 100 mJ 的动态输出激光,光 - 光转换效率为 12.5%,动静比为 73%,脉宽为 9.9 ns,连续工作时间超过 1.5 h,不稳定性小于 3%,可以满足工程应用的需求。

## 参考文献:

- [1] LIU Xibin,JIANG Shengyi,HE Peng, et al. Research progress on Diode-Pumped all-Solid-State Laser [J]. Journal of Hunan Institute of Science and Technology: Natural Sciences,2014,27(2):67-70. (in Chinese)  
刘喜斌,蒋胜意,贺鹏,等. DPSSL 二极管泵浦固体激光器研究进展[J]. 湖南理工学院学报:自然科学版,2014,27(2):67-70.
- [2] FENG Hanliang,LIU Yansheng, et al. Progress on development of US Naval shipborne laser weapons[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014,020004:1-8. (in Chinese)  
冯寒亮,刘彦升,等. 美国海军舰载激光武器研究进展[J]. 激光与光电子学进展,2014,020004:1-8.
- [3] JIN Yujian,WANG Pengfei,Li Qiang, et al. Hot management research for diode-pumped solid-state-laser[J]. Laser & Infrared,2006,36(3):187-189. (in Chinese)  
金煜坚,王鹏飞,李强,等. 二极管泵浦固体激光器的热管理研究[J]. 激光与红外,2006,36(3):187-189.
- [4] SHEN Zhaoguo,DONG Tao, et al. Study on hundred watts high repetition cavity-dumped electro-optically Q-switched laser[J]. Optoelectronic Technology,2014,34(4):309-312. (in Chinese)  
沈兆国,董涛,等. 百瓦级高重频腔倒空电光调 Q 激光器[J]. 光电子技术,2014,34(4):309-312.
- [5] CHEN Xinyu,WANG Di,WANG Chao, et al. Effect of Nd<sup>3+</sup> doping concentration on the output characteristics of Nd : YAG laser without water-cool[J]. Infrared and Laser Engineering,2011,40(5):818-821. (in Chinese)  
陈薪羽,王迪,王超,等. Nd<sup>3+</sup> 掺杂浓度对无水冷 Nd : YAG 激光器输出特性的影响[J]. 红外与激光工程,2011,40(5):818-821.
- [6] M Roth,M Tseitlin, et al. Oxide crystals for electro-optic q-switching of lasers [J]. Glass Physics and Chemistry, 2005,31(1):87-95.