

文章编号: 1000-7032(2018)07-0991-06

# 双程放大 740 mJ TEC 冷却 LD 泵浦 Nd:YAG 激光器

刘学胜<sup>1\*</sup>, 董 剑<sup>1</sup>, 徐爱东<sup>2</sup>, 彭 超<sup>1</sup>, 刘友强<sup>1</sup>, 曹明真<sup>1</sup>, 何 欢<sup>1</sup>, 王智勇<sup>1</sup>

(1. 北京工业大学 激光工程研究院, 北京 100124; 2. 江苏北方湖光光电有限公司, 江苏 无锡 214035)

**摘要:** 报道了一种实现高能量输出的激光二极管(LD)泵浦无水冷全固态 Nd:YAG 双程放大器结构。整个放大系统采用了泵浦与晶体棒集成的模块以及半导体制冷器(TEC),从而实现了激光系统的小型化。总腔长为 730 mm。在 10 Hz 重复频率下,主振荡器得到了最大脉冲能量为 350 mJ 的激光输出。脉宽为 9.7 ns,光束质量  $M^2$  在两个方向分别为 7.7 和 12.3。并进行了双程放大的研究,双程放大后得到了 740 mJ、10 ns 的激光输出。

**关键词:** 全固态激光器; 高能量; TEC 冷却; LD 泵浦; 主振荡功率放大器

中图分类号: TN248.1 文献标识码: A DOI: 10.3788/fjxb20183907.0991

## Two-pass Amplifier 740 mJ Diode-pumped Nd:YAG Laser with Thermoelectric Cooler

LIU Xue-sheng<sup>1\*</sup>, DONG Jian<sup>1</sup>, XU Ai-dong<sup>2</sup>, PENG Chao<sup>1</sup>,LIU You-qiang<sup>1</sup>, CAO Ming-zhen<sup>1</sup>, HE Huan<sup>1</sup>, WANG Zhi-yong<sup>1</sup>

(1. Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. Northern Huguang Photoelectrics Co., Ltd., Wuxi 214035, China)

\* Corresponding Author, E-mail: liuxuesheng@bjut.edu.cn

**Abstract:** A high-pulse-energy, diode-pumped, solid-state Nd<sup>3+</sup>:Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>(Nd:YAG) two-pass amplifier system without water cooler was demonstrated in this study. The modulation of LD and Nd:YAG crystal rod and the use of thermoelectric cooler(TEC) in whole system aimed to make the system miniaturized. The cavity length was 280 mm. And a 350 mJ laser pulse was obtained with a pulse duration of 9.7 ns, a frequency of 10 Hz and a beam quality  $M^2$  of 7.7 and 12.3 for horizontal and vertical directions, respectively. A 740 mJ, 10 ns laser pulse for two-pass amplification was obtained.

**Key words:** solid-state laser; high-energy; thermoelectric cooler(TEC); diode-side-pumped; MOPA

## 1 引 言

激光二极管(LD)泵浦的全固态激光器有着转换效率高、寿命长、稳定性高、光束质量好等诸多特点<sup>[1-3]</sup>。调 Q 技术可以有效地压缩激光脉宽,实现高脉冲能量、高峰值功率的激光输出,因

此高能量全固态调 Q 激光器在材料加工、空间通信、倍频转换、光通信、光谱分析等研究领域得到了广泛应用<sup>[4-9]</sup>。随着半导体激光二极管技术的重大突破,半导体激光器得到了飞速发展<sup>[10]</sup>,由激光二极管泵浦的全固态激光器得到强劲的发展,LD 泵浦的全固态激光器正在逐渐取代闪光灯

收稿日期: 2017-11-22; 修订日期: 2018-03-28

基金项目: 北京市教委面上项目(KM201310005019)资助

Supported by Beijing Municipal Education Committee Project(KM201310005019)

泵浦的固体激光器,成为了国内外竞相研究的热点之一<sup>[11]</sup>。而无水冷却的全固态激光器更是使得全固态激光器结构紧凑小型化的特点更加突出,成为了制作小型化、便携式激光器的一种有效手段。2005年, Ostermeyer 等通过 MOPA 的方式获得了最大输出能量为 0.5 J、脉宽为 33 ns 的 1 064 nm 激光输出。在 100 Hz、405 mJ 的条件下,光束质量  $M^2$  为 1.5;在 250 Hz、402 mJ 的条件下,光束质量  $M^2$  为 2.1。并通过倍频转换实现了效率超过 50% 的绿光输出<sup>[12]</sup>。2008年, Stysley 等使用两个相同的水冷却模块作为泵浦源,并使用梯度反射率镜制作了一台激光探测雷达,得到了重复频率 100 Hz、单脉冲输出能量 100 mJ、脉宽 13~14 ns 的基模激光输出,两个方向的光束质量  $M^2$  分别为 1.6 和 1.3<sup>[13]</sup>。2010年, Xu 等报道了一台 100 W 级别的侧泵 Nd: YAG 激光器,他们使用了两个相同的模块作为振荡级从而减小热致双折射,每个模块由 3 个 LD 阵列进行泵浦,最后得到了 101.4 W、400 Hz 的 1 064 nm 激光输出,斜效率为 29.4%,光束质量  $M^2 = 1.14$ <sup>[14]</sup>。2012年,伊肖静等利用 LD 侧面泵浦 Nd: YAG 晶体,并使用 BBO 晶体进行加压式调 Q,采用 1/4 波片补偿 Nd: YAG 晶体的热退偏,最终实现了重复频率 1 kHz、最大单脉冲能量为 10.7 mJ 的 1 064 nm 激光输出<sup>[15]</sup>。2014年, Ryabtsev 等采用振荡加放大的形式,使用风冷却的方法制作了一台激光雷达。在 10 Hz 的条件下获得了 400 mJ 的激光输出,脉宽是 8~11 ns,作为太空探测雷达的有效距离达到了 40 km<sup>[16]</sup>。国内外对于高脉冲能量、无水冷全固态激光器的报道较少,本文对此进行了相应的实验研究。

本文介绍了一种紧凑型侧面泵浦 Nd: YAG 双程放大激光器结构。它可以有效地实现高能量、窄脉宽、TEC 冷却全固态激光器输出。主振荡级采用了紧凑型、LD 侧面泵浦、电光调 Q 的方案,使用了  $\phi 7 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 、掺杂摩尔分数为 1.1% 的 Nd: YAG 晶体棒和峰值功率为 15 kW 的 LD 阵列集成的脉宽来缩减激光器体积,总腔长为 280 mm。在重复频率 10 Hz 的条件下,获得了输出最大能量为 350 mJ、脉宽 9.7 ns 的激光输出,在两个方向的光束质量  $M^2$  分别为 7.7 和 12.3。放大级使用  $\phi 7.5 \text{ mm} \times 134 \text{ mm}$ 、掺杂摩尔分数为 1.1% 的 Nd: YAG 晶体棒和峰值功率为 24 kW 的

LD 阵列集成的 LD 模块,采用了双程放大,获得了 740 mJ、10 ns 的激光输出。

## 2 实验装置

实验装置图如图 1 所示,激光器采用了主振荡级加二次放大的结构。主振荡级是一台 LD 泵浦 TEC 冷却的电光调 Q 激光器,主振荡级装置图如图 1 中 Master Oscillator 所示。为了增加系统稳定性以及缩小激光器体积,主振荡级将晶体棒和 LD 阵列集成为一个 LD 模块,模块的横截面图如图 2 所示。主振荡级使用了  $\phi 7 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 、掺杂  $1.1\% \pm 0.1\%$  的 Nd: YAG 晶体棒作为增益介质,晶体棒由铜夹具夹持,在整个模块的中心。为了和 Nd: YAG 晶体的吸收峰更好地匹配,中心波长为 808 nm、谱线宽度小于 3 nm 的 LD 阵列被选做泵浦源,每一个阵列由 30 个巴条组成围绕在晶体棒周围,每一个巴条最大的输出峰值功率是 100 W。为了能在增益介质中实现泵浦光的均匀分布,主振荡级采用了侧面 LD 对称泵浦的方式。由于这种泵浦方式可以使泵浦光的能量中心也与晶体的中心重合,从而大大提高了泵浦光的利用率和基横模的转化效率,利于实现大能量、高光束质量的输出。LD 阵列直接焊接在了铜热沉上进行散热。主振荡级模块由 5 个相似的泵浦部件组成并采用了交替泵浦散热的结构。所有 5 个 LD 阵列串联在一起接入外电路,LD 阵列的泵浦电流调节范围为 0~120 A,泵浦脉宽调节范围为 0~250  $\mu\text{s}$ ,模块实物图如图 3 所示。为了对 LD 模块进行散热,两个最大功率为 66 W 的 TEC 冷却片通过导热硅脂粘附在 LD 的模块下端,另一端与铜热沉散热片相连,并由一个温控精度为 0.01  $^{\circ}\text{C}$  的外部电源进行供电来调节模块温度。起偏器是一个  $T_p = 99.52\%$ 、 $T_s = 0.123\%$  的布儒斯特片。调 Q 晶体为 KD\*P 的晶体,输出耦合镜的透过率为 75%,总的腔长为 280 mm。

放大级采用了和主振荡级相似的模块结构,模块由 5 个相似的泵浦部件组成并采用了交替泵浦散热的结构。每个泵浦组件都有一个由 48 个峰值功率为 100 W 的巴条组成的 LD 阵列,LD 阵列直接焊接在了铜热沉上进行散热,所有 LD 阵列串联在一起接入外电路,LD 阵列的泵浦电流调节范围为 0~120 A,泵浦脉宽调节范围为 0~250  $\mu\text{s}$ 。在模块中心由铜夹具夹持  $\phi 7.5 \text{ mm} \times 134 \text{ mm}$ 、

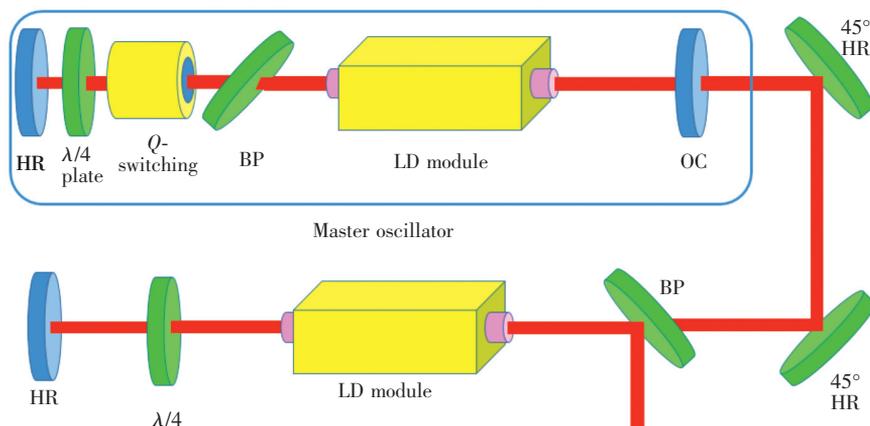


图 1 双程放大实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of two-pass amplification

掺杂  $1.1\% \pm 0.1\%$  的晶体棒作为增益介质, 晶体棒周围是 LD 阵列, 模块的横截面图如图 2 所示。放大模块使用了 3 个最大功率为 66 W 的 TEC 冷却片, 并使用导热硅脂粘附将整个 LD 模块通过 TEC 冷却片与一个铜热沉散热片相连。放大级的泵浦电源可由振荡级电源提供的同步信号进行泵浦的同步控制。我们使用了两个  $45^\circ$  全反镜将光路进行了折叠, 并在放大器前放置了一个布儒斯特偏振片来进行激光输出, 在放大器后放置了一个  $\lambda/4$  波片用来改变激光的偏振方向, 偏振片之后使用了一个全反镜将激光反射回放大级进行

二次放大, 总腔长为 730 mm。

### 3 结果与讨论

我们先测试了主振荡级的输出特性, 设置泵浦电流脉宽  $200 \mu\text{s}$ 、频率 10 Hz, 通过调节电流得到了电流-能量输出曲线和电流-脉宽曲线, 实验结果如图 4 所示。

在图 4 中可以看出, 当泵浦电流由 40 A 逐渐

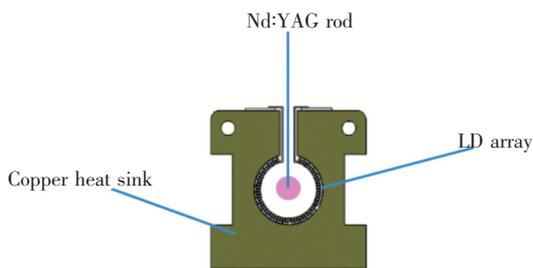


图 2 LD 模块的横截面图

Fig. 2 Cross-section of the LD module

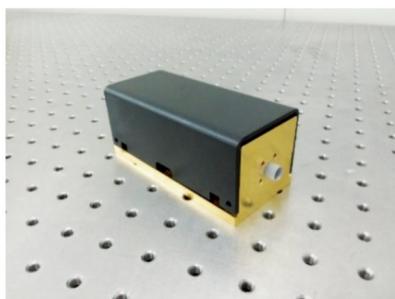


图 3 模块实物图

Fig. 3 Appearance view of LD module

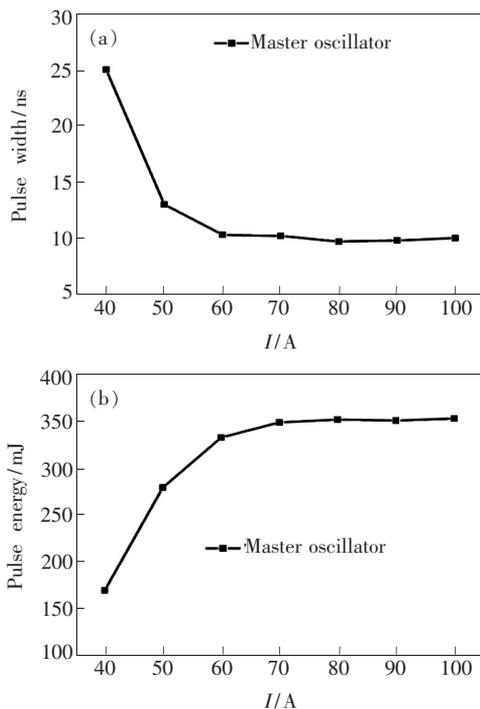


图 4 (a) 不同泵浦电流下主振荡级的输出脉宽; (b) 不同泵浦电流下主振荡级的输出能量。

Fig. 4 (a) Pulse width of master oscillator versus pumping current. (b) Output energy of master oscillator versus pumping current.

增加时,输出能量快速增长,激光脉宽逐渐减小。当泵浦电流达到 60 A 时,输出能量达到 330 mJ,脉宽减小到 10 ns。但是当泵浦电流继续增加时,输出能量增长的速度开始变慢,激光脉宽稳定在 10 ns。当泵浦电流达到 80 A 时,能量输出曲线趋近饱和。这是因为当电流超过阈值继续增加时,泵浦能量迅速增长,从而致使反转粒子数增加,引起了激光输出能量的增长以及脉宽的减小。但是当电流增长到 60 A 时,反转粒子数开始趋近于饱和,所以导致激光输出特性变化变缓慢。而另一方面,由于泵浦功率迅速增长,大量无效的能量以热的形式迅速积累起来,晶体棒的热效应不断变强,从而也限制了激光的输出。我们使用了光束质量诊断仪 M2-200s 和光电探头分别对光束质量、脉宽进行检测,测量结果分别如图 5、图 6 所示。最终在 80 A 的条件下,获得了 350 mJ,9.7 ns 的激光输出,激光光束在两个方向的光束质量参数  $M^2$  分别是 7.7 和 12.3。

主振荡功率放大是一种有效提高激光器能量输出的方法,为了获得更高能量输出的激光,我们

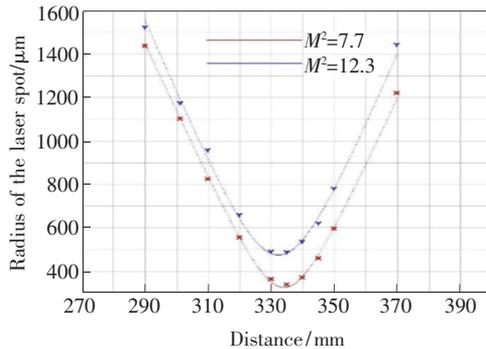


图 5 光束质量测量结果

Fig. 5 Measurement result of beam

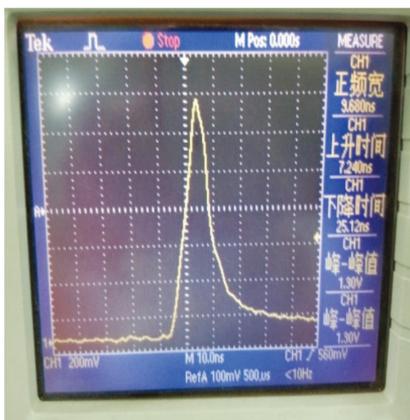


图 6 脉宽测量结果

Fig. 6 Measurement result of pulse

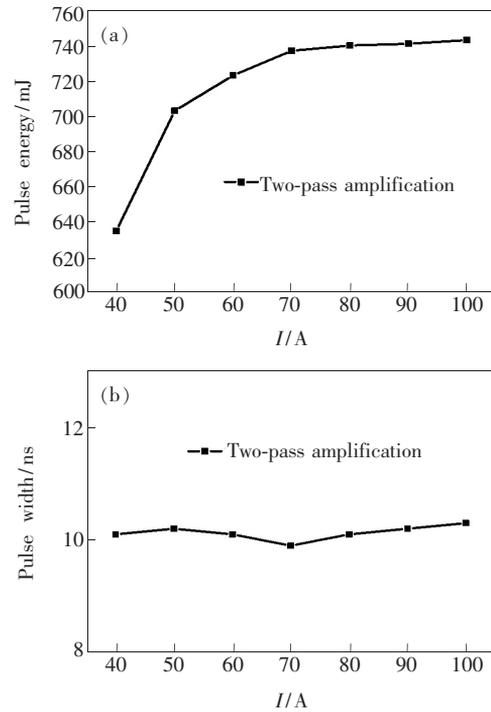


图 7 (a) 不同泵浦电流下双程放大激光的输出能量; (b) 不同泵浦电流下双程放大激光的输出脉宽。

Fig. 7 (a) Output energy of two-pass amplification versus pumping current. (b) Pulse width of two-pass amplification versus pumping current.

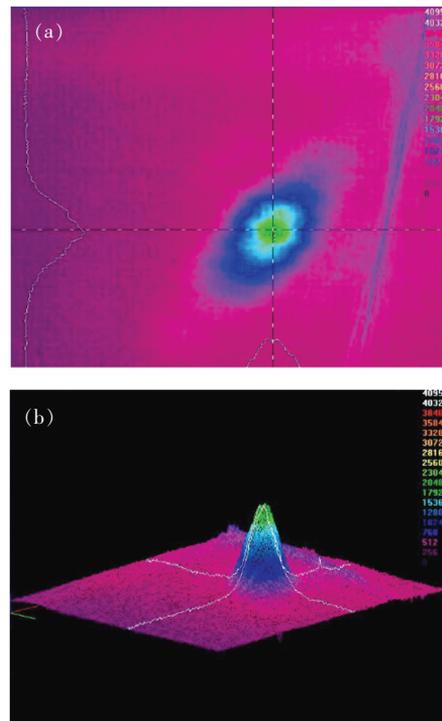


图 8 (a) 双程放大光斑形状; (b) 双程放大光斑外观

Fig. 8 (a) Shape quality of two-pass amplification. (b) Appearance of two-pass amplification.

使用了350 mJ的调Q激光器作为主振荡级,进行了双程放大实验。设置放大的频率为10 Hz,泵浦脉宽为200  $\mu$ s,改变泵浦电流,得到的电流-能量以及电流-脉宽曲线如图7所示。

在图7(a)中可以看出,双程放大后能量的变化曲线与主振荡级的变化趋势十分相近。当放大级泵浦电流达到阈值之后,输出能量线性快速增长,在泵浦电流为60 A时达到730 mJ。但是之后继续增加泵浦电流,输出增长速度变缓慢,最终在80 A时达到了饱和。放大后的脉宽、光束质量与主振荡级相似,基本不发生改变。双程放大的光斑测量图如图8所示。最终,在放大泵浦电流为80 A时得到了740 mJ、10 ns的激光输出。

## 4 结 论

报道了一套高能量、紧凑型、TEC冷却的全固态Nd:YAG双程放大系统。主振荡级采用紧凑型结构、LD侧面泵浦、电光调Q的方式,使用 $\phi 7$  mm  $\times$  100 mm、掺杂摩尔分数为1.1%  $\pm$  0.1%的Nd:YAG晶体棒,泵浦的峰值功率为15 kW,腔长为280 mm。在10 Hz的条件下,主振荡级获得了最大输出能量为350 mJ、9.7 ns的激光,光束质量 $M^2$ 在两个方向分别为7.7和12.3。进行双程放大实验并测量了激光的输出特性,使用 $\phi 7.5$  mm  $\times$  134 mm、掺杂摩尔分数1.1%  $\pm$  0.1%的Nd:YAG晶体棒,泵浦的峰值功率为24 kW,总腔长为730 mm。在泵浦电流为80 A时得到了740 mJ、10 Hz、10 ns的激光输出。

## 参 考 文 献:

- [1] WANG Y, LI W, PAN L, *et al.*. Optimization of concentration and length of laser medium in diode-end-pumped solid-state lasers considering energy-transfer-upconversion effects [J]. *Opt. Int. J. Light Electron Opt.*, 2013, 124(13): 1445-1449.
- [2] SINGH A, MUKHOPADHYAY P K, SHARMA S K, *et al.*. 82 W continuous-wave green beam generation by intracavity frequency doubling of diode-side-pumped Nd:YAG laser [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 2011, 47(3):398-405.
- [3] 张贇坤, 陈襟, 庞庆生, 等. 楔角Nd:YVO<sub>4</sub>晶体电光调Q激光器性能研究[J]. 中国激光, 2010(10):2456-2459. ZHANG Y K, CHEN M, PANG Q S, *et al.*. Wedge angle of Nd:YVO<sub>4</sub> crystal photoelectric Q-switched laser research [J]. *Chin. J. Lasers*, 2010(10):2456-2459. (in Chinese)
- [4] 刘喜斌, 丁卫平. 激光二极管泵浦全固体激光器(DPSSL)的发展与应用[J]. 湖南理工学院学报(自然科学版), 2005, 18(3):49-50. LIU X B, DING W P. Development and application of diode-laser pumping solid state laser (DPSSL) [J]. *J. Hunan Institut. Sci. Technol.*, 2005, 18(3):49-50. (in Chinese)
- [5] 任冬冬, 孙敬武. 中耳激光手术的热生物学效应[J]. 国外医学(耳鼻咽喉科学分册), 2004, 28(3):167-170. REN D D, SUN J W. Thermobiological effect of mid-ear laser surgery [J]. *Foreign Med. Sci. (Sect. Otol. Ngol. Foreign Med.)*, 2004, 28(3):167-170. (in Chinese)
- [6] YANG J, WANG L, WU X, *et al.*. High peak power Q-switched Er:YAG laser with two polarizers and its ablation performance for hard dental tissues [J]. *Opt. Express*, 2014, 22(13):15686.
- [7] 刘伟. 激光器及激光在尖端科学实验中的作用[J]. 科技信息(科学;教研), 2007(14):50. LIU W. The role of lasers and lasers in advanced scientific experiments [J]. *Sci. Technol. Inform. (Sci. Res.)*, 2007(14): 50. (in Chinese)
- [8] 周敏, 魏昕, 谢小柱, 等. 355 nm紫外激光抛光Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>陶瓷工艺的研究[J]. 激光技术, 2014(4):556-560. ZHOU M, WEI X, XIE X Z, *et al.*. The study of 355 nm UV laser polishing Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramics [J]. *Laser Technol.*, 2014(4): 556-560. (in Chinese)
- [9] YU A W, SHAW G B, NOVO-GRADAC A M, *et al.*. In space performance of the lunar orbiter laser altimeter (LOLA) laser transmitter [J]. *SPIE*, 2011, 8182:818208.
- [10] 刘媛, 方高瞻, 马骁宇, 等. 大功率二极管泵浦固体激光器[J]. 激光与红外, 2002, 32(3):139-142. LIU Y, FANG G Z, MA X Y, *et al.*. High power diode pumped solid laser [J]. *Laser Infrared*, 2002, 32(3):139-142. (in Chinese)

- [11] 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.
- [12] OSTERMEYER M, KAPPE P, MENZEL R, *et al.*. Diode-pumped Nd: YAG master oscillator power amplifier with high pulse energy, excellent beam quality, and frequency-stabilized master oscillator as a basis for a next-generation lidar system [J]. *Appl. Opt.*, 2005, 44(4):582-590.
- [13] STYSLEY P R, POULIOS D, COYLE D B, *et al.*. Highly efficient dual head 100 mJ TEM<sub>00</sub> Nd: YAG oscillator [J]. *Opt. Laser Technol.*, 2008, 40(3):435-440.
- [14] XU Y T, XU J L, GUO Y D, *et al.*. Compact high-efficiency 100-W-level diode-side-pumped Nd: YAG laser with linearly polarized TEM<sub>00</sub> mode output [J]. *Appl. Opt.*, 2010, 49(24):4576-4580.
- [15] 伊肖静, 杨超, 陈霖, 等. 高效 LD 侧面泵浦腔外倍频绿光激光器[J]. 量子光学学报, 2012, 18(2):217-222.  
YI X J, YANG C, CHEN M, *et al.*. High efficient LD side pump with external double frequency green laser [J]. *Acta Sinica Quant. Opt.*, 2012, 18(2):217-222. (in Chinese)
- [16] RYABTSEV G I, BOGDANOVICH M V, GRIGOREV A V, *et al.*. Powerful all-solid-state multiwave laser for aerosol lidars [J]. *J. Opt. Technol.*, 2014, 81(10):571.



刘学胜(1980 - ),男,四川资阳人,博士,讲师,2009 年于北京工业大学获得博士学位,主要从事大功率半导体泵浦的全固态激光器的研究。

E-mail: liuxuesheng@bjut.edu.cn