

doi:10.3788/gzxb20184705.0514003

无水冷 LD 侧面泵浦 Nd : YAG 固体激光放大器

曹明真¹, 刘学胜¹, 徐爱东², 董剑¹, 刘友强¹, 何欢¹, 王智勇¹

(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:通过对行波放大器储能及小信号增益进行理论计算, 模拟出输出激光特性, 即随着放大器泵浦电流的增加, 放大器增益介质内储存能量和小信号增益系数快速增长, 提取效率达到 76% 以上. 输出能量随放大器泵浦电流的增加, 呈线性增长趋势, 在泵浦电流为 80 A 时, 输出光能量逐渐饱和, 最大输出能量为 798 mJ. 实验中, 放大器入射光源采用脉冲能量为 350 mJ、重复频率为 10 Hz、脉宽为 10 ns 的脉冲激光, 放大器中的 Nd : YAG 晶体棒尺寸为 $\Phi 7.5 \text{ mm} \times 134 \text{ mm}$, Nd³⁺ 的掺杂浓度为 1.1%, 泵浦功率最大 24 kW, 使用三个最大功率为 66 W 的半导体制冷器进行半导体热电制冷, 在重复频率为 10 Hz, 泵浦电流为 80 A, 泵浦脉冲宽度为 200 μs 时, 获得了最大脉冲能量为 700 mJ、脉冲宽度为 10 ns 的激光输出, 通过光束质量诊断仪 M-200S 测得输出光束在水平和垂直两个方向的光束质量分别是 7.9 和 12.4.

关键词:激光器; 固体激光器; 无水冷; 放大器; Nd : YAG; 短脉冲; 高能量; 高稳定性; LD 泵浦

中图分类号: TN248.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2018)05-0514003-7

LD Side-pumped Nd : YAG Solid-state Amplifier without Water-cooler

CAO Ming-zhen¹, LIU Xue-sheng¹, XU Ai-dong², DONG Jian¹, LIU You-qiang¹,
HE Huan¹, WANG Zhi-yong¹

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

(2 Jiangsu North Huguang Opto-electronics Co. LTD, Wuxi, Jiangsu 214035, China)

Abstract: Based on theoretical calculation of the stored energy and small-signal gain coefficient of the travelling wave amplifier, the characteristics of the output laser were simulated. With the increment of the pumping current, the stored energy and small signal gain coefficient increase rapidly. And amplifier energy extraction efficiency can reach more than 76%. In terms of the output energy, it rises linearly with the increasing of the pumping current. When the pumping current is 80 A, a 798 mJ laser pulse can be obtained. Related experiment is carried out on the basis of theoretical simulation. In this experiment, a pulse with 350 mJ energy, 10 Hz repetition frequency, 10 ns width is used as the seed. The size of the Nd : YAG crystal rod in amplifier is $\Phi 7 \text{ mm} \times 134 \text{ mm}$ and the doping concentration is 1.1 at%. The maximum peak power of laser diode (LD) is 24 kW. In order to control the temperature of the crystal working environment, three thermoelectric coolers are chosen with a maximum power of 66 W. Ultimately, a 700 mJ, 10 ns, 10 Hz laser pulse is obtained for single-pass amplification. The beam qualities of horizontal and vertical direction are 7.9 and 12.4, respectively, measured by the beam quality diagnostic instrument M-200S.

Key words: Lasers; Solid state laser; Thermoelectric cooler; Amplifier; Nd : YAG; Short pulses; High energy; High stability; Diode-side-pumped

OCIS Codes: 140.3538; 140.3580; 140.3480; 140.3530; 140.5560

基金项目: 北京市教委面上项目(No.KM201310005019)资助

第一作者: 曹明真(1991-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为大功率半导体泵浦的全固态激光器. Email: caomingzhen@emails.bjut.edu.cn

导 师: 王智勇(1970-), 男, 研究员, 博士, 主要研究方向为大功率半导体泵浦的全固态激光器. Email: zywang@bjut.edu.cn

通讯作者: 刘学胜(1980-), 男, 讲师, 博士, 主要研究方向为大功率半导体泵浦的全固态激光器. Email: liuxuesheng@bjut.edu.cn

收稿日期: 2017-10-23; 录用日期: 2018-02-02

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

0 引言

随着大功率激光二极管(Laser Diode, LD)的出现,二极管泵浦固体激光放大器迅速发展起来^[1],高重复、高能量、窄脉冲激光器得到了广泛应用^[2-3].由于使用了与固体激光增益介质的主吸收波长相匹配的LD阵列进行泵浦,不仅减小了激光介质的热效应,而且提高了介质对泵浦光的吸收效率^[4],使得结构紧凑、高功率、高效率、高稳定性的全固态激光放大器的实现成为可能^[5-6].激光二极管泵浦全固态激光器具有光电转换效率高、结构简单以及可实现小型化、轻量化等优点,在空间通信、相干雷达、医学、微加工处理、数字光学存储和高功率激光装置等方面有着广泛的应用^[7-8].

高能量脉冲Nd:YAG激光器在激光加工、光电对抗、激光测距、激光通信等方面有着重要应用^[9-10],是众多前沿科学研究、现代科学仪器和设备中的核心器件^[11-12].2008年Wandt等人使用能量2 mJ、频率10 Hz、脉宽6.4 ns的种子激光,采用掺杂浓度为3%的Yb:YAG棒四通放大后,获得了220 mJ的激光输出^[13].2016年赵虎等设计了激光二极管侧面泵浦两级放大电光调Q全固态Nd:YAG激光器,实现间距可调的脉冲序列激光输出.通过提供调Q高压序列,获得了单个脉冲能量大于550 mJ,脉冲宽度小于8 ns,脉冲间隔180~240 μ s可调的脉冲序列输出^[14].2017年,邹岩等报道了单脉冲能量为425 mJ、重复频率为200 Hz、脉宽为25 ns,输出光光束质量因子 M^2 为1.37,功率稳定度为0.81%的激光脉冲输出^[15].

本文报道了一台LD泵浦大能量、TEC制冷的全固态行波放大器.首先从理论上对激光放大器在不同工作条件下的输出特性进行了计算,实验中使用脉冲能量为350 mJ、重复频率10 Hz、脉宽为10 ns的窄脉冲激光作为种子光,放大器使用Nd:YAG晶体棒尺寸为 $\Phi 7$ mm \times 134 mm,Nd³⁺的掺杂浓度为1.1%,泵浦源峰值功率为24 kW,最终实现了最大脉冲能量为700 mJ,脉冲宽度为10 ns,重复频率为10 Hz的激光输出.

1 理论分析

固体激光放大器有单程行波放大和多程再生放大等结构形式,双程(多程)行波放大器中能够更加有效地提取存储于增益介质的能量,但是由于需要添加光束偏转器件使多程放大器变得复杂起来.而单程行波放大对激光工作物质的尺寸要求不苛刻,结构简单、紧凑更适用于工程应用,因此在工程应用中一般将Nd:YAG激光放大器设计为单程行波放大结构形式.单程行波激光放大是一种非反馈激光放大,入射信号光在处于粒子数反转的激光放大介质中随波导距离的增长而不断地被放大,同时放大过程是以输入信号到达之前就存储于上激光能级的能量为基础的,即储存能量越多,提取效率越高,放大器对种子光的放大效果越好.虽然Nd:YAG晶体是一个四能级系统,但由于信号光为调Q激光脉冲,故可略去下能级向基态的跃迁,可将晶体的四能级结构简化为二能级结构,则行波放大得到的激光脉冲能量 $E(x)$ 可表示为

$$\frac{dE(x)}{dx} = E_s g_0 \left\{ 1 - \exp \left[-\frac{E(x)}{E_s} \right] \right\} - \alpha E(x) \quad (1)$$

式中, E_s 为饱和能量密度(J/cm²), g_0 是小信号增益系数, α 是激光增益介质单位长度的损耗系数(包括衍射、散射和吸收损耗等).采用集中损耗的近似方法求解微分方程,得行波激光放大器输出能量密度 E_{out} (J/cm²)的表达式为

$$E_{out} = E_s \exp(-\alpha L) \ln \left\{ 1 + \left[\exp \left(\frac{E_{in}}{E_s} \right) - 1 \right] \exp(g_0 L) \right\} \quad (2)$$

式中, E_{in} 为注入放大器的信号激光能量密度(J/cm²), L 是放大器增益介质的长度,由式(2)可知,激光放大器的输出能量与放大器中激光工作物质的性能参数(E_s 、 α 、 L)和运转条件(g_0 、 E_{in})有关,也就是说,在确定激光器增益介质后,再优化器件的运转工作条件,通过有效的光泵浦获得尽可能高的小信号增益系数,即获得尽可能大的能量存储密度,并通过注入适当能量的种子光信号将激光放大器中的储能提取出来,转变为有效输出能量.

1.1 储能和增益

激光放大器的设计关键是使激光增益介质中贮存较高的反转粒子数密度即储存尽可能多的能量,同时具有较大的激光小信号增益系数.因此,激光放大器的储能效率 η_s 定义为放大器增益介质中的储能与泵浦能量之比,即

$$\eta_s = E_{st}V/E_p \quad (3)$$

式中, E_{st} 为激光放大器的贮能密度(J/cm^2), V 是激光放大器增益介质体积, E_p 为激光放大器的泵浦能量, 该值可由泵浦电源电流、泵浦脉宽等计算得出. 激光放大器的贮能密度 E_{st} 与放大器的小信号增益系数 g_0 有关, Nd:YAG 晶体属于四能级系统, 贮能密度 E_{st} 为

$$E_{st} = g_0 E_s \quad (4)$$

$$E_p = I \times \eta_{PI} \times t_p \times n_{bars} \quad (5)$$

式中, 泵浦源电流 I 取值范围为 40A~100A, 间隔 10A 进行调节; 泵浦源 $P-I$ 的比值 η_{PI} 为 1.1; Bar 条数量 n_{bars} 为 240 个; 泵浦脉宽 t_p 为 200 μ s. 假设放大器中泵浦光能使激光材料得到均匀的抽运, 故而反转粒子数分布在激光晶体内是均匀的, 在能量存储阶段考虑放大自发辐射, 腔内反转粒子数密度为

$$\frac{dn}{dt} = W_p (n_{tot} - n) - \frac{n}{\tau_f} \quad (6)$$

式(6)第一项是泵浦光对反转粒子数的作用, 第二项是放大自发辐射效应 (Amplified Spontaneous Emission, ASE) 的影响^[16]. W_p 为泵浦速率(s^{-1}), τ_f 为增益介质上能级寿命, 取 230 μ s. 荧光寿命因子 m 可近似为

$$m = \frac{\tau_f}{\tau_i} = \sigma_a l_a n \quad (7)$$

式中 σ_a 取经验值为 $1.88 \times 10^{-20} cm^2$; l_a 参考增益介质长度及经验, 取值 100 mm, n 为增益介质上能级粒子数.

求解式(6), 可以得出不同泵浦功率时的上能级反转粒子数 n . 根据 $g_0 = n\sigma$ 及 $E_{st} = g_0 E_s$, 可从理论上预测在某信号注入能量下 g_0 及增益介质存储能量随放大器泵浦能量 E_p 的变化趋势, 如图 1.

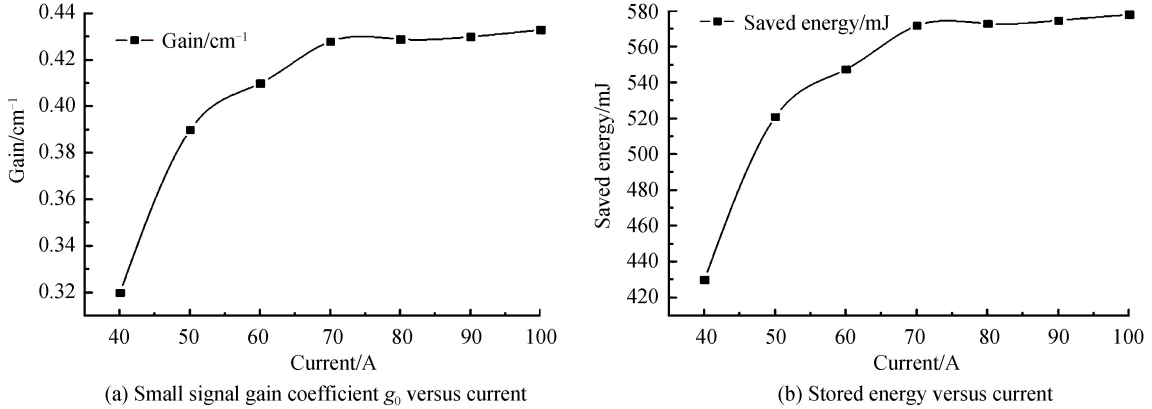


图 1 g_0 及增益介质存储能量随放大器泵浦电流的变化

Fig.1 Small signal gain coefficient g_0 and stored energy in Nd:YAG versus pumping current

由图 1 可以看出: 随着放大器泵浦电流的增加, 放大器增益介质内储存能量和小信号增益系数 g_0 均快速增长, 并呈线性趋势, 并且放大器增益介质内储存的能量处于相对较高的水平, 有利于种子光对存储能量的提取, 当泵浦电流大于 80 A 时, 由于 ASE 效应和反转粒子数达到饱和的原因, 放大器增益介质内储存能量和增益系数 g_0 也趋于饱和状态.

1.2 提取效率和输出能量

将式(4)代入式(2)中, 则在一定贮能密度 E_{st} 下, 激光放大器的输出能量密度 E_{out} 与注入信号能量密度 E_{in} 的关系为

$$E_{out} = E_s \exp(-\alpha L) \ln \left\{ 1 + \left[\exp\left(\frac{E_{in}}{E_s}\right) - 1 \right] \exp(E_{st}L/E_s) \right\} \quad (8)$$

激光放大由两个过程构成: 将泵浦能量 E_p 转换为放大工作物质的贮能 E_{st} 和将该贮能转化为激光放大器的输出能量. 因此, 设计激光放大器除了使放大激光介质有较高的反转贮能外, 还应当考虑如何最有效地使用激光放大器的贮能, 将激光工作物质中通过光泵浦得到的贮能有效地提取出来, 变为激光放大器的输出能量. 为此, 将从激光放大器中提出的能量与通过泵浦而贮存在放大激光介质中的能量之比定义为激光放大

器的提取效率 η_e , 表示为

$$\eta_e = (E_{out} - E_{in}) / E_{st} L \quad (9)$$

将式(8)代入式(9)中, 可得出在一定贮能条件下激光放大器的提取效率 η_e 与增益介质中存储能量 E_{st} 的关系. 饱和能量密度 E_s 的表达式为: $E_s = h\nu/\sigma$, 其中 σ 是受激发射截面, 当激光工作物质为 Nd: YAG 晶体时, $\sigma = 8.8 \times 10^{-19} \text{ cm}^{-2}$, 则饱和能量密度 $E_s = 0.2257 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$. 如果取放大 Nd: YAG 激光介质的长度为 $L = 13.4 \text{ cm}$, 单程损耗系数 $\alpha = 0.01 \text{ cm}^{-1}$, 由式(8)和式(9)计算得出在注入信号种子光能量为 350 mJ 时, 提取效率 η_e 以及 E_{out} 随放大器泵浦能量 E_p 的变化关系如图 2.

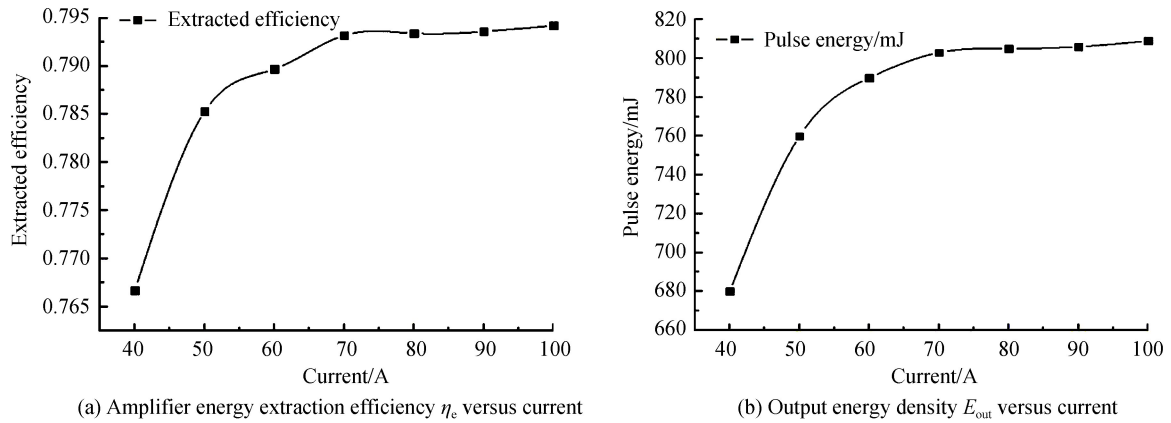


图 2 提取效率 η_e 及 E_{out} 随放大器泵浦电流的变化

Fig.2 Amplifier energy extraction efficiency η_e and output energy density E_{out} versus pumping current

由图 2 可以看出: 1) 在注入种子光能量较大的情况, 即 $E_{in} > E_s$, 可实现较高的提取效率, 达到 76% 以上, 在放大器泵浦电流大于 80A 时, 提取效率趋于稳定; 2) 在输出能量方面, 随着放大器泵浦电流的增加, 输出能量呈线性增长趋势, 其中在泵浦电流为 80A 时输出光能量可达到 798mJ, 在泵浦电流大于 80A 时, 由于 ASE 效应、热效应和反转粒子数达到饱和等原因, 输出能量趋于稳定.

2 实验验证

固体激光放大器有单程行波放大和多程再生放大等结构形式, 为了在结构简捷的基础上获得更高能量输出的激光, 使用了 350 mJ 的调 Q 激光器作为主振荡级来提供种子光, 对其进行单程放大实验. 实验装置如图 3, 其中左侧部分为种子光模块, 右侧部分为放大器模块.

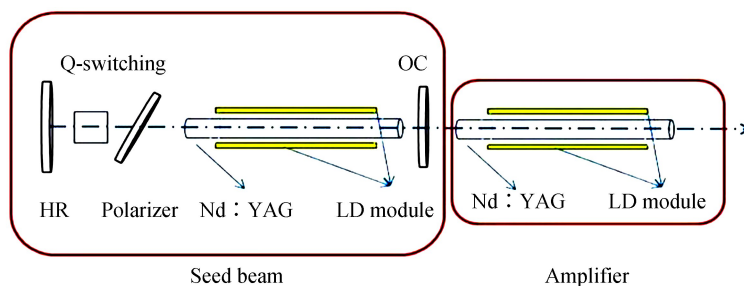
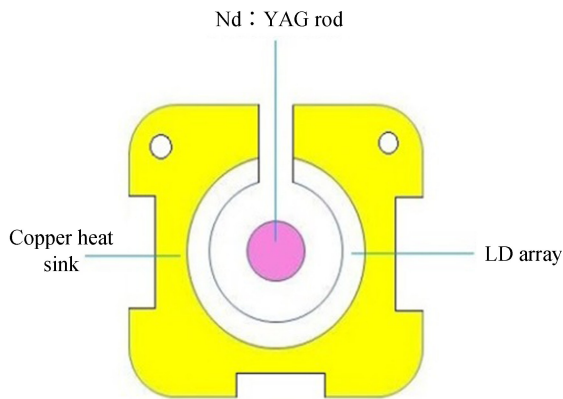
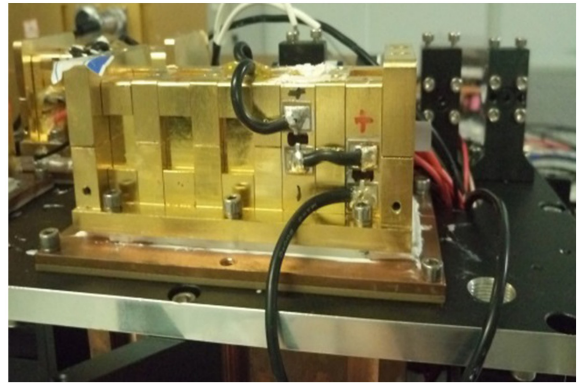


图 3 放大器实验装置示意图
Fig.3 Schematic diagram of experimental device

为提高放大系统的稳定性并缩小其体积, 将尺寸为 $\Phi 7.5 \text{ mm} \times 134 \text{ mm}$, Nd^{3+} 的掺杂浓度为 $1.1 \pm 0.1\%$ 的 Nd: YAG 晶体棒和 Bar 条集成到了一个模块上. 该晶体棒由铜夹具固定并散热, 晶体棒的四周为 48 个峰值功率为 100 W 的 Bar 条组成的 LD 阵列, 所有 Bar 条均匀排布在晶体棒的四周, 确保泵浦光的能量中心与晶体中心能够重合. 整个模块由五个相似的泵浦部件组成, 每个组件都有 48 个 Bar 条, 并将所有 Bar 条串接入外电路中. LD 阵列的工作电流范围是 0~120 A, 工作脉宽范围是 0~250 μs . 其中 LD 模块的横截面图及实物图如图 4.



(a) Cross-section of the LD module amplifier



(b) The appearance view of the LD module amplifier

图4 放大级 LD 模块的横截面及实物图

Fig.4 Cross-section and The appearance view of the LD module amplifier

为有效散热使放大器工作环境维持在一定温度范围,将所有 Bar 条直接焊接在了一块铜热沉上.在系统散热方面,LD 模块上粘贴有热敏电阻,对模块温度进行实时监控,使用三个最大功率为 66 W 的 TEC 冷却片进行半导体热电制冷并配合风扇,采用风冷却方式.由一个温控精度为 0.01 度的外部电源进行供电,对晶体工作环境进行严格的温度调制,确保晶体工作环境在 25℃.其中半导体制冷器(TEC)如图 5,铜热沉结构如图 6.

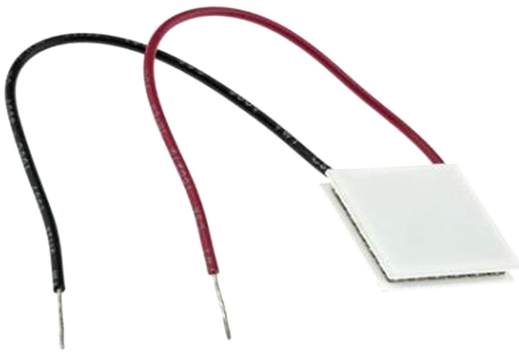


图5 半导体制冷器实物图

Fig.5 The appearance view of TEC

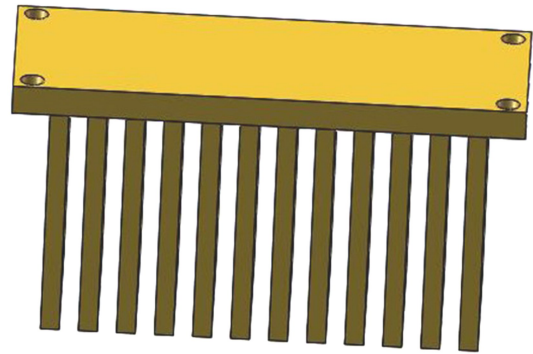
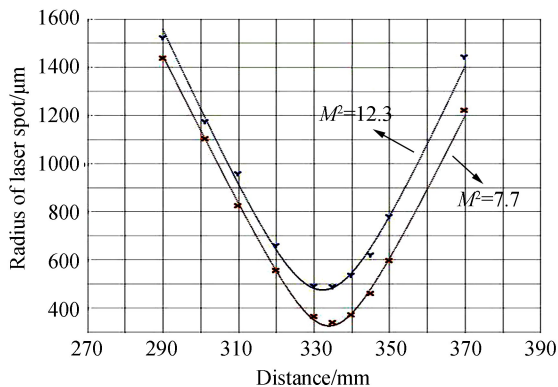


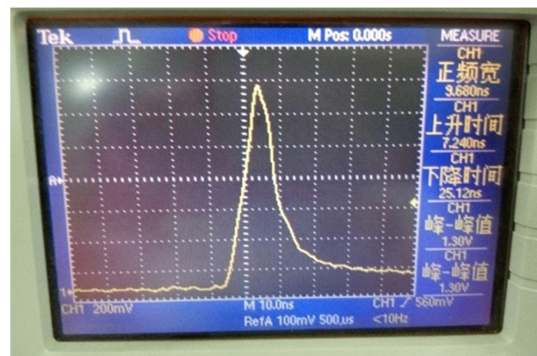
图6 模块散热结构图

Fig.6 The structure of module

放大级由种子光电源提供的同步信号进行泵浦的同步控制,种子光的光束质量及脉宽如图 7.将能量为 350 mJ 的激光脉冲种子光通过放大级模块后,测得种子光的能量衰减到 333 mJ,大约损耗为 5%.打开放大级的泵浦开关,将其频率设置为 10 Hz,泵浦脉宽为 200 μ s,通过改变泵浦电流,测得能量及脉宽随电流变化曲线如图 8.



(a) Measurement result of beam quality



(b) Measurement result of pulse width

图7 种子光光束质量及脉冲宽度

Fig.7 Measurement result of beam quality and pulse width

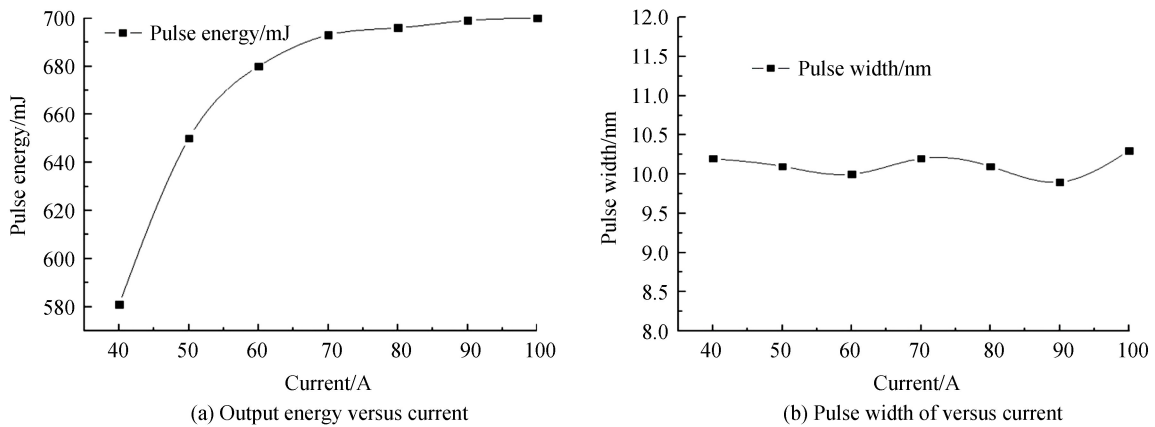


图 8 不同泵浦电流下单程放大激光的输出能量及脉宽
Fig.8 Output energy and pulse width of single-pass amplification versus pumping current

由图 8 中可以看出,当电流在 40 A~50 A 之间时,能量呈线性增长,当泵浦电流达到 60 A 之后,能量增长速度减慢,最终在 80 A 时趋近饱和.脉宽、光束质量与种子光类似,差异很小,单程放大的光斑如图 9.最终,在放大泵浦电流为 80 A 的时候得到了 700 mJ、10 ns 的 1 064 nm 激光输出.

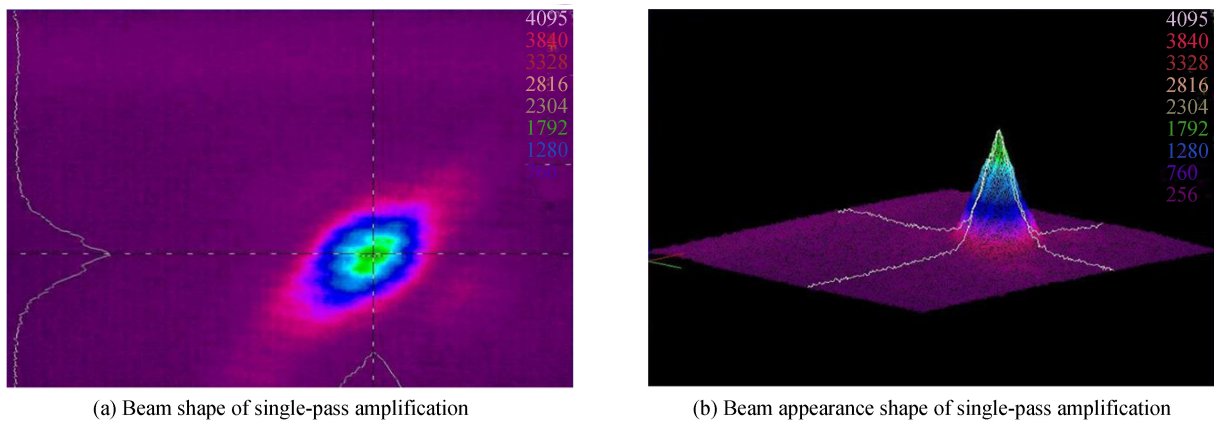


图 9 单程放大激光的光斑形状及外观
Fig.9 Beam shape and appearance of single-pass amplification

针对该无水冷 LD 侧面泵浦 Nd : YAG 固体激光放大器进行了稳定性测试,由图 10 可以看出,在泵浦电流为 80 A 的条件下,采用自然冷却的方式持续工作 3 h,每 20 min 记录一个输出光束能量值,发现其在 700~715 mJ 范围内振荡,稳定性为 2%,该激光放大器可实现持续稳定的工作状态.

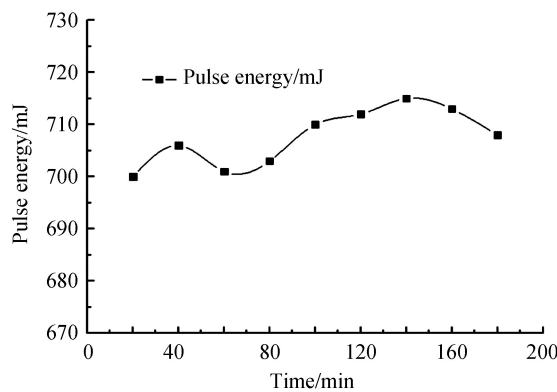


图 10 输出能量稳定性测试
Fig.10 The stability of output energy

3 结论

报道了一套 LD 侧面泵浦 Nd:YAG 无水冷固体激光放大器系统.通过激光放大器的泵浦系数 K 和损耗系数 α ,计算出激光放大器的储能、增益、提取效率和输出能量等参量的理论值,其中提取效率达到 76% 以上.在泵浦电流为 80 A 时,理论输出光能量最大可达 798 mJ.实验中对单程放大激光的输出特性进行了测试,在种子光能量为 350 mJ,脉宽为 10 ns 时,单程放大的泵浦电流为 80 A 的时候获得了最大脉冲能量为 700 mJ、脉冲宽度为 10 ns 的激光输出,其光束质量参数 M^2 分别是 7.9 和 12.4,同时激光器连续工作 3 个小时稳定度为 2%.与之前已发表的结果相比,该结论在能量、稳定性等方面更有优势.

通过实验可以看出在高能量的激光器放大过程中,单程放大已经足够提取出放大级当中存储的能量,并且提供了一种实现小型化、无水冷高能固体激光放大器的现实、有效的方法,也对同行研究高能量放大提供了一定参考意义.

参考文献

- [1] ZENDZIAN 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.
- [2] LIU Q, YAN X P, FU X. High power all-solid-state fourth harmonic generation of 266 nm at the pulse repetition rate of 100 kHz[J]. *Laser Physics Letters*, 2009, **6**(3): 203-206.
- [3] MA Yu-fei, LI Xu-dong, YU Xin, et al. High-repetition-rate and short-pulse-width electro-optical cavity-dumped YVO₄/Nd:GdVO₄ laser[J]. *Applied optics*, 2014, **53**(14): 3081-3084.
- [4] LI Lei, WANG Jian-lei, CHENG Xiao-jin, et al. Cryogenic Yb:YAG solid state pulsed laser amplifier[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, **42**(5): 1170-1173.
李磊,王建磊,程小劲,等.低温重复率 Yb:YAG 固体激光放大器[J]. *红外与激光工程*, 2013, **42**(5): 1170-1173.
- [5] XIAO Chong-li, WAN Chun-ming, LING Ming, et al. Side-pumped Nd:YAG pulsed laser with conduction cooling[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(4): 041400101-0414001014.
肖崇深,万春明,凌铭,等.传导冷却侧面抽运 Nd:YAG 脉冲激光器[J]. *光学学报*, 2011, **31**(4): 041400101-0414001014.
- [6] YANG Xiao-tao, MA Xiu-zhen, LIU You. High energy LD side-pumped Q-switched air cooling Nd:YAG laser[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(11): 11140501-11140504.
杨晓涛,马修真,刘友.高能量激光二极管侧面抽运风冷 Nd:YAG 脉冲激光器[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, **48**(11): 11140501-11140504.
- [7] NIE Yu-mei. LD side-pumped Nd:YAG laser amplifier[J]. *Journal of Chongqing University of Technology(Natural Science)*, 2017, **31**(3): 128-131.
聂喻梅.激光二极管侧面泵浦的 Nd:YAG 激光放大器[J]. *重庆理工大学学报(自然科学)*, 2017, **31**(3): 128-131.
- [8] LI Qiang, JIANG Meng-hua, LEI Hong, et al. High-power laser processing system for industry application[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, **35**(11): 1847-1852.
李强,姜梦华,雷劭,等.工业用大功率固体激光加工系统[J]. *中国激光*, 2008, **35**(11): 1847-1852.
- [9] DAVID H, SANG-GIL R, NIPUN M, et al. Nanoscale laser processing and diagnostics[J]. *Applied Physics*, 2009, **96**(2): 289-306.
- [10] WANG Jin-guo, SUN Zhe, JIANG Meng-hua, et al. Experimental study of nanosecond Nd:YAG rod double-pass amplification[J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2012, **23**(6): 1031-1034.
王金国,孙哲,姜梦华,等.1ns 脉宽激光 Nd:YAG 双通放大的实验研究[J]. *光电子激光*, 2012, **23**(6): 1031-1034.
- [11] DONG Jian, LIU Xue-sheng, SI Han-ying, et al. 350 mJ LD side pumped Q-switched Nd:YAG laser without water cooling[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, **43**(11): 110100501-110100507.
董剑,刘学胜,司汉英,等.350 mJ 侧面抽运 Nd:YAG 无水冷调 Q 激光器[J]. *中国激光*, 2016, **43**(11): 110100501-110100507.
- [12] DONG Jian, LIU Xue-sheng, PENG Chao, et al. High power diode-side-pumped Q-switched Nd:YAG solid-state laser with a thermoelectric[J]. *Applied Sciences-Basel*, 2015, **5**(4): 1837-1845.
- [13] CHRISTOPH W, SANDRO K, MATHIAS S, et al. Generation of 220 mJ nanosecond pulses at a 10 Hz repetition rate with excellent beam quality in a diode-pumped Yb:YAG MOPA system[J]. *Optics Letters*, 2008, **33**(10): 1111-1113.
- [14] ZHAO Hu, YAN Xin-jie, DENG Ming-fa, et al. All solid-state large energy Nd:YAG laser with electro-optical Q-switched pulse sequence[J]. *Laser & Infrared*, 2016, **46**(7): 819-822.
赵虎,延新杰,邓明发,等.大能量电光调 Q 脉冲序列输出全固态 Nd:YAG 激光器[J]. *激光与红外*, 2016, **46**(7): 819-822.
- [15] ZOU Yan, JIANG Meng-hua, HUI Yong-ling, et al. 425 mJ high beam quality specific orientation Nd:YAG amplifier[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, **44**(9): 33-39.
邹岩,姜梦华,惠勇凌,等.425 mJ 高光束质量特殊取向 Nd:YAG 激光放大器[J]. *中国激光*, 2017, **44**(9): 33-39.
- [16] 成精折.放大自发辐射对调 Q 固体激光器性能的影响研究[D].西安:西安电子科技大学,2011.