



·激光物理·

## 连续/脉冲复合体制高功率固体激光技术研究\*

刘 磊, 王文涛, 王 超, 王 钢, 刘 洋, 贾佑权, 李 宁, 吕坤鹏, 陈 露

(中国电子科技集团公司第十一研究所 固体激光技术重点实验室, 北京 100015)

**摘 要:** 常规高功率激光器以连续或者长脉冲方式工作, 与物质作用主要是依靠单一“加热”模式, 针对其对复杂目标作用能力有限的问题, 提出一种连续和脉冲激光同时输出, 脉宽、重频可调的新体制高功率激光技术, 激光放大链路以特殊时域模式工作, 即高重频脉冲与连续运转同时输出, 在重频 10 kHz 时, 实现输出功率 4800 W, 其中连续激光功率 3600 W, 脉冲激光功率 1200 W, 脉冲宽度为 3.6 ns; 在重频 100 kHz 时, 实现输出功率 4920 W, 其中连续激光功率 3100 W, 脉冲激光功率 1820 W, 脉冲宽度为 7 ns, 光束质量 4.8 倍衍射极限。

**关键词:** 连续/脉冲; 时域; 高功率激光; 激光放大链路; 高重频

中图分类号: TN241

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.210292

## High power solid state laser operating in continuous / pulse composite mode

Liu Lei, Wang Wentao, Wang Chao, Wang Gang, Liu Yang, Jia Youquan, Li Ning, Lv Kunpeng, Chen Lu

(Science and Technology on Solid-State Laser Laboratory, North China Research Institute of Electro Optics, Beijing 100015, China)

**Abstract:** Conventional high-power lasers operate in either continuous wave or long pulse mode. They interact with materials mainly through heating, whose effects are very limited when working with complex targets. We propose a novel high-power laser technology based on the combinations of continuous and pulse lasers with adjustable pulse widths and repetition frequencies. Such a “heating/shock” function can be used to improve the effect of high-power laser by aiming the best time-domain eigenvalues of melting and gasification of various target materials. We have achieved output power of 4800 W with 3600 W from continuous wave operation and 1200 W from pulsed operation with repetition rate of 10 kHz and pulse width of 3.6 ns. When the repetition rate is increased to 100 Hz, the resultant output power of the 7 ns pulsed laser is 1820 W, while the power of the continuous laser is 3100 W, and the beam quality is 4.8 times of the diffraction limit.

**Key words:** continuous / pulse, time domain, high power laser, laser amplification chain, high repetition frequency

经过 20 年的高速发展, 激光技术已经达到了很高的水平, 平均功率达到数十万 W 至 MW 级, 峰值功率达到 PW 级, 光束质量近衍射极限, 半导体激光器转换效率 50%~70%, 脉宽达 as 量级。最具代表性的激光器包括固体激光器、光纤激光器、半导体激光器, 各具特点。

激光技术的发展也极大的推动了激光在激光加工(切割、焊接、打标、打孔、3D 打印、涂覆、清洗等)、激光医疗等国民经济的各个领域的拓展。激光与材料相互作用是一门非常复杂的过程<sup>[1-3]</sup>, 几十年的研究表明, 除输出功率以外, 激光时域特征也至关重要, 连续或长脉冲的高功率激光常用于切割、焊接; 脉冲激光用于打标、打孔<sup>[4-6]</sup>。常规的激光器通常仅具有简单的时域特征, 如固定的脉冲宽度、波形, 因此通常一台激光器一般仅能满足一种应用需求, 本文提出一种可以同时工作在连续/脉冲模式下的高功率激光器方案, 使高功率激光器更具通用性。国内外未见连续/脉冲复合体制高功率激光技术的研究报道, 而高功率激光器一般为连续工作, 如: 德国物理技术研究所采用端面泵浦薄片激光器在 2008 年实现多模 16 kW 输出, 美国 Raytheon 公司在 2006 年用单个平面波导实现了

\* 收稿日期: 2021-07-15; 修订日期: 2021-11-25

基金项目: 中国电科创新基金项目

联系方式: 刘 磊, cetc11\_liulei@sina.com。

通信作者: 王文涛, wwntao@163.com。

16 kW 的多模激光输出, 2010 年前后, 诺格公司、达信公司也都实现了 100 kW 板条激光输出; 2016 年, 美国通用原子公司采用液体冷却薄片技术方案输出功率达到 150 kW; 2018 年美国洛克希德·马丁公司的光谱合成光纤激光器输出功率达到 60 kW<sup>[7-9]</sup>。

本文介绍一种以固体+光纤为信号光的连续/脉冲激光输出的技术方案, 可实现高平均功率和高峰值功率激光同时输出, 已获得平均功率数 kW, 峰值功率数 MW 的高功率激光输出, 该技术方案的激光输出功率还可继续提升, 在军事和工业领域应用将大有可为。

## 1 总体技术方案

本文设计的连续/脉冲复合高功率激光器采用主振荡功率放大 (MOPA) 结构(如图 1 所示), 由种子主振荡器、隔离器、预放大器、主放大器等组成。主振荡器由两台激光器偏振合成共同组成, 一路激光器采用光纤激光器, 最大可输出 200 W 连续激光, 另一路是电光调 Q 固体激光器, 可实现 mJ 级激光输出, 两路激光器通过偏振片合成一路, 然后经过隔离器, 经过柱透镜 CL1 和 CL2 整形, 匹配板条放大器的端口, 以角度 1 注入板条放大器 1, 板条放大器 1 放大后激光通过 L1 和 L2 像传递到板条放大器 2, 板条放大器 2 输出激光经过 L3 和 L4 像传递后以角度 2 再次注入板条放大器 2, 板条放大器 2 双程放大后经过 L5 和 L6 像传递以角度 2 注回板条放大器 1, 这样就实现两个放大器的角度复用的双程放大, 最后放大的激光从板条放大器 1 的角度 2 输出。

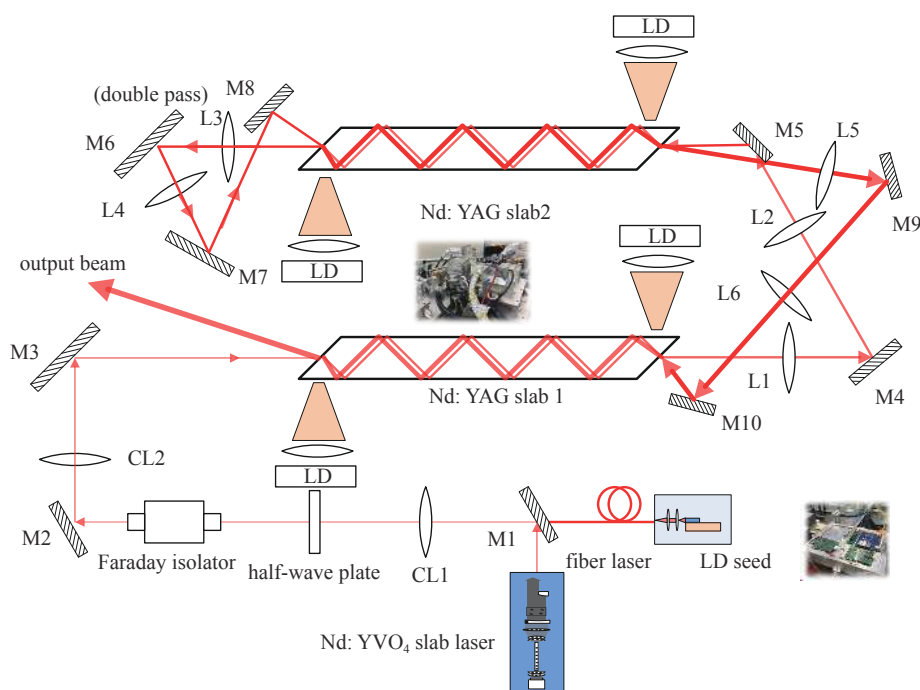


Fig. 1 5 kW continuous / pulse high power laser experimental device structure

图 1 5 kW 连续/脉冲高功率激光器实验装置示意图

板条放大器采用端面泵浦传导冷却结构 (CCEPS), 板条增益介质尺寸为  $120\text{ mm} \times 28\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ , 掺杂浓度为 0.1%, 掺杂长度 100 mm, 双端各键合 10 mm 长的没有掺杂的 YAG, 每一端采用 4 个 30 bar 的 LD stack 做为泵浦源, 每一个 LD stack 由 30 个最高平均功率 100 W bar 条组成, 泵浦波长 808 nm, 泵浦功率最大 3000 W, 泵浦光经过整形压缩后由板条端面注入, 激光通过不同的角度实现激光放大, 激光入射角分别为  $21.3^\circ$  和  $23.8^\circ$ 。

## 2 放大链路增益计算

连续/脉冲复合体制激光放大过程与传统不同, 结合了脉冲放大和连续放大各个过程, 在这一过程中, 增益系数不是一个与时间无关的常量, 而是随时间变化的变量, 而且这一变量同时受到连续激光和脉冲激光光强影响, 是一个非常复杂的参数。为了了解这一个过程, 我们首先从脉冲放大和连续放大两个方面进行分析。

### (1) 连续放大增益过程

放大器链路的增益提取设计主要目的是使激光放大器工作在饱和增益下。

在板条激光放大器的设计中, 小信号增益以及损耗是最重要的参数。它反映了光信号入射增益介质之前增益

介质内的储能情况。通常情况下,用增益系数  $g$  来表示信号光经过单位长度后的增长率,假设在  $z$  处的信号光强为  $I(z)$ ,则在  $z+dz$  处的光强就是  $I(z)+dI(z)$ ,则将增益系数定义为

$$g = \frac{dI(z)}{I(z)dz} \quad (1)$$

增益  $g$  的变化反映了增益介质中反转粒子数密度的变化。光信号在放大的过程中,增益介质  $g$  的变化受到输入泵浦功率大小的影响,输入的泵浦光使得发生反转的粒子数越多,信号光就能够得到更多的功率。

定义小信号增益  $g_0$  降低一半时候的传输光强为  $I_s$ ,如果工作物质是 Nd:YAG,输出波长为 1064 nm,则有

$$I_s = \frac{h\nu}{\sigma_{21}\tau} = 2795 \text{ W/cm}^2 \quad (2)$$

式中:  $\sigma_{21} = 2.8 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$  为受激发射截面,能级寿命  $\tau = 0.23 \times 10^{-3} \text{ s}$ ,  $h$  为普朗克常量,  $\nu$  为激光频率。

如果信号光强度远小于  $I_s$ ,此时增益系数为小信号增益系数

$$g_0 = \Delta n_0 \sigma_{21} = \eta_Q \eta_S \eta_B P_{ab} / I_s V = \eta P_{ab} / I_s V \quad (3)$$

式中:  $\eta_Q, \eta_S, \eta_B$  分别是量子效率、斯托克斯效率、空间交叠效率,如果泵浦光 808 nm,则前两项效率乘积通常取 0.7,  $\eta_B$  根据实际情况取值,  $P_{ab}$  为吸收的泵浦功率,  $V$  为吸收体积。

根据稳态放大公式

$$\frac{dI(z)}{dz} = g(z)I(z) - \alpha' I(z) \quad (4)$$

式中:  $g(z) = \frac{g_0}{1 + I(z)/I_s}$ ,  $\alpha'$  是损耗系数,与式(3)一起代入式(4)得

$$\frac{dI(z)}{dz} = \frac{\eta P_{ab} I(z)}{(I_s + I(z))V} - \alpha I(z) \quad (5)$$

在端面泵浦激光放大器中,由于泵浦光沿光轴方向不是均匀分布的,而是指数衰减的

$$\frac{P_{ab}(z)}{V} = \frac{P_0 e^{-\alpha z} (1 - e^{-\alpha dz})}{S dz} \quad (6)$$

式中:  $S$  为增益介质横截面面积;  $\alpha$  是泵浦光吸收系数,代入式(3)可以得到  $g_0(z)$  的表达式。

对双端泵浦的单程板条激光放大器的小信号增益系数进行数值模拟计算如图2所示。分别计算了不同泵浦

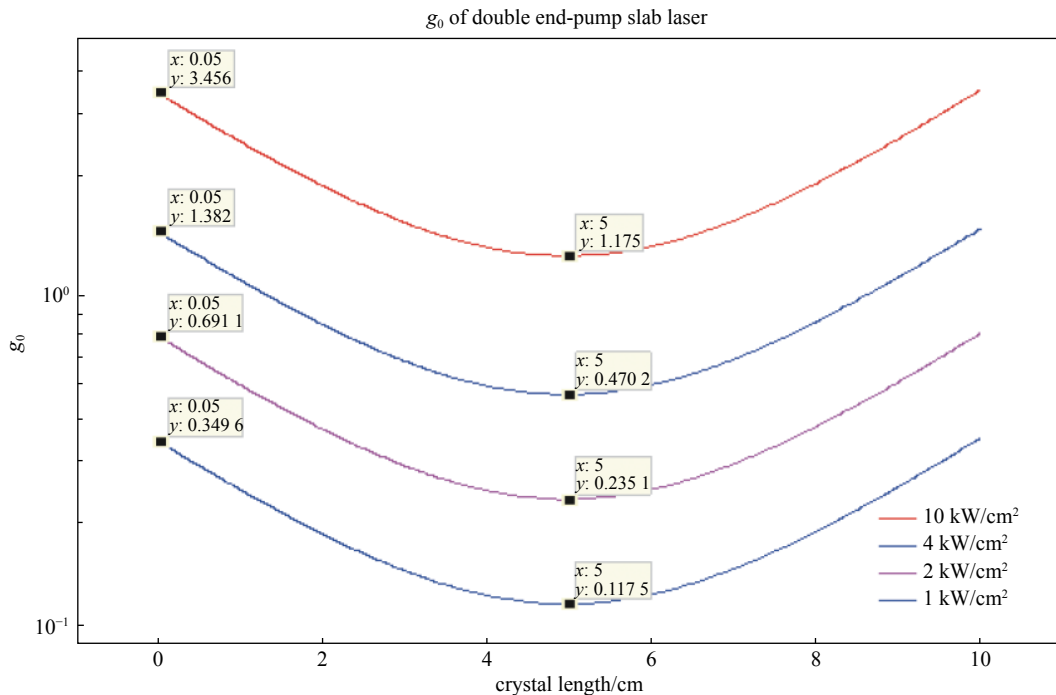


Fig. 2 Small signal gain coefficient varies with length under different pump power

图2 不同泵浦光通量下小信号增益系数随长度的变化

功率通量下,小信号增益系数随长度的变化。从图中可以看出,小信号增益系数随着泵浦功率的增加而增大,对于相同泵浦功率通量,小信号增益系数呈现出两端大中间小的结果,这是由于双端注入时,随着泵浦光传输而被吸收,导致增益介质中间的泵浦功率密度低于端头。所以,增强板条的泵浦注入功率将有利于提高小信号增益系数,从而提高放大器的输出功率。

在激光多程放大过程中,前一程放大输出功率即为下一程输入功率,增益介质内的反转粒子数由于前一程激光提取能量后造成了部分增益损耗,其余部分不变,多次计算超越方程(4),就可以计算得到双程放大后的激光输出功率,当信号光功率  $I_0$  为  $200 \text{ W/cm}^2$  时,两级板条放大器注入功率均为  $10 \text{ kW}$ ,双程放大输出激光功率可以达到  $5.4 \text{ kW}$ 。

(2) 脉冲放大增益过程

设放大器的运行时间比泵浦速率  $W_p$  和自发发射时间  $\tau_f$  快,则有  $t_p \ll \tau_f$ ,  $t_p$  是通过放大增益介质的脉冲宽度。

信号光入射到长度为  $L$  的放大器,假设输入放大器的矩形脉冲,其持续时间为  $t_p$ ,初始光子密度为  $\phi_0$ ,则光子密度解为

$$\frac{\phi(x,t)}{\phi_0} = \left\{ 1 - [1 - \exp(-\sigma n x)] \exp \left[ -\gamma \sigma \phi_0 \left( c \left( t - \frac{x}{c} \right) \right) \right] \right\}^{-1} \quad (7)$$

式中:  $n$  为反转粒子数密度,设  $t = 0$  时,材料内的  $n$  是均匀的,当光束通过长度为  $x = l$  的放大器时,能量增益为

$$G = \frac{1}{c \sigma \gamma \phi_0 t_p} \ln \{ 1 + [\exp(\gamma \sigma \phi_0 \tau_0 c) - 1] \exp(n \sigma l) \} \quad (8)$$

单位面积的输入能量可表示为

$$E_{in} = c \phi_0 t_p h \nu \quad (9)$$

饱和能量密度为

$$E_s = \frac{h \nu}{\gamma \sigma} = \frac{E_{gt}}{\gamma g_0} \quad (10)$$

式中:  $E_{st} = n h \nu$ , 表示单位体积存储的能量;  $g_0 = n \sigma$  表示小信号的增益系数。在四能级系统中,  $\gamma = 1$  放大器内单位面积储能为

$$E_{st} = g_0 E_s \quad (11)$$

输出激光能量为

$$E_1 = E_s \ln \left\{ 1 + \left[ \exp \left( \frac{E_{in}}{E_s} - 1 \right) \right] \exp(g_0 l) \right\} \quad (12)$$

种子源发出的激光  $20 \text{ W}$ , 脉冲能量  $2 \text{ mJ}$ , 重复频率  $10 \text{ kHz}$ , 经过整形后泵浦光口径为  $27 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ , 采用端面泵浦方式, 设泵浦光平均半径也为  $27 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ , 连续泵浦, 增益介质为长度  $100 \text{ mm}$ , 掺杂  $0.1\%$  的 Nd:YAG 晶体, 根据公式(13), 注入  $9000 \text{ W}$  的泵浦光, 小信号增益系数  $g_0$  约  $0.2/\text{cm}^2$ , 单程增益  $7.4$ , 单程输出功率可达  $148 \text{ W}$ , 为了提高激光放大模块的整体效率, 需要采用双程放大的方式。

下面推导双程放大方程(计算模型如图3所示):

双程放大器的输出能量密度  $E_2$  由式(15)求出

$$E_2 = E_1 \ln \left\{ 1 + \left[ \exp \left( \frac{E_1}{E_s} - 1 \right) \right] \exp(g'_0 l) \right\} \quad (13)$$

式中

$$g'_0 = (1 - \eta_i) g_0 \quad (14)$$

第一次放大后的输出能量  $E_1$  作为返程的输入能量, 返程的增益变小了, 是因为在第一次放大过程中的一部分增益已经被提取出来。同样的  $20 \text{ W}$  信号光注入, 经过双程放大的激光链路, 激光输出功率可达  $880 \text{ W}$ 。

(3) 连续/脉冲激光放大增益过程

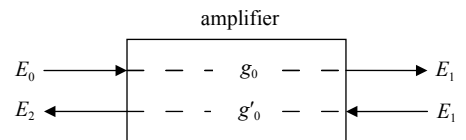


Fig. 3 Calculation model of one-way and two-way output energy density

图3 单程和双程输出能量密度计算模型

从上面两种增益过程分析可以看出,连续放大器中激光提取与泵浦在时间上保持平衡,空间上由于增益介质各处泵浦密度不同,增益系数不同,而且随着穿过的增益区长度增加,激光功率不断增加,因此可以说,连续激光放大中的上能级粒子数在空域分布上是变化的,但每一点在时域上一般是不变的,窄脉冲放大过程由于脉冲周期较短,在很短的时间内将前一段的泵浦激光积累的上能级粒子一次性提取,所以使上能级粒子数在时间上也产生突变。

在连续/脉冲模式下,小信号增益系数是一个与时间  $t$  相关的变量,不再具有稳态放大的过程,由于脉冲激光的大量消耗,在每个周期(两个脉冲间隔)开始时,上能级粒子数处于低值,随着时间增加,上能级粒子数增加,如果周期足够长,上能级粒子数会平衡某个位置。周期长度小于上能级寿命时,公式(3)应该为

$$\frac{dg_0(t)}{dt} = \frac{d\Delta n_0(t)}{dt} \sigma_{21} = \frac{\eta P_{ab}}{I_s \cdot V \cdot \tau} \quad (15)$$

在连续/脉冲体制中,在一个周期内,先是泵浦激光将激活粒子泵浦到上能级,在这过程中,连续激光的提取可以理解为上能级粒子损耗,这一损耗也是逐渐增加的,当脉冲激光到来时,在强激光光强下,上能级积累的粒子数快速消耗,下降到一个较低水平,然后进入下一个周期。根据随时间变化的增益系数得到连续/脉冲时的输出激光波形如图4所示,连续激光在周期内功率逐渐上升,最高值时脉冲激光到来后,在降低到最低值,在时域上是波形结构,当然,如果脉冲激光周期较长,那么在一个周期内,会有一平衡段。利用公式(5),(16)和(17)可以得到如图4所示的连续/脉冲复合激光输出功率曲线。

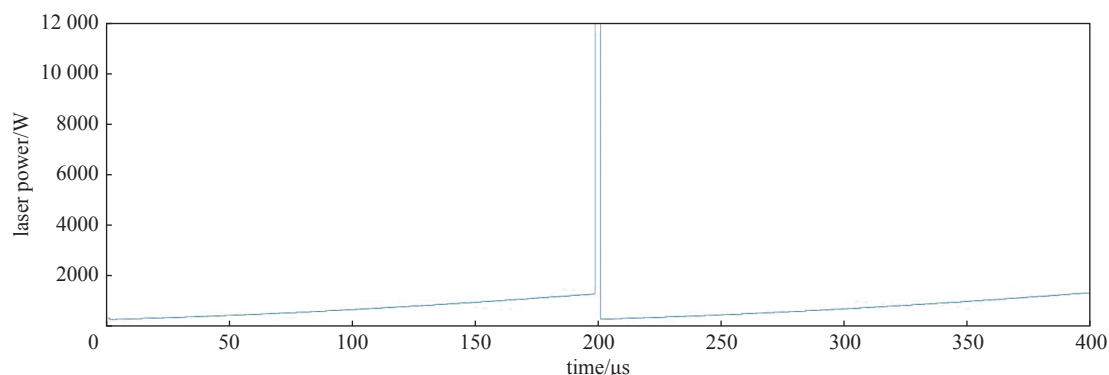


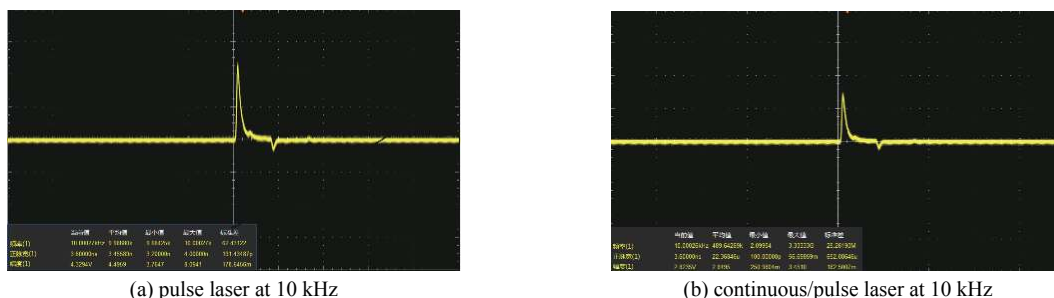
Fig. 4 Continuous / pulse composite laser output

图4 连续/脉冲复合激光输出时功率变化情况

### 3 实验研究

建立如图1所示的实验装置开展实验研究,实验结果如图5~6所示,首先将脉冲固体信号源输出频率调至10 kHz,此时的输出功率为21 W,单脉冲能量2.1 mJ,开启两个放大器后,纯脉冲输出功率达到1800 W,脉冲宽度保持不变,为3.6 ns,然后再单独开启连续光纤信号源,输出功率调至101 W,开启两级放大后,输出功率达到4010 W,开启连续/脉冲模式,实现输出功率4800 W,其中连续激光功率3600 W,脉冲激光功率1200 W。

将脉冲固体信号源输出频率调至100 kHz时,输出功率为55 W,单脉冲能量0.55 mJ,开启两个放大器后,纯脉冲输出功率达到2400 W,脉冲宽度为6.8 ns,100 kHz时,开启连续/脉冲模式,输出功率达到4920 W,其中连续激光功率3100 W,脉冲激光功率1820 W,脉冲宽度为7 ns,光束质量4.8倍衍射极限,输出功率稳定性为3%@5 min,脉

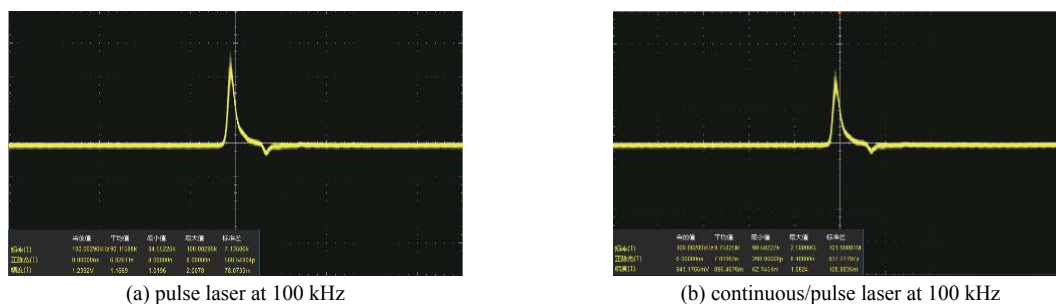


(a) pulse laser at 10 kHz

(b) continuous/pulse laser at 10 kHz

Fig. 5 Laser pulse in pulse and continuous / pulse operation at 10 kHz

图5 10 kHz时纯脉冲与连续/脉冲的激光脉冲



(a) pulse laser at 100 kHz

(b) continuous/pulse laser at 100 kHz

Fig. 6 Laser pulse in pulse and continuous / pulse operation at 100 kHz

图 6 100 kHz 时纯脉冲与连续/脉冲的激光脉冲

冲宽度稳定度 2%@5 min, 与单一模式工作时相同。虽然脉冲激光频率 10 kHz 与 100 kHz 相比, 脉冲部分激光功率更低, 但是由于脉冲峰值功率更高, 可具有更佳的作用效果。

值得一提的是, 这种连续/脉冲激光工作的激光器无法直接测量其中的连续和脉冲激光功率, 因此首先测量脉冲激光能量和示波器显示的脉冲峰值功率, 然后再开启连续/脉冲模式, 利用峰值功率比等于激光能量比推算连续/脉冲激光中的脉冲激光功率。

## 4 结论

本文介绍了一种连续/脉冲激光同时输出的高功率激光器, 在 10 kHz 时, 平均输出功率达到 4.8 kW, 峰值功率 33 MW, 脉冲激光占比达到 25%; 在 100 kHz 时, 平均输出功率达到近 5 kW, 峰值功率 2.6 MW, 脉冲激光占比达到 36.5%。

希望通过本文的工作, 在激光加工、医疗、武器领域, 建立一个能够针对不同作用目的, 寻找最佳效能的、更加灵活可控的工作方式。更进一步, 结合探测技术实现智能工作。可以预期的是, 这种连续/脉冲高功率激光器将成为一个新的发展方向, 对未来激光器的应用产生积极性影响。

## 参考文献:

- [1] Kerse C, Kalaycıoğlu H, Elahi P, et al. Ablation-cooled material removal with ultrafast bursts of pulses[J]. *Nature*, 2016, 537(7618): 84-88.
- [2] Liang Liang, Yuan Jiandong, Lin Guozhi. Effect of the scanning speed on the microgroove formation regime in nanosecond-pulsed laser scanning ablation of cermet[J]. *Int J Adv Manuf Technol*, 2020, 107(1/2): 97-107.
- [3] Fazeli R. Enhanced X-ray emission from laser-produced gold plasma by double pulses irradiation of nano-porous targets[J]. *Phys Lett A*, 2017, 381(5): 467-471.
- [4] Schmidt B E, Hage A, Mans T, et al. Highly stable, 54 mJ Yb-InnoSlab laser platform at 0.5 kW average power[J]. *Opt Express*, 2017, 25(15): 17549-17555.
- [5] Reagan B A, Baumgarten C, Jankowska E, et al. Scaling diode-pumped, high energy picosecond lasers to kilowatt average powers[J]. *High Power Laser Sci Eng*, 2018, 6: 01000e11.
- [6] Sun L C, Liu T H, Fu X, et al. 1.57 times diffraction-limit high-energy laser based on a Nd: YAG slab amplifier and an adaptive optics system[J]. *Chin Opt Lett*, 2019, 17: 051403.
- [7] W. 克希耐尔. 固体激光工程[M]. 孙文, 江泽文, 程国祥, 译. 北京: 科学出版社, 2002. (Koechner W. Solid-state laser engineering[M]. Sun Wen, Jiang Zewen, Cheng Guoxiang, trans. Beijing: Science Press, 2002)
- [8] 周炳琨, 高以智, 陈侗嵘, 等. 激光原理[M]. 4版. 北京: 国防工业出版社, 2000. (Zhou Bingkun, Gao Yizhi, Chen Tirong, et al. The principle of laser[M]. 4th edition. Beijing: National Defense Industry Press, 2000.)
- [9] Klimek D E, Mandl A. Nd: YAG ceramic ThinZag high-power laser development[M]//Injeyan H, Goodno G D. High-power laser handbook. New York: McGraw-Hill, 2011: 207-223.