

# 机载激光雷达用高重复频率亚纳秒双波长全固态激光器

陆俊<sup>1\*\*</sup>, 丁建永<sup>1</sup>, 贺岩<sup>2</sup>, 于广礼<sup>1</sup>, 杨彬<sup>1</sup>, 姚红权<sup>1</sup>, 周军<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>南京先进激光技术研究院, 江苏 南京 210000;

<sup>2</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800;

**摘要** 研究了晶体材料、腔长、抽运功率等对调 Q 脉冲宽度的影响, 研制了一台基于 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体的高效率、结构紧凑的双波长激光器。该激光系统采用主振荡功率放大(MOPA)结构, 振荡级产生重复频率为 5 kHz、脉冲能量为 400 μJ、脉冲宽度为 1.1 ns 的 1064 nm 基横模激光, 通过 878.6 nm 零线抽运的 Nd:YVO<sub>4</sub> 级联放大器, 脉冲能量和脉冲宽度变为 2.72 mJ 和 1.03 ns; 通过三硼酸锂(LBO)晶体腔外倍频, 获得了脉冲能量为 1.54 mJ, 倍频效率大于 56%, 激光脉冲宽度小于 910 ps, 峰值功率为 1.7 MW 的 532 nm 绿光激光输出。

**关键词** 激光器; 亚纳秒; 电光调 Q; 激光放大器; 双波长

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.082804

## High Repetition Rate Sub-Nanosecond Dual-Wavelength Solid-State Laser for Airborne Lidar

Lu Jun<sup>1\*\*</sup>, Ding Jianyong<sup>1</sup>, He Yan<sup>2</sup>, Yu Guangli<sup>1</sup>, Yang Bin<sup>1</sup>, Yao Hongquan<sup>1</sup>, Zhou Jun<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Nanjing Institute of Advanced Laser Technology, Nanjing, Jiangsu 210000, China;

<sup>2</sup>Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

**Abstract** The effect of crystal material, cavity length, pump power and other parameters on the width of Q-switched pulse is investigated, and a compact dual-wavelength laser with high efficiency based on Nd:YVO<sub>4</sub> crystal is developed. Master oscillator power amplifier (MOPA) structure is used in the laser system. A transverse fundamental mode of 1064 nm pulse with repetition frequency of 5 kHz, pulse energy of 400 μJ and pulse width of 1.1 ns is generated in the oscillator. Through the 878.6 nm zero-line pumped cascade amplifier, pulse energy and pulse duration turn to 2.72 mJ and 1.03 ns, respectively. A 532 nm green laser pulse with energy of 1.54 mJ, second harmonic generation efficiency larger than 56%, pulse duration shorter than 910 ps and peak power of 1.7 MW is obtained through the external frequency doubling by lithium triborate (LBO) crystal.

**Key words** lasers; sub-nanosecond; electro-optics Q-switch; laser amplifier; dual-wavelength

**OCIS codes** 140.3460; 140.5960; 140.3580

## 1 引言

亚纳秒窄脉冲宽度大能量调 Q 固体激光器在激光加工、非线性光学、材料制备、激光测距、激光三维扫描等领域具有广泛应用<sup>[1-7]</sup>。为了激发特定的非线性光学过程, 脉冲需要达到较高的光强, 而很多材料的损伤阈值正比于  $\sqrt{\tau_p}$  ( $\tau_p$  为激光脉冲宽度),

因此研究人员更青睐于使用短脉冲激光<sup>[8]</sup>。在激光测距领域, 短脉冲使得测量误差更小, 从而带来更高的测量精度。当使用亚纳秒激光进行测距以及三维扫描时, 它可以高精度地再现目标的位置和轮廓信息。另外, 相比于皮秒和飞秒激光器, 亚纳秒激光器具有更长的等离子体作用时间, 可以完成加工材料的溶解, 从而带来更高的加工效率<sup>[9]</sup>。可见, 亚纳秒

收稿日期: 2018-03-15; 修回日期: 2018-04-16; 录用日期: 2018-04-23

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(2013YQ120343)

\* E-mail: joe427@siom.ac.cn; \*\* E-mail: junlu@siom.ac.cn

短脉冲激光器具有广阔的应用前景。

2002年, Forget等<sup>[10]</sup>将重复频率为28 kHz、单脉冲能量为3.9  $\mu\text{J}$ 、脉冲宽度为800 ps的调Q种子激光经Nd:YVO<sub>4</sub>六通放大后,获得了平均功率为5.7 W的激光脉冲输出。2011年, Nghia等<sup>[11]</sup>采用半导体可饱和吸收镜(SESAM)锁模技术获得了重复频率为2.25 MHz、平均功率为275 mW和脉冲宽度为22 ns的脉冲输出。2012年, 王金国等<sup>[12]</sup>将主振荡级输出的单脉冲能量为160  $\mu\text{J}$ 、重复频率为5 Hz、脉冲宽度为964 ps的种子光通过Nd:YAG板条进行双程放大,获得了单脉冲能量为88 mJ的脉冲输出。2018年, Guo等<sup>[13]</sup>使用液氮冷却的Yb:YAG微芯片被动调Q技术,获得了单脉冲能量为12.1 mJ、重复频率为10 Hz、脉冲宽度为3.3 ns的脉冲输出。较高的重复频率会降低单脉冲的能量,较高的单脉冲能量会限制脉冲的重复频率,而微芯片调Q激光器会引入延时抖动较大的问题。对于一些机载激光雷达三维扫描方面的应用,需要光源进行快速扫描,并需要较高的能量,以保证较长的扫描距离,而较大的脉冲延时抖动会直接影响测量的结果,因此如何在相对较高的重复频率下获得具有较高单脉冲能量、高稳定性、光束质量接近衍射极限的激光脉冲成为了该方向的研究热点。在以往的水下探测系统中,激光光源主要采用半导体侧面抽运电光(EO)调Q激光器,此类激光器的重复频率可以达到1 kHz,输出能量可以达到数十毫焦,但此类激光器的光束质量较差、系统光光效率低,整机功耗及体积较大,对飞行载体有较高要求;同时,此类激光器的脉冲宽度一般在10 ns左右,在其他条件相同时的测距精度与1 ns激光脉冲相比差一个数量级。

本文采用Nd:YVO<sub>4</sub>晶体的主振荡功率放大(MOPA)方案,将主振荡级输出的重复频率为5 kHz、脉冲能量为400  $\mu\text{J}$ 、脉冲宽度为1.1 ns的1064 nm基横模种子光进行级联放大,放大后的光脉冲能量增至2.72 mJ,脉冲宽度变为1.03 ns。之

后采用三硼酸锂(LBO)晶体对1064 nm激光脉冲进行腔外倍频(SHG),倍频后获得了单脉冲能量为1.54 mJ、激光脉冲宽度小于910 ps和峰值功率为1.7 MW的532 nm绿光输出。该激光器采用1064 nm和532 nm双波长输出,用于国产机载双频激光雷达,1064 nm激光主要用于探测海面回波,532 nm的倍频光在海水中的衰减较小,故可用于探测海底的回波,对两个回波进行处理即可实现对海底地形的测绘。

## 2 激光器的结构

考虑到激光器对脉冲宽度、能量以及光束质量的需求,振荡级采用808 nm抽运,级联放大器采用878.6 nm零线抽运方案。振荡级采用808 nm抽运可以缩短增益晶体的长度,以获得较窄的调Q脉冲输出;级联放大器采用878.6 nm的零线抽运,可以减少晶体中热的产生,从而获得具有较高光束质量的脉冲输出。

### 2.1 主振荡级

图1是激光主振荡器光路图,采用半导体端面抽运光纤耦合的方案。为了补偿激光晶体的热效应,谐振腔采用平凸腔结构,后腔镜M1的曲率半径为450 mm,谐振腔的几何长度为40 mm,输出耦合镜M2的透射率为75%。主振荡器抽运激光二极管(LD)中心波长为808 nm,光纤芯径为200  $\mu\text{m}$ ,采用脉冲方式抽运,抽运脉冲宽度为100  $\mu\text{s}$ ,重复频率为5 kHz,最大峰值功率为30 W。为减小聚焦过程中引入的球差,抽运耦合系统选用一对非球面透镜作为准直透镜。为获得亚纳秒量级的调Q脉冲输出,实验中选用受激辐射截面和上能级寿命乘积较大的Nd:YVO<sub>4</sub>晶体作为增益介质,具体分析见下文。由实验可知掺杂原子数分数为0.5%的Nd:YVO<sub>4</sub>晶体可以在20 W连续抽运条件下安全工作,考虑抽运光的充分吸收以及窄脉冲宽度的需求,最终选择尺寸为3 mm $\times$ 3 mm $\times$ 5 mm、掺杂原子数分数为0.5%,切割方向为a-cut的Nd:YVO<sub>4</sub>

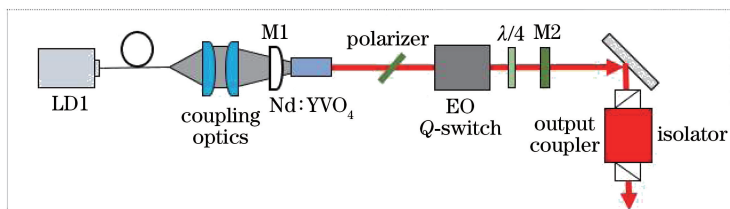


图1 MOPA光学原理图

Fig. 1 Optical schematic of MOPA

晶体作为增益晶体。另外,为了进一步提高高重复频率下调Q输出的脉冲稳定性,实验中选用偏硼酸钡(BBO)晶体作为电光晶体。为了避免产生寄生振荡以及回光对主振荡器的影响,在主振荡器中直接加入隔离器,隔离度大于30 dB。

## 2.2 Nd:YVO<sub>4</sub>级联放大器

图2是Nd:YVO<sub>4</sub>级联放大器的光学原理图,激光放大单元采用两级端泵单通放大构型,抽运LD均采用恩耐公司中心波长为878.6 nm、带有体布拉格光栅(VBG)波长锁定的光纤耦合输出半导体激光器。878.6 nm抽运对应于Nd:YVO<sub>4</sub>晶体的零线抽运过程,该过程将处于基态的粒子直接抽运到激光上能级,相对于808 nm抽运来说,避免了晶体中粒子从高能级向激光上能级的热弛豫过程,从而减少了热量的产生。抽运LD的波长温度漂移系数为0.01 nm/°C,激光器的光学头部及放大级抽运LD采用水冷方式控温,激光器的工作环境温度为0~40 °C,实验中冷却水的温度变化范围为20~26 °C,对输出激光功率的影响很小。为降低结露风险,水温设定为26 °C。两个LD串联供电,采用脉冲方式工作,抽运脉冲宽度为100 μs,单个LD的峰值功率为120 W,光纤芯径为400 μm。级联放大器中使用的增益介质均为Nd:YVO<sub>4</sub>晶体,掺杂原子数分数为0.35%。为了兼顾激光放大的提取效率、激光晶体的热效应以及信号光与抽运光斑的模式匹配,通过实验优化抽运光斑与信号光斑的参数,最后确定一级放大激光和抽运光斑的直径分别为0.95 mm和1.10 mm,二级放大激光和抽运光斑的直径分别为1.10 mm和1.20 mm。

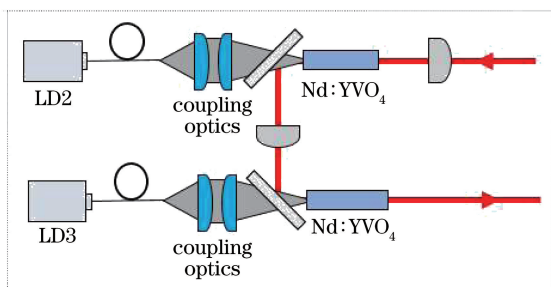


图2 Nd:YVO<sub>4</sub>级联放大器光学原理图

Fig. 2 Optical schematic of Nd:YVO<sub>4</sub> cascade amplifier

## 2.3 倍频与准直

图3为倍频及扩束模块的光学原理图。常用的倍频晶体主要有磷酸氧钛钾(KTP)、LBO、周期性极化铌酸锂(PPLN)等。KTP晶体存在灰迹效应,

不适用于高功率连续激光或高重复频率激光;PPLN晶体具有较高的非线性系数,更适合中低功率激光倍频。在此,选用损伤阈值及非线性系数相对较高的LBO晶体作为倍频晶体。LBO晶体采用I类相位匹配,切割角度为90°,方位角 $\varphi=10.8^\circ$ ,尺寸为3 mm×3 mm×18 mm,两端面镀有1064 nm和532 nm的增透膜。扩束部分采用放大倍数为8的双波长增透扩束镜组,扩束后532 nm的激光发散角(全角)优于0.2 mrad。

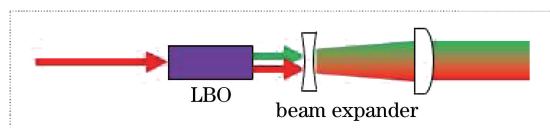


图3 倍频与扩束模块原理图

Fig. 3 Optical schematic of SHG and beam expander

## 3 分析与讨论

### 3.1 小信号增益

对于端面抽运构型的激光系统而言,小信号增益系数 $g_0 = nW\tau_f\sigma_{21}$  ( $n$ 为介质折射率, $W$ 为抽运速率, $\sigma_{21}$ 为受激辐射截面, $\tau_f$ 为激光晶体掺杂粒子的上能级寿命)。 $g_0$ 主要是由抽运速率和增益介质的 $\sigma_{21}\tau_f$ 乘积决定的,小信号增益系数具体可以表示为<sup>[14]</sup>

$$g_0 = \{ \sigma_{21} \tau_f \gamma \eta_i \eta_Q \eta_S \eta_B \eta_{ASE} [1 - \exp(-\alpha l)] \cdot [1 - \exp(-\tau_p / \tau_f)] P_p / h\nu_p \pi \omega_p^2 l \}, \quad (1)$$

式中: $l$ 为增益介质的长度; $h$ 为普朗克常数; $\gamma$ 为与能级结构相关的系数,在四能级系统中, $\gamma=1$ ,在非简并的三能级系统中, $\gamma=2$ <sup>[14]</sup>。 $\eta_i$ 、 $\eta_Q$ 、 $\eta_S$ 、 $\eta_B$ 、 $\eta_{ASE}$ 分别为辐射传递效率、量子效率、斯托克斯因子、光斑重叠效率以及放大的受激辐射对应的效率; $\alpha$ 为晶体对抽运光的吸收系数; $P_p$ 为抽运激光功率; $\nu_p$ 为抽运光频率; $\omega_p$ 为抽运光斑半径。

### 3.2 脉冲宽度

在主动调Q构型中,根据Degnan<sup>[15]</sup>的调Q理论,输出的调Q脉冲宽度 $t_p$ 可表示为

$$t_p = \frac{t_r}{L} \left( \frac{\ln z}{z} \right) \left\{ 1 - \frac{z-1}{z \ln z} \left[ 1 + \ln \left( \frac{z \ln z}{z-1} \right) \right] \right\}^{-1}, \quad (2)$$

式中: $L$ 为腔内往返损耗;腔周期 $t_r = \frac{2l_r}{c}$ ,表示脉冲在腔内往返一次所需的时间; $l_r$ 为谐振腔的光学长度; $c$ 为真空中的光速;无量纲数 $z$ 可以表示为:

$$z = 2g_0 l / L. \quad (3)$$

通过以上脉冲宽度的表达式可知,在不考虑  $Q$  开关打开时间,并忽略  $Q$  开关关门时放大的自发辐射和自激振荡时,影响脉冲宽度的主要因素包括谐振腔的光学长度  $l_r$ 、腔内往返损耗  $L$  和无量纲参数  $z$ 。

### 3.3 脉冲放大

在激光放大器中,脉冲放大所提取的能量取决于增益介质存储的能量。根据 Franz-Novik 的理论,激光脉冲放大增益  $G$  可以表示为<sup>[14]</sup>

$$G = \frac{E_s}{E_{in}} \ln\{1 + [\exp(E_{in}/E_s) - 1]G_0\}, \quad (4)$$

$$E_s = \frac{h\nu}{\gamma\sigma}, \quad (5)$$

式中: $E_s$  为饱和能量密度; $E_{in}$  为输入脉冲能量密度; $\nu$  为激光频率; $\sigma$  为受激辐射截面;小信号增益  $G_0$  可以表示为

$$G_0 = \exp(g_0 l) = \exp(\beta E_{st} l), \quad (6)$$

式中: $E_{st}$  为增益介质的储能密度; $\beta$  为联系增益和

储能的参数。

近红外波段常用的激光晶体主要包括 Nd:YVO<sub>4</sub>、Nd:YAG、Nd:YLF、Nd:GdVO<sub>4</sub> 和 Yb:YAG 等,这几种材料的主要特性参数如表 1 所示。由表 1 易知,Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体和 Yb:YAG 晶体分别对应最大的受激辐射截面、上能级寿命,而 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体凭借着高受激辐射截面和上能级寿命,其对应的  $\sigma_{21}\tau_f$  远高于其他激光晶体。根据(2)式可知小信号增益直接影响调  $Q$  激光器的脉冲宽度,而小信号增益  $g_0$  正比于  $\sigma_{21}\tau_f$ 。在此对不同晶体材料的调  $Q$  脉冲宽度进行比较,假定不同材料对应的辐射传递效率、量子效率、光斑重叠效率以及放大的受激辐射对应的效率相同,分别为 0.95、0.90、0.70,抽运光斑直径为 310  $\mu\text{m}$ ,腔长为 10 cm,腔内往返损耗为 0.3,吸收的抽运功率从 15 W 逐渐增加到 50 W。得到的不同材料在不同吸收抽运功率下对应的脉冲宽度关系如图 4 所示。

表 1 几种近红外波段激光晶体参数的比较<sup>[16]</sup>

Table 1 Comparison of parameters for several near-infrared band laser crystals

Type	$\lambda_p$ /nm	$\eta_s$ /%	$\sigma_{21}$ /( $10^{-19}$ cm <sup>2</sup> )	$\tau_f$ / $\mu\text{s}$	$\sigma_{21}\tau_f$ /( $10^{-19}$ $\mu\text{s}\cdot\text{cm}^2$ )
Nd:YVO <sub>4</sub>	808	75.9	15.6 (1064 nm)	100	1560
Nd:YAG	808	75.9	2.8 (1064 nm)	230	644
Nd:YLF	792	75.6	1.8( $\pi$ ) (1047 nm)	480	864
	792	75.2	1.2( $\sigma$ ) (1053 nm)	480	576
Nd:GdVO <sub>4</sub>	808	75.9	7.6 (1064 nm)	100	760
Yb:YAG	940	91.3	0.21 (1030 nm)	951	200

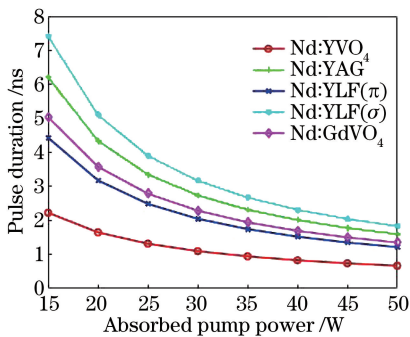


图 4 脉冲宽度与抽运功率、材料类型的关系

Fig. 4 Relationship between pulse duration and pump power or material type

由图 4 可知:随着吸收抽运功率增加,输出的调  $Q$  脉冲宽度逐渐减小;在相同的抽运功率下,Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体输出的调  $Q$  脉冲宽度最窄,这也正是本实验选择 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体作为激光工作物质的原因。

除了激光晶体材料和抽运功率之外,谐振腔的腔长也直接影响输出调  $Q$  脉冲宽度的大小,在此选

取 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体,研究腔长和抽运功率对输出调  $Q$  脉冲宽度的影响。

假定晶体长度为 0.5 cm,辐射传递效率、量子效率、斯托克斯因子、光斑重叠效率分别为 0.95、0.90、0.76、0.70,腔内往返损耗为 0.3,抽运光斑直径为 310  $\mu\text{m}$ 。在此条件下输出的调  $Q$  脉冲宽度和腔长以及吸收的抽运功率之间的关系如图 5 所示。由

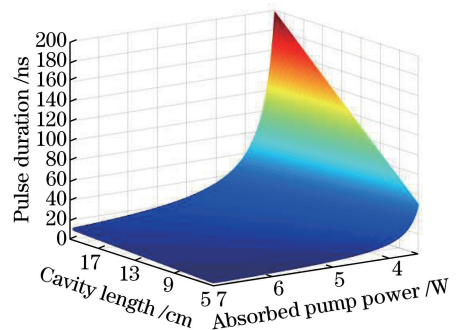


图 5 调  $Q$  脉冲宽度与腔长、抽运功率的关系

Fig. 5 Relationship between  $Q$ -switched pulse duration and cavity length or pump power

图 5 可知,调 Q 输出脉冲宽度随着腔长的减小以及抽运功率的增加而减小。综上可知:要获得更窄的调 Q 脉冲输出,可以选择  $\sigma_{21} \tau_f$  较大的 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体作为激光晶体;另外,在保证机械元件互不干涉、光学元件安全工作的情况下,应尽量缩短腔长,并且增加抽运功率。理论上,使用 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体进行电光调 Q,可以获得最短脉冲宽度为数百皮秒的脉冲输出。

基于以上理论设计了 Nd:YVO<sub>4</sub> 亚纳秒双波长激光器,当抽运 LD 设置电流增加到 6.5 A 时,晶体吸收的平均光功率达到 9.1 W,输出的调 Q 脉冲对应的脉冲宽度和功率分别为 1.18 ns 和 2.0 W。之后使用透镜对激光进行扩束并准直,将其注入到级联放大器中,激光在一级、二级放大级晶体前表面的光斑直径分别为 0.95 mm 和 1.10 mm,由于两级 LD 采用串联结构设计,因此两级放大级的电流相同。当 LD 电流设置为 6.5 A 时,对应单个 LD 的平均抽运功率为 32 W,注入的种子光经过第一级和第二级放大后功率分别为 6.31 W 和 13.6 W,如图 6 所示。使用(4)式对该级联放大过程进行模拟,发现实验值和理论值符合得较好。其中,在较高抽运时(>22 W),二级放大的实验值要高于理论值,这是由于在较高的抽运功率下引入的热透镜效应使激光光斑变小,从而获得了更大的增益。

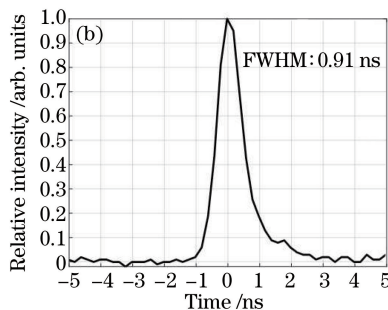
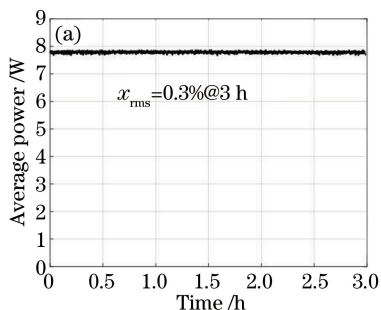


图 7 绿光激光的(a)输出功率稳定性曲线和(b)时域分布

Fig. 7 (a) Power stability map and (b) temporal distribution of green laser

使用双色镜对基频光和绿光进行分离,分离后的基频光和倍频光分别采用 Spiricon 公司型号为 M2-200s 的光束质量因子  $M^2$  测量仪进行光束质量测量, $M^2$  测量仪位于出光口后 450 mm 左右,测得基频光和倍频光的光束质量分别如图 8(a)和 8(b)所示。基频光在  $x$  方向和  $y$  方向的光束质量分别为 1.619 和 1.763,倍频光在这两个方向的光束质量分别为 1.205 和 1.362。可见,倍频过程可以在一定程度上提高激光的光束质量,这是倍频过程的非线

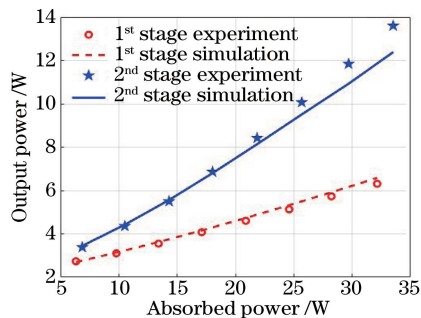


图 6 两级放大输出功率

Fig. 6 Output power of two cascade amplifier

性选择特性决定的,激光中心峰值功率较高的部分被选中进行频率变换,而边侧较弱的部分未被选中。

4 结 论

研究了近红外波段激光晶体材料的选择对调 Q 脉冲宽度的影响,并比较了抽运功率、腔长等因素对调 Q 脉冲宽度的影响。实验中采用 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体的 MOPA 放大方案,提出使用零线抽运级联放大的方案将主振荡级输出的重复频率为 5 kHz、脉冲

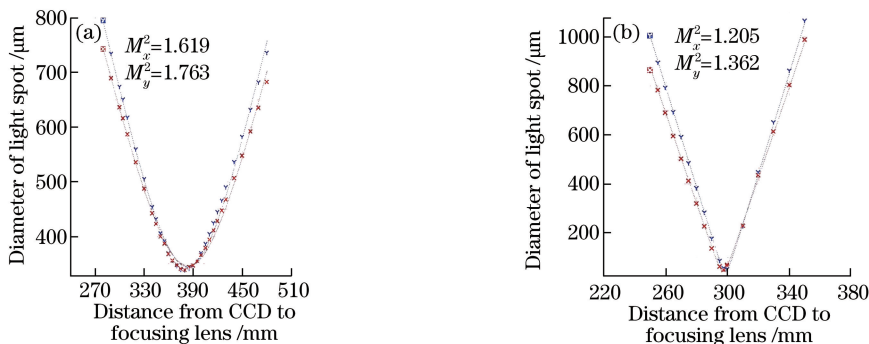


图 8 (a) 1064 nm 和(b) 532 nm 激光脉冲的光束质量

Fig. 8 Beam quality of (a) 1064 nm pulse and(b) 532 nm pulse

能量为 400  $\mu\text{J}$ 、脉冲宽度为 1.1 ns 的 1064 nm 基横模种子光进行级联放大,在保证高光束质量以及较小延时抖动的前提下,获得了最高 5 kHz/7.69 W/910 ps/532 nm 和 5 kHz/5.9 W/1.1 ns/1064 nm 的双波长激光脉冲输出。

### 参 考 文 献

- [1] Černý P, Jelínková H, Zverev P G, *et al.* Solid state lasers with Raman frequency conversion[J]. *Progress in Quantum Electronics*, 2004, 28(2): 113-143.
- [2] 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]. *Applied Optics*, 2005, 44(4): 582-590.
- [3] Hwang D, Ryu S G, Misra N, *et al.* Nanoscale laser processing and diagnostics [J]. *Applied Physics A*, 2009, 96(2): 289-306.
- [4] O'Neill W, Li K. High-quality micromachining of silicon at 1064 nm using a high-brightness MOPA-based 20-W Yb fiber laser [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2009, 15(2): 462-470.
- [5] Zhao M, Hao Q, Guo Z R, *et al.* Compact fiber-solid picosecond laser source with kilohertz repetition rate[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(4): 0401010.

赵明, 郝强, 郭政儒, 等. 结构紧凑的 kHz 重复频率光纤-固体皮秒激光光源 [J]. *中国激光*, 2018, 45(4): 0401010.

- [6] Ma Y F, Shen Y J, Xu L, *et al.* Dual-wavelength amplification properties of continuous-operation Yb:YAG slab laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(1): 0101006.

马艺芳, 申艺杰, 徐浏, 等. 连续运转 Yb:YAG 板条激光器的双波长放大特性 [J]. *中国激光*, 2018, 45

(1): 0101006.

- [7] Lu J, Liu Z Z, Liu Y Q, *et al.* Femtosecond thin-disk regenerative amplifier under burst operation mode[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(5): 0501008.  
陆俊, 刘征征, 刘彦琪, 等. 突发运行模式下的飞秒碟片再生放大器 [J]. *中国激光*, 2017, 44(5): 0501008.
- [8] Stuart B C, Feit M D, Herman S, *et al.* Nanosecond-to-femtosecond laser-induced breakdown in dielectrics[J]. *Physical Review B*, 1996, 53(4): 1749-1761.
- [9] Corkum P B, Brunel F, Sherman N K, *et al.* Thermal response of metals to ultrashort-pulse laser excitation[J]. *Physical Review Letters*, 1988, 61(25): 2886-2889.
- [10] Forget S, Balembois F, Georges P, *et al.* A new 3D multipass amplifier based on Nd:YAG or Nd:YVO<sub>4</sub> crystals[J]. *Applied Physics B*, 2002, 75(4/5): 481-485.
- [11] Nghia N T, Hao N V, Orlovich V A, *et al.* Generation of nanosecond laser pulses at a 2.2-MHz repetition rate by a cw diode-pumped passively Q-switched Nd<sup>3+</sup>:YVO<sub>4</sub> laser [J]. *Quantum Electronics*, 2011, 41(9): 790-793.
- [12] Wang J G, Sun Z, Jiang M H, *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. 1 ns 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.
- [13] Guo X Y, Tokita S, Kawanaka J. 12 mJ Yb:YAG/Cr:YAG microchip laser[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(3): 459-461.
- [14] Koechner W. *Solid-state laser engineering* [M].

Atlanta: Springer, 2006.

- [15] Degnan J J. Theory of the optimally coupled Q-switched laser [J]. Proceedings of the IEEE, 1989, 25(2): 214-220.
- [16] Zhang X, Feng C, Xie X Y, *et al.* Nanosecond electro-optically Q-switched Nd : YVO<sub>4</sub> laser [J].

High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(9): 2361-2364.

张翔, 冯驰, 谢希盈, 等. 纳秒电光调 Q Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(9): 2361-2364.