

# 基于多程腔技术的长纳秒脉冲 532 nm Nd:YAG 调 Q 绿光激光器

宋艳洁<sup>1,3</sup>, 宗楠<sup>1</sup>, 刘可<sup>1</sup>, 涂伟<sup>1</sup>, 杨峰<sup>1</sup>, 卞奇<sup>1</sup>, 申玉<sup>1</sup>, 王志敏<sup>1</sup>, 薄勇<sup>1,2\*</sup>, 彭钦军<sup>1,2\*\*</sup>, 许祖彦<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>中国科学院理化技术研究所固体激光重点实验室, 北京 100190;

<sup>2</sup>中国科学院理化技术研究所功能晶体与激光技术重点实验室, 北京 100190;

<sup>3</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 自行研制出一种基于多程腔(MPC)技术的长纳秒脉冲 532 nm Nd:YAG 调 Q 激光器。在重复频率为 10 kHz 时,采用 MPC 技术,将激光脉冲宽度从可调范围 110~260 ns 扩展到 460~600 ns。在最短脉冲宽度为 460 ns 时,532 nm 激光的输出功率为 6.5 W。理论模拟了 532 nm 激光输出功率和脉冲宽度随基频激光功率的变化曲线,理论与实验数据较好地吻合。这种长纳秒脉冲 532 nm 绿光激光器对于工业和科学研究具有重要意义,如一些新材料的激光损伤特性研究。

**关键词** 激光器; Nd:YAG; 多程腔; 长纳秒脉冲

中图分类号 TN248.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.1201003

## Nanosecond Pulse Width Stretched Q-Switched Nd:YAG Green Lasers Based on a Multipass Cavity

Song Yanjie<sup>1,3</sup>, Zong Nan<sup>1</sup>, Liu Ke<sup>1</sup>, Tu Wei<sup>1</sup>, Yang Feng<sup>1</sup>, Bian Qi<sup>1</sup>,  
Shen Yu<sup>1</sup>, Wang Zhimin<sup>1</sup>, Bo Yong<sup>1,2\*</sup>, Peng Qinjun<sup>1,2\*\*</sup>, Xu Zuyan<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Solid State Laser, Technical Institute of Physics and Chemistry,  
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

<sup>2</sup>Key Laboratory of Function Crystal and Laser Technology, Technical Institute of Physics and Chemistry,  
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

<sup>3</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** We have developed a nanosecond pulse width Q-switched stretched 532-nm Nd:YAG green laser based on a multipass cavity (MPC). The pulse widths were stretched from an adjustable regime of 110–260 ns to 460–600 ns by changing from single-pass to multipass operation at a pulse repetition rate of 10 kHz. At a typical pulse width of 460 ns, an average output power of 6.5 W at 532 nm was successfully achieved. The 532 nm output power and pulse width versus input power at 1064 nm were simulated. The simulated results were shown to be consistent with experimental data. Such nanosecond pulse lasers are interesting for both industrial and scientific applications, such as laser damage experiments for the development of new materials.

**Key words** lasers; Nd:YAG; multipass cavity; long nanosecond pulse

**OCIS codes** 140.3530; 140.3540; 140.3580

## 1 引 言

全固态绿光激光器常被用于医疗<sup>[1-2]</sup>、光参量振

荡器<sup>[3]</sup>、海洋探测<sup>[4-7]</sup>、显示<sup>[8-9]</sup>以及 Ti:Sapphire 激光器泵浦源<sup>[10-12]</sup>等各种科学研究和工业应用中。在纳秒激光器中,调 Q 技术产生的典型激光脉冲宽度

收稿日期: 2020-05-29; 修回日期: 2020-07-06; 录用日期: 2020-07-20

基金项目: 国家自然科学基金(61805259)、国家重点研发计划(2016YFB0402103)、中科院关键技术团队项目(GJJSTD20180004)、中科院理化技术研究所所长基金(Y8A9021H11)

\* E-mail: boyong@mail.ipc.ac.cn; \*\* E-mail: pengqinjun@163.com

在 10~100 ns 的范围内,然而在许多应用领域需要利用长纳秒脉冲激光光源实现高单脉冲能量和低峰值功率,这种激光光源可以减小激光损伤,实现窄带激光输出<sup>[13]</sup>。更重要的是,一些新材料的激光损伤特性的研究中也需长纳秒脉冲的 532 nm 激光光源。此外,对于 Synova S. A. 公司开发的混合水射流激光加工工艺,长纳秒脉冲宽度可调谐激光可以使该工艺针对每个特定的加工任务进行优化<sup>[14]</sup>。

目前,国内外常采用增益开关技术获得长纳秒脉冲激光,2009年,Ray等<sup>[15]</sup>采用这种技术,在二极管阵列侧面泵浦 Nd:YAG 激光器时得到的激光脉冲宽度为 409 ns。然而,这种方法严重依赖于激光二极管的峰值电流,并且容易产生多个亚脉冲输出。另一种方法是将多个激光器组合在一起,并在每个激光器的脉冲之间引入延迟,在重复频率为 8 kHz 时,Chard等<sup>[16]</sup>将激光脉冲宽度从 143 ns 扩展到 260 ns,这种方法增加了激光器的复杂性和成本。显然,上述两种方法很难得到结构简单紧凑的长纳秒激光系统。

实现长纳秒脉冲最简单有效的方法是延长激光谐振腔的腔长,但这种方法会使得激光器的结构庞大,这在实际应用中并不占优势,并且会受到振荡器的机械稳定性和激光模式的动态稳定性的限制。近些年来,多程腔(MPC)技术主要用于皮秒和飞秒激光器<sup>[17-19]</sup>降低重复频率,增加激光脉冲能量。2019年,MPC技术首次被用于纳秒激光器中<sup>[20]</sup>。MPC技术的使用,有效解决了上述提到的延长腔长带来的一系列问题。本文研制出一种长纳秒 532 nm 激光器,通过半波片(HWP2)和薄膜偏振片(TFP2)来选择引入/未引入 MPC 的两个不同激光腔,实现了两种不同激光宽度的脉冲输出。分别在未引入和引入 MPC 的两种情况下,改变不同基频的光功率,实现了脉宽可调范围为 110~260 ns 和 460~600 ns 的 532 nm 绿光激光输出。在光路中引入 MPC 的情况下,基频激光功率为 18.2 W 时,532 nm 激光的输出功率为 6.5 W,测得的脉冲宽度为 460 ns,光束质量因子  $M^2=2.13$ 。

## 2 实验装置

长纳秒脉冲 532 nm 绿光激光器的实验光路如图 1 所示,激光器主要由 1064 nm 基频源与 LBO 倍频(SHG)系统两部分组成。在 1064 nm 基频源中,LH 是一个高功率激光侧面抽运模块,每个模块均采用三向 808 nm LD 抽运结构,每个模块的抽

运功率均为 240 W。所使用的激光晶体为棒状 Nd:YAG 晶体,尺寸为  $\phi 3 \text{ mm} \times 78 \text{ mm}$ ( $\phi$  表示直径),Nd<sup>3+</sup> 的掺杂离子分数为 0.6%,两端均镀有 1064 nm 增透膜,以降低晶体两端的反射损耗。将声光调 Q 开关(Gooch & Housego, 英国)放置在光路中来获得高峰值功率激光,以提高激光的倍频效率。腔镜 M1~M3 镀有 1064 nm 高反膜,平镜 M4 和凹面镜 M5( $R=3657$ )共同组成多程腔,以延长激光腔长。TFP1 和 TFP2 为 45° 放置的 1064 nm 薄膜偏振片,其对水平偏振的 p 光增透,对垂直偏振的 s 光增反,其中,TFP1 作为耦合输出器,偏振片前放置一个 1064 nm 半波片(HWP1),调节 HWP1 的旋转角度,获得波长为 1064 nm 的最大功率线偏振激光。TFP2 和 HWP2 组合在一起,通过旋转 HWP2 可以获得不同的偏振输出,进而选择引入或未引入 MPC 两个不同的激光谐振腔。

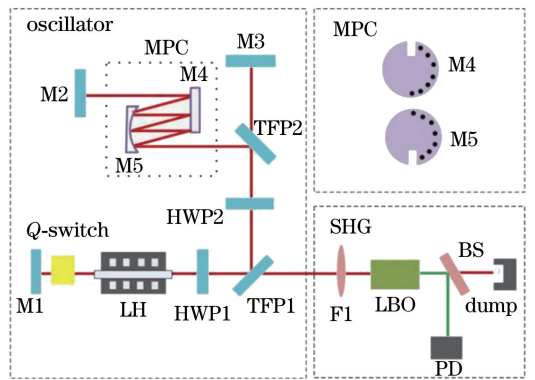


图 1 基于 MPC 技术的长纳秒脉冲 532 nm 激光器实验装置图,其中右上角的插图显示了 M4 和 M5 反射镜上的光束点模式

Fig. 1 Experimental setup for generating the pulse width stretched 532 nm Nd:YAG green laser based on MPC technology, in which the upper right diagram shows the beam spot pattern on mirrors M4 and M5

在倍频阶段:优化透镜的焦距和位置,最后选择焦距为 100 mm 的透镜 F1 将基束聚焦到 LBO 晶体中,实验中基频光经透镜聚焦后光斑束腰直径约为 0.3 mm,LBO 晶体使用 I 类非临界相位匹配,切割方向与 Z 轴的夹角  $\theta=90^\circ$ ,与 X 轴的夹角  $\varphi=0^\circ$ ,尺寸为 4 mm×4 mm×40 mm;优化温控仪的温度,最终控制匹配温度为 142 °C,这与使用软件 SNLO 计算得到的 148 °C 稍有不同,我们认为匹配温度与晶体方向性的加工准确度有关。晶体两端面均镀有 1064 nm & 532 nm 增透膜。分束镜 BS 镀

有 532 nm 高反膜和 1064 nm 增透膜,用于分离绿光和红外光。

### 3 实验结果与讨论

在文献[21]中分析讨论了在保持高斯光束  $q$  参数情况下扩展腔长的 MPC 的设计条件。图 2 显示了 MPC 引入的腔长增加量  $\Delta L$  随不同  $m, n$  值的变化规律,  $n$  表示 MPC 中激光的往返次数,  $m$  表示在保持高斯光束  $q$  参数情况下, MPC 中反射光束在反射镜上所走过的半圆弧数,可以取任意整数,凹面镜曲率取定值  $R = 3657$  mm。综合考虑实验需求,实验中取  $m = 1, n = 7, R = 3657$  mm,则 MPC 腔引入的腔长增加量  $\Delta L = 2500$  mm。为了获得一个长纳秒脉冲 532 nm 激光器,搭建了一个高功率长纳秒脉冲 1064 nm 的调 Q Nd:YAG 激光器。激光输出功率由功率计(OPHIR, FL400A-LP1-50)测量,如图 3 所示,可以发现, MPC 的引入对激光输出功率的影响很小,即使引入 MPC 的一路激光阈值略高,输出功率的减小也主要是由 M4 和 M5 两镜之间多达 14 次的反射损耗造成的。在未引入 MPC 的情况下,当泵浦功率为 160.5 W,最大平均输出功率为 20.8 W。另一路引入 MPC 后,最大平均输出功率从 20.8 W 降至 18.2 W,脉冲宽度明显增大。

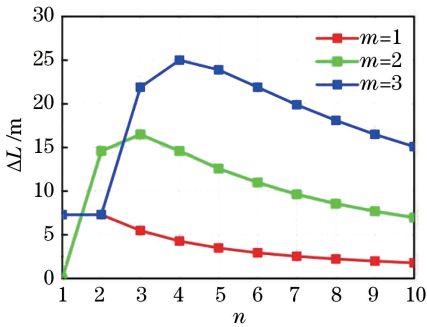


图 2 MPC 平凹腔引入的腔长增加量  $\Delta L$  随不同  $m, n$  值的变化曲线

Fig. 2 Extended cavity length  $\Delta L$  introduced by MPC flat concave cavity versus  $m$  and  $n$

接着,用一个硅基高速光电探头(DET10A, THORLABS, rise time  $< 1$  ns)来捕捉激光的脉冲波形,并将测量图像显示在示波器上(Agilent, DSO 80804 B, 8 GHz),1064 nm 激光脉冲宽度随入射泵浦功率的演变如图 4 所示,其中实心的圆圈和方块分别表示未引入 MPC 和引入 MPC 时的脉宽测量数据。如图中所示,在两种情况中,脉冲宽度随输入泵浦功率的增大明显减小。在重复频率为 10 kHz

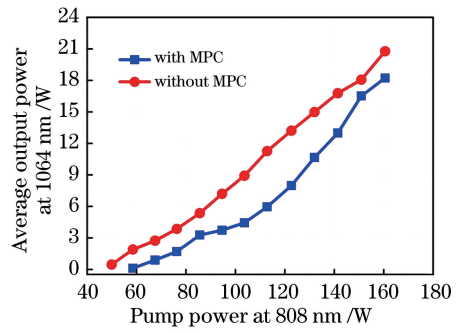


图 3 1064 nm 激光输出功率随 808 nm 泵浦光功率变化的曲线图

Fig. 3 Output power at 1064 nm versus pump power with MPC (solid squares) and without MPC (solid circles)

时,采用 MPC 技术以及改变泵浦功率,激光脉冲宽度从可调范围 130~400 ns 扩展到 490~1000 ns。进一步,根据调 Q 激光器中脉冲宽度与谐振腔腔长的关系<sup>[20,22]</sup>,给出最大泵浦功率下激光脉冲宽度随腔长变化曲线,如图 5 所示,可以看到实验结果与理论计算值相吻合。

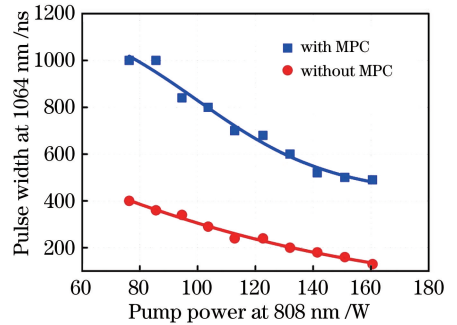


图 4 1064 nm 激光脉冲宽度随 808 nm 泵浦光功率变化的关系及对应拟合曲线

Fig. 4 Variation of the pulse width at 1064 nm with the pump power at 808 nm with MPC (solid squares) and without MPC (solid circles) and the corresponding fit for the experimental data

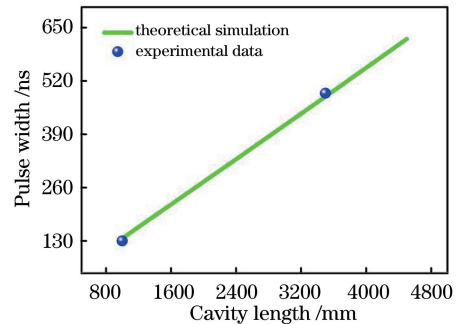


图 5 最大泵浦功率下激光脉冲宽度随腔长变化曲线  
Fig. 5 Pulse width in a Q-switch laser versus cavity length under the maximum pump power

在上述 1064 nm 激光系统的基础上,本研究通过腔外倍频成功实现了 532 nm 激光输出,图 6 为倍频绿光输出功率和倍频效率随 1064 nm 激光功率的变化曲线,可以看出,两种情况下的输出功率和倍频效率都随着 1064 nm 激光功率的增加而单调增加。未引入 MPC 时,当 1064 nm 激光功率为 20.8 W 时,532 nm 激光输出功率最高为 10.2 W,对应的转换效率为 49.1%。在引入 MPC 的情况下,532 nm 激光的最大输出功率和转换效率分别下降到 6.5 W 和 35.7%,这是激光脉冲宽度变宽的结果。

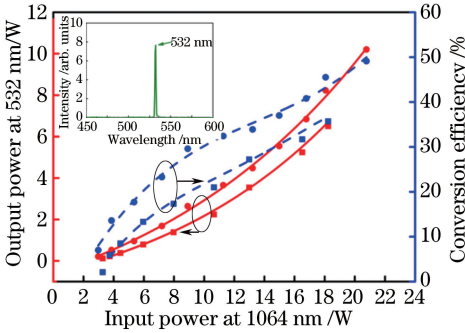


图 6 532 nm 激光输出功率和倍频效率随 1064 nm 激光功率的变化曲线,其中实心方框代表引入 MPC,实心圆点代表未引入 MPC,插图为 532 nm 激光在最大输出功率时的光谱

Fig. 6 Output power at 532 nm and SHG efficiency versus input power at 1064 nm, in which the solid squares and solid circles represent the experimental data for the cavity with MPC and without MPC, and the inset is measured spectrum of the 532 nm laser at the maximum output power

对 532 nm 激光的特性进行理论研究。对于纳秒激光的倍频过程,可以忽略波场的群速度失配(GVM)、群速度色散(GVD)、自相位调制(SPM)和交叉相位调制(XPM)。倍频过程的耦合波方程可描述为

$$\frac{\partial A_1(x, y, z, t)}{\partial z} = \frac{i\omega_1}{cn(\omega_1)} d_{\text{eff}} A_2 A_1^* \exp(i\Delta k z) - \frac{\gamma_1}{2} A_1(x, y, z, t), \quad (1)$$

$$\frac{\partial A_2(x, y, z, t)}{\partial z} = \frac{i\omega_2}{cn(\omega_2)} d_{\text{eff}} A_1^2 \exp(-i\Delta k z) - \frac{\gamma_2}{2} A_2(x, y, z, t) - \tan \rho \frac{\partial A_2(x, y, z, t)}{\partial x}, \quad (2)$$

式中,  $A_1$  和  $A_2$  为基频光和倍频光的复振幅,  $\omega_1$  和  $\omega_2$  是基频光和倍频光的角频率,  $\Delta k$  是波矢失配量,

$d_{\text{eff}}$  是有效非线性系数,  $\gamma_1$  和  $\gamma_2$  是线性吸收系数,  $\rho$  是  $x$  方向的走离角,  $n$  和  $c$  分别为折射率和光速。基频光采用高斯光束近似,光波复振幅  $A$  为空间与时间的函数,表达式为

$$A(x, y, z, t) = \frac{A_0}{w(z)} \exp\left[-\frac{x^2 + y^2}{w^2(z)}\right] \exp\left(-\frac{t^2}{\tau^2}\right), \quad (3)$$

式中:  $A_0 = \sqrt{4\sqrt{2} P_a / (\pi \sqrt{\pi \epsilon_0 c n f \tau})}$  是中心振幅,  $P_a$  是平均功率,  $\tau$  是脉冲宽度,  $f$  是脉冲重复频率,  $n$  为 LBO 晶体中折射率,  $\epsilon_0$  是真空介电常数;  $w(z) = w_0 \sqrt{M^2} \cdot \sqrt{1 + \{\lambda / [n \pi w_0^2 (z - L/2)]\}^2}$  表示 1064 nm 激光光束半径,  $L$  是 LBO 晶体长度,  $w_0$  是光束束腰半径,  $M^2$  是光束质量因子。理论计算所用参数如下:  $d_{\text{eff}} = 0.85 \text{ pm/V}$ ,  $\gamma_1 = 0 \text{ cm}^{-1}$ ,  $\gamma_2 = 0 \text{ cm}^{-1}$ ,  $\rho = 0.16 \text{ mrad}$ ,  $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ 。对于耦合波方程,采用傅里叶空间法对其进行数值求解。假设非线性光学晶体长度为  $L$ ,并沿着  $z$  轴放置。将晶体沿  $z$  方向等分为  $N$  格,则每格的长度为  $\Delta z = L/N$ ,基频激光束腰位于晶体中心,即在晶体横截平面内将基频激光复振幅分成  $M \times M$  格,在时间维度上将光脉冲分为  $N$  格,这样一个激光脉冲复振幅就可看成是一个  $(M+1) \times (M+1) \times (N+1)$  的三维数据集,便于数值计算。通过四阶龙格库塔法数值计算可以求得晶体输出端面倍频激光的复振幅,利用此复振幅可以获得输出光束的特性,比如倍频光输出功率、脉冲波形等重要参数。

图 6 给出了理论模拟的 532 nm 激光输出功率和倍频效率随 1064 nm 激光功率的变化曲线,实线表示计算得到的输出功率曲线,虚线表示计算得到的倍频效率曲线。很明显,计算结果与实验数据吻合较好。另外,还用光谱分析仪(AvaSpec-2048FT-SPU)测量了倍频激光在最大输出功率下的光谱,如图 5 中插图所示,表明波长中心位于 532 nm 处。

激光典型脉冲波形如图 7 所示。对于未引入 MPC 的情况,在 1064 nm 激光功率为 20.8 W 和 8.9 W 时,对应的脉冲宽度分别为 110 ns 和 260 ns,如图 7(a)和图 7(b)所示,引入 MPC 后,在 1064 nm 激光功率为 18.2 W 和 6.0 W 时,对应的脉冲宽度分别为 460 ns 和 600 ns,如图 7(c)和图 7(d)所示。此外,图 7 给出了 532 nm 激光脉冲宽度随 1064 nm 激光功率的变化,十字表示在引入和未引入 MPC 时 532 nm 激光输出功率的实验数据。结果表明,未引入 MPC 时,1064 nm 激光功率

从 20.8 W 减小到 8.9 W 时,对应的脉冲宽度从 110 ns 增加到 260 ns。引入 MPC 后,在 1064 nm 激光最大功率 18.2 W 处,对应的激光脉冲宽度为 460 ns,且随 1064 nm 激光功率从 18.2 W 减小到 6.0 W 时,对应的脉冲宽度从 460 ns 增加到 600 ns。

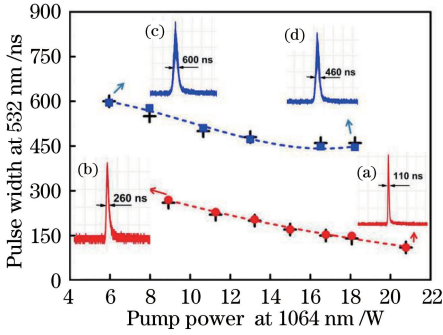


图 7 532 nm 激光实验和计算得到的脉宽随 1064 nm 激光功率变化的曲线,其中十字代表测量数据,实心方形和实心圆点分别代表引入 MPC 和未引入 MPC 的相应计算结果,虚线表示计算结果的拟合曲线,插图(a)~(d)显示了与相邻箭头对应的脉冲波形

Fig. 7 Experimental and theoretical pulse width of 532 nm laser versus input power at 1064 nm, in which the crosses are the measured data, the solid squares and solid circles are the corresponding calculated results with MPC and without MPC, respectively, the dashed lines represent the corresponding fit for the calculated results, and the insets show typical pulse waveforms corresponding to the points indicated by adjacent arrows

通过数值求解(1)~(3)式,计算得到倍频激光的脉宽。计算结果与实验结果吻合较好,表明(1)~(3)式可以较准确地计算出 532 nm 激光脉冲宽度。图 8 给出了引入 MPC 后最大输出功率时脉冲输出波形序列,其重复频率为 10 kHz,峰-峰值波动幅度小于 $\pm 6\%$ ,具有很好的稳定性。用光束质量分析仪(Spiricon M2-200)测量了输出光脉冲的光束质量,光束质量因子为  $M^2 = 2.13$ ,插图为输出激光的二维光强分布。

## 4 结 论

采用 MPC 技术实现了一种长纳秒脉冲 532 nm 绿光激光光源,在重复频率为 10 kHz 下,改变泵浦功率,脉冲宽度的可调范围从 110~260 ns 扩展到 460~600 ns。在最短脉冲宽度为 460 ns 时,输出功

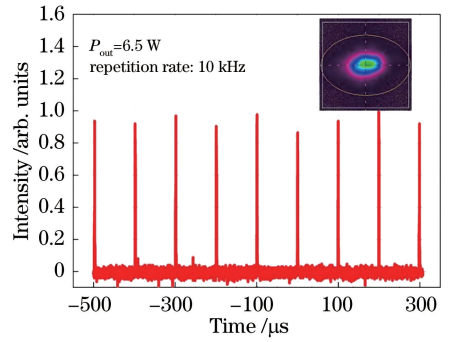


图 8 引入 MPC 后最大输出功率处测量得到的 532 nm 激光典型脉冲序列,其中插图是输出功率为 6.5 W 时输出激光的二维强度分布图

Fig. 8 Typical pulse sequence from 532 nm laser operating with MPC at the output power of 6.5 W, in which the inset is 2D spatial intensity profile of the output laser at  $P_{out} = 6.5$  W

率为 6.5 W,光束质量  $M^2$  为 2.13。通过进一步改变 MPC 的设计参数还可以实现更宽范围的脉冲激光输出,该激光器在一些新材料的激光损伤特性研究等多个领域具有重要应用价值。

## 参 考 文 献

- [1] Brinkmann R, Hüttmann G, Rögner J, et al. Origin of retinal pigment epithelium cell damage by pulsed laser irradiance in the nanosecond to microsecond time regimen[J]. Lasers in Surgery and Medicine, 2000, 27(5): 451-464.
- [2] Bazyar H, Aghaie M, Daemi M H, et al. Compact 151 W green laser with U-type resonator for prostate surgery[J]. Optics & Laser Technology, 2013, 47: 237-241.
- [3] Bi Y, Zhang H B, Sun Z P, et al. High-power blue light generation by external frequency doubling of an optical parametric oscillator [J]. Chinese Physics Letters, 2003(11): 1957-1959.
- [4] Xu D, Wang Y, Li H, et al. 104 W high stability green laser generation by using diode laser pumped intracavity frequency-doubling Q-switched composite ceramic Nd:YAG laser[J]. Optics Express, 2007, 15(7): 3991-3997.
- [5] Zhang G, Zhao S, Li G, et al. Stable Q-switched and mode-locked Nd:GdVO<sub>4</sub>/KTP green laser with dual-loss-modulation[J]. Applied Optics, 2010, 49(24): 4524-4530.
- [6] Tu W, Yang Y D, Guo Y D, et al. High power quasi-continuous microsecond 532 nm laser output [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45 (1): 0115001.

- 涂玮, 杨宇頔, 郭亚丁, 等. 高功率准连续微秒 532 nm 激光输出 [J]. 中国激光, 2018, 45(1): 0115001.
- [7] Cui J F, Wang D, Zhang Y N, et al. LD side-pumped Nd:YVO<sub>4</sub> 532 nm quasi-continuous green laser[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(4): 041402.  
崔建丰, 王迪, 张亚男, 等. LD 侧面抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 532 nm 准连续绿光激光器[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(4): 041402.
- [8] Shao Y, Jin H J, Lin J, et al. A CW green laser emission by self-sum-frequency-mixing in Nd:GdCOB crystal[J]. Laser Physics Letters, 2011, 8(10): 715-718.
- [9] Zhu S Q, He Q, Wang S E, et al. High average power passively Q-switched laser diode side-pumped green laser by using Nd:YAG/Cr<sup>4+</sup> composite crystal [J]. Journal of Laser Applications, 2014, 26(3): 032009.
- [10] Pohl R, Antognini A, Nez F, et al. The size of the proton[J]. Nature, 2010, 466(7303): 213-217.
- [11] Piehler S, Dietrich T, Rumpel M, et al. Highly efficient 400 W near-fundamental-mode green thin-disk laser[J]. Optics Letters, 2016, 41(1): 171-174.
- [12] Li L P, Li Y J, Song Y J, et al. High-power and high-efficiency widely tunable Ti: Sapphire nanosecond pulsed laser pumped by Q-switched green laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(5): 0508018.  
李隆普, 李玉娇, 宋艳洁, 等. 高功率、高效率调 Q 绿光抽运的钛宝石宽调谐纳秒脉冲激光[J]. 中国激光, 2019, 46(5): 0508018.
- [13] Schmid W. Pulse stretching in a Q-switched Nd:YAG laser [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1980, 16(7): 790-794.
- [14] Wagner F, Sibailly O, Vágó N, et al. The laser microjet © technology: 10 years of development [C]//The International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics (ICALEO), October 13-16, 2003, Jacksonville, USA. [S. l.: s. n.], 2003, M401: 595-603.
- [15] Ray A, Das S K, Mishra L, et al. Nonlinearly coupled, gain-switched Nd:YAG second harmonic laser with variable pulse width[J]. Applied Optics, 2009, 48(4): 765-769.
- [16] Chard S, McComb T S, Chen Y, et al. Control of pulse duration and shape in a 400-W Q-switched 532-nm laser[J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10511: 1051113.
- [17] Papadopoulos D N, Forget S, Delaigue M, et al. Passively mode-locked diode-pumped Nd:YVO<sub>4</sub> oscillator operating at an ultralow repetition rate[J]. Optics Letters, 2003, 28(19): 1838-1840.
- [18] Fu X, Li J F, Liang X Y. Compact high-power mode-locked Nd:YVO<sub>4</sub> picosecond laser using multiple-pass cavity [J]. Chinese Optics Letters, 2013, 11(8): 081401.
- [19] Kowalevicz A M, Jr, Zare A T, Kärtner F X, et al. Generation of 150-nJ pulses from a multiple-pass cavity Kerr-lens mode-locked Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> oscillator[J]. Optics Letters, 2003, 28(17): 1597-1599.
- [20] Song Y J, Liu K, Zong N, et al. Pulse duration adjusted by changing the cavity length with a multi-pass cavity in a Q-switched Nd:YAG laser [J]. Optics Letters, 2019, 44(18): 4471-4474.
- [21] Sennaroglu A, Fujimoto J. Design criteria for Herriott-type multi-pass cavities for ultrashort pulse lasers[J]. Optics Express, 2003, 11(9): 1106-1113.
- [22] Koechner W. Properties of solid-state laser materials [M]//Springer Series in Optical Sciences. New York: Springer, 2002: 38-101.