

基于 LiB_3O_5 晶体腔内倍频的 126 W 高稳定性 532 nm 声光调 Q 激光器

周旭阳, 王劲松, 梁旭, 萧云峰, 黄国林

长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022

摘要 基于 II 类相位匹配 LiB_3O_5 (LBO) 晶体腔内倍频技术, 获得了一种高稳定性 532 nm Nd:YAG 声光调 Q 激光器。当声光调 Q 激光器的重复频率为 12 kHz 时, 可实现平均功率为 126 W 的绿光激光输出。通过测量可得, 其脉冲宽度为 52 ns, 脉冲能量为 10.5 mJ, 峰值功率为 205.9 kW, 且 808 nm 的激光二极管光功率到 532 nm 绿光的转换效率为 9.19%。LBO 晶体由控温炉精确控温, 温度控制在 ± 0.1 °C 以内, 有利于高效率、高稳定二次谐波的产生。由实验结果可得, 绿色激光器的输出功率稳定性较好, 126 W 的 532 nm 绿光激光器连续工作 3 h 的均方根不稳定性为 $\pm 0.628\%$ 。

关键词 激光器; 声光调 Q; 腔内倍频; 二次谐波产生器

中图分类号 TN248

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.051401

126 W High-Stability Acousto-Optical Q-Switched 532 nm Laser Based on LiB_3O_5 Crystal Intracavity Frequency-Doubling

Zhou Xuyang, Wang Jinsong, Liang Xu, Xiao Yunfeng, Huang Guolin

*College of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology,
Changchun, Jilin 130022, China*

Abstract A highly stable acousto-optical Q-switched 532 nm Nd:YAG laser based on a type II LiB_3O_5 (LBO) crystal intracavity frequency-doubling is demonstrated. Average output power of 126 W of green laser is obtained at a repetition rate of 12 kHz for acousto-optical Q-switched laser. Test results show that the pulse width is 52 ns, which corresponds to a pulse energy of 10.5 mJ and a peak power of 205.9 kW. The diode-to-green optical conversion efficiency from 808 nm to 532 nm is 9.19%. The LBO crystal's temperature is precisely controlled by a temperature control furnace with the precision of ± 0.1 °C, which directly contributes to the high efficiency high-stability second harmonic generation. The output power of the green laser is very stable. The root mean square instability of green laser at 126 W is calculated to be $\pm 0.628\%$ in 3 h of continuous work.

Key words lasers; acousto-optical Q-switched; intracavity frequency-doubling; second harmonic generator

OCIS codes 140.3460; 140.3480; 140.3530; 140.3570

1 引言

随着全固态激光技术、调 Q 技术及非线性频率变换技术的飞速发展, 全固态激光器正朝着高功率、

高稳定性、多波段、可调谐的方向发展, 其中发展迅速且较为成熟的是半导体激光二极管(LD)抽运的全固态绿光激光器(DPSSGL)^[1-3]。DPSSGL 是在二极管抽运全固态激光器(DPSSL)的研究基础上, 结合调 Q

收稿日期: 2017-09-24; 收到修改稿日期: 2017-11-13

基金项目: 国家中小企业科技创新基金(110262122005651)

作者简介: 周旭阳(1992—), 男, 硕士研究生, 主要从事激光参数检测技术与激光技术方面的研究。

E-mail: 15948081575@163.com

导师简介: 王劲松(1973—), 男, 博士, 副教授, 博士生导师, 主要从事激光参数检测技术与激光技术方面的研究。

E-mail: soldier_1973@163.com(通信联系人)

技术和非线性光学倍频技术获得的一种 532 nm 可见光波段的激光器,其核心技术是通过 LD 或其阵列抽运激光增益介质(如 Nd:YAG、Nd:YVO₄、Nd:YLF 等)获得 1064 nm 基频激光,并结合调 Q 技术(如声光调 Q、电光调 Q 技术等)获得高峰值功率 1064 nm 脉冲基频激光,再通过加入非线性倍频晶体[如 KTiOPO₄、LiB₃O₅(LBO)、 β -BaB₂O₄]实现 532 nm 倍频绿光输出^[4-6]。

全固态绿光激光器在科研、激光医疗、激光加工、军事国防及激光显示等领域的应用越来越广泛^[7-12]。532 nm 绿光作为抽运源,可以实现紫外、深紫外段波段的激光输出,具有重大的科研价值。绿光激光具有亮度高、聚焦光斑小、作用时间短、热影响区小以及在加工过程中工件不易产生较大形变等优点,可以对硬度高、脆性大的特殊材料进行精密加工,在精密加工中有独特的优势。532 nm 绿光激光在水中的吸收率小,DPSSL 可应用于机载或星载激光探潜。绿光激光作为三基色光源之一,可应用于激光电影院大屏幕显示^[13]。

近年来,国内外研究者都非常重视全固态绿光激光器的研究,并取得了很多进展。2004 年 Yi 等^[14]采用 Z 型腔,当抽运功率为 398 W 时,输出平均功率为 101 W 的 532 nm 绿光,光-光转换效率为 25.4%。McDonagh 等^[15]采用端面抽运的双 Nd:YVO₄ 晶体模块的折叠腔结构,结合 LBO 倍频技术实现了 62 W 的横电磁(TEM₀₀)模连续绿光输出,其质量因子 $M^2=1.05$,光-光转换效率为 29%,不稳定性为 0.05%。2009 年, Dudley 等^[16]实现了平均功率为 420 W 的 532 nm 激光和平均功率为 160 W 的 355 nm 多模式激光输出。同年, Poulter 等^[17]获得了 290 W 绿光激光输出,并且采用偏振耦合技术获得了功率为 580 W 的单光束绿光。2010 年, Stolzenburg 等^[18]对 Yb:YAG 薄片腔倒空的调 Q 腔内倍频绿光激光器进行了研究,在重复频率为 10 kHz 时,实现了平均功率为 700 W 的调 Q 脉冲 515 nm 绿光输出,光-光效率高达 35%,并且通过调整腔倒空的调 Q 开关延迟时间,实现脉冲宽度在 200~700 ns 范围内可调谐的激光输出。2009 年, Ren 等^[19]采用 LD 侧面抽运的 V 型腔,实现了平均功率为 206 W、重复频率为 22.4 kHz、脉冲宽度为 201 ns、最大单脉冲能量为 9.2 mJ、峰值功率为 45.8 kW 以及绿光转换效率为 60.2% 的 532 nm 绿色激光输出。2010 年, Zhang 等^[20]采用直线平凹腔结构,利用 II 类相位匹配 LBO 晶体腔内倍频,实现了高

效率的 532 nm 绿光激光器,其电-绿光转换效率为 10.4%,连续工作 4 h 的功率波动小于 $\pm 0.86\%$ 。2013 年, Salamu 等^[21]采用复合陶瓷 Nd:YAG 晶体结合被动调 Q 技术,获得了单脉冲能量和峰值功率分别为 0.36 mJ 和 0.45 MW 的 532 nm 绿光激光器。2015 年, Jiang 等^[22]采用 LD 侧面抽运 Nd:YAG/Cr:YAG/YAG 复合晶体结构,实现平均输出功率为 27.2 W、单脉冲能量为 1.28 mJ、峰值功率为 6.1 kW 以及电-光转换效率为 14.72% 的 532 nm 激光输出。

本文基于 II 类相位匹配 LBO 晶体腔内倍频技术,采用简单直线谐振腔结构,获得了一种高稳定性 532 nm Nd:YAG 声光调 Q 激光器。当声光调 Q 激光器的重复频率为 12 kHz 时,该激光器实现了平均功率为 126 W、脉冲宽度为 52 ns、脉冲能量为 10.5 mJ 以及峰值功率为 205.9 kW 的绿光激光输出,且 808 nm LD 光功率到 532 nm 绿光的转换效率为 9.19%。LBO 晶体由控温炉精确控温,温度误差控制在 ± 0.1 °C 以内,有利于高效率、高稳定二次谐波产生。绿光激光器稳定性较好,连续工作 3 h, 126 W 的 532 nm 绿光激光器的输出平均功率的均方根不稳定性为 $\pm 0.628\%$ 。532 nm 绿光平均功率及功率稳定性等符合项目技术指标要求。

2 实验装置与原理

准对称平腔结构如图 1 所示,图中 d_1 、 d_2 和 d_3 分别为图 1 中相应器件之间的距离, $d_1 = d_3 = 200$ mm, $d_2 = 32$ mm, QR 为旋光片,其作用是改变激光偏振态,减小激光器的热致双折射效应。所采用的激光器为双棒串接的 1064 nm 高功率调 Q 激光器,并采用 LBO 晶体腔内倍频方案。该百瓦级绿光激光器样机利用三基色激光光源合成白光,可应用于电影院激光大屏幕显示,该激光器必须保证高重复频率、高稳定性激光输出,因此采用声光调 Q 运转方式^[23]搭建了如图 1 所示的实验装置。

所选用的型号为 C4HA-7 和 C4HA-8(生产商,生产国)的激光模块具有几乎相同的输出功率曲线,可保证两激光模块具有相同的热效应,实现更好的热致双折射补偿。两激光模块串联并且由单一直流驱动电源供电。实验中,在双 Nd:YAG 激光模块之间插入 90°石英旋光晶体,径向偏振分量与切向偏振分量在第一个激光棒中产生相位延迟,经过 90°石英旋光晶体旋转 90°后,径向偏振与切向偏振互换,然后再经第二个相同激光棒后,径向偏振光与切向偏振光获得相同的相位延迟,从而实现热致双折射效应补偿。

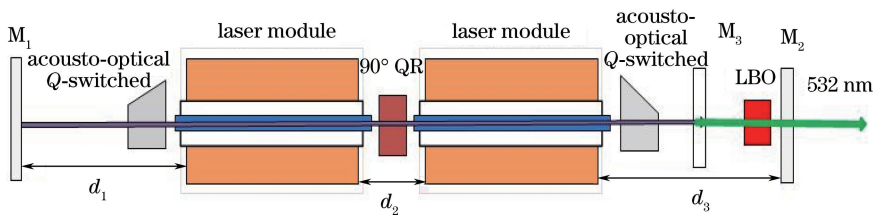


图1 腔内频率声光调Q绿色激光器示意图

Fig. 1 Schematic of intracavity frequency acousto-optical Q-switched green laser

该模块采用五维 808 nm 的 LD 阵列侧面抽运结构,相邻 LD 阵列间的夹角为 72° 。按照五角形等间距分布,通过侧面抽运 Nd:YAG 晶体棒,如图 2 所示。Nd:YAG 晶体的直径为 4 mm,长度为 106 mm, Nd^{3+} 离子的掺杂浓度为 0.6% (原子数分数)。五维激光抽运方式增益分布更加均匀,可避免因增益分布不均匀引起的振荡激光并产生畸变现象,为获得高光束质量、高效率激光输出提供了良好的基础。此激光抽运模块的最大工作电流为 39 A,工作电压小于 90 V,LD 电-光转换效率约为 50%。整个激光模块由 3.6 kW 激光水冷机的循环水制冷。

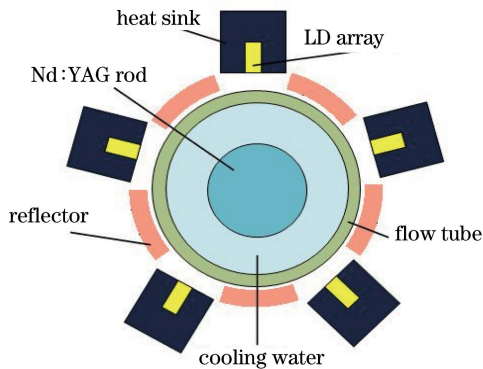


图2 侧面抽运激光模块示意图

Fig. 2 Schematic of side-pumped laser module

声光调 Q 开关为中国电子科技集团公司第二十六研究所研制的 QSG40-1Z 型开关,光波长为 1064 nm,中心频率为 40 MHz,衍射效率大于 50%。声光调 Q 开关尽量靠近激光模块,声光调制频率设定为 12 kHz。两个声光调 Q 开关由同一个驱动源

提供超声波信号,可确保其信号的同步性。声光调 Q 光波长为 1064 nm,中心频率为 40 MHz,衍射效率大于 50%。

非线性倍频晶体为国产 LBO 晶体,尺寸为 $4\text{ mm} \times 4\text{ mm} \times 20\text{ mm}$, II 类相位匹配(匹配角 $\theta = 25.6^\circ$, $\varphi = 90^\circ$),LBO 晶体两端面镀双波长减反射膜(透射率 $T > 99.7\% @ 1064\text{ nm}$,且 $T > 99.6\% @ 532\text{ nm}$),从而降低插入损耗。LBO 晶体由自制的紫铜控温炉精确控温,控温精度为 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 。匹配温度为 80°C ,由于晶体加工误差及不同温度下相位匹配角会发生变化,因此,在实际实验过程中,需要对 LBO 晶体进行微小的角度调整,同时优化晶体控温炉温度,使倍频转换效率最高。本实验中,最终将晶体控温炉的温度设定为 71.9°C 。

对 1064 nm 的基频振荡光全透射而对 532 nm 的光全反射,对 1064 nm 的基频振荡光全反射而对 532 nm 的二次谐波高透射,保证了 532 nm 绿光全部输出。将 LBO 晶体装入控温炉中,得到输出镜 M_3 处的基频光光斑最小,功率密度最高。因此,将控温炉尽量靠近 M_3 并固定,以实现较高的倍频转换效率。

3 实验结果与分析

在腔内倍频绿光激光器的直线谐振腔中撤去 LBO 晶体倍频部分和声光调 Q 开关,采用输出镜 ($T = 30\% @ 1064\text{ nm}$) 代替反射镜 M_2 ,可形成连续波(CW)1064 nm 激光。此外,通过增加双垂直调 Q 开关,可实现准连续波(QCW)1064 nm 的激光输出。图 3 为准连续 1064 nm 激光器装置。两个声

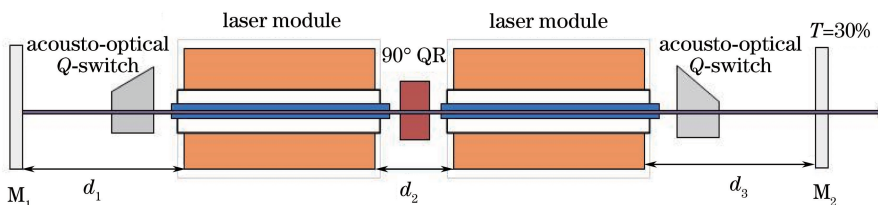


图3 QCW 1064 nm 的激光器示意图

Fig. 3 QCW laser diagram at 1064 nm

光调 Q 开关由同一个驱动源提供超声波信号,可确保其信号的同步性。声光调 Q 光波长为 1064 nm,中心频率为 40 MHz,衍射效率大于 50%。实验中,需精确调节调整声光调 Q 开关的角度,使两个声光调 Q 开关相互垂直,实现超声波孔径与振荡光孔径的匹配,从而提高衍射损耗。

当电抽运功率为 1371.8 W 时,1064 nm CW 激光器和 QCW 激光器的输出功率分别为 291.4 W 和 194.5 W,且电-光转换效率分别为 21.2% 和 14.2%,如图 4 所示。

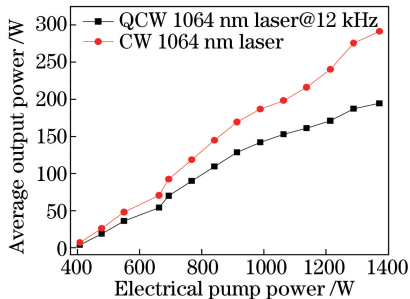


图 4 1064 nm CW 和 QCW 激光器的输出平均功率随电抽运功率的变化

Fig. 4 Average output power of 1064 nm CW and QCW laser as a function of electrical pump power

通过双棒串接 Nd:YAG 激光模块,结合 90° 旋光晶体的 LBO 腔内倍频方案,有效提高了绿光输

出平均功率。如图 5 所示,随着电抽运功率的增加,532 nm 绿光的平均功率逐渐增加,532 nm 激光脉冲宽度随电抽运功率的增加而减小。当电抽运功率为 1371.8 W 时,532 nm 绿光的输出功率为 126 W,电-光转换效率为 9.19%,倍频效率为 64.8%。

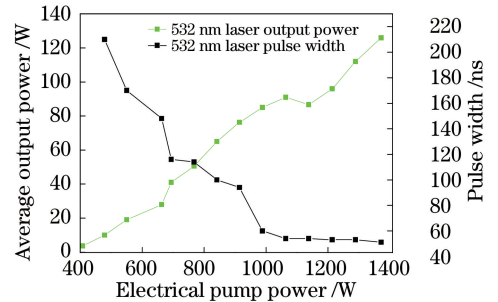


图 5 532 nm 激光的平均输出功率和脉冲宽度随电抽运功率的变化曲线

Fig. 5 Average output power and pulse width of laser at 532 nm as a function of electrical pump power

利用带宽为 1 GHz 的实验室数字示波器 (DSO7104B 型,Agilent 公司,美国)测量 532 nm 绿光激光的脉冲宽度。由图 6 可以看出,532 nm 绿光脉冲稳定,并且脉冲序列比较平齐。稳定的脉冲有利于 532 nm 绿光的稳定输出。当电抽运功率为 1371.8 W 时,脉冲宽度为 51 ns。

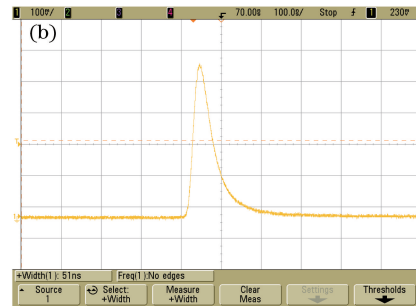
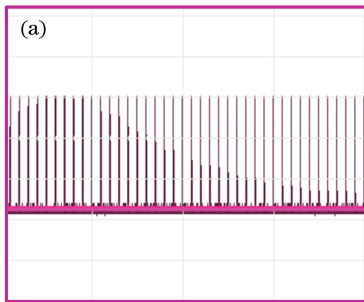


图 6 稳定的绿光脉冲序列与脉冲波形图。(a)绿光脉冲序列图(12 kHz);(b)绿光脉冲波形图(51 ns)

Fig. 6 Stable green pulse sequence and pulse waveform. (a) Pulse sequence diagram of green light (12 kHz); (b) pulse waveform of green light (51 ns)

532 nm 双垂直声光调 Q Nd:YAG 激光器的单脉冲能量随电抽运功率的变化曲线如图 7 所示。当电抽运功率为 1371.8 W 时,532 nm 激光器的单脉冲能量为 10.5 mJ。可以看出,532 nm 激光的单脉冲能量呈上升趋势。

图 8 为 532 nm 激光器的峰值功率随电抽运功率的变化曲线图,当电抽运功率为 1371.8 W 时,532 nm 激光器的峰值功率为 206 kW。可以看出,532 nm 激光的峰值功率呈上升趋势。

采用实验室全英文界面光谱仪(型号,生产商,生产国)测试 532 nm 的光谱,该光谱范围为(532±2) nm,如图 9 所示。该绿光激光器的光谱范围可满足激光显示要求。图 10 为 126 W 单模块 LBO 绿光激光器输出绿光时的实验实物图。LBO 晶体在实验过程中出现晶体膜损伤现象,原因在于:LBO 晶体的损伤阈值较低,而光功率密度较高。因此,采取增加声光调 Q 开关的重复频率方法来减小激光的光功率密度。

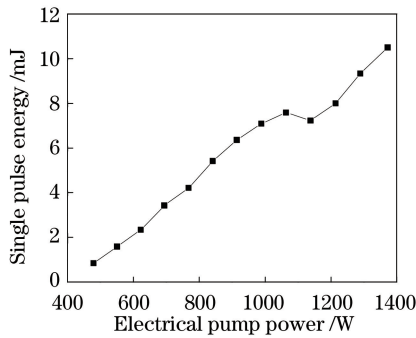


图 7 532 nm 激光单脉冲能量随电抽运功率的变化

Fig. 7 Single pulse energy of laser at 532 nm as a function of electrical pump power

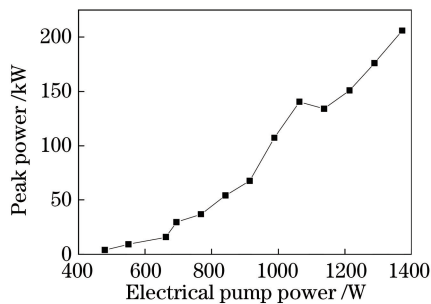


图 8 532 nm 激光峰值功率随电抽运功率的变化

Fig. 8 Peak power of laser at 532 nm laser as a function of electrical pump power

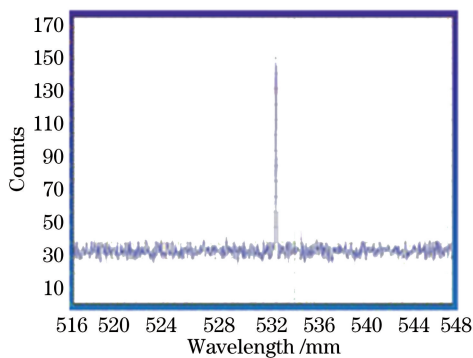


图 9 532 nm 激光的光谱图

Fig. 9 Spectrogram of laser at 532 nm

由实验可知,3~8 h 内激光器功率稳定输出,如图 11 所示。可以看出,该绿光激光器的稳定性较好,通过计算公式 $\pm \Delta \bar{P} / \bar{P} = \pm \left\{ \left[\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2 / n \right]^{1/2} \times (1 / \bar{P}) \right\}$ 可得,126 W 的 532 nm 激光器连续工作 3 h 后输出功率的波动为 $\pm 0.628\%$,其中 ΔP (上方带—)为功率相对波动大小, \bar{P} (上方带—)为功率平均值, P_i 为每隔 3 min 测得激光器的功率值, n 为测量次数。绿光激光器较好的稳定性主要得益于 LBO 晶体温度

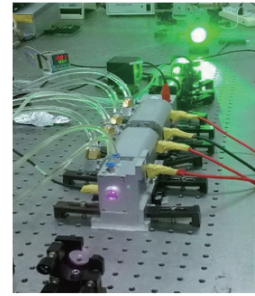


图 10 126 W 声光调 Q 腔内倍频绿光激光器实物图

Fig. 10 Physical map of 126 W acousto-optical Q-switched intracavity frequency-doubling green laser

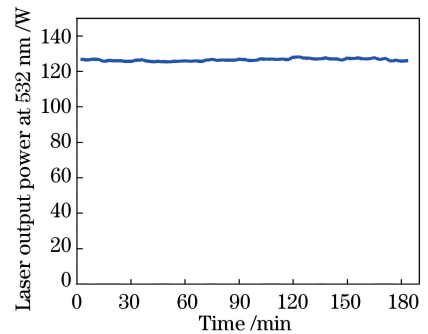


图 11 126 W 绿光激光器的稳定性

Fig. 11 Stability of 126 W green laser

的精确控制、高稳定的 Nd:YAG 增益光模块,以及热敏感性低的谐振腔设计。该激光器运行稳定,532 nm 绿光平均功率及功率稳定性等符合激光显示项目的技术指标要求。

4 结 论

基于 II 类相位匹配 LBO 晶体腔内倍频并结合双声光调 Q 技术,实现了平均功率为 126 W、重复频率为 12 kHz、脉冲宽度为 51 ns、单脉冲能量为 10.5 mJ、峰值功率为 205.9 kW 以及光-光转换效率为 9.19% 的高稳定性 532 nm Nd:YAG 激光器。LBO 晶体由控温炉精确控温,温度误差控制在 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 以内,有利于高效率、高稳定的二次谐波产生。126 W 的 532 nm 绿光激光器连续工作 3 h 的均方根不稳定性为 $\pm 0.628\%$,说明该样机运行稳定。532 nm 绿光平均功率及功率稳定性等符合激光显示项目的技术指标要求。

参 考 文 献

- [1] Li M L, Gao L, Shi W Z, *et al.* Progress in all-solid-state single-frequency lasers [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(8): 080003.
李梦龙, 高龙, 史文宗, 等. 全固态单频激光器研究进

- 展[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(8): 080003.
- [2] Li Y J, Zhao X, Feng J X, *et al.* Stable all-solid-state single-longitudinal-mode pulse laser [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(6): 061411. 李渊骥, 赵鑫, 冯晋霞, 等. 稳定输出的全固态单纵模脉冲激光器[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(6): 061411.
- [3] Wang Y Y, Xu D G, Liu C M, *et al.* A high-power high-stability Q-switched green laser with intracavity frequency doubling using a diode-pumped composite ceramic Nd:YAG laser[J]. *Chinese Physics B*, 2012, 21(9): 094212.
- [4] Chen H W, Chen X Y, Li X, *et al.* High average power Q-switched green beam generation by intracavity frequency doubling of diode-side-pumped Nd:YAG/HGTR-KTP laser [J]. *Optics & Laser Technology*, 2009, 41(1): 1-4.
- [5] Bo Y, Cui Q J, Geng A C, *et al.* 218 W, $M^2 = 20.2$ green beam generation by intracavity-frequency-doubled diode-pumped Nd:YAG laser[C]. *Conference on Lasers & Electro-Optics/Quantum Electronics and Laser Science Conference and Photonic Applications Systems Technologies*, 2007: 482-483.
- [6] Zhang Z L, Liu Q, Gong M L. 32.5 mJ and 4.6 ns 532 nm Q-switched Nd:YAG laser at 500 Hz [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(12): 2735-2738.
- [7] Lu T T, Huang M J, Liu D, *et al.* High efficient Q-switched Nd:YLF laser operating at 523.5 nm with near-diffraction-limited beam quality[C]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8796: 87961S.
- [8] Gao Q S, Ma Y, Pang Y, *et al.* Research progress in all-solid-state high power green laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23(9): 2373-2376. 高清松, 马毅, 庞毓, 等. 高功率全固态绿光激光技术研究进展[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(9): 2373-2376.
- [9] Liu D Y, Chi J J, Yao Y F. LD pumped high-repetition-rate high-power 532 nm Nd:YAG/LBO solid state laser [C]. *International Symposium on Photoelectronic Detection & Imaging*, 2013: 890407.
- [10] Yang K J, Zhao S Z, Li G Q, *et al.* Theoretical and experimental study of a laser-diode-pumped actively Q-switched Nd:YVO₄ laser with acoustic-optic modulator [J]. *Optics & Laser Technology*, 2005, 37(5): 381-386.
- [11] Xue J W, Li K, Fang Y J, *et al.* LD pumped Nd:YVO₄ external cavity PPMgOLN frequency doubling CW green laser [J]. *Laser Journal*, 2015, 36(11): 20-23. 薛竣文, 李坤, 方宇杰, 等. LD泵浦 Nd:YVO₄腔外 PPMgOLN 倍频连续绿激光器[J]. 激光杂志, 2015, 36(11): 20-23.
- [12] Na R, Chen T. YAGlaser polishing of 38CrMoAl surface[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(1): 011402. 那冉, 陈涛. 38CrMoAl 表面 YAG 激光抛光技术研究[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(1): 011402.
- [13] Chen G F, Du G G, Wang X H. LD-pumped Nd:YVO₄/KTP/BBO frequency-quadrupled ultra-violet laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 1999, 28(8): 684-687. 陈国夫, 杜戈果, 王贤华. LD 泵浦 Nd:YVO₄/KTP/BBO 紫外激光器[J]. 光子学报, 1999, 28(8): 684-687.
- [14] Yi J, Moon H J, Lee J, *et al.* Diode-pumped 100-W green Nd:YAG rod laser[J]. *Applied Optics*, 2004, 43(18): 3732-3737.
- [15] McDonagh L, Wallenstein R. Low-noise 62 W CW intracavity-doubled TEM₀₀ Nd:YVO₄ green laser pumped at 888 nm[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(7): 802-804.
- [16] Dudley D R, Mehl O, Wang G Y, *et al.* Q-switched diode pumped Nd:YAG rod laser with output power of 420 W at 532 nm and 160 W at 355 nm [C]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7193: 71930Z.
- [17] Poulter M, Hay N, Fulford B, *et al.* Q-switched Nd:YAG lasers for high average-power and high peak-power operation [C]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7193: 719309.
- [18] Stolzenburg C, Schuele W, Zawischa I, *et al.* 700 W intracavity-frequency doubled Yb:YAG thin-disk laser at 100 kHz repetition rate [C]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7578: 75780A.
- [19] Ren Z Y, Huang Z M, Jia S, *et al.* 532 nm laser based on V-type doubly resonant intra-cavity frequency-doubling[J]. *Optics Communications*, 2009, 282(2): 263-266.
- [20] Zhang S B, Cui Q J, Xiong B, *et al.* High electrical-to-green efficiency high stability intracavity-frequency-doubled Nd:YAG-LBO QCW 532 nm laser with a straight cavity [J]. *Laser Physics Letters*, 2010, 7(10): 707-710.
- [21] Salamu G, Ionescu A, Brandus C. Generation of high-peak power 532-nm green pulses from composite, all-ceramics, passively Q-switched Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG laser [C]. *Proceedings of SPIE*,

2013, 8882: 888206.

- [22] Jiang W, Zhu S Q, Li Z, *et al.* High average output power passively Q-switched LD side-pumped laser by using Nd:YAG/Cr:YAG/YAG composite crystal [C]. Proceedings of SPIE, 2015, 9621: 96210S.
- [23] Chen H M, Zhao X Y. Theory and application of laser[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009.
陈鹤鸣, 赵新彦. 激光原理及应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.