

高功率窄脉宽宽温 Nd:GdVO₄ 激光器

鲁绍文^{1,2}, 孟洁¹, 赵学强^{1,2}, 施君杰¹, 孟俊清¹, 于真真¹, 侯霞¹, 陈卫标¹, 刘源^{1*}

¹中国科学院上海光学精密机械研究所空间激光信息传输与探测技术重点实验室, 上海 201800;

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 报道了一种可宽温稳定工作的高功率亚纳秒被动调 Q 的 Nd:GdVO₄ 激光器。激光振荡级采用平凹腔结构, 以尾纤耦合半导体激光器端面抽运 Nd:GdVO₄ 晶体, 以 Cr⁴⁺:YAG 作为可饱和吸收体进行被动调 Q。在抽运吸收能量为 5.9 mJ 时, 振荡级输出峰值功率为 1.5 MW, 脉冲宽度为 600 ps 的脉冲激光, 单脉冲能量为 0.9 mJ, 光-光转换效率为 15.4%, 光束发散角为 1.2 mrad。采用端面抽运的双程放大结构对振荡级输出激光进行放大, 最终得到峰值功率为 3.5 MW, 单脉冲能量为 2.1 mJ 激光输出。测量了不同温度下的激光能量的变化, 结果表明, 在 20~36 °C 的温度范围内, 激光输出能量的抖动量(均方根)为 5%。激光器结构紧凑、功耗低, 可作为未来空间激光应用的光源。

关键词 激光器; Nd:GdVO₄; 高功率; 窄脉宽; 宽温

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0401009

Temperature Insensitive Nd:GdVO₄ Laser with High Peak Power and Narrow Pulse Width

Lu Shaowen^{1,2}, Meng Jie¹, Zhao Xueqiang^{1,2}, Shi Junjie¹,
Meng Junqing¹, Yu Zhenzhen¹, Hou Xia¹, Chen Weibiao¹, Liu Yuan¹

¹Key Laboratory of Space Laser Communication and Detection Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract A high peak power, sub-nanosecond passively Q-switched Nd:GdVO₄ laser with wide temperature stability is presented. The oscillator adopts a flat-concave cavity structure with pigtail coupling of semiconductor laser diode, and takes Cr⁴⁺:YAG as saturable absorber. When the pump absorption energy is 5.9 mJ, the output peak power of the oscillation is 1.5 MW, with pulse width of 600 ps and pulse energy of 0.9 mJ. The efficiency of light to light conversion is 15.4%. The divergence angle is 1.2 mrad. An end pumped double pass amplifier is used and the output peak power of 3.5 MW with pulse energy of 2.1 mJ is achieved. The output laser energies at different temperatures are measured. The results show that the jitter of laser output energy (root-mean-square) is 5% when the temperature is in the range of 20-36 °C. The laser has compact structure and low power consumption, which can be used as light source for future space laser applications.

Key words lasers; Nd:GdVO₄; high peak power; narrow pulse width; temperature insensitive

OCIS codes 140.3280; 140.3538; 140.3540; 140.3410

收稿日期: 2017-09-08; 收到修改稿日期: 2017-11-01

基金项目: 上海市自然科学基金项目(15ZR1445000)

作者简介: 鲁绍文(1989—), 男, 硕士研究生, 主要从事宽温激光器方面的研究。E-mail: lushaowen@siom.ac.cn

导师简介: 侯霞(1975—), 女, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事固体激光技术、星载激光遥感及激光雷达等方面的研究。

E-mail: hou_xia@siom.ac.cn

* 通信联系人。E-mail: liuyuandt@126.com

1 引 言

随着激光技术的发展,全固态高功率被动调Q脉冲激光器因其具有体积小、质量轻、功耗低等优点在空间应用领域得到了广泛的应用。欧洲空间局(ESA)使用的 LIBS 激光器是基于被动调Q的Nd:YAG激光器,激光重复频率50 Hz、脉冲宽度2.1 ns、单脉冲能量1.5 mJ^[1]。我国已发射或在研的星载激光器也以高功率、低重频的固体激光器为主^[2]。由于空间环境的复杂性如温差大、辐射强以及系统资源有限,对激光器的体积、热管理和温控技术等有着特殊要求,因此高功率、窄脉宽宽温激光器的研究具有重要意义。

激光器宽温稳定工作的难点主要在于半导体抽运源中心波长随温度漂移,中心波长的温漂系数为0.2~0.4 nm/K。为了增强激光器的宽温稳定工作特性,2006年Schilling等^[3]采用Nd:YAG晶体作为激光晶体,通过增加激光晶体对抽运光的吸收长度实现了在-20~50℃的温度范围内输出能量为10 mJ、重频为10 Hz的稳定激光。2013年,中国科学院上海光学精密机械研究所于真真等^[4]利用中心波长温漂系数为0.049 nm/℃的垂直腔面发射激光器(VCSEL)抽运Nd:YAG晶体,实现了在23±8℃范围内稳定工作。2017年,中国科学院上海光学精密机械研究所Xie等^[5]利用三波长抽运源抽运Nd:YAG晶体,实现了在10~45℃温度范围内输出能量为105 mJ、脉冲宽度为200 μs、转换效率为14%的多模激光。2017年,西安电子科技大学屈鹏飞等^[6]通过组合Nd:YAG与Nd:YVO₄晶体,降低了激光器对抽运激光二极管(LD)波长随温度变化的敏感程度,实现了在22~32℃温度范围内激光的稳定输出。通过增加激光晶体对抽运光的吸收长度或采用特殊类型的半导体抽运源来实现激光器的宽温工作,一方面增加了激光系统的复杂性,降低了系统的转换效率和输出光束质量;另一方面,对于被动调Q激光器而言,增加激光晶体对抽运光的吸收长度不利于短脉冲的激光。

Nd:GdVO₄晶体是一种较新型的激光增益介质,其发射截面为 $7.9 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$,在吸收峰808 nm处的吸收截面为 $5 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$,热导率为 $11.7 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K}^{-1})^{-1}$ ^[7]。所以Nd:GdVO₄晶体具有更高的吸收和发射效率。同时,Nd:GdVO₄在808 nm吸收峰处的半峰全宽(FWHM)为4 nm,是Nd:YAG晶体的2倍^[8-9]。因此Nd:GdVO₄晶体是

高效率、窄脉宽、高能量激光系统的理想晶体介质之一^[10-11]。目前关于采用Nd:GdVO₄晶体实现激光器宽温工作的报道较少。本文采用主级振荡功率放大(MOPA)结构。为了保证输出光束质量,振荡级和放大级均为端面抽运形式,以Nd:GdVO₄晶体作为激光增益介质,以尾纤耦合LD作为抽运源。振荡级采用平-凹谐振腔结构,以Cr⁴⁺:YAG晶体作为可饱和吸收体进行被动调Q。放大级为双程放大结构,以提高放大级的提取效率。最终输出激光的单脉冲能量为2.1 mJ,峰值功率为3.5 MW,脉冲宽度为600 ps。整个激光系统体积小,功耗低,可在20~36℃的温度范围内稳定工作,为小型宽温激光器提供一种参考方案。

2 振荡级输出激光特性

2.1 实验装置

激光器的实验装置如图1所示,采用主振荡功率放大(MOPA)结构,振荡级采用端面抽运的平-凹谐振腔结构,抽运源为nLIGHT公司的带尾纤耦合连续(QCW)808 nm半导体激光器,尾纤纤芯直径为400 μm,数值孔径为0.22,输出的最大峰值功率为100 W,光谱宽度约为2 nm。抽运LD以脉冲方式工作,重复频率为30 Hz,抽运脉冲宽度为80 μs。采用1:3的光学耦合系统将抽运光聚焦进激光晶体内部,焦点处光斑直径约为1.2 mm。激光晶体为c轴切割的Nd:GdVO₄晶体,尺寸为4 mm×4 mm×5 mm,原子掺杂浓度为0.3%。除通光方向外,晶体其余四个侧面为毛面,用于传导冷却。为了使晶体有效散热,晶体采用铝箔包裹,置于紫铜热沉上。晶体入射端面镀有808 nm波段的高透射膜和1064 nm波段的高反射膜,用作谐振腔的一个反射腔镜。输出腔镜为平凹镜,曲率半径为600 mm,对1064 nm波段的透射率为50%。被动调Q开关是初始透射率为35.6%的Cr⁴⁺:YAG,谐振腔总长度约为10 mm。

激光放大级采用端面抽运的双程放大结构,采用的晶体、抽运源及其耦合系统与振荡级的相同。为了使放大级晶体内的激光与抽运光的模式匹配,采用焦距为120 mm的平凸透镜将振荡级输出激光成像至放大级晶体。通过调整反射镜Mirror 2的角度,使振荡级激光以一定角度入射至放大级晶体,然后通过晶体后端面的反射使激光在晶体内部进行双程放大后输出。

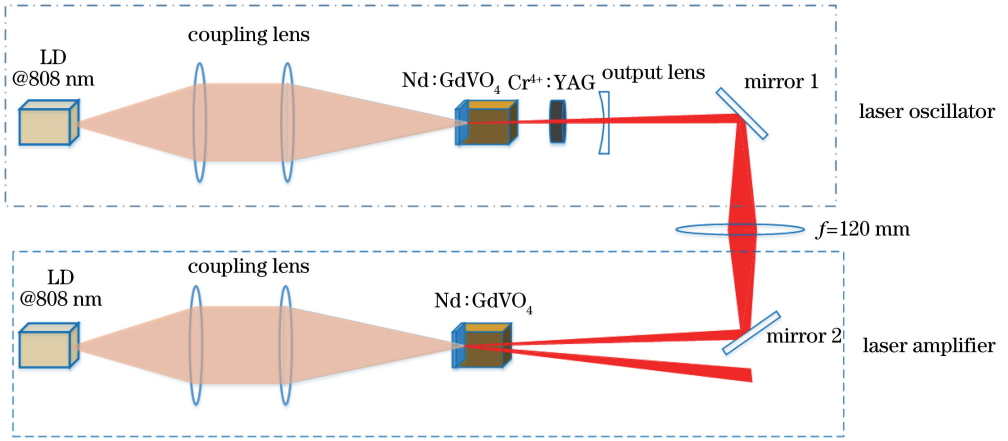


图 1 激光器结构图

Fig. 1 Experimental setup of laser

2.2 数值计算

由调 Q 激光器的速率方程^[12-15]:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = \varphi \left(c \sigma n \frac{l}{L} - \frac{\varepsilon}{t_R} \right), \quad (1)$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -\gamma n \varphi \sigma c, \quad (2)$$

$$n_i - n_f = n_i \ln \left(\frac{n_i}{n_f} \right), \quad (3)$$

$$n_t = \frac{1}{2\sigma l} (-\ln R_{\text{opt}} + \delta), \quad (4)$$

$$R_{\text{opt}} = \exp \left[-\delta \left(\frac{z-1-\ln z}{\ln z} \right) \right], \quad (5)$$

式中 φ 为光子数密度, n 为反转粒子数密度, l 为激活介质长度, L 为谐振腔长度, c 为真空中的光速, σ 为受激发射截面, R_{opt} 为输出腔镜的最佳反射率, $t_R = 2L/c$ 表示光子寿命, γ 为能级简并因子, $z = 2g_0 l / \delta$ 为无量纲变量函数, g_0 为小信号增益系数, $\varepsilon = -\ln R_{\text{opt}} + \delta + \zeta(t)$, 其中 ε 为腔内往返损耗, $-\ln R_{\text{opt}}$ 为耦合损耗, δ 为衍射和吸收损耗, $\zeta(t)$ 为 Q 开关损耗。

调 Q 激光器的输出脉冲宽度和能量分别为

$$\Delta t_p = \tau_c \frac{n_i - n_t}{n_i - n_t [1 + \ln(n_i/n_t)]}, \quad (6)$$

$$E = \frac{h\nu A}{2\sigma\gamma} \ln \left(\frac{1}{R_{\text{opt}}} \right) \ln \left(\frac{n_i}{n_f} \right), \quad (7)$$

式中 n_i 为激光介质的初始反转粒子数, n_t 为阈值反转粒子数, n_f 为最终反转粒子数, $h\nu$ 为光子能量, A 为有效光束截面, τ_c 为荧光寿命。

将表 1 参数代入(1)~(7)式中得到, 在抽运吸收能量为 6.5 mJ 时, 最佳反射率 $R_{\text{opt}} = 0.5$, 脉宽 $\Delta t_p = 0.5$ ns, 输出激光脉冲能量为 $E = 1$ mJ。

表 1 激光器系统的参数值

Table 1 Parameters of laser system

Parameter	Value	Parameter	Value
l / mm	5	τ_c / μs	100
L / mm	10	A / m^2	4.6×10^{-7}
δ	0.06	$h\nu$ / J	1.86×10^{-19}
σ / cm^2	7.9×10^{-19}	g_0 / cm^{-1}	3
γ	1	c / ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	3×10^8

激光晶体的热透镜效应对激光器的稳定性产生重要的影响, 不仅导致输出功率产生波动而且造成非输出的光束质量变差^[16]。晶体的热焦距大小描述为^[17]

$$f = \frac{\pi K_c \omega_p^2}{\eta P dn/dT} \times \frac{1}{1 - \exp(-al)}. \quad (8)$$

由此可见, 热焦距的大小与晶体的热导率 K_c 、热光系数 dn/dT 、抽运光功率 P 以及抽运光束半径 ω_p 有关。

图 2 仿真了当 $\alpha = 4.1 \text{ cm}^{-1}$ 、 $l = 5 \text{ mm}$ 、 $\omega_p = 0.6 \text{ mm}$ 时, Nd:YAG、Nd:YVO₄、Nd:YLF 以及 Nd:GdVO₄ 晶体的热焦距随抽运光功率的变化曲线, 4 种晶体的物理参数如表 2 所示。

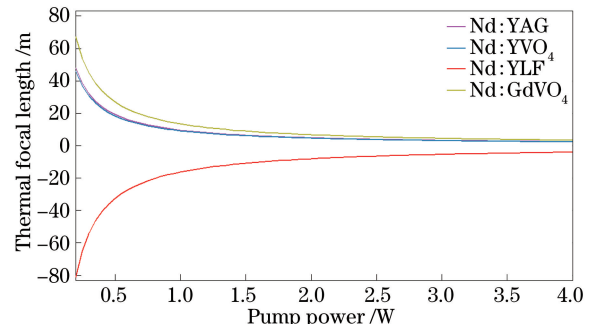


图 2 晶体热焦距随抽运光功率的变化

Fig. 2 Thermal focal length versus pump power of crystal

表 2 激光晶体的物理参数

Table 2 Physical parameters of laser crystal

Crystal	Thermal conductivity	Thermal-optical
	$K_c / [W \cdot (m \cdot K^{-1})^{-1}]$	coefficient $dn/dT / K^{-1}$
Nd:YAG	13	7.3×10^{-6}
Nd:YVO ₄	5.1	3×10^{-6}
Nd:YLF	6	-2×10^{-6}
Nd:GdVO ₄	11.7	4.7×10^{-6}

Nd:GdVO₄ 晶体相对于 Nd:YAG、Nd:YVO₄ 的热透镜效应较弱,这主要是因为 Nd:GdVO₄ 晶体具有较大的热导率系数以及较小的热光系数。当连续抽运功率为 11 W 时,Nd:GdVO₄ 晶体产生的热焦距为 1.2 m。

2.3 实验结果

按上述说明搭建激光器系统,振荡级抽运源采用重复频率为 30 Hz 的脉冲方式抽运。振荡级输出激光能量随晶体吸收的抽运能量变化的曲线如图 3 所示。当抽运脉宽为 80 μs 时,振荡级的激光输出阈值为 3.6 mJ,若晶体的吸收抽运能量为 5.9 mJ,则激光输出能量为 0.9 mJ,相应的峰值功率为 1.5 MW,其光-光转换效率为 15.4%;当抽运脉宽为 100 μs 时,振荡级的激光输出阈值为 4.3 mJ,若晶体

的吸收抽运能量为 7.3 mJ,则激光器输出能量为 0.83 mJ,相应的峰值功率为 1.4 MW,其光-光转换效率为 11.4%。

采用 Agilent 公司的采样率为 40 GS·s⁻¹、带宽为 13 GHz 的示波器测量,当吸收抽运能量为 5 mJ 时,激光输出的脉冲延迟时间和脉冲波形如下图 4 所示。此时激光脉冲的出光时间为 62.5 μs,输出激光的脉冲宽度约为 600 ps。同时,输出具有良好的光束质量。

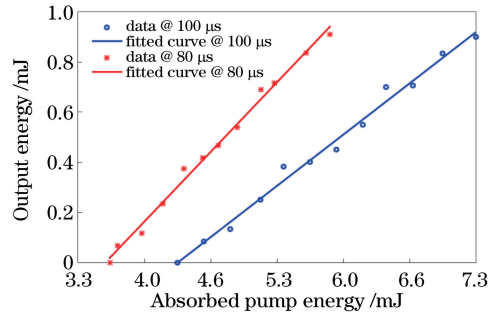


图 3 激光器振荡级输出能量随吸收抽运能量的关系
Fig. 3 Output energy versus absorbed pump energy of laser oscillation

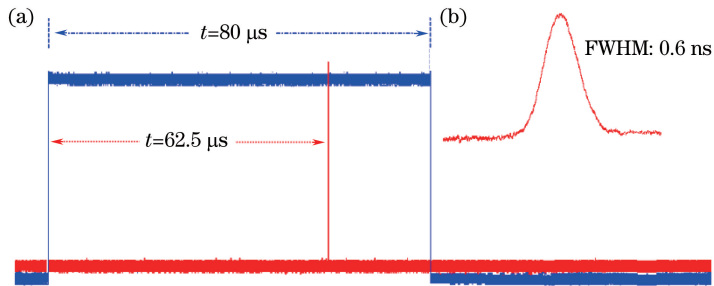


图 4 (a) 脉冲延迟时间; (b) 典型的脉冲波形
Fig. 4 (a) Pulse delay time; (b) typical pulse profile

3 放大级激光特性

放大级采用端面抽运的双程放大结构,在振荡级与放大级间加入一个 $f = 120$ mm 的透镜,调整透镜在光路中的位置使放大级晶体内激光与抽运光有较好的模式匹配。

图 5 是不同的放大程数下,放大级输出的激光能量。在双程放大下,最终的输出激光能量为 2.1 mJ,对应的峰值功率为 3.5 MW。在相互正交的两个方向上 M^2 分别为 $M_x^2 = 1.474$ 和 $M_y^2 = 1.4$,用 Spiricon 公司生产的 CCD 测得振荡级输出光斑 (a) 在 x 和 y 方向上的光斑大小分别为 1.21 mm 和 1.20 mm,双程放大后仍可以保持良好的激光模式

输出性能。

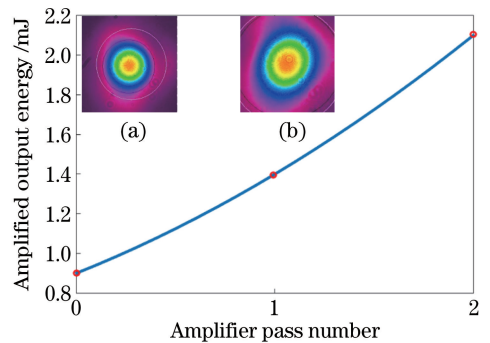
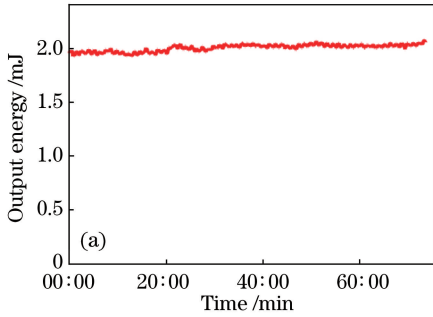


图 5 放大级输出能量与放大程数的关系
Fig. 5 Amplified output energy versus amplifier pass number

对放大后输出激光的能量稳定性进行了测试,图 6(a)为实时监测连续 1 h 的激光输出能量的变化。可以看出,输出激光的能量稳定在 2 mJ 左右,不稳定性为 0.4%,表明激光器具有良好的输出稳定性。为了验证激光器的宽温工作性能,测试了不同



温度下输出激光的能量变化,如图 6(b)所示。可以看出,当温度由 20 °C 增加到 36 °C 时,能量的抖动量为 5%,表明输出激光具有良好的温度稳定性,验证了 Nd:GdVO₄ 晶体作为宽温激光器增益介质的优势。

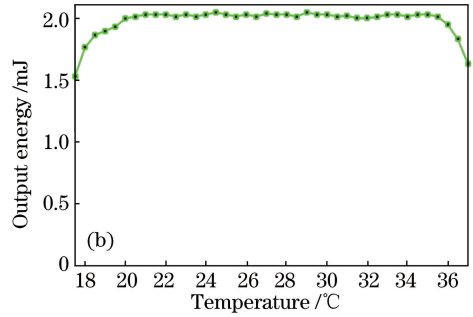


图 6 输出功率的(a)时间稳定性和(b)温度稳定性

Fig. 6 Output power versus (a) time stability and (b) temperature stability

4 结 论

提出了一种高峰值功率、窄脉冲宽温全固态被动调 Q 激光系统。采用 Cr⁴⁺:YAG 晶体进行被动调 Q,得到最窄脉宽为 0.6 ns。当振荡级晶体的吸收抽运能量为 5.9 mJ 时,输出峰值功率为 1.8 MW,此时的光-光转换效率为 15.4%。经过双程放大后得到了峰值功率为 3.5 MW 的激光输出。激光器可以在 20~36 °C 的温度范围内稳定工作,输出能量的抖动量为 5%。这体现了 Nd:GdVO₄ 作为激光晶体所具有的优势。整个激光系统结构简单,稳定性高,可作为空间激光探测的光源。

参 考 文 献

[1] Yu Z Z, Hou X, Zhou C Y. Progress and current state of space-borne laser altimetry [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(2): 020006.
于真真, 侯霞, 周翠芸. 星载激光测高技术发展现状 [J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(2): 020006.

[2] Yang H, Meng J, Ma X, *et al.* Compact and high-energy diode-side-pumped Q-switched Nd:YAG slab laser system for space application[J]. *Chinese Optics Letters*, 2014, 12(12): 121406.

[3] Schilling B W, Chinn S R, Hays A D, *et al.* End-pumped 1.5 μm monoblock laser for broad temperature operation[J]. *Applied Optics*, 2006, 45(25): 6607-6615.

[4] Yu Z Z, Hou X, Zhou Q L. VCSEL pumped compact wide-temperature Nd:YAG laser and grazing-incidence amplifier [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(6): 0602003.

于真真, 侯霞, 周群立, 等. 垂直腔面发射激光器抽运小型宽温 Nd:YAG 激光器及掠入射式放大器的研究 [J]. *中国激光*, 2013, 40(6): 0602003.

[5] Xie W, Ma X, Zhu X, *et al.* Temperature insensitive high energy Q-switched Nd:YAG slab laser [J]. *Laser Physics Letters*, 2017, 14(6): 065803.

[6] Qu P F, Wang S Y, Shao X Z, *et al.* Temperature Stability of Nd:YAG/Nd:YVO₄ Combination Crystals Laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(6): 0614001.
屈鹏飞, 王石语, 邵新征, 等. Nd:YAG/Nd:YVO₄ 组合晶体激光器温度稳定性研究 [J]. *光学学报*, 2017, 37(6): 0614001.

[7] Pavel N, Sato Y, Taira T, *et al.* Generation of 5 W continuous-wave green power at 531 nm based on a frequency-doubled Nd:GdVO₄ micro-laser pumped into the emitting level at 879 nm [C]. *Advanced Solid-State Photonics*, 2005: MF19.

[8] Wang Z M, Zhang F F, Zuo J W, *et al.* Low-timing-jitter high-power mode-locked 1063 nm Nd:GdVO₄ master oscillator power amplifier [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(28): 8425-8428.

[9] Zagumennyi A I, Ostroumov V G, Shcherbakov I A, *et al.* The Nd:GdVO₄ crystal: a new material for diode-pumped lasers [J]. *Soviet Journal of Quantum Electronics*, 1992, 22(12): 1071-1072.

[10] Lupei V, Pavel N, Sato Y, *et al.* Highly efficient 1063 nm continuous-wave laser emission in Nd:GdVO₄ [J]. *Optics Letters*, 2003, 28(23): 2366-2368.

[11] Minassian A, Thompson B A, Smith G R, *et al.* 104 W diode-pumped TEM₀₀ Nd:GdVO₄ master oscillator power amplifier [C]. *Advanced Solid-State*

- Photonics Technical Digest (Optical Society of America), 2005: MF46.
- [12] Degnan J J. Theory of the optimally coupled Q-switched laser [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1989, 25(2): 214-220.
- [13] Wagner W G, Lengyel B A. Evolution of the giant pulse in a laser [J]. Journal of Applied Physics, 1963, 34(7): 2040-2046.
- [14] Zhang X, Zhao S, Wang Q, *et al.* Modeling of diode-pumped actively Q-switched lasers [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1999, 35 (12): 1912-1918.
- [15] Koechner W. Solid-state laser engineering[M]. Sun W, Jiang Z W, Cheng G X, Transl. Beijing: Science Press, 2002: 133-138.
- 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: 133-138.
- [16] Qu P F, Wang S Y, Guo Z, *et al.* Adaptive adjusting technique of thermal effect to laser beam quality [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37 (5): 0514001.
- 屈鹏飞, 王石语, 过振, 等. 热效应对激光器光束质量的自适应调整技术[J]. 光学学报, 2017, 37(5): 0514001.
- [17] Yin Q, Lu H, Su J, *et al.* High power single-frequency and frequency-doubled laser with active compensation for the thermal lens effect of terbium gallium garnet crystal[J]. Optics Letters, 2016, 41 (9): 2033-2036.