

激光与光电子学进展

大能量短纳秒脉冲 Nd:YAG 激光

杨熙航^{1,3,4}, 周子涵^{1,3,4}, 王志敏^{1*}, 崔大复^{1,2}, 彭钦军^{1,2}¹中国科学院理化技术研究所固体激光重点实验室, 北京 100190;²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;³齐鲁中科光物理与工程技术研究所, 山东 济南 250000;⁴中国科学院大学, 北京 100049

摘要 报道了一台大能量高光束质量激光二极管侧面泵浦的短纳秒脉冲 Nd:YAG 激光器。激光器包括纳秒电光调 Q 振荡器和两级侧面泵浦 Nd:YAG 棒状放大器。振荡级采用 Nd:YVO₄ 晶体作为增益介质可减少热致双折射效应并降低腔内损耗。放大级采用两级串联放大的方式以提高放大倍数。最终, 在脉冲重复频率为 10 Hz 时, 获得了最大单脉冲能量为 377 mJ、脉冲宽度为 5.9 ns、平均光束质量因子为 1.86 的 1064 nm 激光输出。这种大能量、窄脉宽、高光束质量激光器有望用于远距离高精度的激光测距。

关键词 激光器; 大能量; 电光调 Q; 窄纳秒脉宽; 激光放大器

中图分类号 TN248.2

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP221588

High Energy Side-Pumped Narrow Nanosecond Pulses
Nd:YAG Laser AmplifierYang Xihang^{1,3,4}, Zhou Zihan^{1,3,4}, Wang Zhimin^{1*}, Cui Dafu^{1,2}, Peng Qinjun^{1,2}

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

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

³Institute of Optical Physics and Engineering Technology, Qilu Zhongke, Jinan 250000, Shandong, China;

⁴University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract We reported a high energy, high beam quality LD side-pumped narrow nanosecond pulses Nd:YAG laser amplifier. The amplification system consists of a nanosecond electro-optic Q-switched oscillator and a two-stage side-pumped Nd:YAG rod amplifier. The oscillation stage uses Nd:YVO₄ crystal as the gain medium to reduce thermally induced birefringence and reduce intra-cavity losses. The amplification stage adopts a two-stage amplification structure to improve the magnification. Finally, when the pulse repetition frequency is 10 Hz, 1064 nm laser output with maximum single pulse energy of 377 mJ, pulse width of 5.9 ns, and average beam quality factor of 1.86 is obtained.

Key words lasers; high energy; electro-optic Q-switched; narrow nanosecond pulse width; laser amplifier

1 引言

二极管泵浦的大能量窄脉宽全固态 Nd:YAG 激光器具有结构紧凑、成本低等优势, 在深海探测、激光微加工、芯片制造、激光卫星测距等领域都拥有着广泛的应用^[1-8]。电光调 Q 技术是获得纳秒窄脉宽激光的一种常用方法^[9]。对于单脉冲能量较高的短脉冲激光

器, 通常采用行波放大或再生放大的方式对种子激光进行放大, 以实现大能量的脉冲激光输出^[10-11]。

2010 年, 中国工程物理研究院李建民等^[12]利用折叠式角锥棱镜和 Nd:YAG 电光调 Q 技术, 在 10 Hz 的重复频率下获得单脉冲能量为 324.5 mJ、脉冲宽度 7.6 ns、光束质量 $\beta=2.09$ 的激光输出。2018 年, 北京工业大学激光工程研究院曹明真等^[13]采用侧面泵浦

收稿日期: 2022-04-12; 修回日期: 2022-05-12; 录用日期: 2022-05-14; 网络首发日期: 2022-05-24

通信作者: *wangzmok@163.com

Nd:YAG 主振荡功率放大系统, 获得单脉冲能量 700 mJ、脉宽 10 ns 的激光输出, 但其光束质量较差, 为 $M_x^2 = 7.9$ 和 $M_y^2 = 12.4$ 。2014 年, Tokita 等^[14]采用三层 Yb:YAG 活性层的 YAG 陶瓷复合材料获得单脉冲能量 500 mJ、脉冲宽度 10 ns、重复频率 10 Hz 的激光输出, 输出光束具有高斯分布。2021 年, 山东大学的孟君等^[15]采用 Nd:YAG 电光调 Q 及两级双头串接放大, 获得单脉冲能量 580 mJ、脉冲宽度 18 ns、重复频率 100 Hz 的激光输出, 但其光束质量仍然欠佳 ($M_x^2 = 4.6$ 和 $M_y^2 = 3.7$)。

综合上述前人的研究可以看出, 端面泵浦的结构通常增益较低, 不易获得大能量的激光输出, 而采用侧面泵浦的结构输出的激光其光束质量较差^[16]。因此, 为了获得大能量、高光束质量的激光输出, 本文设计了一个电光调 Q 激光二极管侧面泵浦 Nd:YAG 激光器, 在振荡级中, 采用 Nd:YVO₄ 晶体作为种子激光的增益介质, 减小了热致双折射效应的产生, 在很大程度上降低了退偏损耗^[17]。为了获得大能量、窄脉宽、高光束质量的激光输出, 本文使用双程和单程组合的放大的方式对种子光进行能量放大, 放大级采用五维两线侧面泵浦 Nd:YAG 晶体激光模块, 利用透镜组对光斑大小进行优化, 在提高放大倍数的同时减小了热效应带来的晶体损伤。最终得到最大单脉冲能量 377 mJ、脉冲宽度 5.9 ns、重复频率为 10 Hz 的激光输出, 光束质量得到显著的改善, 其平均光束质量 $M^2 = 1.86$ 。

2 理论计算与实验研究

2.1 振荡和放大级理论

根据激光 Q 开关理论, 采用速率方程对调 Q 输出的激光脉冲特性进行了模拟^[18], 表示为

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = \varphi \left(c \sigma n \frac{l}{l'} - \frac{\varepsilon}{t_R} \right), \quad (1)$$

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

式中: t_R 为谐振腔内往返时间; ε 为谐振腔损耗; φ 为光子数密度; n 为反转粒子数密度; σ 为受激发射截面; l 为激活材料的长度; l' 为谐振腔的长度; L 为包括散射、衍射和吸收等所有的随机损耗; R 为输出耦合镜的反射率。Q 开关脉冲的模拟结果如图 1 所示, 可以看出, 其脉冲宽度约为 5 ns。

根据 Degnan 等推导出的调 Q 激光器中输出镜反射率 R_{opt} 和输出能量 E_{out} 与 z 的关系式, 在式 (1)、(2) 的基础上对激光器在最佳运转条件下的输出能量进行了分析,

$$R_{\text{opt}} = \exp \left[-L \left(\frac{z-1-\ln z}{\ln z} \right) \right], \quad (3)$$

$$E_{\text{out}} = \frac{Ah\nu L}{2\sigma\gamma} (z-1-\ln z), \quad (4)$$

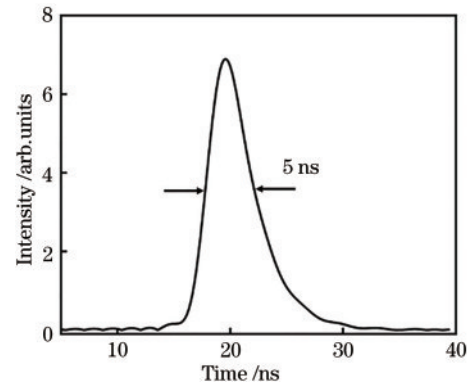


图 1 振荡级激光脉冲特性的模拟结果

Fig. 1 Simulation results of laser pulse characteristics of oscillating stage

式中: $z = \frac{2\sigma N_i l}{L}$ 为无量纲变量函数。图 2 和图 3 分别是 R_{opt} 和 E_{out} 与 z 的变化关系示意图, 可以看出, 当谐振腔损耗为 0.1 时, z 的值约为 36, 此时输出镜最佳反射率 R_{opt} 约为 40%, 振荡级输出的激光能量 E_{out} 约为 0.9 mJ。以下数据用于振荡级的理论计算, $\sigma = 15.6 \times 10^{-23} \text{ m}^2$, $l = 30 \text{ mm}$, $l' = 240 \text{ mm}$, $R = 0.6$, $L = 0.03$, 反转粒子数密度是采用公式 $P_{\text{peak}} \times \tau / (h \times$

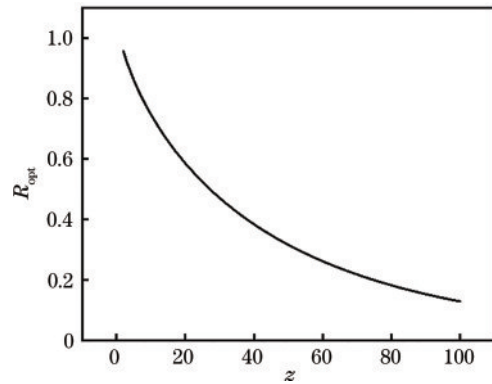


图 2 最佳输出镜反射率与 z 值的关系曲线

Fig. 2 Reflectivity of the optimal output mirror versus z

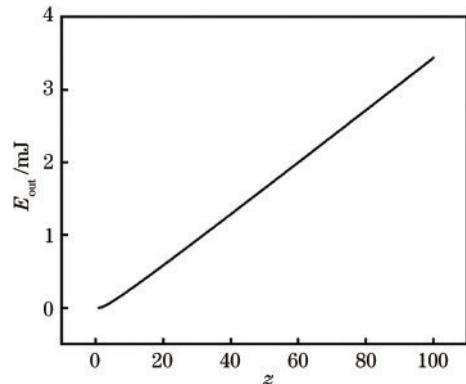


图 3 输出激光能量与 z 值的关系曲线

Fig. 3 Output laser energy versus z

$\frac{c}{\lambda} \times \pi \times R^2 \times l$) 计算得到的, 其中 τ 为增益介质的上能级寿命, 为 $90 \mu\text{s}$ 。

根据脉冲放大理论, 本文对激光通过放大器系统后的脉冲特性进行了分析。当泵浦对反转粒子数的影响可以忽略时, 脉冲放大的过程^[18]满足

$$N(x, t) = N_0 \left(t - \frac{x}{c} \right) / \left\{ 1 - \left[1 - \exp \left[-\sigma \int_0^x \varphi_0(x') dx' \right] \right] \exp \left[-2\sigma c \int_{-\infty}^{t-x/c} N_0(t') dt' \right] \right\}, \quad (5)$$

$$\varphi(x, t) = \varphi_0(x) \exp \left[-\sigma \int_0^x \varphi_0(x') dx' \right] / \left\{ \exp \left[2\sigma c \int_{-\infty}^{t-x/c} N_0(t') dt' \right] + \exp \left[-\sigma \int_0^x \varphi_0(x') dx' \right] - 1 \right\}, \quad (6)$$

式中: x 是激光在放大器增益介质中的位置。以下数据用于脉冲放大的理论计算, $\sigma = 2.9 \times 10^{-23} \text{ m}^2$, 增益介质长度为 82 mm , 荧光寿命 $\tau_f = 230 \mu\text{s}$, 泵浦波长 $\lambda_p = 808 \text{ nm}$, 光斑大小 $\omega_p = 3 \text{ mm}$ 。图 4 为采用式 (5)、(6) 计算得到的激光经过单程放大后的强度变化。根据图 4 可以看出, 在放大过程中, 激光的脉冲宽度基本保持不变, 单通放大倍数约为 10 倍。

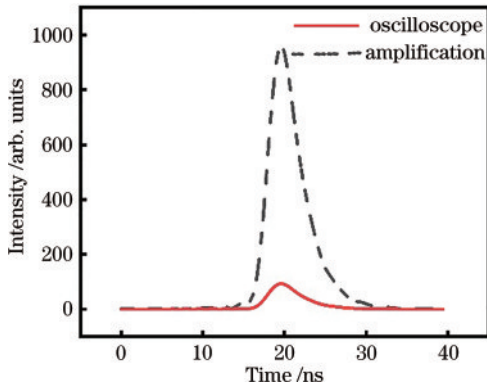


图 4 单通放大时激光脉冲强度随时间变化的模拟结果
Fig. 4 Simulation results of laser pulse intensity changing with time in single pass amplification

2.2 电光调 Q 振荡器

根据上述理论分析, 本文展开了相应的实验研究。电光调 Q 振荡器的光路如图 5 所示。实验中采用端面泵浦的方式, 泵浦源为 DILAS 公司生产的准连续 880 nm 光纤模块, 光纤直径为 $200 \mu\text{m}$, 数值孔径为 0.22 NA 。LD 泵浦脉宽为 $250 \mu\text{s}$, 重复频率为 10 Hz , 最大输出峰值功率为 600 W 。为了实现较好的模式匹配, 采用 ABCD 矩阵对振荡级谐振腔模式进行计算, 得到的腔模基模直径约为 0.8 mm 。因此, 采用的耦合头比例为 $1:4$, 对应的束腰半径为 0.4 mm 与腔模尺寸相匹配。增益介质采用 $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ 的 a 切

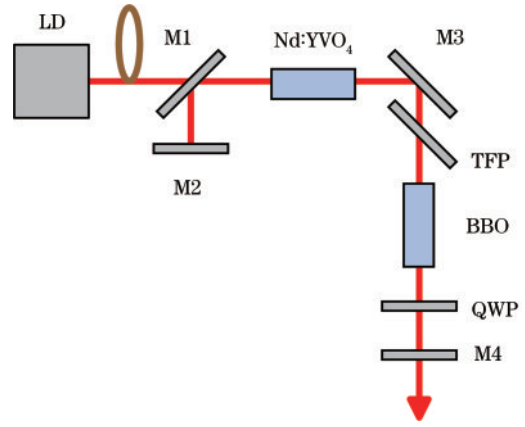


图 5 振荡级实验装置示意图
Fig. 5 Experimental device of the oscillation stage

Nd:YVO₄ 晶体, 掺杂质量分数为 0.6% , 通过循环水冷设备进行制冷, 温度设置为 $22 \text{ }^\circ\text{C}$ 。M1, M3 为镀有 1064 nm 高反 880 nm 高透的镜片, M2 为 1064 nm 的全反镜, M4 为透过率为 60% 的输出镜。M2、M4 构成平-平腔结构, 腔长约为 240 mm 。采用尺寸为 $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$ 的 BBO 晶体作为电光 Q 开关, 并利用高压驱动进行控制。

通过调节电光驱动的输出电压, 实现了最大 0.8 mJ 的 1064 nm 激光输出, 与计算结果产生差异的原因是实验中的 LD 泵浦功率较低。输出单脉冲能量随泵浦脉冲能量的关系如图 6 所示, 插图为最大输出能量下调 Q 激光的二维 (2D) 光束强度分布图。图 7 为在最大输出能量下采用 1 GHz 带宽的示波器 (DPO4104B-L, Tektronix, 美国) 测得的种子激光脉冲特性, 可以看出脉冲宽度约为 5.5 ns , 与模拟结果较一致。

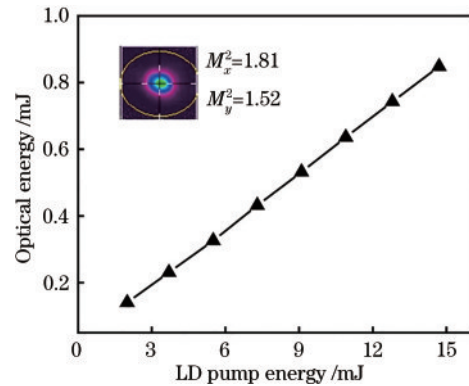


图 6 输出能量与 LD 泵浦能量的变化关系 (插图为最大输出能量下调 Q 激光的二维光束强度分布)
Fig. 6 Output energy versus LD pump energy (inset: 2D beam intensity profile at maximum output energy)

2.3 两级放大器

为了获得更高能量的脉冲激光输出, 采用一级双程加一级单程的组合方式进行放大, 放大器的光路图如图 8 所示。在放大级和振荡级之间插入由偏振片、旋光晶体、 $1/2$ 波片组成的隔离器以抑制自激振荡, M5

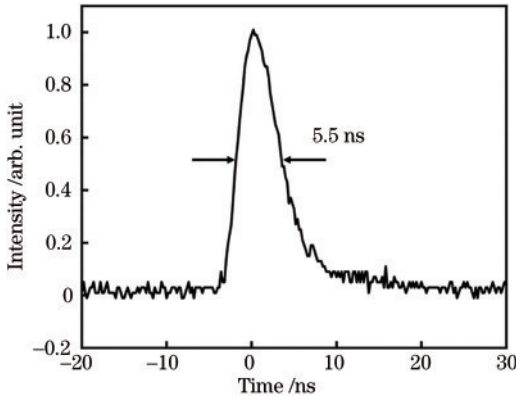


图 7 输出激光单脉冲波形图
Fig. 7 Output laser single pulse waveform

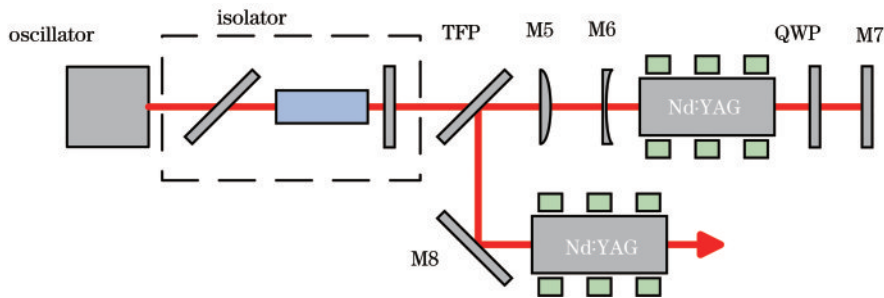


图 8 放大级实验装置示意图
Fig. 8 Experimental device of amplification stage

将振荡器输出的调 Q 激光导入放大器中进行实验, 经过放大后的平均输出功率随 LD 泵浦功率的变化曲线如图 9(a) 和 (b) 和所示, 采用光束质量分析仪 (CS 300-HP CINOGY Technologies, 德国, 1050~1350 nm) 对放大后的输出激光进行测量。可以看出, 输出功率随 LD 泵浦功率的增加呈线性增长趋势, 当第一级电流为 250 A 时, 激光器的最大输出能量为 36 mJ, 保持第一级最大泵浦电流不变, 将第二级电流加到 250 A, 激光器的总输出能量为 377 mJ。图 9(b)

和 M6 为整形透镜组, 焦距分别为 150 mm 和 -75 mm, 间距为 75 mm, 将振荡级输出光束缩小为原来的一半, 整形后的光斑直径约为 1.5 mm, 进入第二放大级时的光斑直径为 2.6 mm。M7 和 M8 为镀有 1064 nm 高反射膜的反射镜。放大级采用两个相同的五维两线侧面泵浦 Nd:YAG 晶体激光模块, 使得阵列的泵浦光在增益介质的分布中满足均匀地分布, 降低了整个系统的热应力, 从而提高了整个系统输出激光的功率稳定度系数和光束质量, 每个晶体尺寸为 $\Phi 3 \text{ mm} \times 82 \text{ mm}$, 掺杂质量分数为 0.6%, 通过循环水制冷装置进行冷却, 水温设置为 22 °C。单个激光模块中包含 40 个巴条, 单个巴条的泵浦峰值功率为 250 W。泵浦脉宽为 250 μs , 重复频率为 10 Hz。

中插图为输出激光的二维光束强度分布图。在满功率输出时, 测得的 x 轴和 y 轴的光束质量分别为 $M_x^2 = 1.85$ 和 $M_y^2 = 1.87$, 相应于平均光束质量为 $M^2 = 1.86$, 表明激光器运转在较好的高斯光束模式。图 10 为满功率输出时输出激光的单脉冲波形, 可以看出输出激光的脉冲宽度为 5.9 ns。与振荡级输出激光的 5.5 ns 脉冲宽度相比, 放大后的激光其脉冲宽度略有展宽, 这是由于放大器对种子激光产生的时间畸变所引起的^[19]。

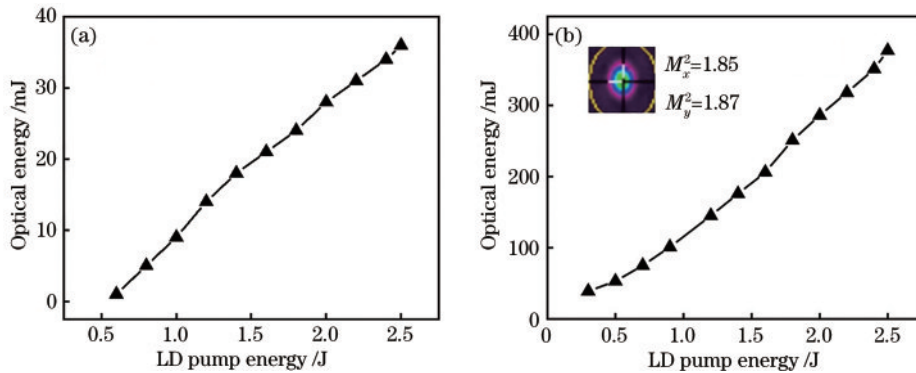


图 9 两级放大输出能量与 LD 泵浦能量的关系。(a) 第一级双程放大; (b) 第二级单程放大 (插图为最大输出能量下输出激光的二维光束强度分布)

Fig. 9 Output energy of amplifiers versus LD pump energy. (a) First stage double pass amplification; (b) second stage single pass amplification (inset: 2D beam intensity distribution of output laser at maximum output energy)

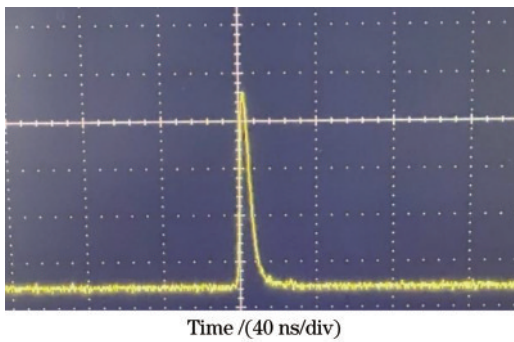


图 10 输出激光的单脉冲波形

Fig. 10 Single pulse waveform of the output laser

3 结 论

本文研制了一台大能量、窄纳秒脉宽、高光束质量激光二极管侧面泵浦短纳秒 Nd:YAG 激光器。激光器包括电光调 Q 的 Nd:YVO₄ 振荡器和两级侧面泵浦 Nd:YAG 棒状放大器。在脉冲重复频率为 10 Hz 时, 获得了最大单脉冲能量 377 mJ、脉冲宽度 5.9 ns 的 1064 nm 激光输出, 平均光束质量因子 $M^2 = 1.86$, 这类激光器有望作为纳秒高能激光器的种子源或在远距离、高精度的激光测距技术中得到应用。

参 考 文 献

- [1] Liu X S, Jia W Z, Yang S, et al. A high pulse energy single-pass picosecond master oscillator power amplifier system with output power 35.7 W[J]. *Optics & Laser Technology*, 2020, 121: 105782.
- [2] Lee K, Lee H C, Cho J Y, et al. Passively Q-switched, high peak power Nd:YAG laser pumped by QCW diode laser[J]. *Optics & Laser Technology*, 2012, 44(7): 2053-2057.
- [3] 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/Cr³⁺:YAG/YAG composite crystal [J]. *Journal of Laser Applications*, 2014, 26(3): 032009.
- [4] Liu X S, Jia W Z, Song Y H, et al. High energy, high brightness picosecond master oscillator power amplifier with output power 65.5 W[J]. *Optics Express*, 2020, 28(6): 8016-8026.
- [5] 高恒, 刘佳铭, 杨闯, 等. 用于远程激光测距机的小体积高功率固体激光器[J]. *激光技术*, 2019, 43(5): 7-10. Gao H, Liu J M, Yang C, et al. Compact solid-state lasers with high peak power used for remote laser rangefinders[J]. *Laser Technology*, 2019, 43(5): 7-10.
- [6] 杨博达, 刑政权, 陈东林, 等. 高温 LDAs 侧面脉冲泵浦 Nd:YAG 激光器[J]. *光子学报*, 2021, 50(3): 0314002. Yang B D, Xing Z Q, Chen D L, et al. High-temperature LDAs pulsedly side-pumped Nd:YAG laser [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2021, 50(3): 0314002.
- [7] 刘瑞, 于永吉, 陈薪羽, 等. 150 kHz 生长型复合 Nd:YVO₄/Nd:GdVO₄ 电光调 Q 激光器[J]. *中国激光*, 2012, 39(6): 0602001. Liu R, Yu Y J, Chen X Y, et al. 150 kHz Q-switched adhesive-free bond composite Nd:YVO₄/Nd:GdVO₄ laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(6): 0602001.
- [8] 王旭, 孙哲, 程光华. 高重复频率窄脉宽电光调 Q Nd:YVO₄ 激光器[J]. *中国激光*, 2016, 43(6): 0601007. Wang X, Sun Z, Cheng G H. High repetition rate and short pulse width electro-optic Q-switched Nd:YVO₄ laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(6): 0601007.
- [9] 白振旭, 龙明亮, 陈檬, 等. 全固态双向加压调 Q 激光器及放大技术研究[J]. *光学技术*, 2012, 38(6): 701-704. Bai Z X, Long M L, Chen M, et al. Research on all-solid-state bidirectional voltage supplied Q-switched laser and amplification technology[J]. *Optical Technique*, 2012, 38(6): 701-704.
- [10] 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.
- [11] Ryabtsev G I, Bogdanovich M V, Grigor'ev A V, et al. Powerful all-solid-state multiwave laser for aerosol lidars [J]. *Journal of Optical Technology*, 2014, 81(10): 571-574.
- [12] 李建民, 叶一东, 廖原, 等. 折叠式角锥棱镜谐振腔的偏振特性理论与实验研究[J]. *强激光与粒子束*, 2010, 22(7): 1495-1499. Li J M, Ye Y D, Liao Y, et al. Theoretical and experimental study on polarization characteristics of corner-cube folded resonator[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, 22(7): 1495-1499.
- [13] 曹明真, 刘学胜, 徐爱东, 等. 无水冷 LD 侧面泵浦 Nd:YAG 固体激光放大器[J]. *光子学报*, 2018, 47(5): 0514003. Cao M Z, Liu X S, Xu A D, et al. LD side-pumped Nd:YAG solid-state amplifier without water-cooler[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, 47(5): 0514003.
- [14] Tokita S, Divoky M, Furuse H, et al. Generation of 500-mJ nanosecond pulses from a diode-pumped Yb:YAG TRAM laser amplifier[J]. *Optical Materials Express*, 2014, 4(10): 2122-2126.
- [15] 孟君, 丛振华, 赵智刚, 等. 百赫兹大能量 KTA 双波长光参量振荡器[J]. *中国激光*, 2021, 48(12): 1201009. Meng J, Cong Z H, Zhao Z G, et al. 100Hz high-energy KTA dual-wavelength optical parametric oscillator[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(12): 1201009.
- [16] 钟健麒, 曲雅臣, 张晓静, 等. 高温 LDAs 泵浦紧凑型 Nd:YAG 激光器[J]. *光子学报*, 2019, 48(12): 1214002. Zhong J Q, Qu Y C, Zhang X J, et al. High-temperature LDAs pumped compact Nd:YAG laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, 48(12): 1214002.
- [17] 丁伟. 全固态高重复高偏振 MOPA 激光器的研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2021. Ding W. Research on all-solid-state high repetition high polarization master oscillator power amplifier[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2021.
- [18] Frantz L M, Nodvik J S. Theory of pulse propagation in a laser amplifier[J]. *Journal of Applied Physics*, 1963, 34(8): 2346-2349.
- [19] Koechner W. Solid state laser engineering[M]. New York: Springer-Verlag, 1976.