

高光束质量平-凸谐振腔 Nd:YVO₄ 激光器

栾智杰¹, 崔建丰^{1,2}, 王浪¹, 邬小娇², 李福玖², 岱钦¹

(1. 沈阳理工大学理学院, 沈阳 110159; 2. 鞍山紫玉激光科技有限公司, 辽宁 鞍山 114044)

摘要: 采用一种由 878.6 nm 激光二极管(LD)端面抽运 Nd:YVO₄ 晶体, 获得高光束质量的 1 064 nm 脉冲激光输出。使用 Matlab 软件对晶体热透镜焦距进行模拟分析, 并通过软件计算选取合适的平-凸谐振腔腔型, 缓解热效应的同时获得最佳输出状态。泵浦功率为 48 W 时获得平均输出功率 15.03 W 的 1 064 nm 连续光输出。通过磷酸钛氧铷(RTP)电光调 Q 的方式, 在重复频率为 10 kHz 时获得了稳定的 1 064 nm 脉冲激光输出, 最大输出平均功率为 8.78 W, 动-静转化比为 72.9%, 脉宽为 8.70 ns, 光束质量因子为 1.2。实验结果表明: 利用波长 878.6 nm 作为泵浦源并采用平-凸谐振腔的方式, 有利于缓解晶体的热效应、提高光束质量、获得基模脉冲激光输出。

关键词: 热透镜焦距; Nd:YVO₄ 晶体; 平-凸谐振腔; 基模

中图分类号: TN248.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1003-1251.2025.01.013

High Beam Quality Plano-convex Resonator Nd:YVO₄ Laser

LUAN Zhijie¹, CUI Jianfeng^{1,2}, WANG Lang¹, WU Xiaojiao², LI Fujiu², DAI Qin¹

(1. Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China; 2. Anshan ZY Laser Technology Co., Ltd., Anshan 114044, China)

Abstract: It is proposed to achieve high beam quality 1 064 nm laser output by using an 878.6 nm LD end-pumped Nd:YVO₄ crystal. Matlab software is utilized for simulating and analyzing the thermal lens focal length of the crystal, and an appropriate plano-convex resonator cavity configuration is selected through software calculation to alleviate thermal effects and achieve optimal output conditions. At a pump power of 48 W, an average output power of 15.03 W of 1 064 nm continuous light output is obtained. By employing RTP electro-optic Q-switching, stable 1 064 nm pulsed laser output is achieved at a repetition rate of 10 kHz, with a maximum average output power of 8.78 W, a dynamic-to-static conversion efficiency of 72.9%, a pulse width of 8.70 ns, and a beam quality factor of 1.2. The experiments demonstrate that using a pump source at 878.6 nm and employing a flat-convex resonator cavity configuration are beneficial for mitigating crystal thermal effects, improving beam quality, and obtaining fundamental mode pulsed laser output.

Key words: thermal lens focal length; Nd:YVO₄ crystal; plano-convex resonator; fundamental mode

激光二极管(LD)端泵的全固态激光器(diode pump solid state laser, DPSSL)因其高重频、窄脉宽、高光束质量等优点, 广泛应用于激光测距、

激光雷达探测、激光通信以及激光焊接等领域^[1-4]。其中传统的 808 nm 泵浦激光器应用更加广泛, 但其存在较严重的热效应, 不利于高重复

频率激光器的发展。在固态激光器的研究中,主要问题是提高光-光转换效率、改善激光的光束质量^[5-7]。

掺钕钒酸钇(Nd:YVO₄)是单轴晶体结构的双折射晶体,只发射线性偏振光。在Nd:YVO₄晶体中,Nd³⁺具有较低的点群对称性,较大的离子振荡强度使Nd:YVO₄晶体对激光有较强的吸收能力^[8]。相较于传统的Nd:YAG晶体,Nd:YVO₄晶体具有高五倍的吸收效率,同时其在1 064 nm和1 342 nm处具有较大的受激发射截面。在1 064 nm处, α 轴方向切割的Nd:YVO₄晶体受激发射截面约为Nd:YAG晶体的四倍,这表明相同条件下Nd:YVO₄晶体在1 064 nm处的连续输出效率大于Nd:YAG晶体。因此,本实验选用Nd:YVO₄晶体作为增益介质。

在端泵固体激光器中,波长880 nm作为泵浦源可以有效地降低热负荷,但需要高精度、高成本的温度控制模块来实现吸收波长与激光二极管中心波长的匹配并保持稳定。同时,Nd:YVO₄晶体对于880 nm泵浦的吸收系数较小,通常需要提高晶体掺杂浓度才能吸收足够的泵浦功率,但提高掺杂浓度的同时会带来与非辐射衰变相关的额外热负载、浓度猝灭和能量传递上转换^[9]。与880 nm相比,波长锁定的878.6 nm作为泵浦源具有热负荷小、高时间稳定性和热稳定性。

近年来,基于波长878.6 nm作为泵浦源用于高重复频率激光器的相关研究逐渐增多。李斌等^[10]研制了一种波长锁定878.6 nm半导体激光器抽运Nd:YVO₄晶体的1 064 nm激光器,当吸收功率为7.41 W时,获得了5.75 W的1 064 nm连续激光输出,光-光转换效率达77.6%。Pan等^[11]通过878.6 nm直接泵浦Nd:YVO₄,在重频10 kHz时获得了单脉冲能量为4.4 mJ、脉宽为9.4 ns的激光输出,光束质量因子 M^2 约为1.5。范灏然等^[12]报道了一种波长锁定878.6 nm的LD双端抽运Nd:YVO₄声光调Q激光器,在500 kHz的重复频率下获得了脉冲宽度为44.2 ns、平均输出功率为26.1 W的1 064 nm脉冲激光输出,光束质量因子 M^2 为1.55。孙冰等^[13]在泵浦源调制频率为10 kHz、平均泵浦功率30 W时,通过声光调Q获得了100 kHz、最大平均功率为8.57 W的1 176 nm斯托克斯光输出,光束质量因子 M^2 约为1.25。

如何获得更高光束质量的激光输出一直是固体激光器的研究方向。本文采用波长878.6 nm

的激光二极管作为泵浦源,选用平-凸谐振腔腔型,通过磷酸钛氧钷(RTP)电光调Q的方式,并且对热透镜焦距进行计算分析,在缓解热效应的同时获得最大输出功率的高光束质量激光输出。

1 实验分析及装置

在端面泵浦固体激光器中,当激光增益介质内存在温度梯度时,不同位置的温度和热应力会导致晶体内部折射率不均匀,从而形成热透镜效应。这种效应使得晶体的折射率在空间上发生变化,类似于透镜的作用。因此,晶体可以视为一个焦距为 f 的薄透镜,在高功率下晶体的热焦距 f 表达式为^[14]

$$f = \left[\frac{\pi K_c \omega_p^2}{P_{ph} \left(\frac{dn}{dT} \right)} \right] \left[\frac{1}{1 - \exp(-\alpha l)} \right] \quad (1)$$

式中: K_c 为热传导系数; ω_p 为平均泵浦光光斑半径; P_{ph} 为引起热透镜效应的泵浦功率; dn/dT 为晶体折射率 n 随温度 T 的变化率; α 为晶体吸收系数; l 为晶体长度。

采用Matlab软件模拟泵浦源波长分别为808、878.6 nm时,热透镜焦距随泵浦功率变化的曲线,结果如图1所示。

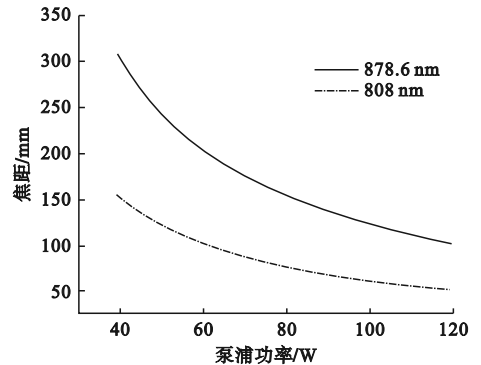


图1 热透镜焦距随泵浦功率的变化曲线

Fig. 1 The curve of the change in the thermal lens focal length with the pump power

由图1可知,当对Nd:YVO₄晶体进行泵浦时,随着泵浦功率的增加,热效应会变得更加严重,导致等效热焦距变小。在相同的泵浦功率时,使用不同波长的泵浦光泵浦Nd:YVO₄晶体,热效应的严重程度有所不同。相较于878.6 nm泵浦源,使用808 nm泵浦时,热透镜焦距更短,热效应更为严重。这是因为808 nm作为泵浦源更容易被Nd:YVO₄晶体吸收,因此在晶体内部产生的热效应更为集中和严重,导致热透镜效应更显著,热

焦距更短。因此,本文选用 878.6 nm 作为泵浦源,可以有效缓解晶体的热效应。实验中最大泵浦功率为 48 W,由计算可得,此时 Nd:YVO₄ 晶体的等效热焦距约为 255 mm。

通过软件模拟不同腔型下的基模半径随热焦距变化关系,结果如图 2 所示。

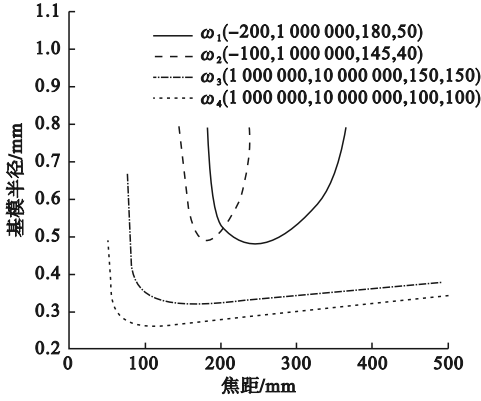


图 2 不同腔型下基模半径随热透镜焦距的变化曲线

Fig. 2 The curve of the change in the fundamental mode radius with the focal length of a thermal lens in different cavity configurations

基模光斑尺寸 ω_n ($n = 1, 2, 3, 4$) 与泵浦光聚焦光斑尺寸 ω_0 ($\omega_0 = 1.2$ mm) 之比定义为参数 a_n ($n = 1, 2, 3, 4$), 由图 2 可知,不同谐振腔型时对应的参数分别为 $a_1 = 0.81$ 、 $a_2 = 0.82$ 、 $a_3 = 0.557$ 、 $a_4 = 0.486$ (f 为 255 mm),可以看出腔型 ω_1 具有更好的模式匹配效果,因此平-凸谐振腔可以更好地获得基模输出。平-凸谐振腔 ω_1 比 ω_2 具有更大的热焦距稳定区间,故实验中选用 ω_1 腔型的谐振腔。

878.6 nm 端面抽运 Nd:YVO₄ 实验装置如图 3 所示,泵浦源使用凯普林公司的高功率稳波长光纤模块,其发射中心波长为 878.6 nm,纤芯直径为 200 μm ,数值孔径 (NA) 为 0.22,光谱宽度 (FWHM) 为 0.5 nm,光纤模块最高输出功率可达 120 W。实验中使用的激光增益介质 Nd:YVO₄ 晶体的尺寸为 3 mm \times 3 mm \times 30 mm, Nd³⁺ 掺杂浓度为 0.2%,增益介质双端镀有 878.6 nm 和 1 064 nm 增透膜,透射率大于 99%。采用电光调 Q 的方式输出脉冲激光,调 Q 晶体 RTP 尺寸为 3 mm \times 3 mm \times 14 mm, RTP 晶体俯仰可微调,外接高压调 Q 盒,工作电压为 15 V。图中:PM 为功率计探头;PL 为偏振片;M₁ 为 45° 反射镜 (878.6 nm 高透、1 064 nm 高反);M₂ 为谐振腔后镜 (平凸反射镜曲率半径 $R = 200$ mm、1 064 nm 高反,反射率大于 99%);M₃ 为谐振腔输出镜 (平面镜 1 064 nm 透射,透射率为 70%);L₁、L₂ 为耦合透镜组 (焦距分别为 $f_1 = 20$ mm、 $f_2 = 120$ mm),其作用是将泵浦光耦合聚焦到增益介质内部,增益介质内部泵浦光焦点处光斑大小为 1.2 mm。由软件模拟可得谐振腔腔长为 230 mm,晶体距后镜距离为 180 mm,距输出镜距离为 50 mm。

使用功率计 (PowerMax-USB/PM 150-50/0050 E17R 型, COHERENT 公司) 测量 878.6 nm 和 1 064 nm 光纤模块的平均输出功率;使用数字示波器 (SDS2352X-E, SIGLENT 公司) 结合光电探头 (DET10A/M, THORLABS 公司) 测量输出 1 064 nm 激光的脉冲宽度;采用 CCD 相机测量输出激光的光束质量。

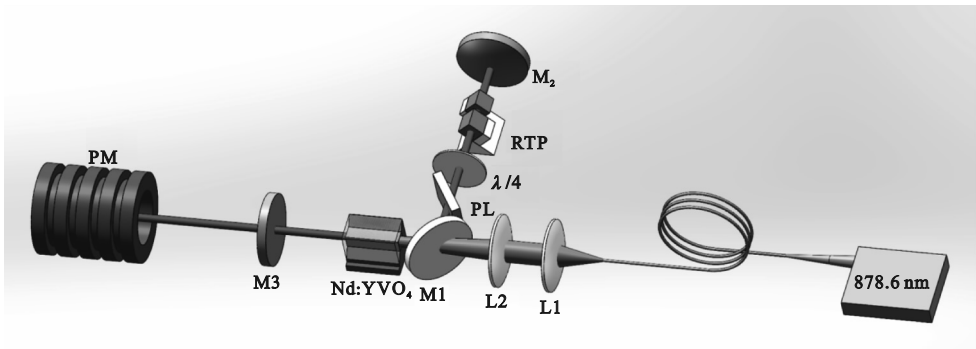


图 3 878.6 nm 端面抽运 Nd:YVO₄ 实验装置

Fig. 3 Experimental setup for 878.6 nm end pumped Nd:YVO₄

2 实验结果

通过调整光学元件,确保整个激光光路系统

中的各部分均达到最佳匹配效果,以此保证输出激光的光束质量和稳定性达到最优水平。实验中 878.6 nm 光纤模块最大输出功率为 48 W,防止泵浦功率过大造成增益介质损坏的同时,确保最佳

的激光输出状态。图4为谐振腔内放置 RTP 晶体前后连续光 1 064 nm 平均输出功率与泵浦功率的关系曲线。

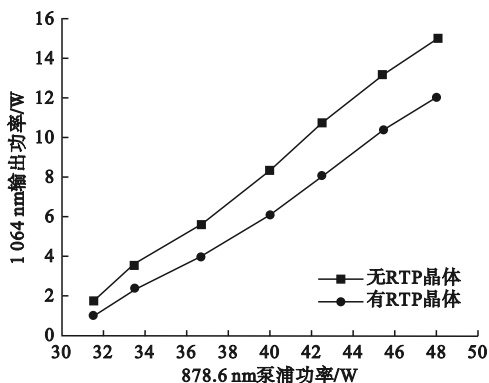


图4 有无 RTP 晶体时 1 064 nm 平均输出功率

Fig. 4 Average output power at 1 064 nm with and without an RTP crystal

由图4可知,空腔状态下 1 064 nm 激光出光阈值功率为 31.6 W,随泵浦功率的增大,其平均输出功率呈线性增长的趋势。当泵浦功率为 48 W 时,腔内未放置 RTP 晶体的情况下,1 064 nm 连续光最大平均输出功率为 15.03 W。腔内放置 RTP 晶体后,1 064 nm 连续光最大平均输出功率为 12.05 W。由图4还可以得出,随着泵浦功率的增大,RTP 晶体在谐振腔内的功率损耗也逐渐增大,在最大输出功率时,RTP 晶体损耗最大,为 2.98 W。

通过 RTP 电光调 Q 的方式实现重复频率为 10 kHz 的 1 064 nm 脉冲激光输出。实验中测得 1 064 nm 激光平均输出功率与动-静转化比随泵浦功率的变化曲线如图5所示。

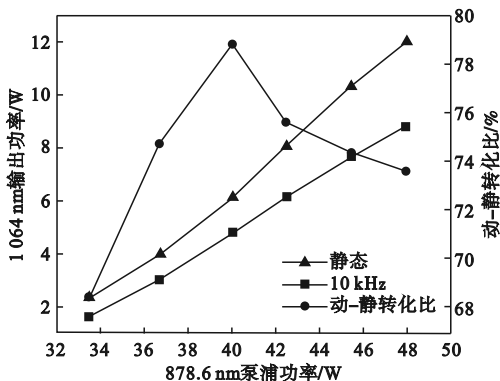


图5 1 064 nm 输出功率与动-静转化比随泵浦功率变化曲线

Fig. 5 Curves of 1 064 nm output power and dynamic to static conversion ratio with pump power variation

由图5可知,在重复频率为 10 kHz 时,随着

泵浦功率的增大,1 064 nm 脉冲激光平均输出功率也增大。当泵浦功率为 48 W 时,1 064 nm 脉冲激光最大平均输出功率为 8.78 W,此时动-静转化比为 72.9%。使用示波器测量重复频率为 10 kHz、最大平均输出功率时激光的脉冲宽度,结果如图6所示,此时 1 064 nm 脉冲激光的脉冲宽度为 8.70 ns。

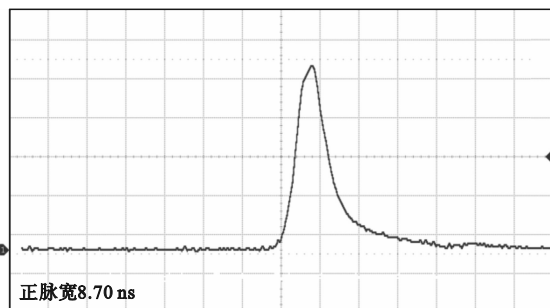


图6 平均输出功率为 8.78 W 时的脉冲宽度图

Fig. 6 Pulse width graph at an average output power of 8.78 W

图7为平-凸谐振腔输出光斑直径随位置的变化曲线,其中插图 a、b 为使用 CCD 相机记录泵浦功率为 48 W、谐振腔长度相同时输出 1 064 nm 光斑图像,插图 a 为本实验平-凸谐振腔获得的光斑图像,插图 b 为搭建实验中采用平-平对称谐振腔所获得的光斑图像。

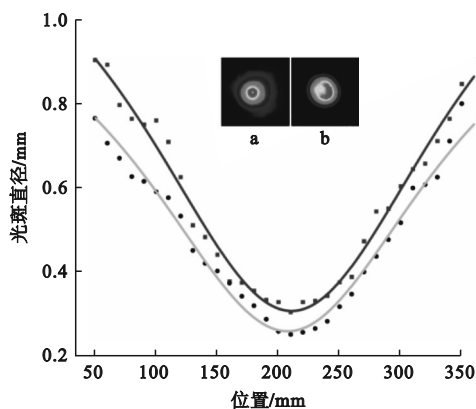


图7 光斑直径的变化曲线

Fig. 7 The curves of the change in spot diameter

通过实验得出,平-平对称谐振腔时 1 064 nm 平均输出功率较大,光-光转换效率较高,但由图7可知,平-平谐振腔时输出 1 064 nm 脉冲激光输出模式不是基模。平-凸谐振腔时激光输出模式为基模,与前面模拟分析相符合,相较平-平谐振腔,平-凸谐振腔更易于得到自准直平行光输出,且对温度的把控要求不高。实验中采用平-凸谐振腔,当平均输出功率为 8.78 W

时,测得光束质量因子 M^2 约为 1.2。因此,采用平-凸谐振腔可以获得高光束质量的 1 064 nm 激光输出,具有更好的实用价值。

3 结论

1)设计了一种高重复频率、高光束质量的基模脉冲 Nd:YVO₄ 电光调 Q 激光器,通过使用波长 878.6 nm 端面泵浦 Nd:YVO₄ 晶体,并使用 Matlab 软件模拟热透镜焦距随泵浦光注入功率的变化关系,设计最佳匹配模式的平-凸谐振腔,有效降低了热透镜效应,同时得到高光束质量的 1 064 nm 基模输出。

2)使用 RTP 电光调 Q 技术获得重复频率为 10 kHz 的脉冲激光输出。在重复频率为 10 kHz、泵浦功率为 48 W 时获得了平均输出功率为 8.78 W、脉冲宽度为 8.7 ns 的 1 064 nm 脉冲激光输出。

3)相同实验条件下对比了平-平谐振腔和平-凸谐振腔的激光输出模式,采用平-凸谐振腔时 1 064 nm 激光输出模式为基模。

本文在对热透镜焦距以及谐振腔腔型进行模拟分析的基础上,获得了高光束质量的 1 064 nm 脉冲激光输出。实验获得的高光束质量脉冲激光可以作为高功率混合泵浦放大器的种子源,为该领域的研究和发展提供了重要的支持。

参考文献 (References):

[1] 冯江,严一鸣,于志伟,等.微型人眼安全固体激光器技术[J].激光与红外,2023,53(12):1861-1865.
FENG J, YAN Y M, YU Z W, et al. Mini solid state laser with human eye-safe[J]. Laser & Infrared, 2023, 53(12):1861-1865. (in Chinese)

[2] 魏超,吴西涛,朱耿霆,等.基于视觉相机和激光雷达融合的无人车障碍物检测与跟踪研究[J/OL].机械工程学报,2024;1-15[2024-03-11].http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2187.TH.20240322.1650.010.html.
WEI C, WU X T, ZHU G T, et al. Research on obstacle detection and tracking of autonomous vehicles based on the fusion of camera and lidar[J/OL]. Journal of Mechanical Engineering, 2024;1-15[2024-03-11].http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2187.TH.20240322.1650.010.html. (in Chinese)

[3] 项森,佟首峰,刘传,等.典型气溶胶颗粒对激光大气传输的作用机理[J].长春理工大学学报(自然科学版),2023,46(4):1-10.
XIANG S, TONG S F, LIU C, et al. Mechanism of typical aerosol particles on atmospheric transmission of laser[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2023, 46(4):1-10. (in Chi-

nese)

[4] 魏英姿,冯艺君,王红.TC4钛合金CO₂激光焊接试验研究[J].沈阳理工大学学报,2011,30(1):70-74.
WEI Y Z, FENG Y J, WANG H. Experiment research on CO₂ laser beam welding of TC4 titanium alloy[J]. Journal of Shenyang Ligong University, 2011, 30(1):70-74. (in Chinese)

[5] 闫观鑫,郝永芹.高光束质量大功率垂直腔面发射激光器[J/OL].中国激光,2024;1-10[2024-03-11].http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1339.TN.20231114.1002.006.html.
YAN G X, HAO Y Q. High beam quality high power vertical cavity surface emitting laser[J/OL]. China Journal of Lasers, 2024;1-10[2024-03-11].http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1339.TN.20231114.1002.006.html. (in Chinese)

[6] 周丹丹,尹兴良,王煜,等.914 nm LD抽运高效率腔倒空电光调Q激光器[J].中国激光,2018,45(1):0101014.
ZHOU D D, YIN X L, WANG Y, et al. High-efficiency electro-optical cavity-dumped Q-switched laser pumped by LD at 914 nm[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(1):0101014. (in Chinese)

[7] 王钢,刘磊,王文涛,等.高能激光器波前预补偿技术研究[J].激光与红外,2023,53(9):1344-1349.
WANG G, LIU L, WANG W T, et al. Research on wavefront precompensation technology of high-energy lasers[J]. Laser & Infrared, 2023, 53(9):1344-1349. (in Chinese)

[8] 关俊.LD双端抽运Nd:YVO₄调Q绿光激光器[D].西安:中国科学院研究生院(西安光学精密机械研究所),2004.

[9] LIU Q, NIE M, LU F, et al. High-power, wavelength-locked 878.6 nm in-band pumped, acoustic-optically Q-switched Nd:YVO₄ MOPA laser with TEM₀₀ mode[J]. IEEE Photonics Journal, 2016, 8(4):1502309.

[10] 李斌,丁欣,张巍,等.波长锁定878.6 nm激光二极管抽运Nd:YVO₄ 1 064 nm激光器[J].中国激光,2014,41(5):0502010.
LI B, DING X, ZHANG W, et al. 1 064 nm Nd:YVO₄ laser pumped by wave-locked 878.6 nm laser diode[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(5):0502010. (in Chinese)

[11] PAN H, YAN R P, FA X, et al. High-peak-power, high-repetition-rate LD end-pumped Nd:YVO₄ burst mode laser[J]. Optical Review, 2016, 23(3):386-390.

[12] 范灏然,于永吉,朱贺,等.500 kHz波长锁定878.6 nm LD双端泵浦Nd:YVO₄声光调Q激光器[J].红外与激光工程,2018,47(6):0606001.
FAN H R, YU Y J, ZHU H, et al. 500 kHz A-O Q-switched Nd:YVO₄ laser pumped by dual-end wave-locked 878.6 nm laser diode[J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(6):0606001. (in Chinese)

[13] 孙冰,丁欣,姜鹏波,等.波长锁定878.6 nm LD调制泵浦Nd:YVO₄自拉曼激光器[J].红外与激光工程,2021,50(12):223-228.
SUN B, DING X, JIANG P B, et al. Efficient wavelength-locked 878.6 nm diode-modulated-pumped Nd:YVO₄ self-Raman laser[J]. Infrared and Laser Engineering, 2021, 50(12):223-228. (in Chinese)

[14] INNOCENZI M E, YURA H T, FINCHER C L, et al. Thermal modeling of continuous-wave end-pumped solid-state lasers[J]. Applied Physics Letters, 1990, 56(19):1831-1833.

(责任编辑:徐淑姣)