

文章编号: 1000-7032(2023)02-0307-07

泵浦光聚焦特性对高重频 1 064 nm 被动调 Q 激光器的影响

姚 聪^{1,2}, 付鑫鹏¹, 申彦鑫^{1,2}, 李文媛^{1,2}, 付喜宏^{1*}

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 研究了泵浦光聚焦特性对被动调 Q 激光器输出激光特性的影响。使用 10 W 激光二极管(LD)和焦距为 4 mm 的耦合聚焦镜,在不改变 LD 和谐振腔结构与间距(15 mm)的情况下,选取 5 个耦合聚焦镜位置,研究对应泵浦光聚焦特性对输出激光特性的影响,特别是对输出脉冲稳定性的影响。泵浦功率为 3.550 W 时,相较于其他耦合聚焦镜位置,在耦合聚焦镜距离 LD 7.50 mm 处,被动调 Q 激光器实现了更高重复频率(160 kHz)、更高平均输出功率(360 mW)、更高单脉冲能量(2.250 μJ)、更低时域抖动(120 ns)的稳定脉冲输出。实验数据说明,耦合聚焦镜距离 LD 7.50 mm 处,泵浦光聚焦光斑与谐振腔基模光斑的匹配程度较好。理论计算得出,耦合聚焦镜距离 LD 7.50 mm 时,谐振腔基模光斑尺寸与泵浦光聚焦光斑束腰尺寸的比值为 0.854,该比值对今后开展高重频被动调 Q 激光器相关研究具有一定的借鉴意义。

关 键 词: LD 端面泵浦; 被动调 Q; 耦合聚焦镜位置

中图分类号: TN248.4 文献标识码: A DOI: 10.37188/CJL.20220294

Influence of Pump Light Focused Characteristics on High Repetition Frequency 1 064 nm Passively Q-switched Laser

YAO Cong^{1,2}, FU Xinpeng¹, SHEN Yanxin^{1,2}, LI Wenyuan^{1,2}, FU Xihong^{1*}

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

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

* Corresponding Author, E-mail: fuxh@ciomp.ac.cn

Abstract: The effect of pump focusing characteristic on output laser characteristics of passively Q-switched solid-state(PQS) laser is studied. Using a 10 W laser diode(LD) and a coupling focusing lens with focal length of 4 mm, without changing the cavity structure and the distance between LD and resonator(15 mm), five coupling focusing lens positions were selected to research the effect of pump focusing characteristic on output laser characteristics, especially on the stability of the output pulse. When the distance between LD and the coupling focusing lens is 7.50 mm, at a continuous-wave pump power of 3.550 W, a passively Q-switched laser with higher repetition rate(160 kHz), higher average output power(360 mW), higher single-pulse energy(2.250 μJ) and lower time jitter(120 ns) was obtained. The experimental results indicate that the match degree between pump focusing spot and fundamental mode spot is good when the distance between LD and the coupling focusing lens is 7.50 mm. The theoretical calculation results indicate that the ratio of the fundamental mode spot size to the focusing spot size is 0.854 when the distance between LD and the coupling focusing lens is 7.50 mm. The ratio can be used as a reference for the research of high repetition-frequency PQS laser.

Key words: LD-pumped; passively Q-switched; coupling focusing lens position

收稿日期: 2022-08-11; 修订日期: 2022-08-31

基金项目: 吉林省科技发展计划项目(20200401060GX, 20210201028GX)

Supported by Jilin Province Science and Technology Development Plan Project(20200401060GX, 20210201028GX)

1 引 言

高重频被动调 Q 激光器结构简单、可靠性及系统兼容性较高,脉冲宽度容易达到纳秒甚至亚纳秒级,且有较高的峰值功率,可广泛应用于高精度激光雷达、微型激光源、环境探测和微细加工等领域^[1]。输出脉冲的稳定性影响因素众多,包括泵浦光中心频率的波动、泵浦功率的波动、增益介质中的热梯度以及自发辐射噪声等,限制了被动调 Q 激光器更广泛的应用。随着脉冲重复频率提高,脉冲的稳定性会进一步变差,极大地阻碍了高重频被动调 Q 激光器的研究与应用。研究人员发现^[2],泵浦光聚焦尺寸、泵浦光发散角的大小和泵浦光聚焦光斑的位置直接影响着泵浦光与振荡光模式匹配程度,从而影响激光器的阈值和输出功率等输出激光特性。

1980年, Hall等通过速率方程求解^[3],首次指出泵浦光聚焦光斑束腰处半径(ω_{p0})与谐振腔基模光斑半径(ω_0)比值 ω_{p0}/ω_0 对出射激光的阈值存在影响, ω_{p0}/ω_0 越大,出射激光阈值越高。并比较了 $\omega_{p0}/\omega_0=1, \sqrt{2}, 2$ 三种情况时输出功率随泵浦功率的变化。结果表明, $\omega_{p0}/\omega_0=1$ 时,输出功率曲线斜效率最大; $\omega_{p0}/\omega_0=2$ 时,斜效率最小。1991年, Laporta和Brussard通过速率方程计算以及实验验证^[4],发现较低功率连续泵浦(200 mW~3 W)下, ω_p 范围在80~120 μm 之间、泵浦光椭圆度参数 β 范围为0.3~0.9时, ω_0/ω_{p0} 的优选范围为1.5~3.5。2000年, Chen等发现^[5], ω_{p0}/ω_0 对晶体热效应同样存在影响。实验结果表明,为了获得较高的输出功率, ω_{p0}/ω_0 应该低于1.600,从而降低晶体热效应的影响。

上述研究都是针对连续输出的激光器的输出特性,本文研究了泵浦光聚焦特性对被动调 Q 激光器输出激光特性的影响。实验中,被动调 Q 激光器输出脉冲的稳定性对耦合聚焦镜位置非常敏感,仅移动0.30 mm,输出脉冲特性即有明显变化,因此开展了进一步实验。以10 W T-Mount作为泵浦源,以焦距为4 mm的非球面镜作为耦合聚焦镜,在不改变LD和谐振腔结构与间距(15 mm)的情况下,通过调节耦合聚焦镜与LD的距离,选取5个耦合聚焦镜位置,研究对应泵浦光聚焦特性对输出激光特性的影响,特别是对输出脉冲稳定性的影响。实验结果表明,耦合聚焦

镜存在较为合适的位置,使输出脉冲的时域抖动较小。通过ZEMAX模拟和理论分析,计算时域抖动较小时耦合聚焦镜位置处谐振腔基模光斑尺寸与泵浦光聚焦光斑束腰尺寸的比值,该比值对今后开展高重频被动调 Q 激光器研究具有一定的借鉴意义。

2 实验装置

LD端面泵浦Nd:YAG/Cr:YAG激光器的结构如图1所示。激光增益介质是Nd³⁺离子掺杂浓度为1.0%的Nd:YAG晶体,尺寸为3 mm×3 mm×3 mm,晶体前端面镀有808 nm高透、1 064 nm高反的光学薄膜,后表面镀有1 064 nm高透膜。被动调 Q 晶体为初始透过率为95.39%的Cr⁴⁺:YAG晶体,尺寸为3 mm×3 mm×1.50 mm。Cr⁴⁺:YAG晶体前端面与Nd:YAG晶体后端面距离为2.50 mm。输出镜选用透过率为94.31%的平面镜,Nd:YAG晶体的前表面与输出镜构成光学谐振腔。为压缩脉宽,谐振腔腔长缩短到8 mm。实验中采用半导体制冷器(TEC)进行精密温控,LD温度设置为25 °C,Nd:YAG晶体与Cr:YAG晶体温度设置为22 °C。

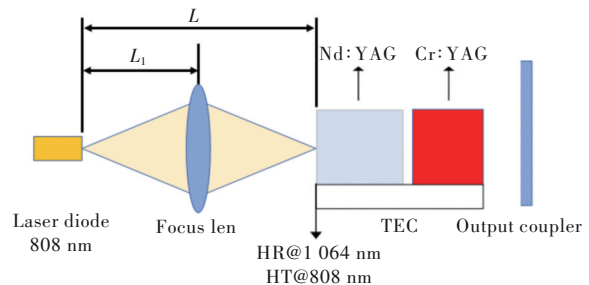


图1 耦合聚焦镜位置变化下的Nd:YAG/Cr:YAG被动调 Q 激光器示意图

Fig.1 Experimental setup for the LD-pumped passively Q -switched Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG laser

LD为山东华光光电子股份有限公司提供的型号DM-820C的T-Mount,室温下的输出阈值为1.15 A,中心波长为808 nm,最大输出功率为10 W,其发光面积为1 μm ×200 μm 。LD快轴方向发散角为30°,慢轴方向发散角为10°。为压缩LD快轴方向发散角,将半径为200 μm 的光纤棒放置在LD发光区之前。泵浦光快轴方向发散角受光纤棒压缩后,经过焦距为4 mm的非球面耦合聚焦镜聚焦,进入Nd:YAG晶体。

3 实验结果与分析

3.1 被动调 Q 激光器实验结果

3.1.1 耦合聚焦镜不同位置的输出脉冲特性

耦合聚焦镜位置变化的具体过程如图 1 所示。实验过程中,将 LD 与谐振腔间距(L)固定为 15 mm,调节耦合聚焦镜的位置(即调节 LD 与耦合镜焦平面的距离 L_1),选取 5 个耦合聚焦镜位置,观察 5 个位置下,不同泵浦光聚焦特性对输出脉冲特性的影响。耦合镜位置 1~5 代表 $L_1 = 6.90, 7.20, 7.50, 7.90, 8.20$ mm 的情况,位置从 1~5 代表耦合镜与 LD 的距离逐渐增大。实验测量时,采用 THORLABS 生产的型号 S142C 的功率探头测量激光输出功率,THORLABS 生产的型号 DET-02AFC 高速光电探测器探测输出激光脉冲信号,并在 RIGOL 公司型号 DS2202A-S 的示波器上记录脉冲波形。实验结果如下列各图所示。

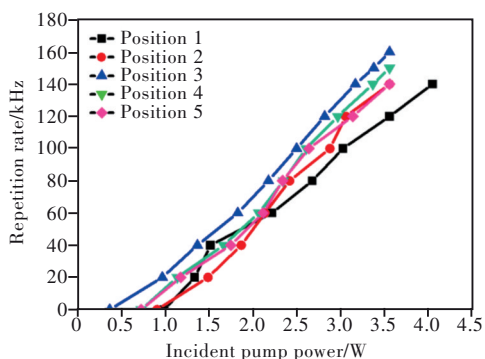


图2 重复频率随泵浦功率的变化曲线

Fig.2 Pulse repetition rate versus incident pump power

耦合聚焦镜位置对高重频被动调 Q 激光器输出脉冲重复频率的影响如图 2 所示。耦合聚焦镜不同位置对应输出脉冲的阈值功率存在差异。位置 3 处对应输出激光阈值功率最低,为 0.360 W。位置 4、5 处对应输出激光阈值功率为 0.720 W。位置 2 处对应输出激光阈值功率为 0.900 W。位置 1 处对应输出激光阈值功率最高,为 0.980 W。随着泵浦功率的增加,不同耦合聚焦镜位置对应的输出激光的重复频率线性增大。泵浦功率为 3.550 W 时,位置 3 处对应输出激光重频最高,达到 160 kHz;位置 4 处对应输出激光重频达到 150 kHz;位置 2、5 处对应输出激光重频达到 140 kHz;位置 1 处对应输出激光重频最低,仅 120 kHz。

图 3 是耦合聚焦镜位置对高重频被动调 Q 激光器输出激光脉宽的影响。耦合聚焦镜不同位置

对应输出脉冲的脉宽先降低,后保持稳定。位置 1 处对应输出激光脉宽从 40.50 ns 降至 9.90 ns,之后保持在 8.90~9.90 ns 范围内。位置 2 处对应输出激光脉宽保持在 9~12.90 ns 范围内。位置 3 处对应输出激光脉宽保持在 10~11.40 ns 范围内。位置 4 处对应输出激光脉宽从 16.30 ns 降至 9.10 ns,之后保持在 9~10.40 ns 范围内。位置 5 处对应输出激光脉宽从 13.70 ns 降至 9.70 ns,之后保持在 9.50~9.70 ns 范围内。

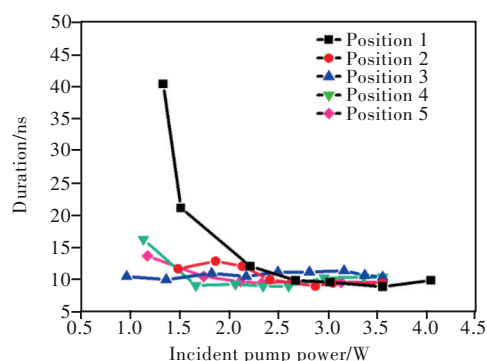


图3 脉宽随泵浦功率的变化曲线

Fig.3 Pulse duration versus incident pump power

耦合聚焦镜位置对高重频被动调 Q 激光器输出脉冲时域抖动的影响较为明显,随着泵浦功率的增加,耦合聚焦镜不同位置对应输出脉冲的时域抖动降低。由图 4 可知,位置 1 处对应输出激光时域抖动从 27 μ s 降至 5.20 μ s。位置 2 处对应输出激光时域抖动从 45 μ s 降至 3 μ s。位置 3 处对应输出激光时域抖动从 11 μ s 降至 120 ns。位置 4 处对应输出激光时域抖动从 15 μ s 降至 400 ns。位置 5 处对应输出激光时域抖动从 22 μ s 降至 3.10 μ s。

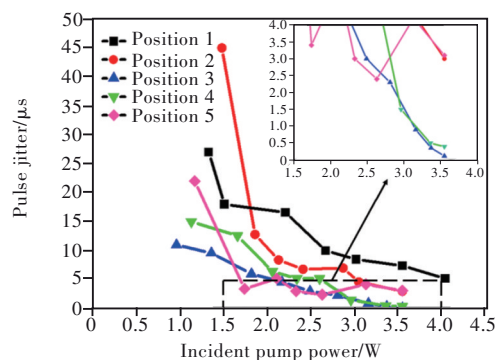


图4 时域抖动随泵浦功率的变化曲线(插图为局部放大图)

Fig.4 Time jitter versus incident pump power, the inset shows a partial enlarged view.

图5描述的是耦合聚焦镜位置对高重频被动调Q激光器输出激光平均输出功率的影响。位置1处对应输出激光平均输出功率最大值为61 mW。位置2处对应输出激光平均输出功率最大值为162 mW。位置3处对应输出激光平均输出功率最大值为360 mW。位置4处对应输出激光平均输出功率最大值为309 mW。位置5处对应输出激光平均输出功率最大值为212 mW。在高重频被动调Q激光器中,耦合聚焦镜位置对输出激光单脉冲能量的影响如图6所示,随着泵浦功率的增加,耦合聚焦镜不同位置对应输出脉冲的单脉冲能量保持上升趋势。位置1处对应输出激光单脉冲能量增至0.467 μJ,后降至0.436 μJ。位置2处对应输出激光单脉冲能量增至0.825 μJ,后降至0.680 μJ,最后增至1.157 μJ。位置3处对应输出激光单脉冲能量增至2.360 μJ,后降至2.250 μJ。位置4处对应输出激光单脉冲能量增至1.683 μJ,后降至1.250 μJ,最后增至2.060 μJ。位置5处对应输出激光单脉冲能量增至1.675 μJ,后降至1.283 μJ,最后增至1.514 μJ。

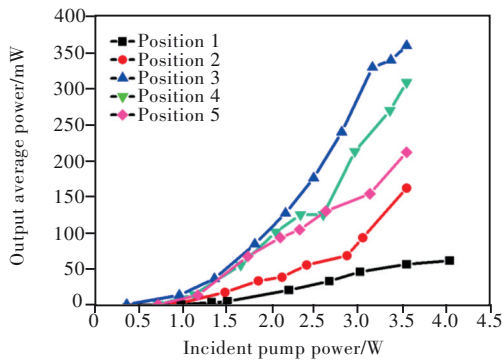


图5 平均输出功率随泵浦功率的变化曲线

Fig.5 Average output power versus incident pump power

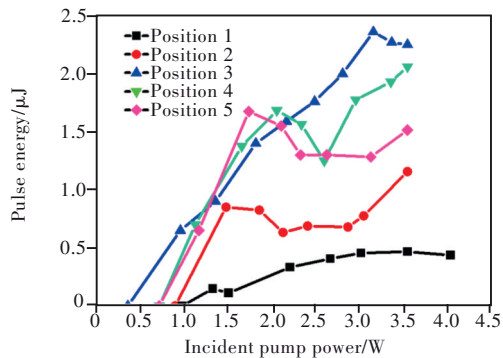


图6 单脉冲能量随泵浦功率的变化曲线

Fig.6 Single-pulse energy versus incident pump power

综上,随着泵浦功率的增加,不同耦合聚焦镜位置对应输出激光的重复频率、平均输出功率、单脉冲能量、时间抖动、脉宽等输出激光特性变化的整体趋势一致。由于耦合聚焦镜位置不同,输出激光特性对应的具体数值不同。各耦合聚焦镜位置下,输出激光特性整体变化趋势都表现为:随着泵浦功率的增加,重频、输出功率以及单脉冲能量明显增加,时域抖动明显降低,脉宽变化趋势是先降低,然后趋于稳定。

3.1.2 被动调Q激光器的最佳输出脉冲特性

根据图2~6所示,在耦合镜位置1~5之间,耦合聚焦镜处于位置3时,相同泵浦功率情况下,无论增加或减小 L_1 ,耦合镜越远离该位置,输出激光的重频、平均输出功率、单脉冲能量越低,时域抖动越大。

在耦合聚焦镜位置3处,LD泵浦功率为3.550 W时,实现了重复频率为160 kHz、平均输出功率为360 mW、单脉冲能量为2.250 μJ的稳定脉冲输出。经过示波器多次采集,得到整体脉冲序列如图7所示,输出脉冲比较稳定,脉冲的时域抖动为120 ns(如图8所示)。示波器单次采集下,单个脉冲曲线如图9所示,输出脉冲的脉宽为10.60 ns。

文献报道已经指出^[3-5],谐振腔基模光斑与



图7 160 kHz重频脉冲序列图

Fig.7 Pulse train profile and the pulse repetition rate (160 kHz)

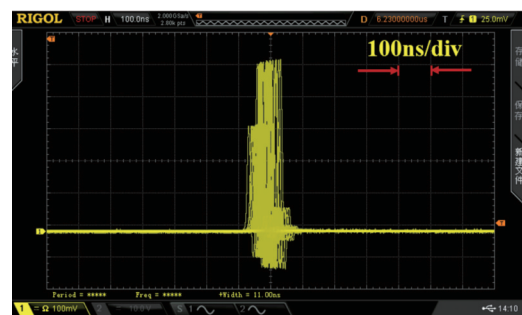


图8 时域抖动示意图

Fig.8 Time jitter profile

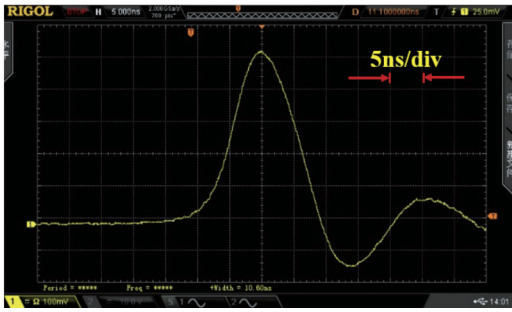


图 9 单脉冲示意图

Fig.9 Single-pulse profile and pulse duration

泵浦光聚焦光斑的匹配情况不仅对出射激光的阈值、输出功率存在影响,而且对激光器晶体热效应存在影响。结合实验结果可以看出,耦合聚焦镜位置 3 处,谐振腔基模光斑与泵浦光聚焦光斑匹配效果较好。下面采用 Zemax 软件模拟和理论计算的方式,进行谐振腔基模光斑尺寸 ω_1 与泵浦光聚焦光斑束腰尺寸 ω_p 匹配程度的具体研究。

3.2 理论分析

根据 LD、非球面耦合镜相关参数,利用 Zemax 软件对泵浦光慢轴方向经过非球面耦合镜在晶体内聚焦光斑的束腰尺寸进行模拟。以耦合聚焦镜位置 3 为例,LD 聚焦系统在 Zemax 非序列模式下的模拟光路如图 10 所示。第 1 处为非序列模式下,根据 LD 发散角(快轴方向发散角为 30° ,慢轴方向发散角为 10°)和发光区域($1 \mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$)等相关参数设计的模拟泵浦源;第 2 处为设计的焦距为 4 mm 的耦合镜,对泵浦光进行聚焦;第 3 处为探测器,距离模拟泵浦源发光点 17.50 mm,探测泵浦光聚焦光斑的尺寸。

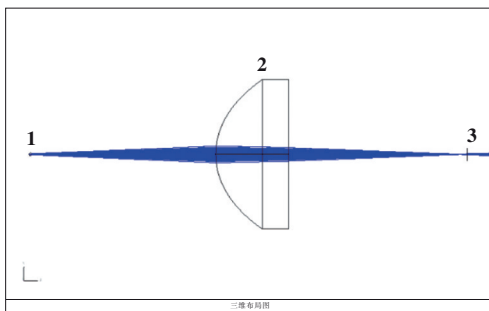


图 10 Zemax 模拟光路图

Fig.10 Zemax simulation optical path profile

如图 11 所示,耦合聚焦镜处于位置 3 时,LD 在晶体内束腰处的聚焦光斑尺寸 ω_p 为 $248.800 \mu\text{m}$ 。

之后,采用理论计算的方式计算耦合聚焦镜位置 3 处谐振腔的基模光斑尺寸 ω_1 ^[6-7]。谐振腔结

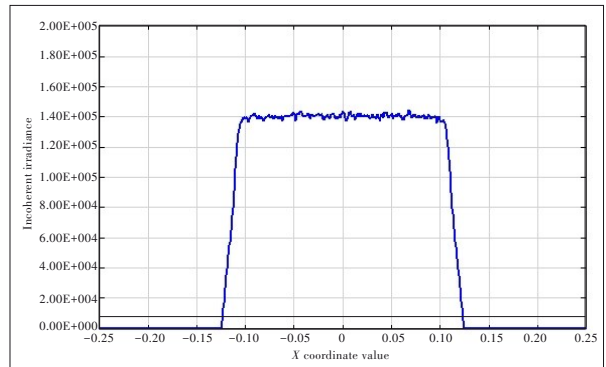


图 11 耦合聚焦镜位置 3 时,泵浦光聚焦光斑束腰尺寸(慢轴)。

Fig.11 Pump beam waist light spot size at coupling focusing lens position 3(slow axis)

构如图 12 所示。晶体热透镜效应可以等效为薄透镜,为了方便计算将其放在晶体左端面。

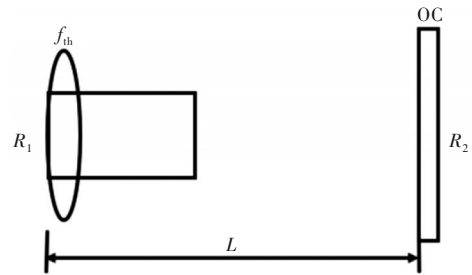


图 12 含热透镜的谐振腔结构

Fig.12 Cavity with thermal lens

谐振腔基模光斑束腰尺寸的计算公式为

$$\omega_0^4 = \left(\frac{\lambda}{\pi}\right)^2 \frac{L(R_1 - L)(R_2 - L)(R_1 + R_2 - L)}{(R_1 + R_2 - 2L)^2}, \quad (1)$$

R_2 趋近于无穷大时:

$$\omega_0^4 = \left(\frac{\lambda}{\pi}\right)^2 L(R_1 - L), \quad (2)$$

热透镜等效凸面镜的曲率半径 R_1 与热透镜焦距 f 之间的关系如下:

$$R_1 = 2(n_0 - 1)f, \quad (3)$$

$$\omega_0^4 = \left(\frac{\lambda}{\pi}\right)^2 L[2(n_0 - 1)f - L], \quad (4)$$

其中,热透镜焦距 f 的计算公式为^[8-9]:

$$f_{th} = \frac{2\pi K \omega_p^2}{\xi \eta_\alpha P_{in}} \cdot \frac{1}{\left(\frac{dn}{dT} + \alpha_T \eta_g\right)}, \quad (5)$$

K 为激光晶体的热导率, ω_p 为慢轴方向的泵浦光在激光晶体中的平均光斑尺寸的半数, dn/dT 为激光晶体的热色散系数^[10], α_T 和 η_g 分别为激光晶体的热膨胀系数^[7]和折射率, ξ 为热转换系数^[11](即激

光晶体吸收的泵浦能量转化成热能的比例), P_{in} 为泵浦功率, η_α 为激光晶体的吸收率, $\eta_\alpha =$

$\exp(-\alpha l)$, 其中 l 和 $\alpha^{[12]}$ 分别是激光晶体的长度和吸收系数。具体参数如表 1 所示。

表 1 热透镜焦距 f 的计算公式中各项参数

Tab. 1 The parameters in the thermal lens focal length' calculation formula

$K/(W \cdot cm^{-1} \cdot K^{-1})$	dn/dTK^{-1}	η_e	P_{in}/W	l/mm	$\omega_p/\mu m$	α_i/K^{-1}	ξ	η_α	α/mm^{-1}
0.140	7.3×10^{-6}	1.823	3.550	3	154.127	7.9×10^{-6}	0.36	0.888	0.73

将表 1 中各项数值代入公式(9)可得热透镜焦距 $f=104.838$ mm。将振荡光波长 $\lambda=1064$ nm、谐振腔腔长 $L=8$ mm、热透镜焦距 f 代入公式(4)得出在耦合聚焦镜处于位置 3 时, 谐振腔基模光斑束腰尺寸 ω_1 为 $212.558 \mu m$ 。

当耦合镜处于其他位置(耦合镜焦平面与 LD 距离 $L_1=6.90, 7.20, 7.90, 8.20$ mm)时, 对应的 LD 在晶体内聚焦光斑的束腰尺寸 ω_p 分别为 $301.400, 274.400, 225, 211.400 \mu m$, 对应的基模光斑尺寸 ω_1 分别为 $226.012, 220.088, 206.026, 204.318 \mu m$ 。

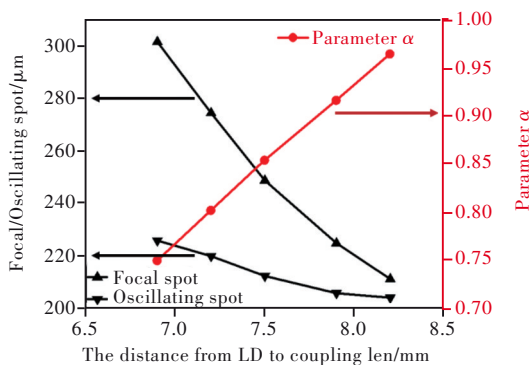


图 13 不同耦合聚焦镜位置对应的泵浦光斑尺寸 ω_p 、基模光斑尺寸 ω_1 以及参数 α 。

Fig.13 Pump spot size (ω_p), fundamental mode spot size (ω_1) and parameter α versus coupling focusing lens' position.

将基模光斑尺寸 ω_1 与泵浦光聚焦光斑束腰尺寸 ω_p 之比 ω_1/ω_p 定义为参数 α , 以评价基模光斑与泵浦光聚焦光斑的重叠程度。耦合聚焦镜不同位置(耦合镜焦平面与 LD 距离 $L_1=6.90, 7.20, 7.50, 7.90, 8.20$ mm)对应的参数 α 分别为 $0.750, 0.802, 0.854, 0.916, 0.966$ 。

结合实验数据结果, 从图 2~6 中可看出, 在耦合聚焦镜位置 3 两侧, 随着与位置 3 距离的增加, 输出激光的重频、平均输出功率、单脉冲能量降低, 时域抖动增大。不同耦合聚焦镜位置脉冲特性的变化源于泵浦光聚焦光斑尺寸与谐振腔基模光斑尺寸匹配

情况的变化, 即参数 α 的变化。上述结果表明, 现有的实验装置下, $\alpha=0.854$ 是使高重频被动调 Q 激光器获得较好输出特性的匹配条件。耦合镜处于位置 3 时, 参数 $\alpha=0.854$, 符合文献提到的为降低晶体热透镜效应, α 应该大于 0.625 的设计原则^[5]。

本实验为获得紧凑结构, LD 先采用光纤棒压缩快轴方向发散角, 然后采用单一非球面镜进行泵浦光聚焦。尽管如此, LD 慢轴方向与快轴方向聚焦情况差异依旧较大。根据与慢轴方向相同的步骤进行计算, 快轴方向不同耦合聚焦镜位置(位置 1~5)对应的参数 α 分别为 $16.250, 17.632, 22.667, 23.667, 23.413$, 快轴方向谐振腔基模光斑束腰尺寸远大于聚焦光斑束腰尺寸, 谐振腔基模光斑与聚焦光斑匹配程度远差于慢轴方向。因此, 上述理论分析只考虑 LD 慢轴方向的泵浦光, 不考虑其快轴方向。

4 结 论

在高重频被动调 Q 激光实验中, 发现输出脉冲的稳定性对泵浦光的聚焦特性非常敏感, 因此开展实验。实验中保持 LD 与谐振腔结构与间距(15 mm)不变, 使用焦距为 4 mm 的单一非球面镜作为耦合聚焦镜, 通过调节 LD 与耦合镜焦平面的距离 L_1 , 研究耦合聚焦镜位置对应泵浦光聚焦特性对高重频 Nd:YAG/Cr:YAG 被动调 Q 激光器输出脉冲特性的影响。实验结果表明, 耦合聚焦镜在距离 LD 7.50 mm 处, 泵浦功率为 3.550 W 时, 实现了重复频率为 160 kHz、平均输出功率为 360 mW、单脉冲能量为 $2.250 \mu J$ 、时域抖动为 120 ns、脉宽为 10.60 ns 的稳定脉冲输出。重复频率、平均输出功率、单脉冲能量、时域抖动均是各耦合聚焦镜位置的最佳结果。其中, 120 ns 是现有文献中重频 160 kHz 时, 被动调 Q 输出脉冲时域抖动最好的结果。这说明耦合聚焦镜在距离 LD 7.50 mm 处, 泵浦光聚焦光斑与谐振腔基模光斑匹配较好。之后通过理论计算, 得出耦合聚焦镜在距离 LD 7.50 mm 处, 基模光斑尺寸与泵浦光聚焦光

斑束腰尺寸之比为 0.854。该比值是在单透镜聚焦条件下获得的, 可为今后开展高重频紧凑型被动调 Q 激光器的研制和应用提供借鉴。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址: <http://cjl.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20220294>.

参 考 文 献:

- [1] 李梦龙, 蒙裴贝, 颜凡江, 等. 高重频被动调 Q 固体激光器研究进展 [J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(9): 09001-1-10.
LI M L, MENG P B, YAN F J, *et al.* Progress on passively Q-switched solid-state lasers [J]. *Laser Optoelectron. Prog.*, 2015, 52(9): 09001-1-10. (in Chinese)
- [2] 李兵斌. 紧凑型高峰值功率端面抽运固体激光器研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.
LI B B. *Study on Compact High Peak Power End-pumped Solid-state Lasers* [D]. Xi'an: Xidian University, 2014. (in Chinese)
- [3] HALL D G, SMITH R J, RICE R R. Pump-size effects in Nd:YAG lasers [J]. *Appl. Opt.*, 1980, 19(18): 3041-3043.
- [4] LAPORTA P, BRUSSARD M. Design criteria for mode size optimization in diode-pumped solid-state lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1991, 27(10): 2319-2326.
- [5] CHEN Y F. Pump-to-mode size ratio dependence of thermal loading in diode-end-pumped solid-state lasers [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2000, 17(11): 1835-1840.
- [6] 丁小艇. 二极管侧面泵浦薄片激光器结构参数的设计与分析 [D]. 北京: 北京工业大学, 2007.
DING X T. *Design and Analysis on Structure Parameters of Diode Side-pumped Thin Disk Laser* [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2007. (in Chinese)
- [7] 杨永明, 文建国, 王石语, 等. LD 端面泵浦 Nd:YAG 激光器中的热透镜焦距 [J]. 光子学报, 2005, 34(12): 1769-1772.
YANG Y M, WEN J G, WANG S Y, *et al.* The thermal lens focus of the end-pumped Nd:YAG laser [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, 34(12): 1769-1772. (in Chinese)
- [8] LI G Q, ZHAO S Z, YANG K J, *et al.* Control of the pulse width in a diode-pumped passively Q-switched Nd:GdVO₄/KTP green laser with a Cr³⁺:YAG saturable absorber [J]. *Appl. Opt.*, 2005, 44(28): 5990-5995.
- [9] 殷磊. LD 泵浦键合 Nd:YVO₄ 晶体被动调 Q 及锁模激光特性研究 [D]. 济南: 山东大学, 2012.
YIN L. *Study on Passively Q-switched and Mode-locked Laser Characteristics of LD-pumped Nd:YVO₄ Composite Crystal* [D]. Ji'nan: Shandong University, 2012. (in Chinese)
- [10] 吴霞芳. LD 端面泵浦被动 Q 开关 Nd:YAG 激光器模拟与实验研究 [D]. 长春: 长春理工大学, 2016.
WU X F. *LD End-pumped Passively Q-switched Nd:YAG Laser Simulation and Experimental Study* [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2016. (in Chinese)
- [11] 屈鹏飞. 紧凑型高效能固体激光器关键技术研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2017.
QU P F. *Study on Key Techniques of Compact High Efficiency End-pumped Solid-state Laser* [D]. Xi'an: Xidian University, 2017. (in Chinese)
- [12] MAO Y L, DENG P Z, ZHANG Y H, *et al.* High efficient laser operation of the high-doped Nd:YAG crystal grown by temperature gradient technology [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2002, 19(9): 1293-1295.



姚聪(1997-),男,山东枣庄人,硕士研究生,2019年于内蒙古大学获得学士学位,主要从事脉冲激光器的相关研究。
E-mail: yaocong19@mails.ucas.ac.cn



付喜宏(1980-),男,内蒙古巴彦淖尔人,博士,研究员,博士生导师,2008年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事脉冲激光技术及应用的研究。
E-mail: fuxh@ciomp.ac.cn