

基于Nd:YVO₄/YVO₄键合晶体的皮秒激光器研究

余泓霖¹,谢松霖¹,张振荣^{1,2},董书秋^{3*},张超凡⁴,梁正友¹

(1.广西大学计算机与电子信息学院,南宁 530004;2.广西大学广西多媒体通信与网络技术重点实验室,南宁 530004;

3.广西北港大数据科技有限公司,南宁 530004;4.国防科技大学前沿交叉学科学院,长沙 410073)

摘要:为了缓解高功率皮秒激光器中增益介质的热透镜效应,提高稳定锁模输出功率,研究设计了基于Nd:YVO₄/YVO₄键合晶体的皮秒激光器,采用888 nm半导体激光器作为泵浦源以降低热负载,并利用可饱和吸收镜(SESAM)构建折叠谐振腔实现稳定锁模。实验结果表明,在28.9 W最大泵浦功率下,系统实现了中心波长1064 nm的连续锁模输出,获得7.4 W的最大平均功率,脉冲宽度为20.4 ps,重复频率为120 MHz,光-光转换效率约25%,平均光束质量因子约为1.33。

关键词:皮秒激光;键合晶体;连续锁模;Nd:YVO₄;热透镜

中图分类号:TN256 文献标志码:A 文章编号:1002-5561(2026)02-0072-07

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2026.02.012

Study of picosecond laser based on Nd:YVO₄/YVO₄ bonded crystal

YU Honglin¹, XIE Songlin¹, ZHANG Zhenrong^{1,2}, Dong Shuqiu^{3*}, ZHANG Chaofan⁴, LIANG Zhengyou¹

(1. School of Computer and Electronic Information, Guangxi University, Nanning 530004, China;

2. Guangxi Key Laboratory of Multimedia Communications and Network Technology, Guangxi University,

Nanning 530004, China; 3. Guangxi Beibu Gulf Port Big Data Technology Co., Ltd., Nanning 530004, China;

4. College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: To mitigate the thermal lensing effect of the gain medium in high-power picosecond lasers and improve the stable mode-locked output power, a picosecond laser based on Nd:YVO₄/YVO₄ bonded crystal is designed. An 888 nm semiconductor laser was used as the pump source to reduce thermal load, and a semiconductor saturable absorber mirror (SESAM) is employed to construct a folded resonator for stable mode-locking. Experimental results show that at a maximum pump power of 28.9 W, the system achieves continuous-wave mode-locked output at a central wavelength of 1 064 nm, with a maximum average power of 7.4 W, pulse duration of 20.4 ps, repetition rate of 120 MHz, optical-to-optical conversion efficiency of approximately 25%, and average beam quality factor of about 1.33.

Key words: picosecond laser, bonded crystal, continuous-wave mode-locking, Nd:YVO₄, thermal lens

0 引言

近年来,随着新能源、半导体及柔性电子等战略性新兴产业的快速发展,兼具高精度加工特性、高峰值功率、高重复频率和低热损伤阈值的固体皮秒脉冲激光正逐步成为先进制造领域的重要工具^[1-6]。在激

收稿日期:2025-03-17。

基金项目:广西重点研发计划项目(桂科AB23075200)资助。

作者简介:余泓霖(2000—),男,硕士研究生,现就读于广西大学计算机与电子信息学院,主要从事固体激光器谐振腔仿真分析与优化、固体激光器空间光路设计与开发、基于空间光调制器的光束整形及其整形算法优化等方面工作。

*通信作者:董书秋(1979—),女,硕士,高级经济师,现就职广西北港大数据科技有限公司,主要研究方向为激光技术和应用、精密加工、大数据技术和应用。



光微纳加工、材料处理等应用场景中,皮秒量级的超短脉冲与物质相互作用时,可将热损伤控制在亚微米量级,从而实现“冷加工”效果^[7-8],这一优势使得固体皮秒激光器在精密加工领域备受关注。但目前固体激光器运转过程中普遍存在热透镜效应的问题。热透镜效应是指激光器运转时热积累引起增益介质内部折射率产生空间梯度变化,从而使增益介质对谐振腔内的激光束起到动态透镜的作用。当热透镜效应加剧时,腔内各元件上的光场发生变形,直接破坏基模光与泵浦光的空间模式匹配,导致光-光转换效率下降,输出功率提升受限;同时,被动锁模机制所需的光通量不足,会造成锁模激光器失锁。为了有效管理热透镜效应,Lü Yanfei等人^[10]在Nd:YAG激光器中,通过对LiNbO₃晶体制备的透镜施加电压调控透镜焦距,

从而补偿光路中增益介质的热透镜效应,实现453 mW的946 nm连续激光输出,4 h内输出功率波动为1.8%。吴羽等人^[11]通过在谐振腔中插入凹透镜来补偿热透镜效应,采用120 mm的Nd:YAG激光棒作为增益介质,在808 nm的激光器泵浦抽运电流为20 A时,1 064 nm波长激光最大输出功率达55 W,光束质量因子为4.4,有效改善了光束质量。马建立等人^[12]采用Nd:YAG陶瓷构建皮秒激光器,在11.49 W的808 nm激光器泵浦下获得脉宽为33.6 ps、平均功率为1.25 W的激光输出,光-光转化率为10.9%,但随着泵浦功率继续增加,锁模激光出现失锁现象。焦文龙等人^[13]采用有限元分析法研究了Nd:YAG晶体工作时的温度场、应力场的热致变化量情况,结果表明单位面积上最大应力以及热致形变量会随泵浦功率的增大而增大。李萌萌等人^[14]对4种不同的复合Nd:YAG晶体的热效应进行了模拟分析,结果表明键合晶体是减小激光晶体热效应的有效方法。基于以上研究结果可知,键合晶体不仅能免去额外元件调试,有效缓解热透镜效应,而且还易于制备。目前关于808 nm激光泵浦Nd:YAG键合晶体的热透镜效应研究较多,但对于888 nm激光器泵浦Nd:YVO₄键合晶体的热透镜效应研究较少。因此,本文采用波长为888 nm的半导体泵浦源搭建基于Nd:YVO₄/YVO₄键合晶体的皮秒激光器。

1 皮秒激光器原理

1.1 实验原理

在固体激光器中,增益介质吸收泵浦光能量后,低能级的粒子跃迁到高能级,当泵浦能量足够大,使得高能级的激发态粒子数大于低能级基态粒子数时,就形成了粒子数反转,此时特定频率的光子触发激发态粒子发生受激辐射,获得相同频率、方向、相位的相干光子,实现光放大。当光增益大于腔内光损耗时,获得纵模相位呈随机分布的连续激光输出,纵模数量 N 由增益介质的增益带宽 $\Delta\nu$ 和谐振腔腔长 l 确定,如式(1)所示。

$$N = \frac{2nl\Delta\nu}{c} \quad (1)$$

式中: n 为传输空间折射率, c 为真空光速。

此时,采用锁模器件对谐振腔内相位随机分布的纵模进行相位固定,具有固定相位关系的纵模在时域上相干叠加后形成超短脉冲,该过程在谐振腔中稳定循环运转,实现连续锁模脉冲输出。

以上过程中,增益介质的受激辐射截面决定激发

态粒子捕获特定频率入射光子并触发受激辐射的概率,即增益介质的光放大能力;超短脉冲能达到的理论最短脉宽 τ 与增益介质的增益带宽 $\Delta\nu$ 有关,表示为

$$\tau \approx \frac{k}{\Delta\nu} \quad (2)$$

式中: k 为时间带宽积常数。

本文采用Nd:YVO₄/YVO₄晶体作为1064 nm皮秒激光器的增益介质,相比于常用的Nd:YAG晶体, a 轴方向切割的Nd:YVO₄晶体在1 064 nm处的受激辐射截面约为Nd:YAG晶体的4倍,增益带宽约为Nd:YAG晶体的2倍,意味着Nd:YVO₄晶体在中心波长1 064 nm处作为激光器增益介质时,表现出更高的光放大增益,进而有利于实现更高的斜效率,理论锁模脉冲更短^[15]。但较低的热导率会导致Nd:YVO₄在提高泵浦功率时热透镜效应明显,限制了其输出功率的提升。为了促使晶体棒均匀吸收泵浦光能量,缓解高功率泵浦时Nd:YVO₄晶体端面局部温度过高的热透镜效应,本文采用 a 轴切割规格为3 mm×3 mm×(5 mm@0 at.%+30 mm@0.8 at.%)的键合Nd:YVO₄/YVO₄晶体,符号at.%为原子百分比的简写,5 mm@0 at.%与30 mm@0.8 at.%分别表示5 mm的0%Nd掺杂的YVO₄晶体部分与30 mm的0.8%Nd掺杂的Nd:YVO₄晶体部分。将提拉法生长的30 mm的Nd:YVO₄晶体与5 mm的YVO₄晶体使用光胶粘合,在高温条件下进行分子扩散实现Nd:YVO₄晶体与YVO₄晶体稳固结合,未掺杂Nd的基质YVO₄晶体部分作为泵浦光入射端面,可有效缓解增益介质的热透镜效应^[16];同时采用0.8%的Nd掺杂浓度,降低Nd掺杂带来的非辐射衰变相关热负载^[17]。

在泵浦源方面,选用中心波长为888 nm的半导体激光器。相较于常用的中心波长为808 nm的半导体泵浦源,虽然Nd:YVO₄晶体在波长808 nm处吸收系数高于888 nm处,但较高的吸收系数会导致泵浦光在较短的距离内被晶体吸收,造成严重的局部热效应,而且Nd:YVO₄晶体对808 nm泵浦光呈现线偏振吸收特性,导致808 nm泵浦光在晶体内相互正交的2个偏振方向上吸收系数存在较大差别。相较之下,Nd:YVO₄在888 nm处的吸收系数受偏振态的影响较小,并且可以通过增加晶体长度提高888 nm泵浦光总体吸收率^[18],缓解晶体热透镜效应。

锁模器件方面,采用可饱和吸收镜(SESAM)实现被动锁模。利用SESAM对强脉冲反射率高、对弱脉冲反射率低的非线性特性,当脉冲在SESAM处的光通量足够触发饱和吸收时,谐振腔建立对强脉冲的正反馈

余泓霖, 谢松霖, 张振荣, 等: 基于 Nd:YVO₄/YVO₄ 键合晶体的皮秒激光器研究

循环, 同时抑制无法触发饱和吸收的弱脉冲; 在频域上表现为: 相位固定的纵模序列在谐振腔中被选择性保留, 相位随机的纵模被有效抑制, 从而实现激光器锁模。

1.2 实验装置

皮秒激光器谐振腔布局如图 1 所示, 设计总腔长为 1.25 m, 折叠角为 5°。Nd:YVO₄/YVO₄ 键合晶体两端面分别镀波长为 1 064 nm、888 nm 高透膜, 夹持于铜块中, 铜块连接冷水机并设定水温为 20 °C。泵浦源采用中心波长为 888 nm 的光纤耦合半导体激光器, 纤芯直径为 200 μm, 数值孔径为 0.22。泵浦光通过 F₁ 与 F₂ 平凸透镜组成放大比例为 1:2.5 的光学耦合器, 透过平面镜 M₃ 入射到键合晶体未掺杂的 YVO₄ 部分, 并与晶体光轴同心对齐。凹面反射镜 M₁、M₂、M₄ 的曲率半径分别为 -100、-500、-400 mm, 均镀有 1 064 nm 波长高反膜, M₃ 镀 888 nm 波长高透膜和 1 064 nm 波长高反膜。1 064 nm 激光输出镜 (OC) 的透过率为 15%, 采用 BATOP 公司铜基座半导体可饱和吸收镜 SESAM 作为锁模元件, 调制深度为 0.8%, 置于谐振腔一端。从 SESAM 端至 OC 端, SESAM 与 M₁ 的间距 L₁ 为 80 mm, M₁ 与 M₂ 的间距 L₂ 为 480 mm, M₂ 与 M₃ 的间距 L₃ 为 430 mm, M₃ 与 M₄ 的间距 L₄ 为 180 mm, M₄ 与 OC 的间距 L₅ 为 80 mm。为了降低谐振腔搭建调试的复杂度, 激光晶体置于 M₂ 与 M₃ 之间, 并靠近 M₃, 具体位置由腔内基模光斑半径确定。

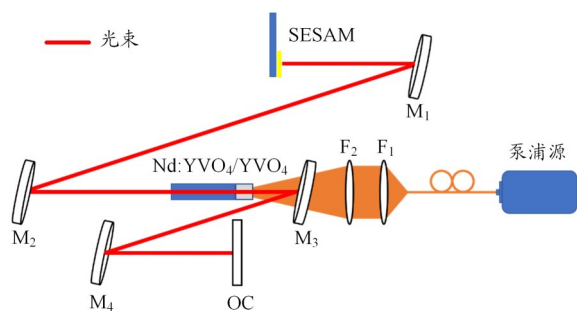


图 1 基于 Nd:YVO₄/YVO₄ 键合晶体的皮秒激光器实验装置示意图

1.3 谐振腔光传输仿真

为了确定增益介质晶体放置位置, 同时分析晶体热透镜焦距变化对 SESAM 和增益介质上光斑大小的影响, 采用传输矩阵结合高斯传输理论对谐振腔内的光传输进行仿真。

谐振腔中的自由空间传输 (传输距离为 L)、平面反射镜、球面镜 (曲率半径为 R)、透镜 (焦距为 f) 对应的传输矩阵 M_L 、 M_p 、 M_R 、 M_f 分别表示为

$$\begin{cases} M_L = \begin{bmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \\ M_p = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \\ M_R = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{R} & 1 \end{bmatrix} \\ M_f = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (3)$$

将 SESAM 视为平面反射镜, 并作为计算起始面。在代入各元件的矩阵参数后, 按照光束往返一次所经过元件的顺序, 将相应矩阵按逆序相乘, 得到谐振腔内光束的总传输矩阵 M 。M 代表光线从起始面出发、在腔内往返一次所发生的几何变换, 表示为

$$M = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: A 表示光线传输中的角放大因子, B 表示光线传播距离因子, C 表示光学系统中透镜效应因子, D 表示光线传播中的位置放大因子。

提取矩阵 M 中的 $ABCD$ 参数, 腔内基模光斑半径大小可由式 (5) 求出。

$$\omega^2 = \lambda \frac{|B|}{\pi \sqrt{1 - \left(\frac{A+D}{2}\right)^2}} \quad (5)$$

式中: ω 为腔内高斯基模光斑半径大小, λ 为光波长, $\lambda = 1 064 \text{ nm}$ 。

根据高斯光束传输理论, 并考虑折叠角对子午面和弧矢面光斑半径的影响, 腔内光斑分布仿真如图 2 所示。图中 S 曲线为光束弧矢面光斑半径变化曲线, T 曲线为光束子午面光斑半径变化曲线。横轴 0 mm 的位置是可饱和吸收镜 SESAM 位置, 右侧末端是 OC 位

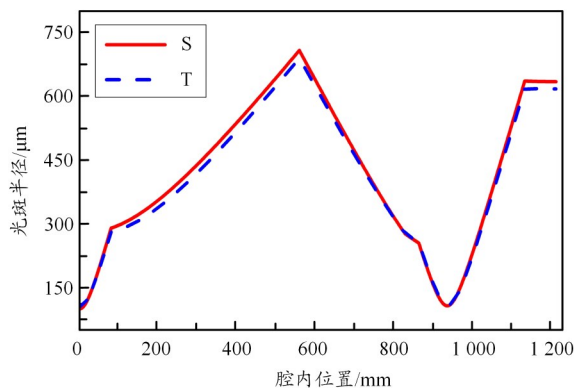


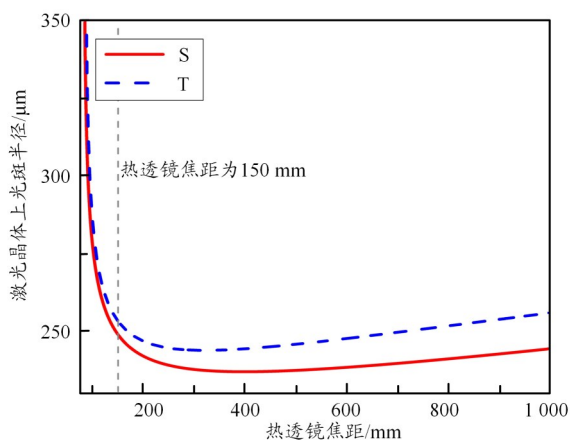
图 2 谐振腔内光斑分布

置。对于晶体上的基模光束,当基模光束与泵浦光束(半径约250 μm)空间重叠时可实现空间模式匹配,提高泵浦效率。从图2可以看出,850mm处的基模光束重叠较好,可实现较好的模式匹配,因此为了最大化泵浦效率,便于谐振腔搭建和调试,应当取850 mm处放置增益介质晶体。

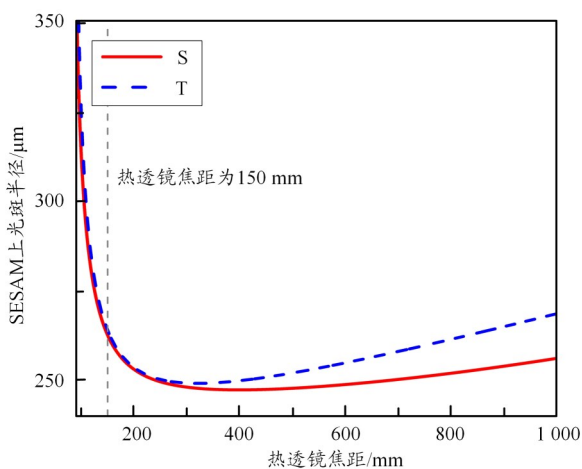
增益介质在发生热透镜效应时存在热焦距 f_t ,可将其等效为焦距动态变化的薄透镜。以 f_t 为自变量,将其传输矩阵加入到谐振腔传输矩阵的相应位置,重新计算矩阵 M 和基模光束半径,得到晶体和SESAM上的光斑半径与热透镜焦距的关系曲线,如图3所示。

从图3(a)可知,当晶体热透镜焦距发生变化时,晶体上的基模光斑尺寸随之变化。当热透镜焦距缩短至150 mm以下,晶体基模光斑半径变化幅度大,此时基模光与泵浦光的空间模式匹配将受到影响。

从图3(b)可知,当热透镜焦距大于150 mm时,



(a) 晶体上光斑半径与热透镜焦距的关系曲线



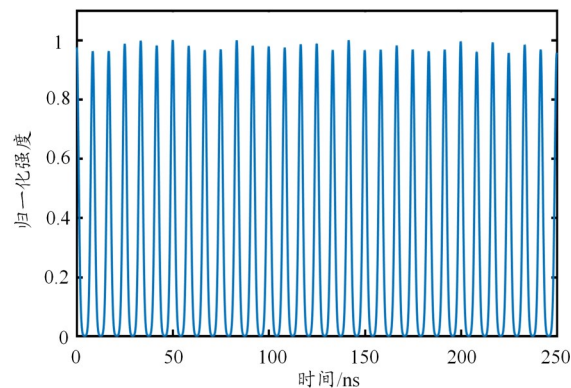
(b) SESAM上光斑半径与热透镜焦距的关系曲线

图3 热透镜焦距对晶体和SESAM上光斑的影响

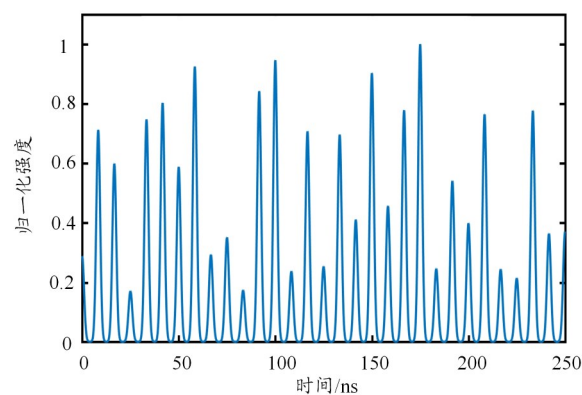
SESAM上的光斑半径变化幅度小,保持小于或等于100 μm;当热透镜焦距小于150 mm时,SESAM上的光斑半径变化幅度较大,锁模的能量阈值随之变化,进而影响锁模的稳定性^[19]。

2 实验结果

本文分别以Nd:YVO₄/YVO₄键合晶体、Nd:YVO₄晶体作为增益介质进行了2组实验,其中Nd:YVO₄晶体的规格为3 mm×3 mm×30 mm@0.8 at.%,使用功率计、示波器、光电探头先后观察记录输出功率和锁模情况。在相同的实验装置下,2组实验的泵浦功率阈值均在1.8 W左右,此时输出1 064 nm连续光;当泵浦功率提高至15.4 W,2组激光器均能达到连续锁模运转状态,平均输出功率约为3.5 W;连续提高泵浦功率至28.9 W,键合晶体实验组的最大平均输出功率达7.4 W,在这一过程中,连续锁模运转状态维持不变,光-光转化效率稳定,约为25%。当泵浦功率超过28.9 W后,脉冲序列波动较大,不再以连续锁模方式运转,失锁前后的脉冲序列如图4所示。可以看出,连续锁模运转



(a) 连续锁模运转的脉冲序列



(b) 稳定锁模失效的脉冲序列

图4 失锁前与失锁后脉冲序列

余泓霖, 谢松霖, 张振荣, 等: 基于Nd:YVO₄/YVO₃键合晶体的皮秒激光器研究

的脉冲序列整齐稳定, 而失锁后脉冲的起伏波动较大。

键合晶体实验组输出功率线性增加的泵浦功率范围为0~28.9 W, 稳定锁模的泵浦功率范围为15.4~28.9 W, 锁模输出功率为3.5~7.4 W, 最大光-光转化效率为25.6%。未键合晶体实验组在泵浦功率超过22.2 W时处于失锁状态, 并且随着泵浦功率提高, 光-光转化效率开始下降, 故未键合晶体实验组连续锁模运转的泵浦功率范围为15.4~22.2 W, 锁模输出功率为3.5~5 W。2组实验的功率变化曲线如图5所示。可以看出, 在泵浦功率小于22.2 W时, 2组实验的功率曲线相似, 锁模状态相同。此后持续提升泵浦功率, 未键合晶体实验组由于热透镜效应的影响, 锁模状态被破坏, 光-光转化效率下降。相反, 键合晶体实验组表现出了更好的热稳定性, 稳定锁模光功率的提升空间更大。

对2组实验中稳定锁模运转时光束质量因子 m^2 进行测量计算^[20], m^2 定义为

$$m^2 = w_0 \theta_0 \frac{\pi n}{\lambda} \quad (6)$$

式中: w_0 为光束传播的最小束腰半径, θ_0 为光束传播的发散角, n 为折射率, 基模高斯光束的 m^2 因子恒为1。

从式(6)可以看出, 只需测得光束传播过程中的最小束腰半径和发散角, 即可计算出光束质量因子。

本文使用焦距为150 mm的聚焦透镜对出射光束进行空间变换、瑞利长度压缩后, 再进行数据测量。以 z 轴为光束传播方向, 在焦点附近沿传播方向使用光束质量仪测量一系列光斑数据点(z, w)。使用最小二乘法对测得数据点进行双曲线拟合, 可表示为

$$w^2(z) = w_0^2 + \theta_0^2 z^2 \quad (7)$$

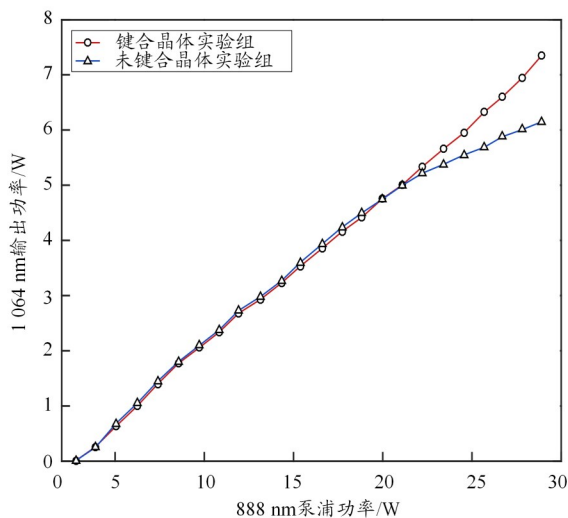
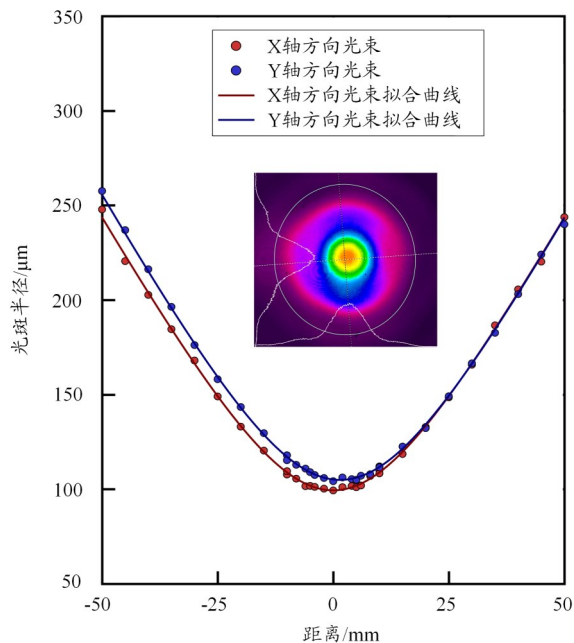


图5 不同激光晶体功率变化曲线

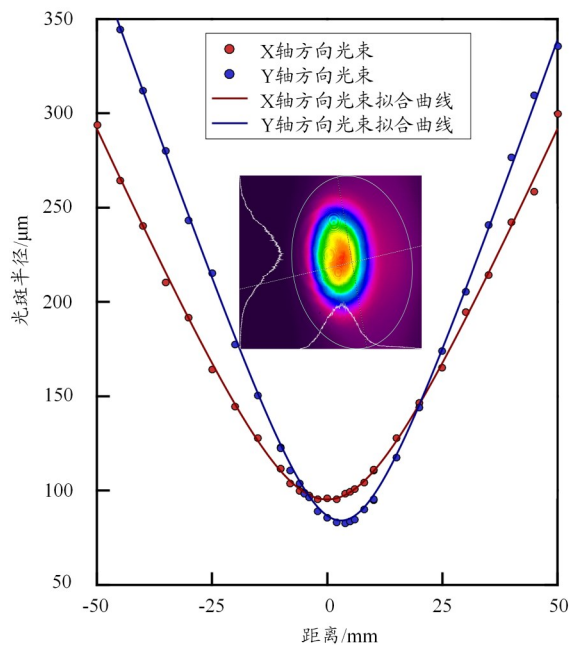
考虑到光束在横轴或纵轴上可能存在变形的情况, 故单独对光束在横轴方向与纵轴方向上的光斑尺寸进行测量和拟合, 最后再对横轴与纵轴上光束质量因子 m_x^2 和 m_y^2 求几何平均得到平均光束质量因子 m^2 , 几何平均表达式为

$$m^2 = \sqrt{m_x^2 m_y^2} \quad (9)$$

测量结果如图6所示, 曲线表示光束发散情况, 插



(a) 键合晶体实验组光束质量

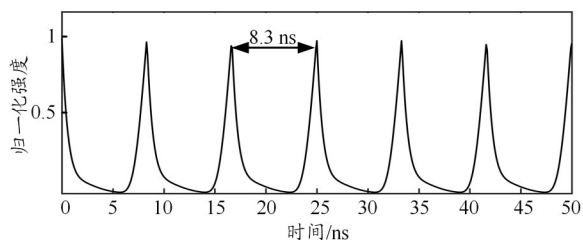


(b) 未键合晶体实验组光束质量

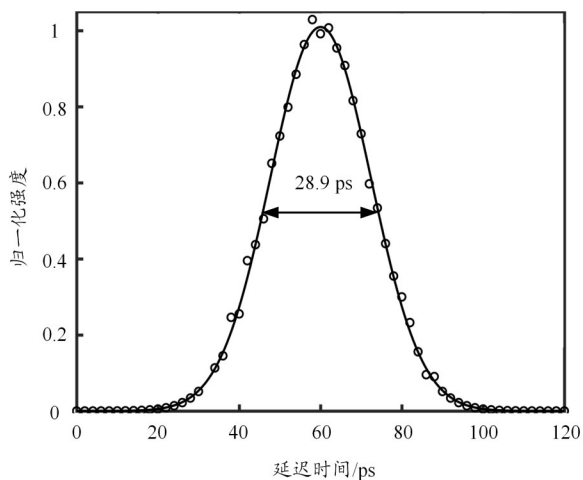
图6 输出光斑二维剖面图与光束质量因子

图为测得的远场光斑截面。可以看出,采用键合晶体实验组的输出激光光束质量较好,横截面为基模输出模式,发散角较小,计算得到平均光束质量因子约为1.33。未键合晶体实验组的输出光斑发散角较大,且在纵轴方向上出现了由热透镜效应导致的光斑变形,计算得到平均光束质量因子约为1.62。

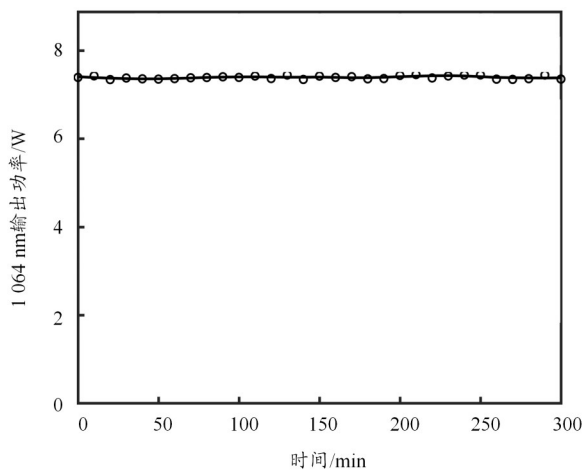
本文测量了键合晶体实验组在最大平均输出功率



(a) 脉冲序列



(b) 自相关延迟时间曲线



(c) 5 h 功率变化图

图7 皮秒激光器输出特性

7.4 W 工况下的激光输出特性。使用采样率为 10 Ga/s、带宽为 2 GHz 的示波器测量脉冲序列,如图 7(a)所示。测得脉冲间隔约为 8.3 ns,重复频率约为 120 MHz,符合 1.25 m 的腔长设计。由于示波器无法测量皮秒量级的时间尺度,故采用自相关法测量脉冲宽度,自相关法实验方法是将脉冲光分成 2 束后,一束光不作任何调整,另一束光利用反射镜和位移台改变其光程,再将 2 束光合束到非线性晶体上,2 束光脉冲合束在晶体上输出的谐波强度随增加的光程改变,连续移动位移台并测量强度变化,将移动的距离换算成光传输这段距离所需时间,对描点进行拟合即可得到自相关曲线,如图 7(b)所示。自相关曲线宽度约为 28.9 ps,取拟合系数为 1.414,计算得到脉冲宽度约为 20.4 ps。关于功率稳定性测试,本文在 5 h 内每 10 min 记录一次平均输出功率,结果如图 7(c)所示。计算得到功率波动约为 0.8%,说明长时间运转的稳定性良好。

3 结束语

本文采用 Nd:YVO₄/YVO₄ 键合晶体作为增益介质,中心波长为 888 nm 半导体激光器作为泵浦源,铜基座 SESAM 作为锁模元件,对谐振腔光路进行合理设计后搭建皮秒脉冲激光器。实验结果表明,键合晶体设计有效缓解了高功率泵浦下的热透镜效应,使得稳定锁模的泵浦功率范围扩展至 15.4~28.9 W,最大平均输出功率达 7.4 W,平均光束质量因子约为 1.33,且长时间运行功率波动仅 0.8%。同时,与未键合晶体相比,键合晶体的设计有效缓解了热透镜效应,提升了锁模稳定性与输出光束质量,抑制了高功率下的失锁现象,对设计搭建大功率、高光束质量的皮秒激光器有重要参考意义。

参考文献:

- [1] Ouyang Wentai, Jiao Junke, Xu Zifa, et al. Experimental study on CFRP drilling with the picosecond laser "double rotation" cutting technique[J]. Optics and Laser Technology, 2021, 142: 107238.
- [2] Kang Yiyun, Derouach H, Berger N, et al. Experimental research of picosecond laser based edge preparation of cutting tools[J]. Journal of Laser Applications, 2020, 32(2): 022043.
- [3] Włodarczyk K L, Brunton A, Rumsby P, et al. Picosecond laser cutting and drilling of thin flex glass[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2016, 78: 64-74.
- [4] Beg F N, Bell A R, Dangor A E, et al. A study of picosecond laser - solid interactions up to 1019 W/cm²[J]. Physics of Plasmas, 1997, 4(2): 447-457.
- [5] Liu Yang, Yu Jin, Zhang Xue, et al. Design and experimental study of

余泓霖, 谢松霖, 张振荣, 等. 基于Nd:YVO₄/YVO₄键合晶体的皮秒激光器研究

picosecond laser machining system[J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40: 48-54.

[6] 袁美霞, 孙永强, 郭玉冰. 皮秒激光加工钛合金表面微槽及润湿性研究[J]. 激光与红外, 2025, 55(1): 33-39.

[7] 叶盛, 赵上熈, 邢忠福, 等. 激光技术在金刚石加工中的研究及应用进展[J]. 红外与激光工程, 2024, 53(2): 44-65.

[8] 敬海军. CFRP的纳皮秒双脉冲激光加工仿真与实验研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2022.

[9] 高月, 宋秋艳, 陈根祥. 被动锁模激光器的关键技术与研究进展[J]. 光通信技术, 2015, 39(3): 14-17

[10] Lü Yanfei, Xia Jing, Cheng Weibo, et al. Diode-pumped cw Nd: YAG three-level laser at 869 nm[J]. Optics Letters, 2010, 35(21): 3670-3672.

[11] 吴羽, 龙晓莉, 焦中兴, 等. 热透镜效应补偿的高功率Nd: YAG激光器的优化设计[J]. 激光技术, 2015, 39(3): 377-380.

[12] 马建立, 张玲, 甘新昌, 等. 基于Nd: YAG陶瓷的被动锁模激光器研究[J]. 光通信技术, 2021, 45(10): 7-9.

[13] 焦文龙, 李武军, 郭苗迪, 等. LD端面泵浦棒状Nd: YAG晶体热效应分析[J]. 激光杂志, 2025, 46(1): 40-45.

[14] 李萌萌, 杨飞, 赵上龙, 等. 复合Nd: YAG晶体固体激光器热效应研究[J]. 激光与红外, 2020, 50(1): 42-48.

[15] 周炳琨, 高以智. 激光原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014: 33-38.

[16] Li Xudong, Yu Xin, Chen Fei, et al. Laser properties of continuous-grown Nd: GdVO₄/GdVO₄ and Nd: YVO₄/YVO₄ composite crystals under direct pumping[J]. Optics Express, 2009, 17(15): 12869-12874.

[17] Liu Qiang, Nie Mingming, Lu Fuyuan, 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): 1-9.

[18] 艾庆康, 常亮, 陈檬, 等. 808 nm与888 nm抽运Nd: YVO₄热效应分析[J]. 中国激光, 2011, 38(4): 7-12.

[19] 于海波, 刘可, 陈莹, 等. 紧凑型被动风冷Nd: YVO₄皮秒振荡器设计[J]. 中国激光, 2015, 42(8): 60-66.

[20] 陈诚, 郑加金, 韦玮, 等. 基于CCD测量激光光束质量M₂[J]. 发光学报, 2017, 38(5): 643-648.