

高稳定高光光效率的 Yb:YAG 单薄片再生放大器

石玉森^{1,2}, 李祖强^{1,2}, 潘雪^{1*}, 肖奇¹, 汤晓云¹, 卢兴华¹, 王江峰¹, 张攀政¹, 姜有恩¹, 范薇¹, 李学春^{1**}, 朱健强¹¹中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理联合实验室, 上海 201800;²中国科学院大学材料与光电研究中心, 北京 100049

摘要 薄片激光器可以实现高峰值功率、高平均功率、高光束质量的激光输出,是高重复频率皮秒泵浦源的关键技术之一。基于 Yb:YAG 单薄片激光模块设计并搭建了再生放大系统,连续泵浦下获得了平均功率为 40.9 W、重复频率为 1 kHz、脉冲宽度为 3.4 ns 的激光输出,水平方向上的光束质量因子(M_x^2)和垂直方向上的光束质量因子(M_y^2)分别为 1.12 和 1.10。基于腔内光束指向主动控制技术,2 h 输出的平均功率稳定性峰谷(PV)值和均方根(RMS)值分别为 6.42% 和 0.56%。在 600 μ s 脉冲泵浦情形下,光光效率达 16.1%。在 10 kHz 重复频率下,获得了 53.3 W 的高平均功率的激光输出, M_x^2 和 M_y^2 分别为 1.07 和 1.06。

关键词 激光器; 薄片激光器; 再生放大器; 脉冲泵浦; 激光稳定性

中图分类号 TN248.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL230761

1 引言

1994年,Giesen等^[1]首次提出薄片激光器的概念,其中的激光增益介质被设计成薄片状(厚度为100~200 μ m),并采用端面泵浦背面冷却的强化换热技术。相比传统的棒状和板条固体增益介质,薄片增益介质的热效应明显较弱^[2]。薄片增益介质的单程小信号增益较低,而再生放大器中激光脉冲的放大程数可控,即使很低的单程增益也能实现足够大的总增益,能够为激光脉冲提供 $10^4\sim 10^8$ 的总增益。因此薄片激光技术适用于再生放大器,可获得高功率、高光束质量的激光输出。

2016年,Jung等^[3]研制的薄片再生放大器在100 Hz重复频率下实现了300 mJ单脉冲能量的输出,这是目前报道的薄片再生放大器输出的最高单脉冲能量。2017年,Nubbemeyer等^[4]采用双薄片激光模块以及环形腔设计了薄片再生放大器,在5 kHz重复频率下获得了203 mJ单脉冲能量的激光输出,首次同时实现了百毫焦级能量、千瓦级平均功率的皮秒激光输出。2019年,德国通快公司将薄片再生放大器输出的平均功率扩展到1.9 kW,重复频率为20 kHz^[5],这是目前报道的薄片再生放大器实现的最高平均功率。在国内,2021年,董静等^[6]基于双薄片激光模块实现了96 W平均功率、100 kHz重复频率的亚纳秒再生放大输出,光光效率约为10.5%。2023年,陈飞等^[7]在国内首次使用单薄片激光模块实现了百毫焦能量、百瓦级平均功

率的薄片再生放大器,光光效率为11%。

薄片激光器优异的功率扩展性^[8]使其可以通过增加光斑尺寸来提升输出功率。然而,在激光模式尺寸提升的同时,谐振腔动态稳定区的宽度变窄,并且输出性能对腔内元件的机械蠕变和温度漂移更加敏感^[9-10],这将限制薄片再生放大器输出功率的提升。基于腔内光束指向主动控制技术,我们设计并搭建了大模场的Yb:YAG单薄片再生放大器,实现了40.9 W平均功率、1 kHz重复频率的激光输出,2 h的输出功率稳定性峰谷(PV)值和均方根(RMS)值分别为6.42%和0.56%,放大器展现出极好的能量稳定性,满足工程稳定性要求。基于脉冲泵浦技术,实现了16.1%的光光效率。并且在10 kHz重复频率下,获得了53.3 W高平均功率的激光输出,水平方向上的光束质量因子(M_x^2)和垂直方向上的光束质量因子(M_y^2)分别为1.07和1.06。

2 薄片再生放大系统的结构与设计

基于Yb:YAG单薄片激光模块的再生放大实验装置如图1所示,包含窄带的纳秒种子源(seed)、半波片(HWP)、偏振分束器(PBS)、隔离器(ISO)、薄膜偏振片(TFP)、法拉第旋光器(FR)、1/4波片(QWP)、普克尔盒(Pockels cell)、反射镜(M1~M9)以及薄片激光模块等。种子光由1030 nm单纵模连续激光器产生,经过声光斩波器、振幅调制器等后形成<1 nJ单脉冲能量、1~3 ns脉宽可调的种子激光脉冲,时域波形近似为方波。实验中薄片激光模块内Yb:YAG薄片

收稿日期: 2023-04-25; 修回日期: 2023-05-16; 录用日期: 2023-05-31; 网络首发日期: 2023-07-04

基金项目: 国家自然科学基金(11604350)、中国科学院战略性先导科技专项(XDA25020307, XDA25020103)

通信作者: *pxll33@siom.ac.cn; **lixuechun@siom.ac.cn

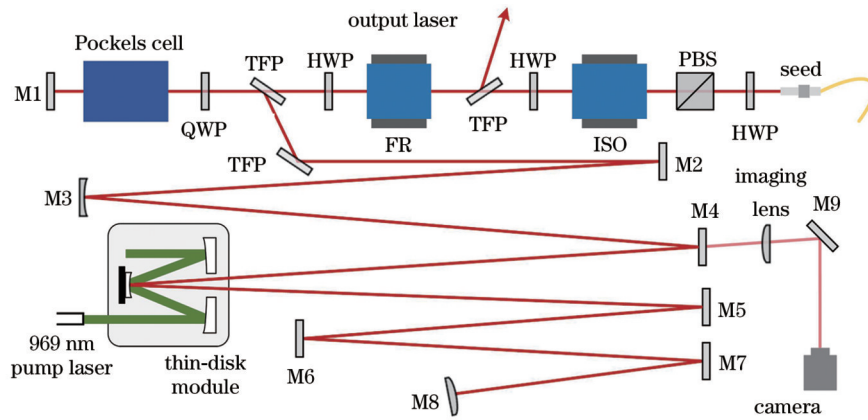


图 1 Yb:YAG 薄片再生放大系统

Fig. 1 Yb:YAG thin-disk regenerative amplification system

晶体的通光口径为 9 mm、厚度为 215 μm, 掺杂 Yb 的原子数分数为 7%。泵浦源为光纤耦合的半导体激光器, 中心波长为 969 nm、最高输出功率为 500 W。泵浦光经匀化、准直后被注入 24 程多通泵浦系统, 在 Yb:YAG 薄片晶体上形成直径约为 3.9 mm 呈超高斯分布的圆形光斑。普克尔盒包含两块尺寸为 12 mm × 12 mm × 20 mm 的偏硼酸钡 (BBO) 晶体, 1/4 波电压约为 7.5 kV。

薄片晶体的热焦距和热致波前畸变是薄片激光模块的性能指标, 热焦距决定再生腔内的模式, 在谐振腔设计和搭建前需对薄片晶体的热焦距和热致波前畸变进行测量。在不同泵浦功率下, 薄片晶体反射波前的球面部分 PV 值和非球面部分 RMS 值如图 2 所示, 其中 λ 为波长。在低泵浦功率下, 薄片晶体的球面波前 PV 值为负, 意味着呈散焦效应; 随着泵浦功率的增加, 薄片晶体的球面波前逐渐呈聚焦效应, 且热焦距减短。在 350 W 泵浦功率下, 薄片晶体反射波前的球面部分对应的热焦距约为 32.28 m。另外, 从图 2 可以看出, 球面波前 PV 值随泵浦功率的增加近似呈线性变化, 对两者作线性拟合, 可以推算出 500 W (泵浦源最高输出功率) 泵浦功率下薄片晶体的热焦距约为 20.08 m。

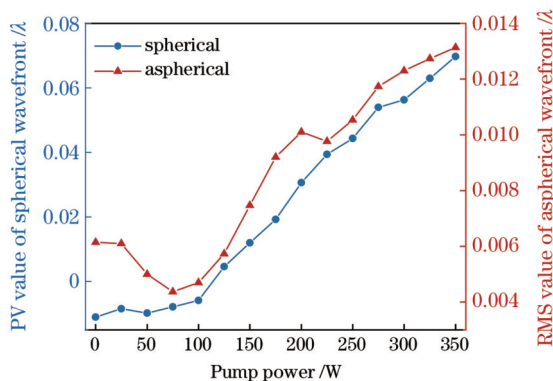


图 2 球面和非球面波前随泵浦功率的变化

Fig. 2 Variation of spherical and aspherical wavefronts with pump power

在薄片激光器中, 可以通过增加光斑尺寸, 在保持泵浦功率密度不变的情况下, 进一步提高泵浦功率, 以获得更高功率的激光输出。然而, 薄片再生放大器在提升激光模式尺寸的同时, 谐振腔的动态稳定区的宽度变窄, 并且再生输出性能对谐振腔内元件的机械蠕变和温度漂移更加敏感。为保证激光输出的稳定性^[11], 薄片晶体的热焦距应尽量设计在动态稳定区的极小值点附近, 使薄片晶体处的模式尺寸对其光焦度的变化不敏感, 并尽量降低谐振腔的失调灵敏度 ($|1/C|$, 其中 C 为谐振腔单程传输矩阵中的元素)。另外, 为保证不同泵浦功率下谐振腔均为稳定腔, 须使谐振腔动态稳定区的宽度大于薄片晶体光焦度的变化范围。

根据薄片晶体波前测量的结果, 我们设计了薄片再生放大器的谐振腔, 如图 3 所示, 总腔长约为 6.8 m。当薄片晶体的热焦距为 32.28 m 时, 薄片晶体和电光开关处的模式光束直径分别为 3.44 mm 和 4.37 mm, 腔内模式光束直径的最小值位于曲面端镜处, 约为 1.66 mm。图 3(a) 也给出了薄片晶体热焦距 (f) 为无穷大和 20 m 两种情形下的腔内模式光束尺寸。对比 20 m 热焦距情形与 32.28 m 热焦距情形, 发现热焦距的减小导致薄片晶体处的模式尺寸增加, 腔内模式尺寸最小值减小。图 3(b) 展示了谐振腔的动态稳定区, 菱形点标注了稳定区内的动态稳定点。当薄片晶体热焦距为无穷大 (∞) 时, 其近似位于动态稳定点。 $|1/C|$ 作为表征腔内模式光束对腔镜失调的灵敏程度, 其值越大, 腔镜失调导致的模式光束在薄片晶体处的位置和指向漂移就越严重^[9]。我们所设计的谐振腔的失调灵敏度 $|1/C|$ 值约为 5.95 m, 作为对比, 美国国家点火装置 (NIF) 中再生谐振腔的 $|1/C|$ 值约为 1.6 m^[11]。因此, 为提高我们所设计的薄片再生放大器的激光稳定性 (输出功率和指向的稳定性), 利用腔内光束指向主动控制技术补偿模式光束在薄片晶体处的位置漂移。

根据失调光学系统的矩阵分析理论^[9,12], 可以计算腔内不同光学元件出现同等角度失调时模式光束在薄

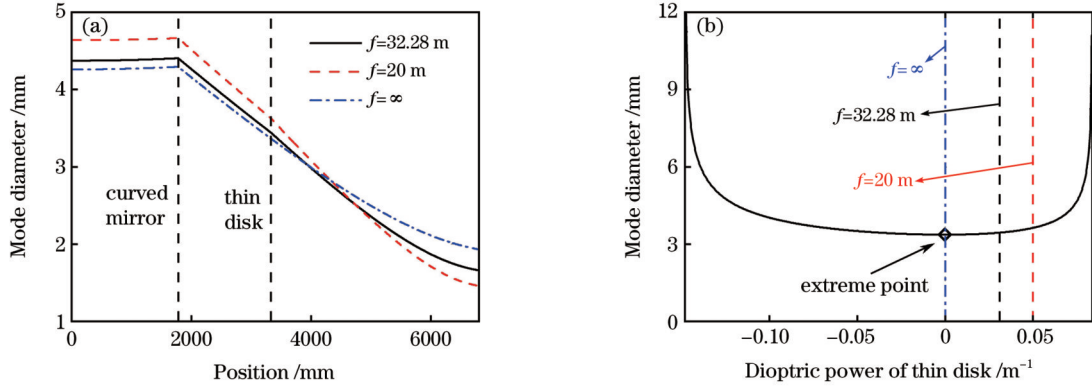


图 3 谐振腔设计结果。(a)谐振腔内的模式尺寸演化;(b)谐振腔的动态稳定性

Fig. 3 Resonator design results. (a) Mode size evolution in resonator; (b) dynamic stability of resonator cavity

片晶体处的位置漂移量。数值计算结果表明,谐振腔内模式光束尺寸较小的光学元件发生角度失调,导致模式光束在薄片晶体处的位置漂移量更小。并且在这些光学元件中,曲面端镜失调导致的模式光束在薄片晶体处的位置漂移最小。这意味着曲面端镜作为腔内光束指向主动控制系统的电控镜,对薄片晶体处的模式光斑位置有着最高的调节精度和最好的补偿效果。腔内光束指向主动控制系统的电控镜,对薄片晶体处的模式光斑位置有着最高的调节精度和最好的补偿效果。腔内光束指向主动控制系统包含由图 1 所示的成像透镜、反射镜 M9 和相机构成的光束采集系统,以及由电控曲面端镜 M8 构成的补偿调节组件等,该系统已在我们之前研制的大模场 Nd:glass 再生放大器中得到成功应用^[12]。腔内光束指向主动控制系统的运行原理如下:初始标定薄片晶体处模式光束的近场质心位置,之后利用光束采集系统进行实时监控,当模式光束的近场质心偏离初始标定位置一定范围时,电控镜 M8 通过调节自身倾斜角来改变模式光束的指向,直至模式光束的近场质心再次与初始位置重合。腔内光束指向主动控制系统可以有效提升大模场激光器输出功率的稳定性。

3 再生放大系统的输出性能

在实验中,将单脉冲能量 < 1 nJ、脉冲宽度为 3.4 ns 的种子源注入所搭建的薄片再生放大器中,输出功率

与泵浦功率的关系曲线如图 4 所示,其中泵浦光为连续光。当泵浦功率为 400 W 时,再生放大器在 1 kHz 和 10 kHz 重复频率下输出的平均功率分别为 40.9 W 和 53.3 W,对应的单脉冲能量分别为 40.9 mJ 和 5.33 mJ,光光效率分别为 10.2% 和 13.3%。在 1 kHz 和 10 kHz 重复频率下,种子光脉冲在谐振腔内均循环 64 程,单程小信号净增益系数的测量结果如图 4 所示。当泵浦功率为 400 W 时,1 kHz 和 10 kHz 重复频率下的单程小信号净增益系数分别为 1.147 和 1.129。对比两种重复频率下的激光输出结果,相比于 1 kHz 重复频率,10 kHz 重复频率下再生输出的光光效率有所提高。原因如下:低重复频率时一个脉冲周期内的激光上能级的粒子数未被种子光充分吸收,仍有部分泵浦能量以自发辐射荧光或者无辐射跃迁的形式耗散;在重复频率提高后,脉冲周期减短,激光上能级粒子的能量被充分地吸收^[13]。图 4(a)、(b)中插图分别为两种重复频率下泵浦功率为 400 W 时再生输出的近场光斑形貌,其中测量用相机的靶面大小为 13.3 mm \times 13.3 mm。

基于高斯光束传播的束宽测量法^[14-15]测量再生放大输出光束的质量因子,泵浦功率为 400 W 时的测量结果如图 5 所示。在 1 kHz 重复频率下,再生输出光束的 M_x^2 和 M_y^2 分别为 1.12 和 1.10;在 10 kHz 重复频率下, M_x^2 和 M_y^2 分别为 1.07 和 1.06。在两种重复频率

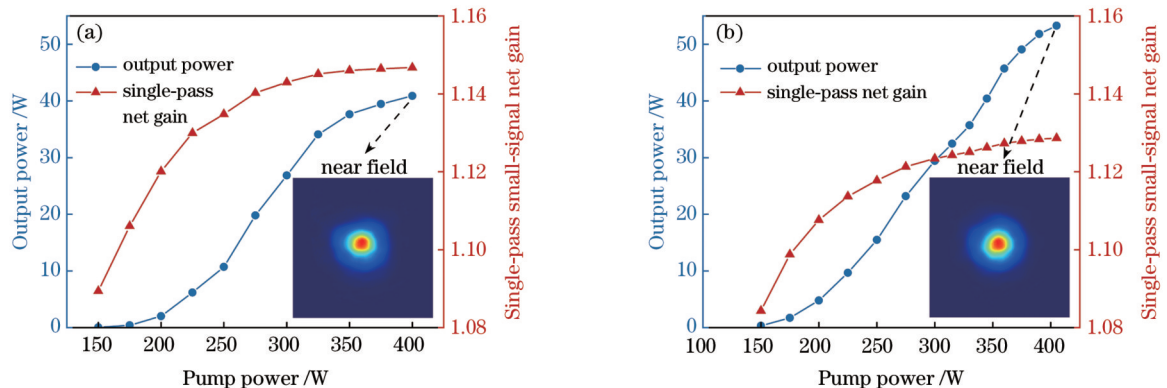


图 4 不同重复频率下输出功率、单程小信号净增益系数与泵浦功率的关系曲线。(a) 1 kHz;(b) 10 kHz

Fig. 4 Output power and single-pass small-signal net gain versus pump power at different repetition rates. (a) 1 kHz; (b) 10 kHz

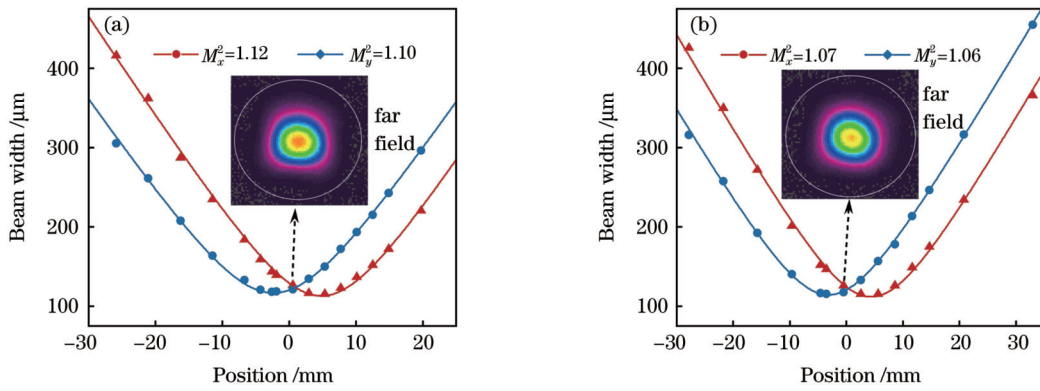


图 5 不同重复频率下再生输出光束的质量因子。(a) 1 kHz; (b) 10 kHz

Fig. 5 Quality factors of regenerative output beams at different repetition rates. (a) 1 kHz; (b) 10 kHz

下,再生输出光束的质量均接近衍射极限。图 5(a)、(b)中插图分别为两种重复频率下再生输出的远场光斑形貌。相比于 1 kHz 重复频率,10 kHz 重复频率下的光束质量更好。这是因为 10 kHz 重复频率下泵浦功率的提取效率更高,薄片晶体内的热量更低、热致波前畸变更弱。

基于高稳定的光机设计以及腔内光束指向主动控制系统,薄片再生放大输出展现出极好的功率稳定性,如图 6 所示。将脉冲宽度为 3.4 ns、重复频率为 1 kHz 的种子光注入薄片再生放大器,在大于 2 h 的测量时间内,再生输出平均功率的稳定性 PV 值和 RMS 值分别为 6.42% 和 0.56%。作为对比,关闭腔内光束指向主动控制系统,再生输出的功率曲线如图 6 所示,在再生放大器的预热阶段,输出功率逐渐降低,1 h 后的平均功率下降约 20%,并且短时间内展现出大幅的功率抖动。实验证明腔内光束指向主动控制系统有效提升了再生放大输出的功率稳定性。

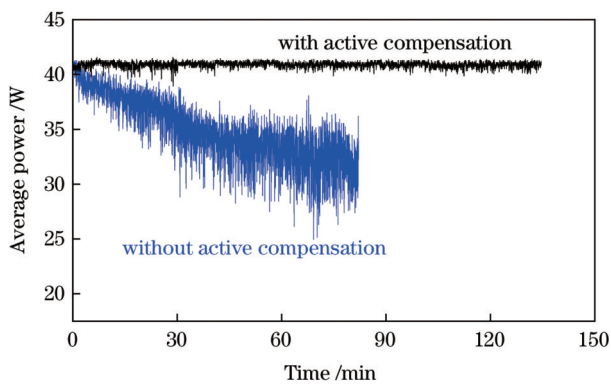


图 6 补偿与不补偿腔镜失调时再生输出的功率稳定性

Fig. 6 Power stabilities of regenerative output with and without active compensation for cavity misalignment

考虑到脉冲泵浦可以在一定程度上抑制薄片晶体放大的自发辐射(ASE)效应^[16],实验测量了 1 kHz 重复频率下不同占空比的脉冲泵浦时的再生放大输出,测量结果如图 7 所示,其中种子光的脉冲宽度和重复频率分别为 3.4 ns 和 1 kHz,占空比为 1.0 时对应连

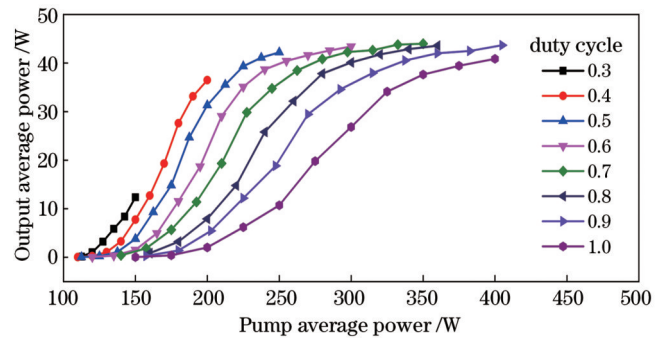


图 7 脉冲泵浦时输出功率与泵浦平均功率的关系曲线

Fig. 7 Output power versus pump average power during pulse pumping

续泵浦情形。实验结果表明,在同一泵浦平均功率下,泵浦脉宽越短,输出平均功率越高,但短的泵浦脉宽意味着泵浦峰值功率需求高。因此,在较短泵浦脉宽下,受限于泵浦源的峰值功率,薄片再生放大器的输出未达到功率饱和状态。

当泵浦峰值功率为 400 W 时,不同泵浦脉宽下再生输出的平均功率和光光效率如图 8(a)所示,其中泵浦脉宽为 1000 μs 时对应连续泵浦情形。当泵浦脉宽为 600 μs 时,再生放大输出有着最高的光光效率,为 16.1%,此时输出平均功率为 38.7 W;当泵浦脉宽为 900 μs 时,再生放大输出有着最高的输出平均功率,为 42.0 W,此时光光效率为 11.7%。当泵浦脉宽低于 500 μs 时,再生放大输出的光光效率较低,这是因为此时储能较低,未达到饱和泵浦能量。

根据实验测量结果,可以计算达到 35 W 的输出平均功率时不同泵浦脉宽下的泵浦峰值功率和对应的光光效率,结果如图 8(b)所示。随着泵浦脉宽的增加,光光效率逐渐降低,脉宽为 400 μs 时光光效率最高,为 17.9%,但其所需的泵浦峰值功率最高;随着泵浦脉宽的增加,所需的泵浦峰值功率逐渐降低,但在连续泵浦情形下有所上升,这是因为更严重的 ASE 效应消耗了反转粒子数。根据图 8(b)所示的泵浦峰值功率和泵浦脉宽的关系曲线可知:当脉宽为 400~600 μs 时,所需的泵浦峰值功率的变化较快;当脉宽为 600~900 μs

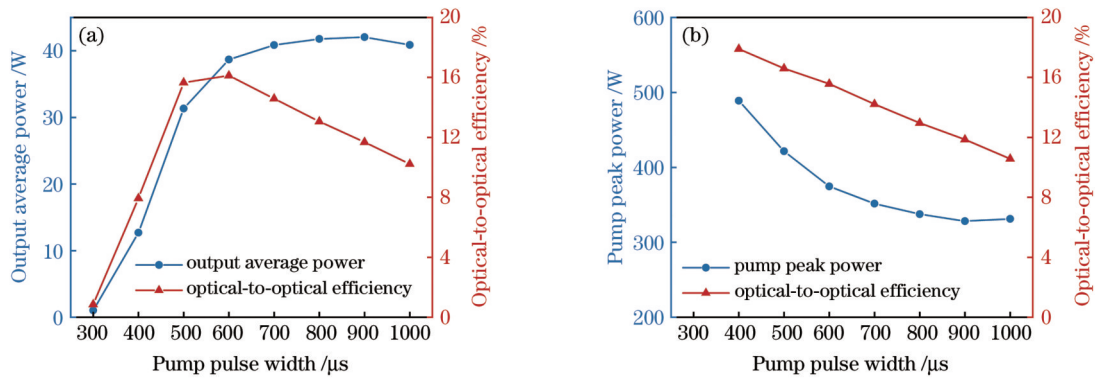


图 8 脉冲泵浦实验结果。(a) 泵浦峰值功率为 400 W 时; (b) 输出平均功率达到 35 W 时

Fig. 8 Pulse pumping experiment results. (a) When pump peak power is 400 W; (b) when output average power reaches 35 W

时,所需的泵浦峰值功率的变化较慢。因此,综合图 8(a)、(b)的分析结果,当泵浦脉宽约为 600 μs 时,薄片再生放大器具有较优的输出性能,同时对泵浦源的峰值功率要求适当。

4 结 论

设计并搭建了高稳定的 Yb:YAG 薄片再生放大系统,获得了平均功率为 40.9 W、重复频率为 1 kHz 的激光输出, M_x^2 和 M_y^2 分别为 1.12 和 1.10。基于腔内光束指向主动控制技术,在大于 2 h 的时间内输出功率的稳定性 PV 值和 RMS 值分别为 6.42% 和 0.56%。当泵浦脉宽约为 600 μs 时,再生放大输出有着最高 16.1% 的光光效率。在 10 kHz 重复频率下,再生输出平均功率为 53.3 W, M_x^2 和 M_y^2 分别为 1.07 和 1.06。

为进一步提升薄片再生放大器的输出性能,我们将继续优化谐振腔设计,进一步提高光光效率;同时采用具有更高峰值功率的泵浦源,结合啁啾脉冲放大技术以及光谱补偿技术,实现具有更窄脉宽的高平均功率的超短脉冲。

参 考 文 献

- Giesen A, Hügel H, Voss A, et al. Scalable concept for diode-pumped high-power solid-state lasers[J]. *Applied Physics B*, 1994, 58(5): 365-372.
- 王海林,董静,刘贺言,等. 高功率超快碟片激光技术研究进展(特邀)[J]. *光子学报*, 2021, 50(8): 0850208.
Wang H L, Dong J, Liu H Y, et al. Research progress of high-power ultrafast thin-disk laser technology (invited) [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2021, 50(8): 0850208.
- Jung R, Tümmler J, Will I. Regenerative thin-disk amplifier for 300 mJ pulse energy[J]. *Optics Express*, 2016, 24(2): 883-887.
- Nubbemeyer T, Kaumanns M, Ueffing M, et al. 1 kW, 200 mJ picosecond thin-disk laser system[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(7): 1381-1384.
- Krötz P, Wandt C, Grebing C, et al. Towards 2 kW, 20 kHz ultrafast thin-disk based regenerative amplifiers[C]//*Laser Congress 2019 (ASSL, LAC, LS&C)*, September 29-October 3, 2019, Vienna, Austria. Washington, D. C.: Optica Publishing Group, 2019: ATh1A.8.
- 董静,陈涵天,王海林,等. 基于薄片增益介质的皮秒激光再生放大器研究[J]. *光学学报*, 2021, 41(14): 1414003.
Dong J, Chen H T, Wang H L, et al. Research on picosecond laser regenerative amplifier based on thin-disk gain medium[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(14): 1414003.
- 陈飞,于晶华,陈毅,等. Yb:YAG 单碟片再生放大器实现 107 mJ 激光输出[J]. *中国激光*, 2023, 50(5): 0515001.
Chen F, Yu J H, Chen Y, et al. 107 mJ Yb:YAG single thin-disk regenerative amplifier[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2023, 50(5): 0515001.
- Schad S S, Gottwald T, Kuhn V, et al. Recent development of disk lasers at TRUMPF[J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9726: 972615.
- Magni V. Multielement stable resonators containing a variable lens [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1987, 4(10): 1962-1969.
- Boge R, Horáček J, Mazúrek P, et al. Robust method for long-term energy and pointing stabilization of high energy, high average power solid state lasers[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2018, 89(2): 023113.
- Bowers M, Burkhart S, Cohen S, et al. The injection laser system on the National Ignition Facility[J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, 6451: 64511M.
- Shi Y S, Zhang P, Jiang Y E, et al. High-stability, high-energy Nd: glass rod regenerative amplifier with compensation for cavity misalignment[J]. *Applied Optics*, 2021, 60(5): 1150-1158.
- 陆俊,刘征征,刘彦祺,等. 突发运行模式下的飞秒碟片再生放大器[J]. *中国激光*, 2017, 44(5): 0501008.
Lu J, Liu Z Z, Liu Y Q, et al. Femtosecond thin-disk regenerative amplifier under burst operation mode[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(5): 0501008.
- 曾秉斌,徐德衍,王润文. 激光光束质量因子 M^2 的物理概念与测试方法[J]. *应用激光*, 1994, 14(3): 104-108.
Zeng B B, Xu D Y, Wang R W. Physical concept and measurement on laser beam quality factor M^2 [J]. *Applied Laser*, 1994, 14(3): 104-108.
- 胡雪原,邓健,钟方川,等. 超强脉冲激光系统光束质量的测量和改善[J]. *中国激光*, 2001, 28(5): 407-411.
Hu X Y, Deng J, Zhong F C, et al. Beam quality measurement and amendment of the ultrashort ultraintense laser system[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2001, 28(5): 407-411.
- Chyla M, Miura T, Smrz M, et al. Optimization of beam quality and optical-to-optical efficiency of Yb:YAG thin-disk regenerative amplifier by pulsed pumping[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(6): 1441-1444.

Yb:YAG Single Thin-Disk Regenerative Amplifier with High Stability and High Optical-to-Optical Efficiency

Shi Yusen^{1,2}, Li Zuqiang^{1,2}, Pan Xue^{1*}, Xiao Qi¹, Tang Xiaoyun¹, Lu Xinghua¹,
Wang Jiangfeng¹, Zhang Panzheng¹, Jiang Youen¹, Fan Wei¹, Li Xuechun^{1**}, Zhu Jianqiang¹
¹Key Laboratory of High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy
of Sciences, Shanghai 201800, China;
²Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences,
Beijing 100049, China

Abstract

Objective In recent years, thin-disk lasers have been applied in many fields such as basic scientific research, industrial production, biomedicine, and defense. Owing to the significant advantages, such as power scalability, thermal performance, and nonlinear effects, thin-disk lasers hold great promising for high average and peak power laser while maintaining excellent beam quality. Scaling of both the average and peak powers of thin-disk lasers is possible by increasing the beam cross sections, while all internal intensities and the brightness of the pump laser are kept constant. However, the width of the dynamic stability zones of resonator cavities becomes narrower, and the output performance becomes more sensitive to cavity misalignment when the mode beam cross-section in resonators increases. These issues limit the further increase of output power of the thin-disk laser. This study reports a large-mode Yb:YAG thin-disk regenerative amplifier with active compensation for cavity misalignment.

Methods The thermal focal length of a thin-disk module determines the mode distribution in the resonator cavity and should be measured before designing the cavity. The thermal focal length is measured at different pump powers using a wavefront sensor based on the principle of four-wave lateral shearing interferometry. By applying the ABCD matrix theory, the optical resonator of the thin-disk regenerative amplifier is designed and optimized, to ensure the operation of the fundamental mode and to enhance resistance to cavity misalignment. The optical layout of the thin-disk regenerative amplifier is shown in Fig. 1. The regenerative amplifier contains a seed laser with a narrow spectral width, an optical isolator, a Faraday rotator, a Pockels cell, thin-film polarizers, a resonator cavity, and a Yb:YAG thin-disk module with a 24-pass pumping system. The thin disk module contains a Yb:YAG thin-disk crystal with free aperture and thickness of 9 mm and 215 μm , respectively. The pump laser can deliver up to 500 W at a wavelength of 969 nm. The multipass pump spot on the Yb:YAG thin-disk crystal is circular with a super-Gaussian distribution and diameter of ~ 3.9 mm. To improve the output stability, a feedback system is applied in the regenerative amplifier for the active compensation of the cavity misalignment. The numerical results show that the cavity misalignment caused by the mirrors in the branch with a small mode size results in smaller displacement of mode beam on the thin-disk crystal compared to that caused by the mirrors in the branch with a large mode size. In addition, the cavity misalignment caused by curved end mirror M8 results in a minimal displacement of the mode beam on the thin-disk crystal, implying that the active compensation for the cavity misalignment by the mirror M8 leads to the highest adjustment precision.

Results and Discussions When a seed laser with an energy of less than 1 nJ and a pulse width of 3.4 ns is injected into the thin-disk regenerative amplifier, and the pump laser operates continuously at 400 W power, the regenerative amplifier delivers average power values of 40.9 W and 53.3 W at repetition rates of 1 kHz and 10 kHz, respectively. The optical-to-optical efficiencies are 10.2% and 13.3%, respectively, and the single-pass small-signal net gain values are 1.147 and 1.129, respectively. The near- and far-field patterns of the amplified beam are measured and are shown in the insets in Figs. 4 and 5, respectively. The spatial quality factors M_x^2 and M_y^2 of the amplified beam at 1 kHz repetition rate are 1.12 and 1.10, respectively. Moreover, the M_x^2 and M_y^2 of the amplified beam at 10 kHz repetition rate are 1.07 and 1.06, respectively. The amplified beam exhibits an excellent power stability. The power stability is measured to be 6.42% (PV) and 0.56% (RMS) over a continuous period of 2 h, owing to the active compensation for cavity misalignment. By contrast, without active compensation for cavity misalignment, the average power of amplified beam decreases by 20% after more than 1 h of operation. In experiments of pulsed pump, when the pump pulse width and pump peak power are 600 μs and 400 W, respectively, the amplifier delivers an average power of 38.7 W at a repetition rate of 1 kHz, with a high optical-to-optical efficiency of 16.1%. When the pump pulse width is 900 μs , the amplifier delivers an average power of 42.0 W at a repetition rate of 1 kHz, with an optical-to-optical efficiency of 11.7%.

Conclusions This study presents a regenerative amplifier with a Yb:YAG thin-disk module. When the pump power is 400 W, the amplifier delivers average powers of 40.9 W and 53.3 W at repetition rates of 1 kHz and 10 kHz, respectively. The amplified output exhibits a nearly diffraction-limited beam. Based on the active compensation for cavity misalignment, the Yb:YAG regenerative amplifier exhibits excellent output power stability, with a stability of 6.42% (PV) and 0.56% (RMS) over 2 h. In the pulsed-pump experiments, the optical-to-optical efficiency is as high as 16.1% when the pump pulse width is 600 μs . In future work, the resonator cavity will be optimized, and the pump laser will be replaced by a laser with higher power.

Key words lasers; thin-disk lasers; regenerative amplifiers; pulsed pumping; laser stability