

## Yb:YAG 单碟片再生放大器实现 107 mJ 激光输出

陈飞<sup>1\*</sup>, 于晶华<sup>1,2</sup>, 陈毅<sup>1\*\*</sup>, 孙俊杰<sup>1,2\*\*\*</sup>, 姚志焕<sup>1,2</sup>, 张逸文<sup>1</sup>, 于德洋<sup>1</sup>, 何洋<sup>1</sup>, 张阔<sup>1</sup><sup>1</sup>中国科学院长春光学精密机械与物理研究所激光与物质相互作用国家重点实验室, 吉林 长春 130033;<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 基于 Yb:YAG 单碟片模块设计并搭建了激光再生放大器, 实现了重复频率为 1 kHz、脉冲能量为 107 mJ、脉冲宽度为 1.2 ns 的近衍射极限激光输出,  $x$  的光束质量因子( $M_x^2$ )和  $y$  方向的光束质量因子( $M_y^2$ )分别为 1.07 与 1.05, 光光转换效率为 11%。激光中心波长为 1031.7 nm, 光谱宽度为 2.04 nm, 该光谱宽度支持将激光的脉宽压缩至 735 fs。据我们所知, 这是国内首次使用单碟片激光再生放大器实现重复频率为 1 kHz、单脉冲能量为 107 mJ 的激光输出。

**关键词** 激光器; 碟片; 再生放大器; Yb:YAG; 啁啾脉冲

**中图分类号** O436

**文献标志码** A

**DOI:** 10.3788/CJL221456

近年来, 碟片激光器以其在结构、效率和光束质量上的重大优势, 在实现高重复频率、大脉冲能量及高平均功率的超快激光方面展现了强大的能力, 在基础科研、工业生产、国防军事以及生物医学等领域具有重要的应用<sup>[1-5]</sup>。当前, 考虑光学器件和膜系的损伤阈值, 实现高重复频率、大能量超快激光的主要技术途径为啁啾脉冲放大技术, 涉及的碟片放大技术主要分为再生放大和多通放大两种。碟片再生放大器以紧凑的光学结构、良好的散热性能、较弱的非线性效应受到研究者广泛的关注。

早在 20 世纪 90 年代, 德国科学家基于碟片技术开展了超快激光放大的研究工作并取得了一系列优秀成果<sup>[6-10]</sup>。国内相关研究开展较晚。2021 年, 华中科技大学董静等<sup>[11]</sup>采用碟片再生放大器技术直接放大脉宽小于 10 ps 的种子光, 最终获得了脉冲能量为 220  $\mu$ J、脉宽为 9.3 ps、重复频率为 200 kHz 的脉冲激光输出。2021 年, 中国科学院上海光学精密机械研究所 Sun 等<sup>[12]</sup>将脉冲能量为 25  $\mu$ J、重复频率为 200 kHz、脉宽为 750 ps 的种子光注入到碟片再生放大器中进行放大, 放大光经光栅压缩后实现了脉冲能量为 0.25 mJ、重复频率为 200 kHz、脉宽为 500 fs 的激光输出。2022 年, 该研究团队进一步采用碟片技术与非线性压缩的方法获得了重复频率为 200 kHz、平均功率为 54 W、脉冲宽度为 195 fs 的激光输出<sup>[13]</sup>。目前, 国内碟片再生放大器研究工作所实现的单脉冲能量普遍小于 1 mJ, 本课题组以实现更高脉冲能量超快激光为目标, 基于速率方程理论与高斯光束传播规律设计了大基模尺寸

的碟片再生放大器。放大器谐振腔具有较大的稳区范围, 在碟片光焦度变化范围内能够实现良好的腔模匹配。实验中使用具有高损伤阈值与良好散热效果的碟片晶体、大口径电光晶体和具有高损伤阈值的反射镜获得了重复频率为 1 kHz、脉冲能量为 107 mJ 的激光输出。未来将通过提升光学原件的损伤阈值、优化谐振腔设计和提升种子光的单程增益, 进一步提升输出激光的单脉冲能量。

碟片再生放大器实验装置如图 1 所示, 包含了种子源、光隔离器、法拉第旋光器、普克尔盒、薄膜偏振片、再生放大腔及 48 通泵浦模块。种子源是由光纤锁模振荡器产生的 ps 级脉冲激光, 经过光纤展宽器, 激光脉宽展宽至 1 ns。种子光再次经过声光调制器选频与三级光纤放大后, 重复频率为 1 kHz, 脉冲能量为 12  $\mu$ J。将种子光注入到再生放大器中, 通过调节普克尔盒的

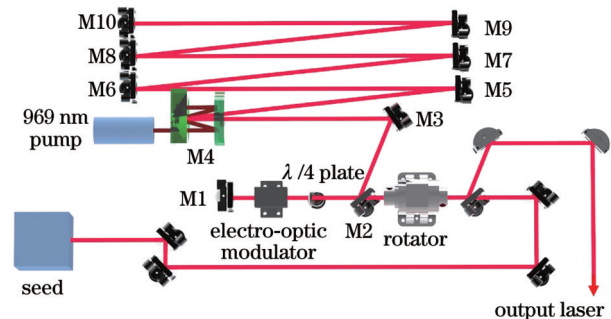


图 1 Yb:YAG 碟片再生放大器结构图

Fig. 1 Structural diagram of Yb:YAG thin disk regenerative amplifier

收稿日期: 2022-11-25; 修回日期: 2022-12-13; 录用日期: 2022-12-22; 网络首发日期: 2023-01-06

基金项目: 长春光机所创新重大项目(E10302Y3M0)、吉林省青年成长科技计划项目(20220508041RC)

通信作者: \*feichenny@126.com; \*\*chenyihit@163.com; \*\*\*sunjunjie@ciomp.ac.cn

电脉冲宽度与延时,控制种子光在放大腔中的循环次数。实验中使用的碟片晶体直径为 12 mm,厚度为 215  $\mu\text{m}$ ,掺杂浓度(原子数分数)为 7%。泵浦源采用波长为 969 nm、光纤输出口径为 1 mm、最大功率为 1300 W 的光纤耦合输出半导体激光器。泵浦光为超高斯分布的平顶光束,能够提高泵浦功率。由于普克尔盒驱动电压为 5.2 kV,须使用两块尺寸为 10 mm $\times$ 10 mm $\times$ 25 mm 的偏硼酸钡(BBO)晶体实现  $\lambda/4$ ( $\lambda$ 为波长)相位调制量。再生放大腔的光程长度为 7 m,碟片处基模光斑半径为 3.3 mm, M1 为  $0^\circ$ 高反镜, M2 为薄膜偏振片, M3 为  $34^\circ$ 反射镜, M4 为碟片, M5 为曲率半径为 7 m 的球面反射镜, M6 为曲率半径为 -10 m 的球面反射镜, M7~M10 为  $0^\circ$ 高反镜。M1~M5 处光斑较大,能够有效避免普克尔盒与碟片被高能激光损伤。

在实验过程中,再生放大器输出激光的平均功率随泵浦光功率的变化如图 2(a)所示,当泵浦功率为 980 W 时,再生放大器获得了重复频率为 1 kHz、单脉冲能量为 107 mJ、脉冲宽度为 1.2 ns 的激光输出,光光转换效率为 11%。实验中受限于偏硼酸钡(BBO)晶

体与碟片的损伤阈值以及碟片光焦度对激光模式的影响,不能单纯地通过增加泵浦功率来提高激光的输出功率。图 2(b)为最大功率下放大的激光光束质量的测量结果,实验中使用互补金属氧化物半导体(CMOS)相机测量光斑  $x$ 、 $y$  方向的直径,透镜焦距为 400 mm,对测量结果进行高斯拟合,发现输出激光光束在  $x$  方向的光束质量因子( $M_x^2$ )和  $y$  方向的光束质量因子( $M_y^2$ )分别为 1.07 与 1.05,光束质量接近衍射极限。说明碟片再生放大器在实现高能量激光输出的同时能够保证良好的光束质量。

使用带宽  $>15$  GHz 的高速光电探头测量最大功率下放大光的脉冲宽度,结果如图 2(c)所示,输出激光的脉冲宽度即半峰全宽(FWHM)为 1.2 ns。统计了放大器在最大功率下运行 20 min 后输出的激光脉冲,幅值稳定性均方根(RMS)为 1.26%。同时测得放大激光的光谱,结果如图 2(d)所示,中心波长为 1031.7 nm,光谱宽度为 2.04 nm。由于高斯型傅里叶变换极限脉冲的时间带宽积为下限值  $2\ln 2/\pi$ ,该光谱宽度理论上支持将激光脉冲宽度压缩至 735 fs。

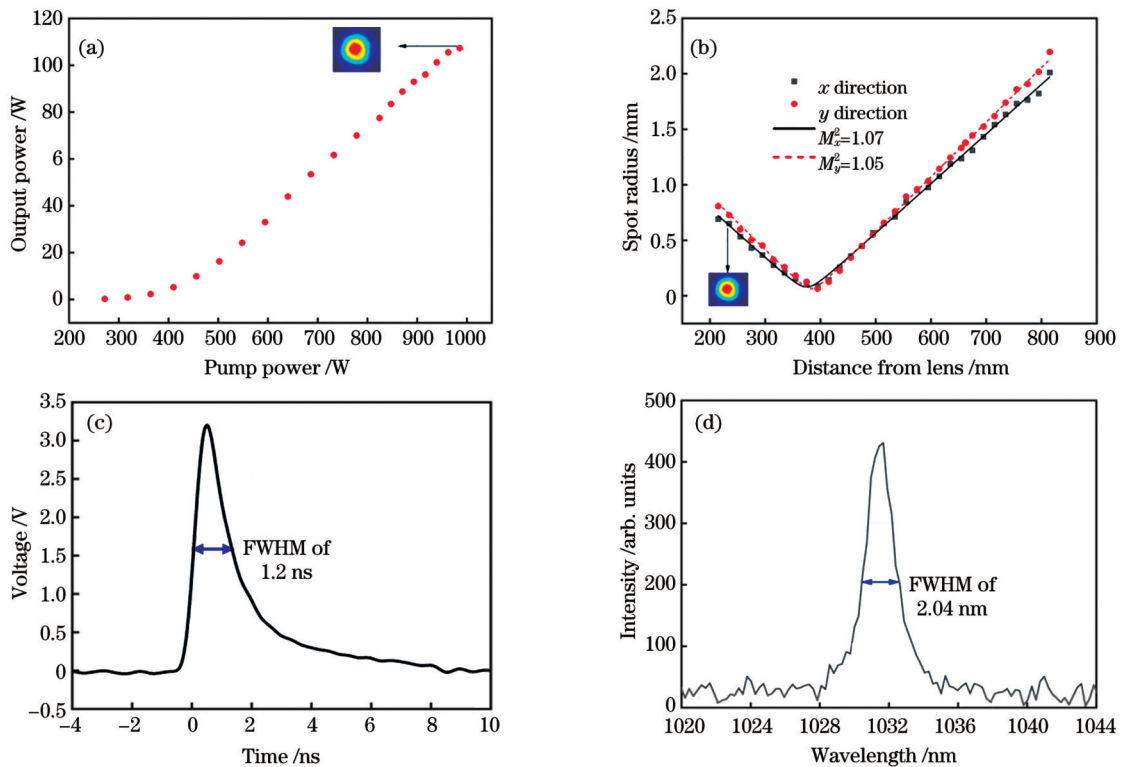


图 2 碟片再生放大器输出激光参数。(a)输出功率随泵浦功率的变化;(b)光束质量;(c)输出激光脉冲宽度;(d)输出激光的光谱  
Fig. 2 Output laser parameters of thin disk regenerative amplifier. (a) Output power versus pump power; (b) beam quality; (c) output laser pulse width; (d) spectrum of output laser

基于单碟片模块再生放大器,优化了腔体参数,实现了单脉冲能量为 107 mJ 的放大激光输出。下一步将继续优化再生放大腔的结构以及高效率脉冲压缩工作,实现更高脉冲能量、更高平均功率、更窄脉宽的激光输出。

## 参 考 文 献

- [1] Baltuska A, Fuji T K, Kobayashi T. Visible pulse compression to 4 fs by optical parametric amplification and programmable dispersion control[J]. Optics Letters, 2002, 27(5): 306-308.
- [2] Batysta F, Antipenkov R, Borger T, et al. Spectral pulse shaping

- of a 5 Hz, multi-joule, broadband optical parametric chirped pulse amplification frontend for a 10 PW laser system[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(16): 3866-3869.
- [3] Herrmann D, Veisz L, Tautz R, et al. Generation of sub-three-cycle, 16 TW light pulses by using noncollinear optical parametric chirped-pulse amplification[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(16): 2459-2461.
- [4] Schneider W, Ryabov A, Lombosi C, et al. 800-fs, 330- $\mu$ J pulses from a 100-W regenerative Yb: YAG thin-disk amplifier at 300 kHz and THz generation in LiNbO<sub>3</sub>[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(23): 6604-6607.
- [5] Thiré N, Maksimenka R, Kiss B, et al. 4-W, 100-kHz, few-cycle mid-infrared source with sub-100-mrad carrier-envelope phase noise [J]. *Optics Express*, 2017, 25(2): 1505-1514.
- [6] Hönninger C, Johannsen I, Moser M, et al. Diode-pumped thin-disk Yb: YAG regenerative amplifier[J]. *Applied Physics B*, 1997, 65(3): 423-426.
- [7] Jung R, Tümmler J, Will I. Regenerative thin-disk amplifier for 300 mJ pulse energy[J]. *Optics Express*, 2016, 24(2): 883-887.
- [8] Ueffing M, Lange R, Pleyer T, et al. Direct regenerative amplification of femtosecond pulses to the multimillijoule level[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(16): 3840-3843.
- [9] Jung R, Tümmler J, Nubbemeyer T, et al. Thin-disk ring amplifier for high pulse energy[J]. *Optics Express*, 2016, 24(5): 4375-4381.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] Sun D, Guo J, Wang W, et al. Numerical and experimental analysis of Yb: YAG thin disk regenerative amplifier[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2021, 13(3): 1501309.
- [13] Guo J, Gao Z C, Sun D, et al. An efficient high-power femtosecond laser based on periodic-layered-Kerr media nonlinear compression and a Yb: YAG regenerative amplifier[J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2022, 10(2): e10.

## 107 mJ Yb: YAG Single Thin-Disk Regenerative Amplifier

Chen Fei<sup>1\*</sup>, Yu Jinghua<sup>1,2</sup>, Chen Yi<sup>1\*\*</sup>, Sun Junjie<sup>1,2\*\*\*</sup>, Yao Zhihuan<sup>1,2</sup>, Zhang Yiwen<sup>1</sup>,

Yu Deyang<sup>1</sup>, He Yang<sup>1</sup>, Zhang Kuo<sup>1</sup>

<sup>1</sup>State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, Jilin, China;

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

### Abstract

**Objective** In recent years, the thin disk laser has been shown to have significant advantages in terms of structure, efficiency, and beam quality. It has been used to realize ultrafast lasers with high repetition rates, large pulse energies, and high average powers. It has important applications in basic scientific research, industrial production, national defense and military, biomedicine, and other fields. Based on theoretical and numerical analyses, this paper presents an analysis and design of a thin disk regenerative amplifier with a large fundamental mode volume. It can afford a laser output with pulsed energy exceeding 100 mJ.

**Methods** Based on ABCD matrix theory, the optical resonator of the thin disk regenerative amplifier is designed to ensure a laser output with basic mode size. By optimizing the parameters of the pump and seed lasers in the amplifier cavity and managing the thermal effect in the amplification process, the regenerative amplifier can achieve high energy pulse laser output. The experimental device of the disk regeneration amplifier, shown in Fig. 1, contains a seed source, optical isolator, Faraday rotator, Pockels cell, thin film polarizer, regeneration amplifier cavity, and thin disk module with a 48-pass pump structure.

**Results and Discussions** The regenerative amplifier provides a laser output with a repetition rate of 1 kHz, single pulse energy of 107.3 mJ [Fig. 2(a)], pulse width of 1.2 ns [Fig. 2(c)], and optical-to-optical conversion efficiency of 11%. In the experiment, a CMOS camera is used to measure the diameter of the light spot in the  $x$  and  $y$  directions. The Gauss fitting of the measurement results indicates that the beam quality factor ( $M_x^2$ ) of the output laser beam in the  $x$  direction and the beam quality factor ( $M_y^2$ ) of the output laser beam in the  $y$  direction are 1.07 and 1.05, respectively [Fig. 2(b)], and the beam quality is near the diffraction limit. The root-mean-square (RMS) of pulse amplitude stability is 1.26%. The amplified laser spectral width is 2.04 nm [Fig. 2(d)], which supports the compression of the laser pulse width to 735 fs, as shown by theoretical calculations.

**Conclusions** This paper presents the optimization of the mode matching of the amplifier cavity based on the single thin disk module regenerative amplifier and the realization of the amplification laser output with a single pulse energy of 107 mJ. In future studies, we will continue to optimize the design and experimental scheme of the regenerative amplifier cavity and use multi-layer dielectric gratings to compress the pulse width of a chirped pulse with high pulse energy to achieve laser output with higher pulse energy, higher average power, and narrower pulse width.

**Key words** lasers; thin disk; regenerative amplifier; Yb: YAG; chirp pulse