

### 重复频率和脉冲宽度独立可调的单腔碟片再生放大器

刘波 张凤 赵伟 陈远 陈毅 孙俊杰 陈飞

### Single-cavity thin-disk regenerative amplifier with independently adjustable pulse repetition frequency and pulse width

LIU Bo, ZHANG Feng, ZHAO Wei, CHEN Yuan, CHEN Yi, SUN Jun-jie, CHEN Fei

#### 引用本文:

刘波, 张凤, 赵伟, 陈远, 陈毅, 孙俊杰, 陈飞. 重复频率和脉冲宽度独立可调的单腔碟片再生放大器[J]. 中国光学, 优先发表. doi: 10.37188/CO.2026-0064

LIU Bo, ZHANG Feng, ZHAO Wei, CHEN Yuan, CHEN Yi, SUN Jun-jie, CHEN Fei. Single-cavity thin-disk regenerative amplifier with independently adjustable pulse repetition frequency and pulse width[J]. *Chinese Optics*, In press. doi: 10.37188/CO.2026-0064

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2026-0064>

#### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

##### 重复频率可调窄脉宽228 nm紫外激光器

An ultraviolet laser at 228 nm with adjustable repetition rate and narrow pulse width  
中国光学 (中英文). 2024, 17(1): 100 <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0058>

##### 大能量碟片激光多通放大器腔体设计研究综述

Review of the cavity-design of high-energy thin-disk laser multi-pass amplifiers  
中国光学 (中英文). 2023, 16(5): 996 <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0009>

##### 双包层掺铥光纤放大器中的受激布里渊散射

Stimulated brillouin scattering in double-clad thulium-doped fiber amplifier  
中国光学 (中英文). 2024, 17(1): 226 <https://doi.org/10.37188/CO.EN-2023-0011>

##### 5.2 W高重频257 nm深紫外皮秒激光器

High repetition frequency 257 nm deep ultraviolet picosecond laser with 5.2 W output power  
中国光学 (中英文). 2023, 16(6): 1318 <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0026>

##### 距离选通成像系统中短脉冲激光驱动技术研究

Short pulse laser drive technology in a distance-selective imaging system  
中国光学 (中英文). 2023, 16(3): 567 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0142>

##### 二阶泵浦种子光对三阶拉曼光纤放大器的影响

The influence of second-order pump seed light on third-order Raman fiber amplifier  
中国光学 (中英文). 2025, 18(2): 266 <https://doi.org/10.37188/CO.2024-0170>

文章编号 2097-1842(xxxx)x-0001-08

## 重复频率和脉冲宽度独立可调的单腔 碟片再生放大器

刘波<sup>1</sup>, 张凤<sup>2,3</sup>, 赵伟<sup>1</sup>, 陈远<sup>1</sup>, 陈毅<sup>2</sup>, 孙俊杰<sup>2</sup>, 陈飞<sup>2\*</sup>

(1. 军事航天部队装备项目管理中心, 北京 海淀 100091;

2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 吉林省高功率激光技术及应用重点  
实验室, 吉林 长春 130033;

3. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:**为实现 Yb:YAG 单腔碟片再生放大器重复频率、脉冲宽度大范围双调节激光输出, 本工作设计并搭建了双普克尔盒协同调控单腔 Yb:YAG 碟片再生放大器。依托双普克尔盒的时序配合与宽稳区谐振腔设计, 保证高光束质量与高能量提取效率的同时, 灵活实现了激光重复频率的大范围可调节输出, 并通过调整两个压缩光栅之间的间距实现了输出激光脉冲宽度调节。实验结果表明: 碟片再生放大器通过调节普克尔盒实现了 1~50 kHz 可调重复频率激光输出, 并在 50 kHz 重复频率下, 泵浦平均功率为 503 W 时, 得到了最大输出功率 93.1 W, 光束质量因子  $M_x^2=1.18$ ,  $M_y^2=1.01$ , 输出激光近衍射极限, 在 1 kHz 重复频率下, 得到了单脉冲能量 50.2 mJ 激光输出, 并通过改变双光栅压缩器间距, 实现了 1.34 ps 至 150.37 ps 的脉冲宽度连续调节。碟片再生放大器成功实现了重复频率与脉冲宽度双参数可调激光输出。

**关键词:** Yb:YAG 碟片; 再生放大器; 重复频率; 脉冲宽度; 可调节

中图分类号: TN248.1

文献标志码: A

doi: 10.37188/CO.2026-0064

CSTR: 32171.14.CO.2026-0064

## Single-cavity thin-disk regenerative amplifier with independently adjustable pulse repetition frequency and pulse width

LIU Bo<sup>1</sup>, ZHANG Feng<sup>2,3</sup>, ZHAO Wei<sup>1</sup>, CHEN Yuan<sup>1</sup>, CHEN Yi<sup>2</sup>, SUN Jun-jie<sup>2</sup>, CHEN Fei<sup>2\*</sup>

(1. *Equipment Project Management Center of Military Aerospace Forces, Beijing Haidian 100091;*

2. *Key Laboratory of High-Power Laser Technology and Applications of Jilin Province, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

3. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*

\* *Corresponding author, E-mail: feichenny@126.com*

**Abstract:** In order to achieve large-range dual adjustment of laser output in repetition rate and pulse width for a Yb:YAG single-cavity thin-disk regenerative amplifier, this work designed and constructed a dual Pockels cell collaboratively controlled single-cavity Yb:YAG thin-disk regenerative amplifier. Relying on the tim-

收稿日期: 2026-04-14; 修订日期: xxxx-xx-xx

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 62405311); 长春光机所旭光人才项目 (No. E4X041Y6C0)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 62405311); Xu Guang Talent Program in Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics (No. E4X041Y6C0)

ing coordination of the dual Pockels cells and the design of a wide-stable-zone resonator, it ensured high beam quality and high energy extraction efficiency, while flexibly achieving a wide range of adjustable laser repetition frequency output. Additionally, the adjustment of the output laser pulse width was achieved by changing the distance between the two compression gratings. Experimental results show that the thin-disk regenerative amplifier achieved laser output with a tunable repetition frequency ranging from 1 to 50 kHz by regulating the Pockels cells. At a repetition frequency of 50 kHz and an average pump power of 503 W, a maximum output power of 93.1 W was obtained, with beam quality factors  $M_x^2=1.18$  and  $M_y^2=1.01$ , indicating near-diffraction-limited output. At a repetition frequency of 1 kHz, a single-pulse energy of 50.2 mJ was achieved. By changing the spacing between the double-grating compressors, continuous tuning of the pulse width from 1.34 ps to 150.37 ps was realized. The thin-disk regenerative amplifier successfully realized laser output with dual-parameter tunability of repetition frequency and pulse width.

**Key words:** Yb:YAG thin-disk; regenerative amplifier; repetition rate; pulse width; tunable

## 1 引言

自第一台红宝石激光器问世以来<sup>[1]</sup>, 激光技术获得了飞速发展, 由于激光在单色性、方向性、相干性方面具有独特优势, 迅速在国防军事、工业加工、医疗卫生等领域展现出极大的应用价值<sup>[2-6]</sup>。然而激光器中的热效应一直以来都是制约激光向更高能量, 更优质光束质量发展的关键难题<sup>[7-9]</sup>。为有效解决热效应问题, 碟片激光器应运而生, 其通过薄片状增益介质进行高效散热, 显著降低了热透镜效应与应力畸变, 为高能量、高光束质量激光的稳定输出提供了可行的技术路径。然而碟片单程增益较低, 通常采用碟片再生放大技术实现激光有效放大<sup>[10, 11]</sup>。早在 1997 年, 德国斯图加特大学 Hominger C 等人便利用碟片再生放大技术进行激光放大输出<sup>[12]</sup>。自此国内外研究学者对碟片再生放大器开展了广泛的研究。在国外, 德国通快有限公司一直处于领先地位, 2015 年通快公司 Klingebiel 等人搭建了一台啁啾脉冲碟片再生放大器, 以线性再生腔实现了 1 kHz 重复频率 220 mJ 单脉冲能量, 脉冲宽度 1.9 ps<sup>[13]</sup>。基于碟片再生放大器升级与优化, 2016 年德国马克斯·波恩研究所 Robert J 等人获得了重复频率 100 Hz、脉冲宽度 1.8 ps、单脉冲能量 240 mJ 激光输出<sup>[14]</sup>。2018 年, 通快公司实现了碟片再生放大器从实验室样机向商业化产品的跨越, 并实现了重复频率 5 kHz、脉冲宽度 1.13 ps、脉冲能量 200 mJ 的激光输出<sup>[15]</sup>。2021 年, 该公司 Yanik P 等人利用脉冲泵浦掺镱双碟片再生放大器在 1 kHz 重复频率

下进行了 550 mJ 激光放大输出, 输出的一部分光压缩到脉冲宽度 602 fs。这是目前 1 kHz 重复频率下碟片再生放大器输出的最大脉冲能量。相较于国外, 国内关于碟片再生放大器领域的研究起步相对较晚, 但近几年来相关技术发展迅速, 取得了较为显著的进展, 整体研究水平显著提升。国内相关研究单位主要包括华中科技大学、深圳技术大学等高校以及相关研究所。2021 年, 华中科技大学董静等人基于自研的泵浦模块研制了碟片再生放大器, 实现了重复频率 200 kHz、脉冲宽度 9.3 ps、脉冲能量 220  $\mu$ J 激光输出。2024 年, 中国科学院大连化物所重点突破碟片封装、泵浦模块等关键核心技术, 通过自研模块在再生放大器中实现重复频率 50~200 kHz 可调、脉冲宽度为 720 ps 激光输出, 最大脉冲能量超过 6 mJ<sup>[16]</sup>。同年, 深圳技术大学报道了 500 kHz 重复频率下 170  $\mu$ J 激光输出, 并将脉冲宽度压缩至 884 fs<sup>[17]</sup>。与此同时, 深圳大学夏瀛等人利用碟片再生放大器获得了重复频率 800 kHz, 脉冲能量 190  $\mu$ J 激光输出, 脉宽为 6.418 ps<sup>[18]</sup>。中国科学院空天院利用双通碟片再生放大器对种子光进行放大, 获得了重复频率 200 kHz、脉冲宽度 143.9 ps, 脉冲能量 522.5  $\mu$ J 激光输出<sup>[19]</sup>。中国科学院上海光机所设计并搭建了单程双通再生放大系统, 实现了重复频率 10 kHz、脉冲宽度为 3.4 ns、脉冲能量 13 mJ 的单纵模激光输出<sup>[11]</sup>。中国科学院长春光机所在近年来相继实现了多项碟片再生放大技术成果, 通过单碟片再生放大系统, 获得了单脉冲能

量 107 mJ、脉冲宽度 1.2 ns、重复频率 1 kHz 的激光输出<sup>[20]</sup>。2024 年进一步将再生放大器结构拓展为双碟片构型, 成功获得 1 kHz 重复频率下单脉冲能量 145 mJ 的激光输出, 脉冲宽度 580 ps<sup>[21]</sup>。2026 年, 松山湖材料实验室基于自主开发的碟片激光头, 在 1 kHz 重复频率下得到脉冲宽度 1.7 ns、单脉冲能量 216 mJ 激光输出<sup>[22]</sup>。

从上述可知, 碟片再生放大器的大多研究仅限于实现单一重复频率或固定脉宽下的高能量放大, 难以实现再生放大器重复频率与脉冲宽度大范围可调输出。因此, 本文设计并搭建了一种基于双普克尔盒协同调控单腔碟片再生放大器。在重复频率方面, 本文依托双普克尔盒的时序配合与宽稳区谐振腔设计, 在保证高光束质量与高能量提取效率的同时, 灵活实现激光重复频率可调。在脉冲宽度方面, 通过调整两个压缩光栅之间的间距, 实现了输出激光脉冲宽度的大范围压缩及连续可调。通过上述方法, 激光输出重复频率实现在 1~50 kHz 大范围可调节; 在泵浦平均功率为 503 W 时, 50 kHz 重复频率下得到最大输出功率 93.1 W; 在 1 kHz 重复频率下, 实现了单脉冲能量 50.2 mJ。脉冲宽度实现了 1.34 ps~150.37 ps 可调节。通过与前文研究的对比, 本文设计的碟片再生放大器突破了单一输出频率和脉冲宽度的限制, 实现了多重频、多脉宽协同可调节激光输出, 从而可以满足精密加工、超快光谱等多场景应用<sup>[23-25]</sup> 对激光时域参数灵活可调的需求。

## 2 再生放大器装置

图 1 为碟片再生放大器光路图, 主要由三大模块构成: 种子源模块、再生放大模块、光栅压缩模块。其中种子模块与再生放大模块各设置一个普克尔盒, 一个普克尔盒 (Pockels cell 1) 置于腔外, 主要完成对种子光的脉冲选取与频率筛选<sup>[26]</sup>; 另一个普克尔盒 (Pockels cell 2) 集成于再生放大腔内, 用于精准控制脉冲注入与放大循环周期<sup>[27]</sup>。在种子源内, 由光纤锁模振荡器输出的 1030 nm 激光经啁啾光纤布拉格光栅进行脉冲展宽, 再经过光纤放大器预放大后, 能量可达到 10  $\mu$ J, 此时脉冲宽度约 1 ns, 重复频率为 100 kHz。注入再生放大器腔内的脉冲激光重复频率可由普克尔盒 (Pockels cell 1) 进行控制。随后, 种子光通过 1/2

波片 (HWP 1), 偏振方向被调整为 P 光后进入光隔离器 (Isolator), 通过反射镜 (M2) 反射并透过薄膜偏振片 (TFP 1), 在依次经过旋光器 (Rotator)、1/2 波片 (HWP 2)、薄膜偏振片 (TFP 2) 后, 种子光进入再生放大器腔内进行放大。再生放大器内采用的是商用光纤耦合的半导体激光泵浦模块, 采用 969 nm 零声子线泵浦 Yb:YAG 碟片, 可将量子亏损降至最低, 最高泵浦功率为 1000 W, 泵浦光采用的是超高斯分布的平顶光束, 可实现碟片增益介质内均匀泵浦, 有效抑制热效应与波前畸变, 提升增益利用率与输出光束质量。Yb:YAG 碟片晶体作为再生放大器的增益介质, 其直径为 12 mm, 厚度为 215  $\mu$ m, 掺杂浓度为 7%。再生放大器光程长度约 7 m, 碟片处光斑半径为 2.15 mm。种子光在 0° 反射镜 (M9) 反射前后两次经过 1/4 波片 (QWP) 改变偏振方向, 其中 M3 为 34° 平面反射镜, M4~M8 为介质膜高反镜。该再生放大器为线形腔结构, 激光主要通过普克尔盒 (Pockels cell 2)、四分之一波片 (QWP) 与薄膜偏振片 (TFP 2) 共同作用, 控制种子光的放大次数。经放大后的激光光束经反射镜 M10、M11 反射后入射至双光栅压缩器, 反射镜 M12、M13 为 45° 反射镜起转折光路的作用, M14 为爬高镜, 用于降低光路, 激光经光栅传输至反射镜 M15 输出, 完成脉宽压缩。通过精确控制平移台的位移, 可连续调节双光栅压缩器中两块光栅的相对间距, 从而改变脉冲在压缩器内的光程差与色散补偿量, 最终实现输出激光脉冲宽度的连续可调节。

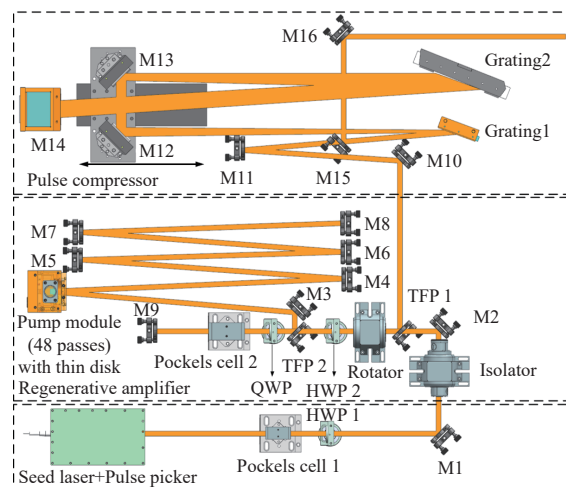


图 1 Yb:YAG 碟片再生放大器结构图

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

为实现多重复频率激光稳定运转,同时获得高平均功率、高光束质量的基模激光输出,需将谐振腔碟片位置的光斑半径控制在泵浦光斑半径的 0.7~0.8 倍范围内。本文以激光谐振腔 ABCD 定律<sup>[28-30]</sup>为基础,结合碟片实测热焦距变化规律与球面反射镜参数,完成了碟片再生放大器谐振腔的整体优化设计。图 2 为碟片处基模光斑半径随碟片光焦度变化的稳区图,在不同光焦度条件下,谐振腔均保持稳腔运行状态,且碟片位置的光斑半径能够较好满足模式匹配需求。在重复频率可调的碟片再生放大器中,重复频率的改变会直接影响泵浦光的提取效率,进而导致碟片增益介质内部的产热功率与热累积程度出现显著差异。在相同泵浦条件下,不同重复频率工作时碟片的等效热光焦度也会相应改变。本研究所设计的谐振腔保证了放大系统在宽重复频率范围内稳定工作,使得碟片再生放大器在不同重复频率下,即便碟片光焦度发生波动,仍可始终运行在谐振腔稳定区域内,从而保障输出激光的模式与光束质量稳

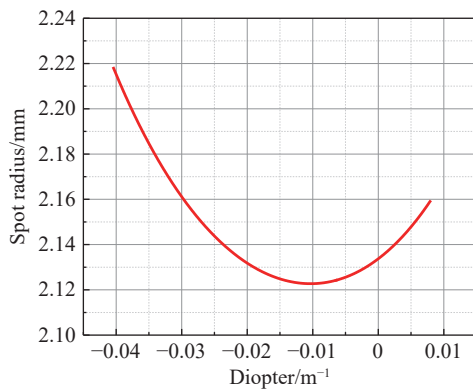


图 2 谐振腔内碟片处光斑半径随碟片光焦度变化

Fig. 2 Variation of the spot radius on the thin-disk with the thin-disk dioptr in the resonator

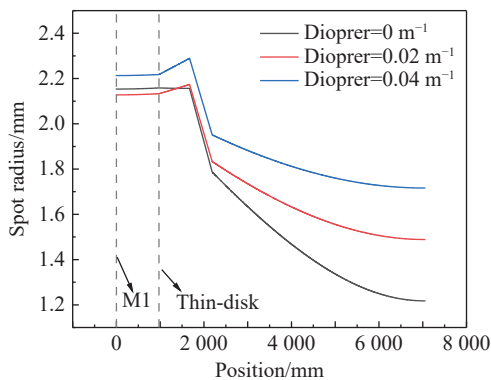


图 3 谐振腔内激光光斑尺寸的变化

Fig. 3 Variation of the laser spot size in the resonator.

定可靠。图 3 为三种碟片光焦度下腔内传输模式演变过程,从图中可以看出,尽管碟片处光焦度有较大差异,但在碟片处的基模光斑半径仅存在 0.1 mm 左右的波动,始终工作在稳区范围内,表明该再生放大器具备多重频运转的能力。

### 3 实验结果与分析

首先设计并搭建了双普克尔盒协同调控单腔碟片再生放大器与脉冲压缩器。依托双普克尔盒的时序配合与谐振腔设计,得到了碟片再生放大器不同重复频率下激光输出,测试了碟片再生放大器不同泵浦功率下的基模输出性能。图 4 展示了 1 kHz、5 kHz、10 kHz、25 kHz、50 kHz 五组重复频率下碟片再生放大器输出功率的测试曲线,结果表明,所设计的碟片再生放大器成功实现重复频率可调节激光输出。从图 4 可以看出,随着泵浦功率的增加,激光输出功率同步提升,但不同重复频率下,激光输出功率存在差异,在 50 kHz 重复频率下得到了最大输出功率 93.1 W,其中泵浦平均功率为 503 W。受限于光学元件损伤阈值,在 1 kHz 重复频率下,实现了单脉冲能量 50.2 mJ。采用更高损伤阈值的光学元件,可进一步提升输出脉冲能量。从图 4 可知,在相同泵浦条件下,平均输出功率随重复频率升高而增大,且重复频率相差越大,功率差异越明显。这是因为高重复频率对应更短的脉冲间隔,单位时间内的能量提取次数增加,从而提升了能量提取效率,并最终表现为更高的平均输出功率。

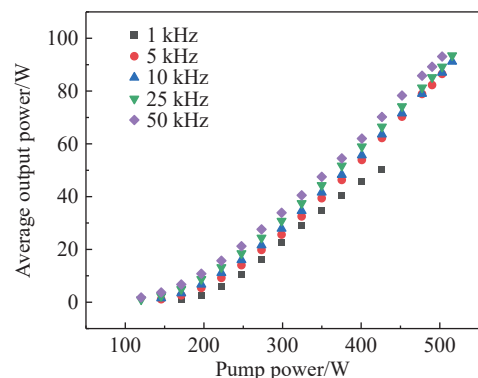


图 4 不同重复频率下激光的平均功率随泵浦功率变化情况

Fig. 4 Variation of average laser power with pump power at multiple repetition rates.

为评估该碟片再生放大器输出激光的光束质量, 在 50 kHz 重复频率下, 使用 Dataray 光斑分析仪测量平均功率 93.1 W 时的光斑半径 ( $1/e^2$ ) 分布, 并根据测量数据拟合出输出激光的光束质量, 如图 5 所示, 光束质量因子  $M_x^2=1.18$ ,  $M_y^2=1.01$ , 表明该碟片再生放大器输出光束质量近衍射极限, 在高功率输出情况下仍然保持优异的光束质量。

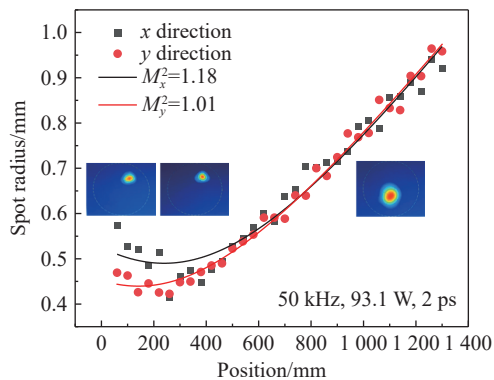


图 5 在平均功率 93.1 W、重复频率 50 kHz 下输出激光的光束质量

Fig. 5 The beam quality factor  $M^2$  of the output laser measured at the average power of 93.1 W and the repetition rate of 50 kHz.

在碟片再生放大器外光路中, 借助光栅搭建了一条脉宽可调的皮秒脉宽压缩光路, 通过调节平移台移动, 调整两个压缩光栅之间的间距, 实现了输出激光脉宽可调节, 并通过自相关仪测量了

最高功率下输出激光的脉冲宽度。图 6 为 50 kHz 重复频率, 最高输出激光功率下, 移动平移台测得的输出激光脉宽测量结果, 表明碟片再生放大器可以实现 1.34 ps~150.37 ps 脉宽可调激光输出。

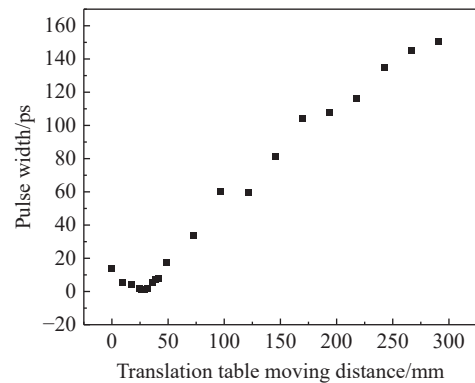


图 6 输出激光压缩后的可调节脉冲宽度

Fig. 6 Tunable pulse width of the output laser after pulse compression.

由图 6 中的变化趋势可以清晰看出, 脉冲宽度会随平移台的移动呈现逐步增大的规律, 换言之, 平移台位移的改变与脉宽展宽之间存在明显的正相关关系, 平移台移动量越大, 对应的脉冲宽度也就越宽。图 7 为平移台调节下其中的四组激光脉冲宽度即半峰全宽 (FWHM), 测量的脉宽宽度分别为 1.98 ps、77.3 ps、109.62 ps、143.95 ps。从图 7 可以看出, 输出的脉冲基线基本保持水平, 仅存在微弱的噪声起伏, 表明激光系统较为稳定。

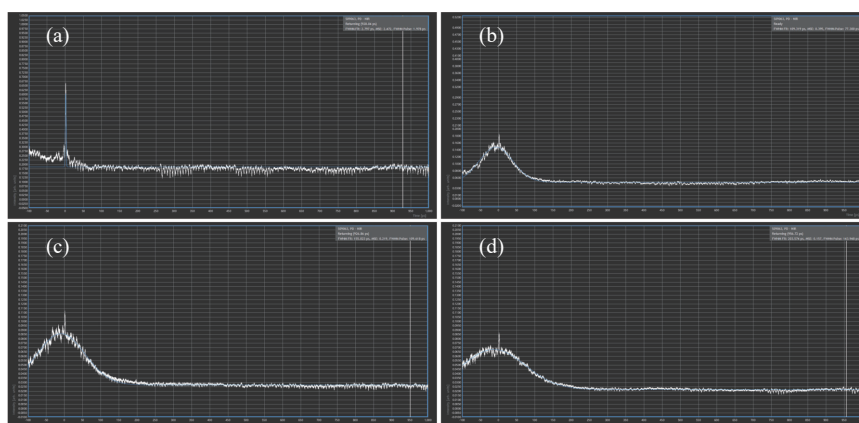


图 7 脉冲压缩后的脉冲宽度。(a) 脉冲宽度 1.98 ps; (b) 脉冲宽度 77.3 ps; (c) 脉冲宽度 109.62 ps; (d) 脉冲宽度 143.95 ps

Fig. 7 Pulse width after pulse compression. (a) Pulse width 1.98 ps; (b) Pulse width 77.3 ps; (c) Pulse width 109.62 ps; (d) Pulse width 143.95 ps

## 4 结 论

本文设计并搭建了基于双普克尔盒协同控制

的单腔碟片再生放大器, 该系统通过双普克尔盒时序协同配合及宽稳区谐振腔结构设计, 在保证高光束质量与高效能量提取的前提下, 实现了重

复频率的宽范围可调节输出。同时,在泵浦平均功率 503 W、重复频率 50 kHz 条件下,获得最高 93.1 W 的平均输出功率,且光束质量因子  $M_x^2=1.18$ ,  $M_y^2=1.01$ , 输出激光近衍射极限,在 1 kHz 重复频率下,实现了单脉冲能量 50.2 mJ。并通过改

变双光栅压缩器间距,实现了 1.34 ps 至 150.37 ps 的脉冲宽度连续调节,最终成功实现了重复频率与脉冲宽度双调节的碟片再生放大系统。下一步将进一步优化再生放大腔结构,以实现更高脉冲能量与更高平均功率的激光输出。

#### 参考文献:

- [1] MAIMAN T H. Stimulated optical radiation in ruby[J]. *Nature*, 1960, 187(4736): 493-494.
- [2] 袁庆贺, 井红旗, 张秋月, 等. 砷化镓基近红外大功率半导体激光器的发展及应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(4): 040003.  
YUAN Q H, JING H Q, ZHANG Q Y, *et al.*. Development and applications of GaAs-based near-infrared high power semiconductor lasers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(4): 040003. (in Chinese).
- [3] 刘梦涵, 崔碧峰, 何新, 等. 大功率低阈值半导体激光器研究[J]. *中国激光*, 2016, 43(5): 0502001.  
LIU M H, CUI B F, HE X, *et al.*. Study of high power semiconductor laser with low threshold current[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(5): 0502001. (in Chinese).
- [4] 程乃俊, 李惟帆, 祁峰. 中红外激光器研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2023, 60(17): 1700006.  
CHENG N J, LI W F, QI F. Progress of mid-infrared laser[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(17): 1700006. (in Chinese).
- [5] SHAO J H, YAO G J, WU X CH, *et al.*. Robust mode-locking in all-fiber ultrafast laser by nanocavity of two-dimensional heterostructure[J]. *Light: Science & Applications*, 2025, 14(1): 301.
- [6] SHENG Y H, WEN X M, JIA B H, *et al.*. Direct laser writing on halide perovskites: from mechanisms to applications[J]. *Light: Advanced Manufacturing*, 2024, 5(1): 95-116.
- [7] KURNIKOV G, VOLKOV M, GOROKHOV A, *et al.*. Thermal-lens-free active-mirror ytterbium-doped yttrium aluminum garnet amplifier[J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2025, 13: e20.
- [8] SAMOILOV V I, KARPOV N I, OSTROVSKII V A, *et al.*. Laser amplifier based on a 5 mm Yb: YAG rod operating at room temperature[J]. *Instruments and Experimental Techniques*, 2025, 68(6): 993-1000.
- [9] MOON K J, KIM S H, KIM Y, *et al.*. Analysis of the optical and thermal characteristics of a hexagonally shaped six-core fiber for kilowatt-class amplifiers[J]. *Optical Fiber Technology*, 2026, 100: 104626.
- [10] 冯磊, 周煌, 吕仁冲, 等. 100 mJ 碟片 Yb: YAG 激光再生放大的增益窄化抑制 (特邀)[J]. *中国激光*, 2025, 52(23): 2301021.  
FENG L, ZHOU H, LÜ R CH, *et al.*. Suppression of gain narrowing in 100 mJ thin-disk Yb: YAG regenerative amplifiers (Invited)[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2025, 52(23): 2301021. (in Chinese).
- [11] 李祖强, 肖奇, 潘雪, 等. 高光光效率百瓦级薄片再生放大器[J]. *中国激光*, 2024, 51(17): 1701001.  
LI Z Q, XIAO Q, PAN X, *et al.*. Hundred-watt thin-disk regenerative amplifier with high optical-to-optical efficiency[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2024, 51(17): 1701001. (in Chinese).
- [12] HÖMINGER C, ZHANG G, MOSER M, *et al.*. Diode-pumped thin disc Yb: YAG regenerative amplifier[C]. *Advanced Solid State Lasers*, Optica Publishing Group, 1998: TS3.
- [13] KLINGEBIEL S, SCHULTZE M, TEISSET C Y, *et al.*. 220mJ ultrafast thin-disk regenerative amplifier[C]. *CLEO: Science and Innovations*, Optica Publishing Group, 2015: STu4O. 2.
- [14] JUNG R, TÜMMLER J, WILL I. Regenerative thin-disk amplifier for 300 mJ pulse energy[J]. *Optics Express*, 2016, 24(2): 883-887.
- [15] TEISSET C Y, WANDT C, SCHULTZE M, *et al.*. Multi-kW thin-disk amplifiers[C]. *High Intensity Lasers and High Field Phenomena*, Optica Publishing Group, 2018: HT1A. 6.
- [16] 雷希音, 戴隆辉, 苏盟, 等. 国产 Yb: YAG 薄片再生放大器输出功率突破 300 W[J]. *中国激光*, 2024, 51(19): 1915002.  
LEI X Y, DAI L H, SU M, *et al.*. Output power of domestic Yb: YAG thin-disk regenerative amplifier exceeding 300 W[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2024, 51(19): 1915002. (in Chinese).
- [17] XU S ZH, GAO Y B, LIU X, *et al.*. High-efficiency Yb: YAG thin-disk chirped pulse amplifier delivering 884-

- femtosecond laser with tunable repetition rates and high stability[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2024, 142: 105574.
- [18] 夏瀛. 高功率碟片激光器及二倍频的研究[D]. 深圳: 深圳大学, 2023.  
XIA Y. *Research on high power thin disk laser and double frequency*[D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2023. (in Chinese).
- [19] LIU X P, SUI Y, YUAN M H, *et al.*. Cpa-free Yb: YAG thin-disk regenerative amplifier laser with hundreds of watts, hundreds of kHz, and hundreds of picoseconds[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2024, 140: 105354.
- [20] 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. (in Chinese).
- [21] SUN J J, CHEN Y, CHEN F, *et al.*. Beam mutation and its suppression in Yb: YAG thin-disk regenerative amplifiers[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2024, 136: 105041.
- [22] 张家瑞, 吴忻朋, 邓子龙, 等. 满足空间应用的高可靠性固体激光器研制[J]. 中国激光, 2026, 53(2): 0201004.  
ZHANG J R, WU X P, DENG Z L, *et al.*. Development of high-reliability solid-state laser for space applications[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2026, 53(2): 0201004. (in Chinese).
- [23] XIAO G Z, KUANG T F, HE Y T, *et al.*. Giant enhancement of nonlinear harmonics of an optical-tweezer phonon laser[J]. *eLight*, 2024, 4(1): 17.
- [24] SHAO J H, YAO G J, WU X CH, *et al.*. Robust mode-locking in all-fiber ultrafast laser by nanocavity of two-dimensional heterostructure[J]. *Light: Science & Applications*, 2025, 14(1): 301. (查阅网上资料, 本条文献与第 5 条文献重复, 请确认).
- [25] DU SH J, ZHANG F T, MA L. Advances in femtosecond laser synthesis and micromachining of halide perovskites[J]. *Light: Advanced Manufacturing*, 2024, 5(3): 452-474.
- [26] 王旭, 秘国江, 钟国舜, 等. LD 泵浦再生放大器技术研究[J]. 激光与红外, 2010, 40(11): 1191-1194.  
WANG X, BI G J, ZHONG G SH, *et al.*. Study on laser diode-pumped regenerative amplifier[J]. *Laser & Infrared*, 2010, 40(11): 1191-1194. (in Chinese).
- [27] 董静, 陈涵天, 王海林, 等. 100 kHz 腔倒空薄片激光器理论与实验研究[J]. 光学学报, 2022, 42(9): 0914002.  
DONG J, CHEN H T, WANG H L, *et al.*. Theoretical and experimental research on 100 kHz cavity-dumped thin-disk laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(9): 0914002. (in Chinese).
- [28] 卢亚雄, 杨亚培, 陈淑芬. 激光束传输与变换技术[M]. 成都: 电子科技大学出版社, 1999.  
LU Y X, YANG Y P, CHEN SH F. *Laser Transmission and Transform Technology*[M]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China Press, 1999. (in Chinese).
- [29] BELANGER P A. Phase conjugation and optical resonators[J]. *Optical Engineering*, 1982, 21(2): 212266.
- [30] YARIV A, YE H P. Confinement and stability in optical resonators employing mirrors with Gaussian reflectivity tapers[J]. *Optics Communications*, 1975, 13(4): 370-374.

#### 作者简介:



刘 波 (1991—), 男, 江西高安人, 硕士研究生, 工程师, 2018 年于北京理工大学获得硕士学位, 主要从事激光技术研究及安全领域项目管理工  
作。E-mail: [liubo19910214@163.com](mailto:liubo19910214@163.com)

张 凤 (2000—), 女, 四川万源人, 博士研究生, 主要从事激光技术方面的研究 E-mail: [zhangfeng23@mails.ucas.ac.cn](mailto:zhangfeng23@mails.ucas.ac.cn)

赵 伟 (1981—), 男, 河北安国人, 硕士研究生, 工程师, 主要从事激光技术研究及安全领域项目管理工  
作。E-mail: [313914980@qq.com](mailto:313914980@qq.com)

陈 远 (1990—), 男, 河南济源人, 硕士研究生, 工程师, 主要从事安全领域项目管理工  
作。E-mail: [985625925@qq.com](mailto:985625925@qq.com)

陈毅 (1991—), 男, 新疆昌吉人, 博士, 高级工程师, 主要从事碟片激光技术与长波红外激光方面的研究。E-mail: [chenyihit@163.com](mailto:chenyihit@163.com)



陈飞 (1982—), 男, 河南南阳人, 博士, 研究员, 2011 年于哈尔滨工业大学获得博士学位, 主要从事新型激光技术及应用研究。E-mail: [feichenny@126.com](mailto:feichenny@126.com)

孙俊杰 (1994—), 女, 吉林长春人, 博士, 副研究员, 主要从事新型激光技术及应用研究。E-mail: [15143115236@163.com](mailto:15143115236@163.com)