

大能量碟片激光多通放大器腔体设计研究综述

陈毅 孙俊杰 于晶华 姚志焕 张逸文 于德洋 何洋 张阔 潘其坤 陈飞

Review of the cavity-design of high-energy thin-disk laser multi-pass amplifiers

CHEN Yi, SUN Jun-jie, YU Jing-hua, YAO Zhi-huan, ZHANG Yi-wen, YU De-yang, HE Yang, ZHANG Kuo, PAN Qi-kun, CHEN Fei

引用本文:

陈毅, 孙俊杰, 于晶华, 姚志焕, 张逸文, 于德洋, 何洋, 张阔, 潘其坤, 陈飞. 大能量碟片激光多通放大器腔体设计研究综述[J].

中国光学, 2023, 16(5): 996–1009. doi: 10.37188/CO.2023-0009

CHEN Yi, SUN Jun-jie, YU Jing-hua, YAO Zhi-huan, ZHANG Yi-wen, YU De-yang, HE Yang, ZHANG Kuo, PAN Qi-kun,

CHEN Fei. Review of the cavity-design of high-energy thin-disk laser multi-pass amplifiers[J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(5): 996-

1009. doi: 10.37188/CO.2023-0009

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0009>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

键合型掺铒纳米晶-聚合物波导放大器的制备

Fabrication of optical waveguide amplifiers based on bonding-type NaYF₄: Er nanoparticles-polymer

中国光学 (中英文). 2017, 10(2): 219 <https://doi.org/10.3788/CO.20171002.0219>

激光微角偏移测试系统研究

Laser micro angular deviation measurement system

中国光学 (中英文). 2017, 10(2): 234 <https://doi.org/10.3788/CO.20171002.0234>

钙钛矿材料在激光领域的研究进展

Research progress of perovskite materials in the field of lasers

中国光学 (中英文). 2019, 12(5): 993 <https://doi.org/10.3788/CO.20191205.0993>

用于超冷原子囚禁的一体式结构三维光晶格系统

The integrated three dimensional optical lattice system for confining ultra-cold atoms

中国光学 (中英文). 2019, 12(6): 1295 <https://doi.org/10.3788/CO.20191206.1295>

空气导热作用下Nd:YAG晶体温场特性

Temperature field of Nd: YAG crystal under air heat transfer

中国光学 (中英文). 2019, 12(3): 686 <https://doi.org/10.3788/CO.20191203.0686>

基于激光的测量技术在燃烧流场诊断中的应用

Applications of measurement techniques based on lasers in combustion flow field diagnostics

中国光学 (中英文). 2018, 11(4): 531 <https://doi.org/10.3788/CO.20181104.0531>

文章编号 2097-1842(2023)05-0996-14

大能量碟片激光多通放大器腔体设计研究综述

陈毅¹, 孙俊杰^{1,2*}, 于晶华^{1,2}, 姚志焕^{1,2}, 张逸文¹, 于德洋¹,
何洋¹, 张阔¹, 潘其坤¹, 陈飞^{1*}

(1. 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;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:为了明晰碟片多通放大器的腔体设计方法, 本文对不同类型的碟片多通放大器做归纳与总结, 共归纳出4f中继成像、谐振腔设计/光学傅立叶变换、近准直光束传输与其他共4种设计理念的多通放大器。介绍了每种放大器的设计方法并详尽列举了研究现状。通过对比4种类型的碟片多通放大器, 发现不同种类的多通放大器各有优缺点。4f中继成像需要真空环境以避免焦点处的气体电离, 因此机械装置与调试难度较大; 谐振腔设计/光学傅立叶变换概念多通放大器的镜片处存在较小光斑, 因此较适用于较低能量的多通放大器; 近准直光束传输方法由于不需要真空环境, 具备很大的发展潜力, 但需要精准控制激光运转状态下的碟片面形, 难度也较大。因此, 从激光器设计角度来看, 需要对碟片多通放大器继续进行优化设计, 从而同时实现使用场景的多元化与输出能量的可持续拓展。

关键词:激光; 碟片; 多通放大器; 腔体设计; 激光放大器

中图分类号: TN248 文献标志码: A doi: 10.37188/CO.2023-0009

Review of the cavity-design of high-energy thin-disk laser multi-pass amplifiers

CHEN Yi¹, SUN Jun-jie^{1,2*}, YU Jing-hua^{1,2}, YAO Zhi-huan^{1,2}, ZHANG Yi-wen¹, YU De-yang¹,
HE Yang¹, ZHANG Kuo¹, PAN Qi-kun¹, CHEN Fei^{1*}

(1. *State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, 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: 15143115236@163.com; feichenny@126.com*

Abstract: In order to clarify the cavity design methods of thin-disk multi-pass amplifiers, we summarize the different types of thin-disk multi-pass amplifiers and concludes that there are four fundamental design concepts: (1) 4f relay imaging, (2) resonant cavity design/optical Fourier transform, (3) near-collimated beam transmission, and (4) others. Each amplifier design method is described and the current status of its research

收稿日期: 2023-01-05; 修订日期: 2023-02-05

基金项目: 长春光机所创新重大项目(No. E10302Y3M0); 吉林省青年成长科技计划项目(No. 20220508041RC)

Supported by Innovate Major Project, CIOMP (No. E10302Y3M0); Jilin Province Youth Growth Science and Technology Project (No. 20220508041RC)

is listed in as much detail as possible. By comparing the four types of disk multi-pass amplifiers, it is found that the varying methods have distinct advantages and disadvantages. $4f$ relay imaging requires a vacuum environment to avoid gas ionization at the focal point, making the mechanics and adjustment more difficult; the resonant cavity design/optical Fourier transform concept multi-pass amplifier has a small spot at the mirrors, making it more suitable for lower energy multi-pass amplifiers; the near collimated beam transmission method has great development potential because it does not require a vacuum environment, but accurately controlling the surface shape of the thin-disk is difficult while the laser is operating. Therefore, from the perspective of laser design, it is necessary to continue to optimize the design of the thin-disk multi-pass amplifier to realize the diversification of application scenarios and the sustainable expansion of output energy.

Key words: laser; thin-disk; multi-pass amplifier; cavity-design; laser amplifier

1 引言

固体激光器^[1-3]有多种体制,其中,碟片激光技术的散热表面积体积比不随通光孔径的增加而变化,因此具备极大的功率/能量扩展性。Yb:YAG 碟片再生放大器已经实现单脉冲能量为 200 mJ、重频为 5 kHz、脉宽为 1.1 ps 的高能激光脉冲^[4]与单脉冲能量为 95 mJ(压缩前)、重频为 20 kHz 的高重复频率激光脉冲^[5]。但受限再生放大器中 BBO(BaB_2O_4)普克尔盒的通光孔径与损伤阈值,碟片再生放大器的能量提升陷入瓶颈。为解决该问题,一般使用碟片多通放大器持续提升激光能量。

由于碟片晶体的厚度很薄,一般为 100~500 μm ,单通增益低,需要数十次通过碟片提取能量,因此碟片多通放大器的腔体光路设计较为复杂。国际上经过近 20 年的发展,发展出 $4f$ 中继成像、谐振腔设计/光学傅立叶变换、近准直光束传输等概念的碟片激光多通放大器,本文对其设计理念与研究进展进行归纳与阐述,并对下一步发展做展望。

2 基于 $4f$ 中继成像的多通放大器

2.1 常规 $4f$ 中继成像多通放大器

基于 $4f$ 传输系统的多通放大器的应用案例^[6-9]较多,其基本原理如图 1 所示。碟片晶体位于传输透镜的焦点位置,两片传输透镜的间距为 $2f$ 。其优点是经过 $4f$ 系统传输后光斑尺寸保持不变。

对于具有不同光斑半径、波前曲率的光束,经过 $4f$ 系统后的光斑变换情况如图 2(彩图见期刊电子版)所示(使用 ABCD 矩阵计算得到),其中碟片晶体的光焦度(即焦距的倒数)为零,即不存在热透镜效应,传输透镜的焦距为 1 m。Beam1、Beam2 与 Beam3 的入射光斑半径与波前曲率半径分别如表 1 所示,可见经过 $4f$ 系统传输后,再现了入射光束的光斑半径与波前曲率。

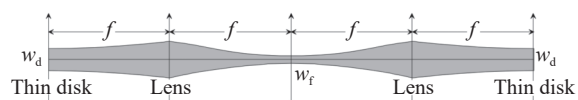


图 1 $4f$ 中继传输系统。带有两个透镜的中继成像可再现碟片上激光束的相位和强度分布^[6]

Fig. 1 $4f$ relay transmission system. Relay imaging with two lenses to reproduce the phase and intensity distribution of the laser beam on the thin disk^[6]

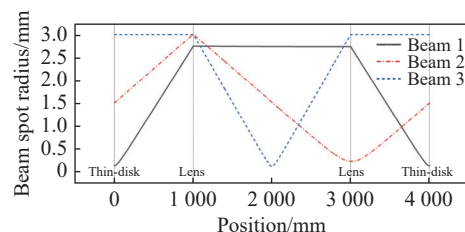


图 2 不同半径、不同波前曲率的光束在 $4f$ 系统内传输情况(碟片光焦度为 0,光焦度指焦距的倒数)

Fig. 2 Graph of beams with different spot radii and wave-front curvatures propagating in a $4f$ system (The diopeter of thin-disk is 0, and the diopeter refers to the reciprocal of the focal length)

图 3(彩图见期刊电子版)展示了光束通过 5 个 $4f$ 系统,入射光束的参数如下:光斑半径为

0.5 mm、波前曲率半径为 10 m, 图中绿色五角星指碟片所在位置, 蓝色方块代表传输透镜所在位置, 传输透镜的焦距为 1 m。图 3 中, 碟片晶体的光焦度为 0 时, 即 $\text{Diopter}_{\text{thin-disk}} = 0 \text{ m}^{-1}$, 光束通过 5 个 $4f$ 系统后, 保持光斑半径和波前曲率不变, 但当碟片晶体的光焦度不为 0 时, 输出光束的光斑半径与波前曲率均发生变化, 尤其 $4f$ 系统内的最小光斑逐渐变小, 最大光斑逐渐变大。这将带来 2 个问题: (1) 系统内光斑最小位置处的能量密度逐渐增大, 直到大于器件的损伤阈值; (2) 系统内的最大光斑尺寸逐渐变大直到大于器件尺寸。

表 1 $4f$ 系统传输前后的光束参数

Tab. 1 Beam parameters before and after $4f$ system transmission

	光束1	光束2	光束3
入射前参数	光斑半径 0.12 mm 波前曲率半径 1 m	光斑半径 1.5 mm 波前曲率半径 1 m	光斑半径 3 mm 波前曲率半径 10^6 m
传输后参数	光斑半径 0.12 mm 波前曲率半径 1 m	光斑半径 1.5 mm 波前曲率半径 1 m	光斑半径 3 mm 波前曲率半径 10^6 m

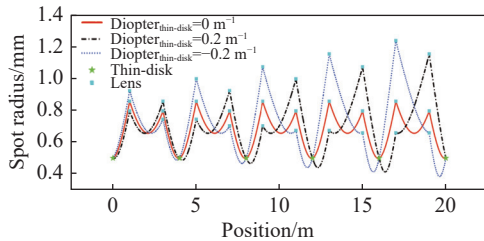


图 3 不同碟片晶体光焦度时光束在 5 个串联 $4f$ 系统内的传输情况

Fig. 3 Transmission curves of beams within 5 tandem $4f$ systems when the diopter of the thin-disk is different

调研统计到的基于 $4f$ 系统的多通放大方案有 4 种, 分别是德国斯图加特大学 Daniel Müller 提出的透镜/抛物面镜+棱镜方案^[6]、德国德累斯顿-罗森道夫亥姆霍兹研究中心的 $4f$ 系统^[7, 10]、巴黎第十一大学的双碟片 $4f$ 系统^[8, 11]、德国宇航中心^[12] 等, 下面分别讲述。

2.1.1 德国斯图加特大学 $4f$ 系统

如图 4 所示, 德国斯图加特大学 Müller D 等^[6] 使用透镜与棱镜将 $4f$ 系统小型化, 实现 16 通激光放大(由于碟片晶体后表面的反射作用, 因此激

光被碟片反射 1 次算 2 通), 通过扩大透镜与棱镜尺寸, 理论上激光放大次数不受限制。

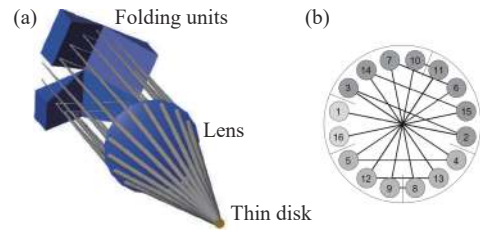


图 4 (a) 包含一个透镜和两个棱镜对的 $4f$ 系统光路; (b) 通过透镜的光束位置^[6]

Fig. 4 (a) Optical path of a $4f$ system consisting of one lens and two prism pairs; (b) position of the beam passing through the lens^[6]

由于图 4 所示方案的光束焦点处于棱镜对附近, 能量密度较高, 因此棱镜易损坏, 为降低棱镜的损伤几率, 作者提出图 5 所示的改进方案。与图 4 相比, 使用抛物面镜代替透镜, 通过增加棱镜的数量与排列方式使得光路焦点位于空气中。作者使用该放大器实现 48 通放大, 得到脉冲能量为 11.6 mJ、脉冲重复频率为 1 kHz、脉宽为 0.3~0.6 μs 的激光。

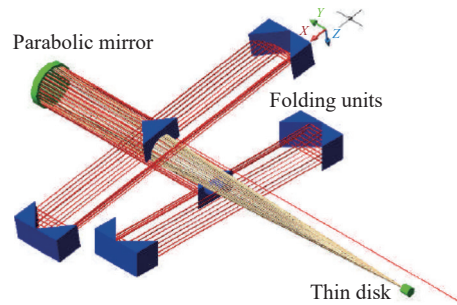


图 5 包含抛物面镜与棱镜的碟片多通放大器^[6]

Fig. 5 Thin-disk multi-pass amplifier with parabolic mirrors and prisms^[6]

2.1.2 德国德累斯顿-罗森道夫亥姆霍兹研究中心的 $4f$ 系统

2012 年, 德国德累斯顿-罗森道夫亥姆霍兹研究中心 Loeser M 等^[7] 使用基于 $4f$ 中继成像的 12 通放大器(图 6), 直接放大再生放大器注入的 200 μJ 、1.8 ps 激光, 得到 30 mJ 激光输出, 脉冲重复频率达 10 Hz。同年, 该课题组使用陶瓷 Yb:LuAG 多通放大器, 将 1 mJ、脉宽 6 ns 种子光放大至 580 mJ, 重频 100 Hz, 最大光光转换效率为 28%^[10]。

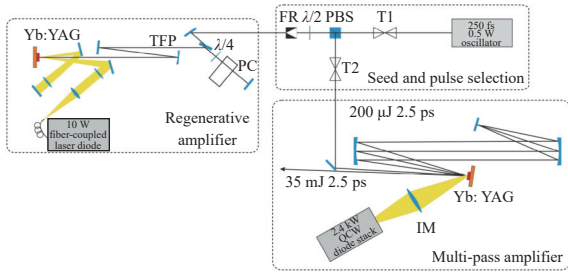


图 6 基于 4f 中继成像的 12 通碟片放大器^[7]

Fig. 6 12-pass thin-disk amplifier based on 4f relay imaging^[7]

2.1.3 巴黎第十一大学的双碟片 4f 系统

2013 年, 巴黎第十一大学 Friebel F 等^[8, 11] 使用 2 个 Yb:CaF₂ 作为端面镜, 基于 4f 中继传输系统设计了 18 通碟片放大器(图 7-图 8), 将 1.1 mJ 种子光放大至 57 mJ, 脉冲重复频率为 20 Hz, 光束质量 $M^2=1.1$ 。

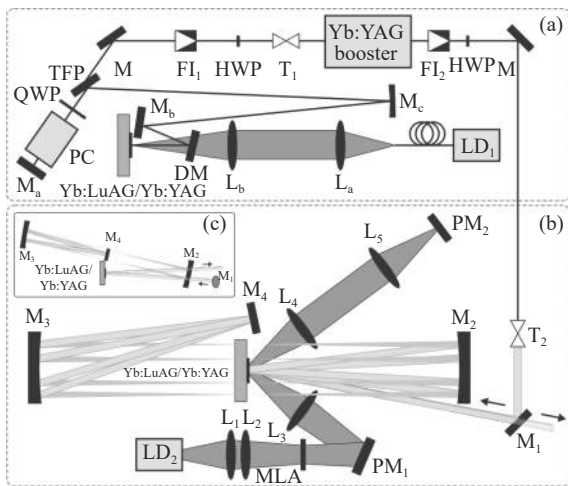


图 7 基于 4f 中继成像的 14 通碟片放大器^[10]

Fig. 7 14-pass thin-disk amplifier based on 4f relay imaging

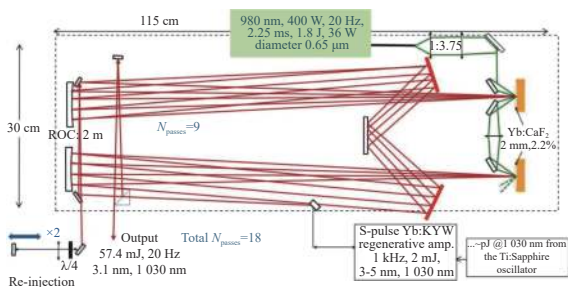


图 8 基于双碟片 4f 系统的 18 通放大器^[8, 11]

Fig. 8 18-pass amplifier based on a dual thin-disk 4f system^[8, 11]

2.1.4 德国宇航中心提出的 4f 系统

2020 年, 德国宇航中心 Zwilich M 等^[12] 使用

基于 4f 中继成像系统的 14 通放大器, 对 75 mW 注入光放大, 获得增益 $G = 1.3$ 。图 9 为其原理图与实物图, 使用圆形对称结构从而获得对称光路且光程相同。

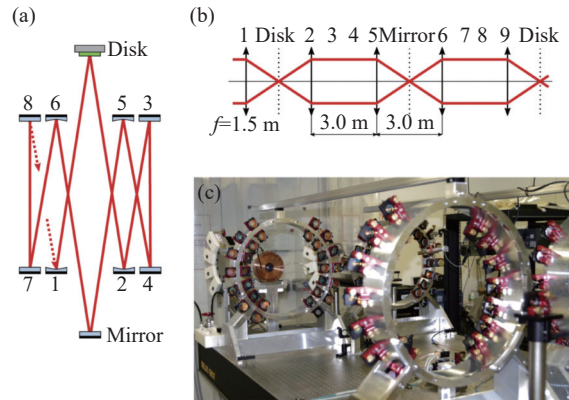


图 9 基于 4f 中继成像系统的 14 通放大器。(a) 单碟片双通放大器俯视图; (b) 非折叠的光路传输示意图; (c) 碟片多通放大器实物图^[12]

Fig. 9 14 pass amplifier based on 4f relay imaging system.

(a) Top view of the single thin-disk dual-pass amplifier; (b) schematic diagram of non-folded optical path transmission; (c) physical diagram of the thin-disk multi-pass amplifier^[12]

2.2 改进的中继成像多通放大器

虽然 4f 中继成像系统结构简单, 且保证中继成像的光斑尺寸不变, 但当系统内存在热透镜时, 存在 2 个不利因素: (1) 系统内最小光斑逐渐减小(见图 3), 导致能量密度逐渐增大直至大于器件的损伤阈值; (2) 系统内的最大光斑逐渐增大直至大于器件尺寸。这对高能多通放大激光器的使用是不利的。

为弥补热透镜效应, 多家机构给出了解决方案, 大体有 2 种: (1) 使用相反面形的端面镜补偿碟片的热透镜效应; (2) 采用液氮制冷减小热效应并减小所需的放大次数。除此之外, 将双中继成像系统放大通数提升至 64 通^[13], 甚至更多。

2.2.1 相反面形端面镜补偿热效应

图 10 展示了德国宇航中心 Speiser J 等^[14] 提出的带有补偿镜、基于中继成像的碟片多通放大器, 其中最右端的端面镜的曲率半径与碟片晶体的热致曲率半径相等, 面形相反, 例如凸面镜对应凹面镜, 从而补偿碟片晶体热效应, 使得待放大激光每次通过碟片晶体时都具有相同的光斑半径与发散角。该多通放大器中碟片共反射待放大激

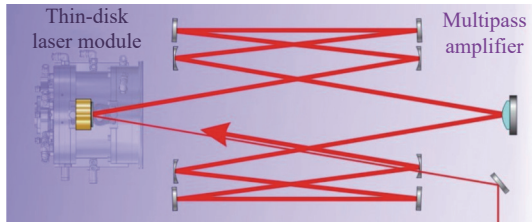


图 10 带有补偿镜、基于中继成像的碟片多通放大器俯视图^[14]

Fig. 10 Top view of the thin-disk multi-pass amplifier with compensation mirror based on relay imaging^[14]

光 12 次, 将 2 kW 连续波入射激光放大至 14 kW, 光束质量 $M^2=10$ 。类似使用补偿镜的报道还包括日本国家量子与辐射科学技术研究所 Yoshihiro Ochi 等的成果^[15]。

2016 年, 耶拿大学 Körner J 等^[16]将中继成像中的一个抛物面镜与补偿镜用 1 个补偿镜代替, 简化了系统的结构, 简化后的光路如图 11 所示。

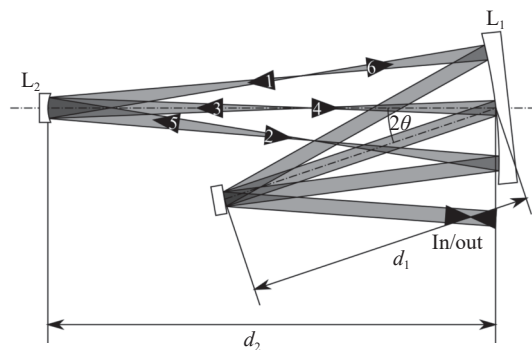


图 11 改进中继成像光路图(使用一个补偿镜代替抛物面镜与补偿镜)^[16]

Fig. 11 Improved relay imaging optical path diagram (Using a compensating mirror instead of a parabolic mirror with a compensating mirror)^[16]

在商用产品方面, 德国 Dausinger + Giesen 公司推出输出能量达 750 mJ、脉宽小于 3 ps、脉冲重复频率为 1~1.75 kHz 的商用激光器, 采用啁啾脉冲放大方案, 系统使用工业设计的真空室^[17], 及真空设计的 TDM30 碟片泵浦模块, 多通放大器基于 4f 中继成像原理, 并使用端面补偿镜补偿碟片形变。

2.2.2 低温 (≤ 100 K) 制冷减小热效应并减小所需的放大次数

低温制冷从应力、热学与光学等多方面改变增益介质的性质, 以 YAG 举例, 在不同温度,

~90 K 与 ~298 K 时, 其机械、热学特性将发生如下改变^[18]: (1) 热导率提升至 4.1 倍; (2) 热致折射率系数 dn/dT 降低至约 1/8, 其中 n 与 T 指折射率与温度; (3) 热膨胀系数降低至约 1/3。这使得热透镜效应与光学畸变大幅下降。光学特性的改变如下(以掺杂浓度为 2% 的 Yb:YAG 单晶举例, 80 K 与 293 K 温度下的性能对比结果)^[18, 19]: (1) 吸收截面峰值强度提升约 3 倍; (2) 发射截面峰值强度提升约 5 倍。这带来更高的吸收与辐射效率, 在保证相同光光转换效率的前提下, 可减小放大通数。总的来说, 低温制冷可在提升光光转换效率的同时, 使系统拥有更佳的光束质量。当然, 低温制冷也会引起吸收、辐射谱宽度 (FWHM) 减小等, 这对于需要宽增益谱的应用是不利的。

2014 年, 德国汉堡大学 Calendron A L 等使用 4f 中继成像+万花筒系统组成的 12 通放大器, 将 Yb:YAG 晶体温度控制在 82~93 K, 实现 50 mJ、100 Hz 重复频率的激光输出^[20], 其光路如图 12 所示。2015 年, 该课题组将输出激光参数提升至单脉冲能量 100 mJ、重频 250 Hz、光谱带宽 0.6 nm、脉宽 700 ps (未压缩)^[9]。

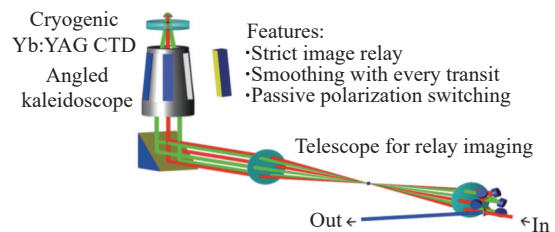


图 12 基于 4f 中继成像+万花筒系统的碟片 12 通放大器^[20]
Fig. 12 Thin-disk 12-pass amplifier based on a 4f relay imaging + kaleidoscope system^[20]

2.3 双中继成像系统

基于中继成像系统的多通放大器为实现更大的放大次数, 需要更大尺寸的透镜或抛物面镜, 系统体积随之增大。为缩小系统体积, 俄罗斯科学院应用物理研究所 Perevezentsev E 等^[13]给出双中继成像传输系统的设计概念, 其光路原理如图 13 所示。他们利用 Körner J 等^[16]提出的概念, 使用 1 个补偿镜代替 1 个抛物面镜+1 个补偿镜, 进一步缩小系统体积。作者使用 Yb:YAG 碟片双中继成像 64 通放大器, 将平均功率为 5 W、脉宽为 2 ns 的入射激光放大至 50 W, 光光转换效率约 10%, 脉冲重复频率为 10 kHz。

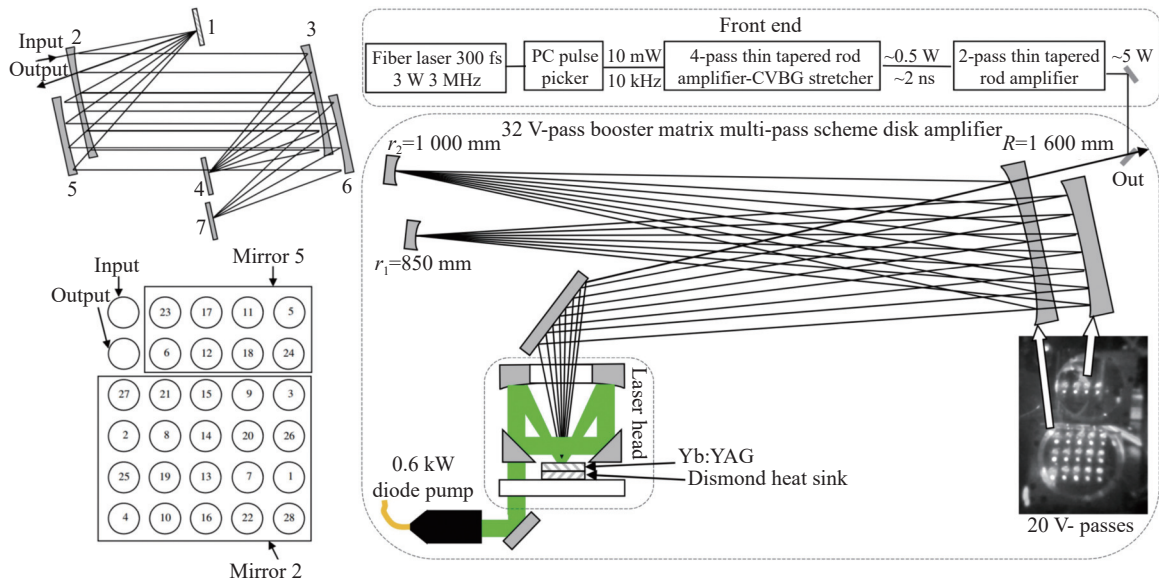


图 13 基于双 4f 中继成像系统的碟片 64 通放大器^[13]

Fig. 13 Thin-disk 64 pass amplifier based on a dual 4f relay imaging system^[13]

3 基于激光器谐振腔设计/光学傅立叶变换概念的多通放大器

3.1 基于激光器谐振腔设计的多通放大器

基于激光器谐振腔设计的多通放大器是通过叠加多个稳定谐振腔得到的, 谐振腔之间通过反射镜阵列连接。如图 14(彩图见期刊电子版)为德国马克斯普朗克量子光学研究所 Antognini A 等^[21]实现的 24 通放大器。其中, 14(a)、14(b)分别是放大器的俯视图与侧面图, 镜片 K_1 、 K_2 与碟片构成一个稳定谐振腔, 利用 24 个平面反射镜构成的反射镜阵列实现 12 个稳定谐振腔的串联, 即实现 24 通放大器。与基于 4f 中继成像的多通放大器相比, 在系统内最小光斑尺寸相同的前提下, 该系统受碟片热透镜效应的影响更小, 且相同放大次数所需的光程更小, 因此系统更紧凑。作者使用该多通放大器将 12 mJ、30 ns 脉冲放大至 48 mJ, 脉冲重复频率为 850 Hz。2013 年, Schuhmann K 将输出能量提升至 150 mJ^[22]。

2009 年, 德国马克斯波恩研究所 Tümmler J 等^[23]展示了类似的 24 通放大器, 将 90 mJ、2 ns 脉宽的啁啾脉冲放大至 320 mJ, 重频 100 Hz。

3.2 基于光学傅立叶变换概念的多通放大器

碟片晶体存在泵浦区域与未泵浦区域, 因此沿碟片晶体径向存在位置相关的增益, 通常也称为“软光阑”^[24]。软光阑入射与出射的光斑半径满

足公式(1):

$$w_{out}^{-2} = w_{in}^{-2} + W^{-2} \quad (1)$$

其中, w_{in} 为入射光斑半径; w_{out} 为出射光斑半径; W^2 为高斯孔径光强透射函数的 $1/e^2$ 半径。

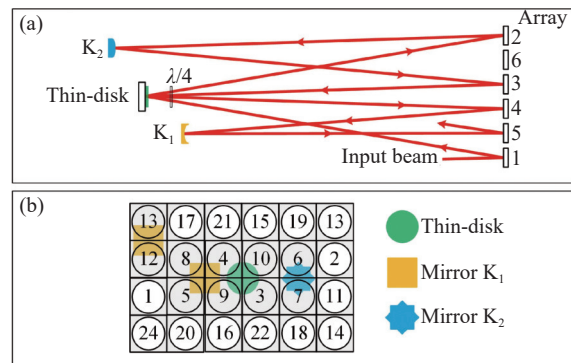


图 14 24 通放大器的光路示意图。(a)光路连续通过 1-disk-2- K_2 -3-disk-4- K_1 -5-disk-6- K_2 -7。其中: 1~7 代表图 14(b)中的镜片编号; K_1 、 K_2 分别表示凹面反射镜 K_1 与凸面反射镜 K_2 ; K_1 - K_2 定义了光学稳定腔。(b)反射镜阵列编号与其他元件的侧面投影位置

Fig. 14 Schematic diagram of the optical path of the 24-pass amplifier. (a) The optical path passes continuously through 1-disk-2- K_2 -3-disk-4- K_1 -5-disk-6- K_2 -7, where 1-7 represents the mirror numbers in Figure 14 (b), K_1 and K_2 represent the concave mirror K_1 and convex mirror K_2 , respectively. K_1 - K_2 defines the optical stable cavity. (b) The reflector array number and the lateral projection position of other elements

虽然 $4f$ 中继传输系统本身不改变传输前后的光斑半径,但由于碟片晶体本身存在“软光阑”效应,故每次通过碟片晶体后,光束的光斑均会变小。

基于 $4f$ 中继成像多通放大器的另一个更重要的缺点是输出光束的发散角强烈依赖于碟片晶体的光焦度变化 ΔV 。出射光束的波前曲率半径 R 与 ΔV 的关系为

$$R_{\text{out},N}^{-1} = N\Delta V, \quad (2)$$

其中 $R_{\text{out},N}^{-1}$ 为第 N 次通过碟片晶体后光束的波前曲率半径倒数。 $R_{\text{out},N}^{-1}$ 与 ΔV 呈线性关系,且随放大次数 N 呈线性累积,因此 ΔV 对光束的发散影响很大。

为解决该问题,瑞士苏黎世联邦理工 Schumann K 等^[24] 提出一种基于光学傅立叶变换的多通放大器。其输出光斑与波前曲率倒数随碟片晶体光焦度的变化如图 15(彩图见期刊电子版)所示。可见在很大的光焦度变化范围内,输出光斑与波前曲率倒数的变化非常小。

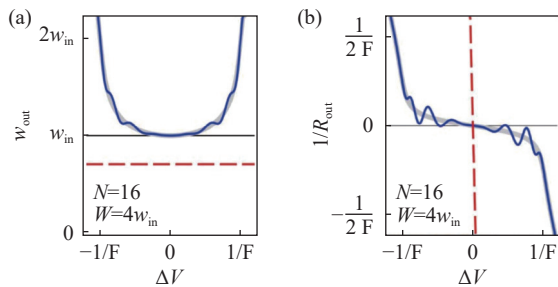


图 15 16 通 $4f$ 放大器与光学傅立叶传输多通放大器的 (a) 输出光斑与 (b) 波前曲率倒数随碟片晶体光焦度的变化。红色虚线代表 $4f$ 多通放大器,蓝色实线代表光学傅立叶传输多通放大器,灰色实线代表理想情况的光学傅立叶传输多通放大器^[24]

Fig. 15 Variation in (a) output spot and (b) wavefront curvature inverse with a diopter of thin-disk for the 16-pass $4f$ amplifier and optical Fourier transmission multi-pass amplifier. The red dashed line represents the $4f$ multi-pass amplifier, the blue solid line represents the optical Fourier transmission multi-pass amplifier, and the gray solid line represents the optical Fourier transmission multi-pass amplifier in ideal circumstances^[24]

图 15 中红色虚线表示 16 通 $4f$ 多通放大器的输出光斑半径与波前曲率倒数随碟片晶体光焦

度的变化,可见输出光斑 w_{out} 与输入光斑 w_{in} 相比显著减小;波前曲率倒数对碟片晶体光焦度的变化非常敏感,几乎呈垂直变化。因此,作者指出基于中继成像的放大器非常适合热透镜较小的低功率激光器,但不适合具有良好输出光束质量的高功率激光器^[24]。

该系统的特点是:(1)必须通过碟片晶体偶数次;(2)变换系统的焦距需满足:

$$F = \frac{\pi w_{\text{in}}^2}{\lambda}. \quad (3)$$

基于光学傅立叶传输的 8 通放大器的光束传播路径如图 16(彩图见期刊电子版)所示。可见,输出光束的半径、发散角几乎与输入光束保持一致。根据公式 (3) 可知,光束半径 $w_{\text{in}}=5.4$ mm,波长 $\lambda=1030$ nm,则变换系统焦距 $F=90$ m。为缩短系统长度,作者利用伽利略望远镜概念,令碟片晶体作为望远镜的一部分,配合望远镜的另一个镜片,成功将 F 缩短至 1.72 m。两个光学傅立叶传输系统之间使用 $4f$ 系统来保证通过碟片晶体数为偶数次,其传输过程如图 17(彩图见期刊电子版)所示。

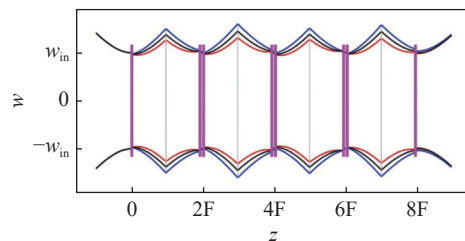


图 16 基于光学傅立叶传输的 8 通放大器的光束传播。(黑线代表碟片晶体光焦度为 0,红线和蓝线代表碟片晶体光焦度分别为 $\pm 1/(40f)$ 的光束传播, f 为 $4f$ 系统的焦距)^[24]

Fig. 16 Beam propagation of an 8-pass amplifier based on optical Fourier transmission. (The black line represents the diopter of the thin-disk at 0. The red and blue lines represent the diopter of the thin-disk are $\pm 1/(40f)$, and f is the focal length of the $4f$ system)^[24]

2019 年,该课题组基于傅立叶变换传输,设计了 40 通放大器,其光路如图 18(彩图见期刊电子版)所示,得到 30 倍的小信号增益,光束质量因子 $M^2=1.16$ ^[25]。

同年,该课题组进一步分析基于傅立叶变换

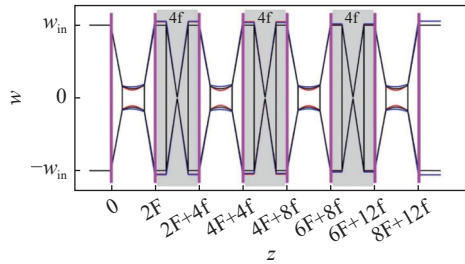


图 17 实际使用的光学傅立叶变换 8 通放大器的光束传播缩短了传输距离。(黑线代表碟片晶体光焦度为 0, 红线和蓝线代表碟片晶体光焦度 $=\pm 1/(40f)$ 对应的光束传播, f 为 $4f$ 系统的焦距)^[24]

Fig. 17 Beam propagation of a practical optical Fourier transform 8-pass amplifier that shortens the transmission distance. (The black line represents the diopter of the thin-disk at 0. The red and blue lines represent the diopter of the thin-disk $= \pm 1/(40f)$, and f is the focal length of the $4f$ system)^[24]

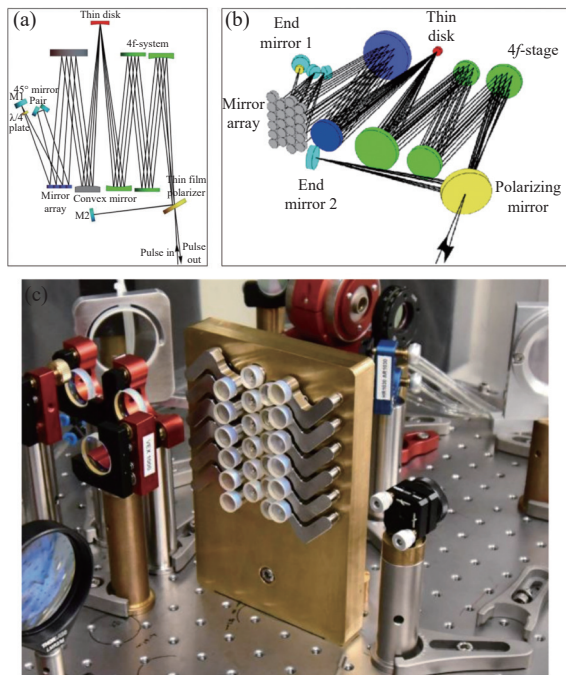


图 18 20 通放大器的(a)俯视^[25]、(b)立体光路图与(c)镜片阵列实物图^[25]

Fig. 18 (a) Top view^[25], (b) stereo optical path diagrams, and (c) physical view of the lens array^[25] of the 20-pass amplifier

传输的多通放大器对于失准的稳定性^[26]。多通放大器的失准有两方面原因: (1) 入射光未对准; (2) 碟片晶体前端空气受热对流带来的光学楔角。为减小空气楔角, Negel J P 等^[27] 提出使用垂直方向的后向反射镜(如图 19(a))代替平面镜, 从

而降低光路高度, 减小热空气导致的光学楔角带来的光路偏离; 另一方面, 与平面镜相比, 后向反射镜可倒置角度和偏移(如图 19(b), 彩图见期刊电子版), 从而被动补偿光路偏斜^[26]。该课题组分析了傅立叶传输多通放大器、后向反射镜代替其中一个平面反射镜、加入主动校准装置(如图 20, 彩图见期刊电子版)这 3 种情况的失准稳定性, 结果如图 21(彩图见期刊电子版)所示, 可见, 傅立叶传输多通放大器具有一定的抗失准稳定性, 加入垂直后向反射镜可将失准稳定性提升 4 倍, 加入主动稳定系统可将失准稳定性提升 1 个量级^[26]。图 21 中, 对于具有主动稳定系统的放大器, 反射镜 M2 已被替换为具有稍高透射率的反射镜, 以从 Q1 和 Q2 生成稳健的误差信号。这会降低放大器的整体增益, 但不会改变其倾斜依赖性。

该作者表示, 之前部分报道的文献 [21, 24, 28-31] 也属于光学傅立叶变换概念。

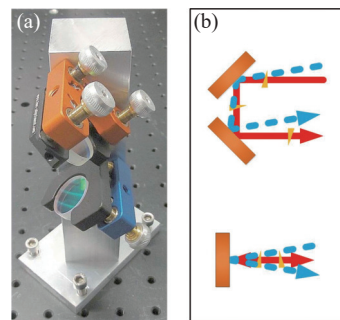


图 19 (a)垂直后向反射镜实物图^[26], (b)垂直后向反射镜与平面反射镜的光路对比

Fig. 19 (a) Physical drawing of the vertical retro-reflector^[26]; (b) comparison of the optical path between the vertical retro-reflector and the plane reflector

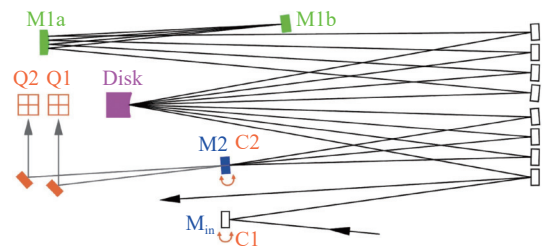


图 20 配备主动稳定系统的傅立叶传输多通放大器^[26]

Fig. 20 Fourier transmission multi-pass amplifier with an active stabilization system^[26]

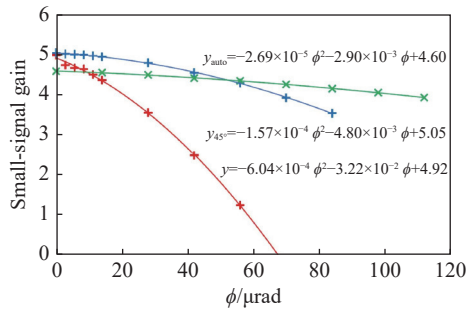


图 21 测量的 3 个八通放大器的小信号增益与碟片偏角 ϕ 的关系。红色线代表常规傅立叶传输多通放大器,蓝色符号取自相同放大器但 M2 镜片被垂直后向反射镜代替,绿色符号代表配备主动稳定系统的傅立叶传输多通放大器^[26]

Fig. 21 The relationship between the small signal gain of three eight-pass amplifiers and the measured deflection angle of the thin-disk. The red symbols represent conventional Fourier transmission multi-pass amplifiers, the blue symbols are taken from the same amplifiers but with the M2 lens being replaced by a vertical rearward reflector, and the green symbols represent the Fourier transmission multi-pass amplifiers equipped with an active stabilization system^[26]

4 基于近准直光束传输的多通放大器

基于 Antognini A 等^[21]的多通放大器方案,德国斯图加特大学 Negel J P 等展示了近准直光传输的 40 通放大器,其不同之处在于除碟片晶体外,放大器内的所有镜片均为平面镜,而碟片晶体的曲率半径很大,因此允许光束在系统内进行超过 20 次的近准直传播。其优势在于最大限度地减少非线性效应并防止高功率下的光学器件损伤。使用该放大器,该作者直接放大脉宽 7 ps、平均功率 50 W、重频 800 kHz 入射光,得到平均功率为 264 W 激光输出,光光转换效率为 23.5%^[32]。同年,该作者改进放大器的设计方案,使用 $1/4 \lambda$ 波片与薄膜偏振片使激光反向放大,放大通数从 40 通倍增至 80 通,光路如图 22 所示^[27]。为尽量减少实验过程中空气湍流的影响,整个放大器周围有一个由丙烯酸玻璃制成的密封外壳,将装置与外部气流隔离。使用后向反射镜对代替平面镜,从而降低光路高度,减小热空气导致的光学楔角带来的光路偏离,最终得到平均功率为 1105 W、脉宽为 7.3 ps、重频为 800 kHz 的激光输出,光束质量 $M^2=1.25$,光光转换效率为 44%^[27]。2014 年,

该作者将平均输出功率提升至 1327 W,重频为 300 kHz,光光转换效率为 45%^[33]。2015 年,该课题组将平均输出功率提升至 1420 W,重频为 300 kHz,光光转换效率为 48%^[34]。同年,该课题组得到平均功率为 635 W、重频为 300 kHz 的径向偏振激光,光光转换效率为 30%^[35]。2016 年,该课题组初步展示了平均输出功率为 2 kW,重频为 300 kHz 皮秒激光的实验结果^[36]。2017 年,该课题组展示了飞秒脉冲直接放大的 60 通放大器,得到平均功率为 400 W、重频为 200 kHz、脉宽为 885 fs、峰值功率为 2.0 GW 的脉冲输出。通过使用线性-径向偏振转换器,该作者获得了平均功率为 235 W、脉宽为 888 fs、峰值功率为 1.2 GW 的径向偏振脉冲光^[37]。2020 年,该课题组使用 2 级串联 60 通放大器,将 105 W 种子光放大至 2050 W,重频为 300 kHz,脉宽为 7.7 ps,光束质量 $M^2=1.5$ 。为隔离种子光,放大器只进行了单向放大,未使用 $1/4 \lambda$ 波片与薄膜偏振片使激光反向放大^[38]。同年,该课题组使用单向 80 通放大器,直接放大重频为 1278 kHz、脉宽为 266 fs、平均功率为 50 W 的种子光,得到平均功率为 528 W、脉宽为 272 fs 激光输出^[39]。

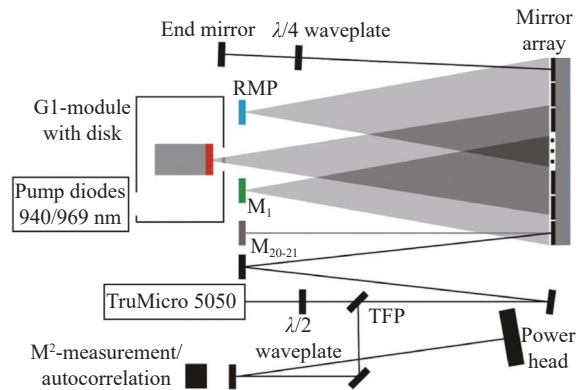


图 22 近准直光束传输多通放大器光路图^[27]

Fig. 22 Optical path diagram of the near collimated beam propagation multi-pass amplifier^[27]

2020 年,通快激光有限公司 Thomas Dietz 等^[40]展示针对工业应用的多通碟片放大器,其特点是配备具有卓越热稳定性和机械稳定性的单片反射镜阵列,如图 23(彩图见期刊电子版)所示,单片反射镜阵列包含 34 个 45° 平面镜,通过一个单独的对准设备将 34 个镜片预对准,入射光束单次通过放大器时,可以被碟片晶体反射 18 次(即 36 通),使用偏振片与波片,入射光可反向再次通

过放大器,即被碟片晶体反射36次。图23展示的第一级放大器将20 W入射光放大至500 W,第二级放大器将功率继续放大至1.9 kW,脉宽为1.3 ps、重频为400 kHz、单脉冲能量为4.8 mJ,光束质量 $M^2=2.3$ 。该激光器还可工作在脉冲簇模式,每个脉冲簇包含4个间距20 ns的脉冲,脉冲簇重复频率为25 kHz,脉冲簇能量为46.7 mJ,对应单脉冲能量为11.7 mJ。

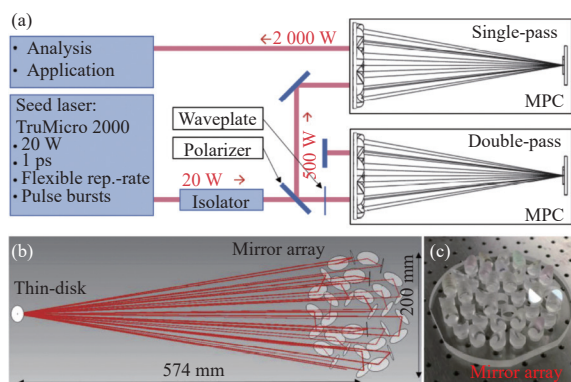


图23 皮秒多通放大器的(a)整体光路布局、(b)多通池光路图与(c)镜片单阵列实物图^[40]

Fig. 23 (a) Overall optical path layout of picosecond multi-pass amplifier, (b) optical path of a multipass cell and (c) picture of a single array of mirrors^[40]

该工作的另一个亮点是在系统内其他镜片均

为平面镜的情况下,通过优化碟片晶体曲率半径,使系统内光路维持近准直的光束传播,如图24(彩图见期刊电子版)所示。

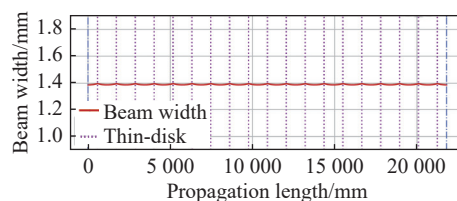


图24 皮秒多通放大器光路中的光斑半径分布^[40]

Fig. 24 Spot radius distribution in the optical path of the picosecond multi-pass amplifier^[40]

2020年,德国通快科学激光有限公司 Herkommmer C等^[41]展示了由4个商用碟片泵浦头构成的多通放大器,光路如图25(彩图见期刊电子版)所示。其中2个泵浦头组成第一级放大器,激光被每个泵浦头放大7次(14通),剩余2个泵浦头组成第二级放大器,激光被每个泵浦头放大4次(8通),每个泵浦头的泵浦功率为2.3 kW,泵浦是占空比为25%、波长为940 nm的准连续光。注入的激光能量为240 mJ、脉宽为1 ns,被放大至800 mJ,脉冲重复频率为1 kHz,最终使用光栅将脉宽压缩至920 fs,脉冲能量为720 mJ,光束质量 $M^2=2.1$,能量稳定性为0.76% RMS。

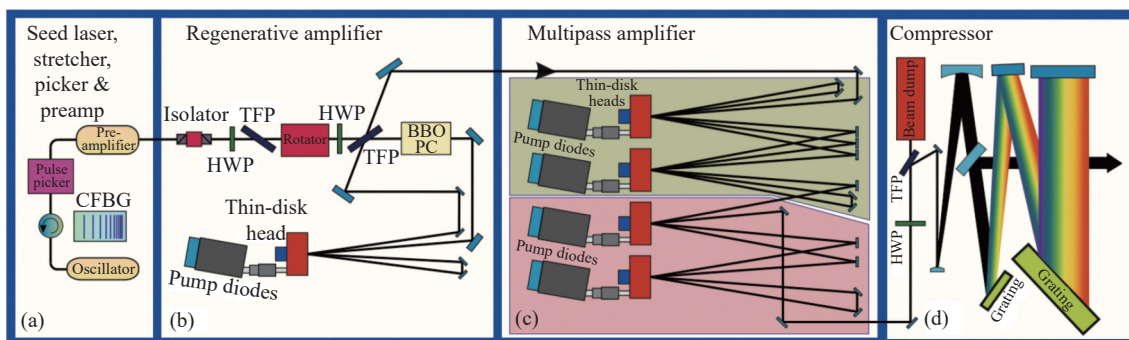


图25 720 mJ皮秒激光器整体光路图^[41]

Fig. 25 Overall optical path of the 720 mJ picosecond laser^[41]

该作者也将本方案与其他多通放大器设计概念相比较,指出:(1)4f结构将碟片所在平面连续中继成像,这有利于在碟片上保持稳定的模式直径^[42],然而,对于强激光脉冲,光路的焦点需要在真空中操作,以防止由于空气电离引起的光击穿;(2)可以通过串联谐振腔来实现稳定的传播,但是代价是沿传播的某些位置的光束直径很小,或者传播距离很长^[24, 28]; (3)通过平衡光束的周期

性发散与聚焦来实现光束的近准直传输,这需要精心选择碟片晶体的光焦度^[37, 40]。而该作者最终对于工作点的碟片热透镜,精心设计光路,实现光束的近准直传输。

5 其他类型的多通放大器

2015年,德国马克斯波恩研究所 Jung R等^[43]

设计的大口径环形放大器, 使用 2 个 Yb:YAG 碟片模块, 系统光路如图 26 所示, 使用真空空间滤波器滤除高阶横模。注入激光脉宽为 1 ns、能量为 300 mJ, 通过碟片 4 次后, 能量放大至 1.07 J, 能量稳定性为 0.4% RMS, 脉冲重复频率为 100 Hz。

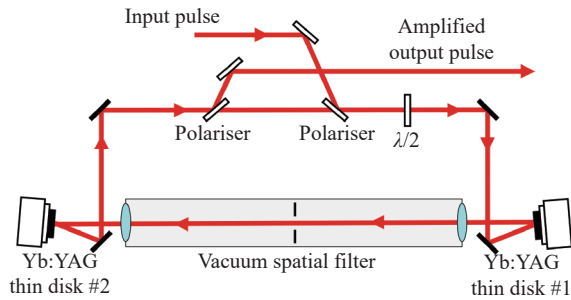


图 26 碟片大口径环形放大器光路图^[43]

Fig. 26 Optical path diagram of the thin-disk large-aperture ring amplifier^[43]

6 讨论

本文概述了部分高能碟片多通放大器的研究进展, 根据成像原理, 可分为: 基于 $4f$ 中继成像的多通放大器; 基于激光器谐振腔设计/光学傅立叶变换概念的多通放大器、基于近准直光束传输的多通放大器和其他类型的多通放大器共 4 类。图 27 整理了部分公开报道的碟片多通放大器输出激光参数, 分析其中数据可得到如下结论:

(1) 在同时保持重频与脉冲能量方面, 按指标排序为近准直传输 > $4f$ 中继成像 > 谐振腔设计 > 其他;

(2) 同时保持脉宽与峰值功率方面, 近准直传输 > $4f$ 中继成像 > 其他 > 谐振腔设计;

(3) 同时保持平均功率与峰值功率方面, 近准直传输 > $4f$ 中继成像 > 其他 > 谐振腔设计。

综上所述, 现阶段基于近准直传输、 $4f$ 中继成像的碟片激光器的综合指标好于谐振腔设计与其他类型。在单项指标方面, 近准直传输、 $4f$ 中继成像、其他类型碟片激光器均实现近 1 J 激光输出, 而其中近准直传输碟片激光器输出近 1 TW 峰值功率。

表 2 总结了各个方案的优缺点, $4f$ 中继成像系统由于在任何热透镜焦距下, 均能复现光斑尺寸, 因此光路设计简单, 但光束发散角随热透镜焦距变化剧烈, 光束焦点剧烈压缩而电离空气, 需

要真空环境运行或令焦点位于真空管内。

$4f$ 中继成像系统中的低温制冷方案将增益介质维持在 <100 K 温度, 相比常温, Yb:YAG 的吸收截面与发射截面峰值强度分别提升至约 3 倍与 5 倍, 单次增益高, 因此仅需较少的放大次数, 光路设计简单。其缺点是需要液氮等低温制冷介质, 同时需要真空环境。

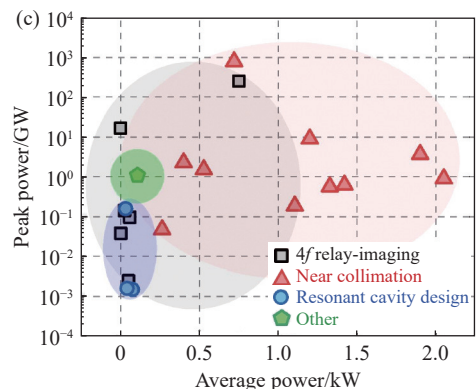
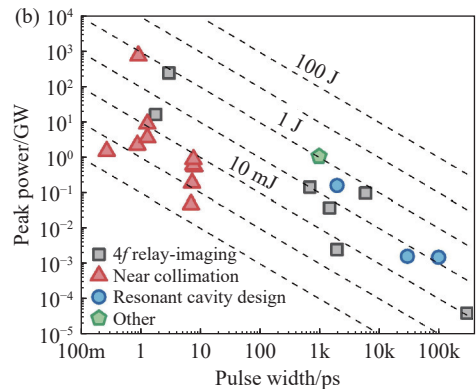
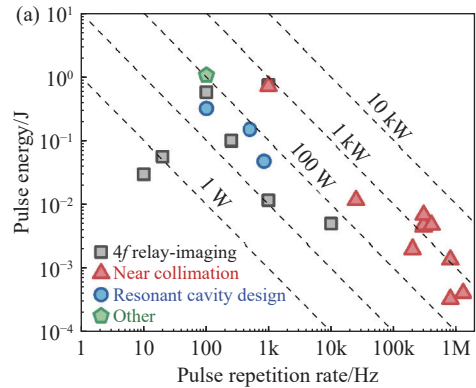


图 27 部分已报告的多通放大器输出激光参数。(a) 脉冲重频 vs 脉冲能量, (b) 脉冲宽度 vs 峰值功率, (c) 平均输出功率 vs 峰值功率

Fig. 27 The output laser parameters of some reported multi-pass amplifiers. (a) Pulse repetition frequency vs pulse energy, (b) pulse width vs peak power, and (c) average output power vs peak power

表2 4种碟片多通放大器的优缺点
Tab.2 Advantages and disadvantages of four types of thin-disk multi-pass amplifiers

方案名称	优点	缺点
4f中继成像	任何热透镜焦距下,均能复现光斑尺寸,光路设计简单	光束发散角随热透镜焦距变化剧烈,光束焦点处容易电离空气,需要真空环境运行或令焦点位于真空管内
4f中继成像—低温制冷	单次增益高、热光性能优异,光路设计简单	需要液氮等低温制冷,同时需要真空环境
谐振腔设计/光学傅立叶变换	抗热透镜变化性能优于4f中继成像	镜片上存在较小尺寸光斑,对镜片损伤阈值要求高;未进行皮秒脉冲放大实验,停留在理论阶段
近准直光束传输	可在空气环境运行,无空气电离	需要精心设计的碟片光焦度
其他	—	—

谐振腔设计/光学傅立叶变换设计的优点是抗热透镜变化性能优于4f中继成像系统,因此系统对于热透镜变化相对不敏感,利于长时间稳定运行。但是,系统内部镜片存在较小光斑,因此对于镜片的损伤阈值要求较高。目前多停留在理论阶段。

参考文献:

- [1] 张世达,耿乙迦. 碲化铋倏逝场锁模器件的超快光纤激光器[J]. *中国光学*, 2022, 15(3): 433-442. ZHANG SH D, GENG Y J. Ultrafast fiber laser based on bismuth telluride evanescent field mode-locked device[J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(3): 433-442. (in Chinese)
- [2] 徐飞,潘其坤,陈飞,等. 中红外Fe²⁺: ZnSe激光器研究进展[J]. *中国光学*, 2021, 14(3): 458-469. XU F, PAN Q K, CHEN F, et al.. Development progress of Fe²⁺: ZnSe lasers[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(3): 458-469. (in Chinese)
- [3] 牛娜,窦微,浦双双,等. 蓝光二极管抽运Pr: YLF腔内倍频连续深紫外激光器[J]. *中国光学*, 2021, 14(6): 1395-1399. NIU N, DOU W, PU SH SH, et al.. Continuous deep ultraviolet laser by intracavity frequency doubling of blue laser diode pumped Pr: YLF[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(6): 1395-1399. (in Chinese)
- [4] NUBBEMEYER T, KAUMANN M, UEFFING M, et al.. 1kW, 200 mJ picosecond thin-disk laser system[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(7): 1381-1384.
- [5] KRÖTZ P, WANDT C, GREBING C, et al.. Towards 2 kW, 20 kHz ultrafast thin-disk based regenerative amplifiers[C]. *Advanced Solid State Lasers 2019*, Optica Publishing Group, 2019: ATH1A. 8.
- [6] MÜLLER D, ERHARD S, RONSIN O, et al.. Thin disk multi-pass amplifier[C]. *Advanced Solid-State Photonics 2003*, Optica Publishing Group, 2003: 278.
- [7] LOESER M, SIEBOLD M, ROESER F, et al.. High energy CPA-free picosecond Yb: YAG amplifier[C]. *Advanced Solid-State Photonics 2012*, Optica Publishing Group, 2012: AM4A. 16.
- [8] FRIEBEL F, PELLEGRINA A, PAPADOPOULOS D N, et al.. 57-mJ 20-Hz multipass laser amplifier based on Yb: CaF₂ crystals[C]. *Advanced Solid State Lasers 2013*, Optica Publishing Group, 2013: ATu3A. 21.
- [9] ZAPATA L E, LIN H, CALENDRON A L, et al.. Cryogenic Yb: YAG composite-thin-disk for high energy and average power amplifiers[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(11): 2610-2613.
- [10] SIEBOLD M, LOESER M, ROESER F, et al.. High-energy, ceramic-disk Yb: LuAG laser amplifier[J]. *Optics Express*, 2012, 20(20): 21992-22000.
- [11] FRIEBEL F, PELLEGRINA A, PAPADOPOULOS D N, et al.. Diode-pumped Yb: CaF₂ multipass amplifier producing

近准直光束传输方案由于近准直传输特性,光束能量密度远离空气击穿阈值,因此不需要真空环境,在实验室空气环境可实现720 mJ能量输出。其缺点是在特定泵浦功率下,碟片晶体需要维持在大曲率聚焦状态,使得光束在近准直状态传输,这对碟片晶体的设计与选取要求苛刻。

7 结束语

综合来看,近准直传输方案似乎是最有前景的碟片激光多通放大器方案,但其使用难度依然较高。其他方案的多通放大器也有各自的困难,例如4f中继成像多通放大器需要的真空环境阻碍其应用范围,谐振腔设计多通放大器镜片中较小光斑阻碍能量继续提升等。未来,随着碟片制冷工艺的提升与泵浦、碟片面形的优化设计,近准直传输方案将获得量级的性能提升。而其他方案仍需要设计方法的优化演进,从而实现输出激光性能的有效提升。

- 50 mJ with dynamic analysis for high repetition rate operation[J]. *Applied Physics B*, 2014, 117(2): 597-603.
- [12] ZWILICH M, EWERS B. Coherent beam combining of multipass thin-disk lasers with active phase control[J]. *OSA Continuum*, 2020, 3(11): 3176-3186.
- [13] PEREVEZENTSEV E, KUZNETSOV I, MUKHIN I, *et al.*. Matrix multi-pass scheme disk amplifier[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(30): 8471-8476.
- [14] SPEISER J. Thin disk lasers: history and prospects[J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9893: 98930L.
- [15] OCHI Y, NAGASHIMA K, MARUYAMA M, *et al.*. Effective multi-pass amplification system for Yb: YAG thin-disk laser[C]. *Laser Applications Conference 2017*, Optica Publishing Group, 2017: JTh2A. 31.
- [16] KÖRNER J, HEIN J, KALUZA M C. Compact aberration-free relay-imaging multi-pass layouts for high-energy laser amplifiers[J]. *Applied Sciences*, 2016, 6(11): 353.
- [17] SMRŽ M, MUŽÍK J, NOVÁK O, *et al.*. Progress in kW-class picosecond thin-disk lasers development at the HiLASE[J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9726: 972617.
- [18] FAN T Y, RIPIN D J, AGGARWAL R L, *et al.*. Cryogenic Yb³⁺-doped solid-state lasers[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2007, 13(3): 448-459.
- [19] KOERNER J, VORHOLT C, LIEBETRAU H, *et al.*. Measurement of temperature-dependent absorption and emission spectra of Yb: YAG, Yb: LuAG, and Yb: CaF₂ between 20 °C and 200 °C and predictions on their influence on laser performance[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2012, 29(9): 2493-2502.
- [20] CALENDRON A L, ZAPATA L E, ÇANKAYA H, *et al.*. Optimized temperature/bandwidth operation of cryogenic Yb: YAG composite thin-disk laser amplifier[C]. *High Intensity Lasers and High Field Phenomena 2014*, Optica Publishing Group, 2014: JW2A. 10.
- [21] ANTOGNINI A, SCHUHMANN K, AMARO F D, *et al.*. Thin-disk Yb: YAG oscillator-amplifier laser, ASE, and effective Yb: YAG lifetime[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2009, 45(8): 993-1005.
- [22] SCHUHMANN K, ANTOGNINI A, KIRCH K, *et al.*. Thin-disk laser for the measurement of the radii of the proton and the alpha-particle[C]. *Advanced Solid State Lasers 2013*, Optica Publishing Group, 2013: ATu3A. 46.
- [23] TÜMMLER J, JUNG R, STIEL H, *et al.*. High-repetition-rate chirped-pulse-amplification thin-disk laser system with joule-level pulse energy[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(9): 1378-1380.
- [24] SCHUHMANN K, KIRCH K, MARSZALEK M, *et al.*. Multipass amplifiers with self-compensation of the thermal lens[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(35): 10323-10333.
- [25] ZEYEN M, ANTOGNINI A, KIRCH K, *et al.*. Compact 20-pass thin-disk amplifier insensitive to thermal lensing[J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 10896: 108960X.
- [26] SCHUHMANN K, KIRCH K, KNECHT A, *et al.*. Passive alignment stability and auto-alignment of multipass amplifiers based on Fourier transforms[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(11): 2904-2912.
- [27] NEGEL J P, VOSS A, AHMED M A, *et al.*. 1.1 kW average output power from a thin-disk multipass amplifier for ultrashort laser pulses[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(24): 5442-5445.
- [28] SCHUHMANN K, AHMED M A, ANTOGNINI A, *et al.*. Thin-disk laser multi-pass amplifier[J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9342: 93420U.
- [29] SCHUHMANN K, KIRCH K, NEZ F, *et al.*. Thin-disk laser scaling limit due to thermal lens induced misalignment instability[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(32): 9022-9032.
- [30] SCHUHMANN K, KIRCH K, ANTOGNINI A. Multi-pass resonator design for energy scaling of mode-locked thin-disk lasers[J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, 10082: 100820J.
- [31] SCHUHMANN K. *The thin-disk laser for the 2S – 2P measurement in muonic helium*[D]. Zurich: ETH Zurich, 2017.
- [32] NEGEL J P, VOSS A, AHMED M A, *et al.*. Thin-disk multipass amplifier for ultrashort pulses with an output power of 264 W[C]. *Advanced Solid State Lasers 2013*, Optica Publishing Group, 2013: AF3A. 9.
- [33] NEGEL J P, VOSS A, AHMED M A, *et al.*. 1.3 kW average output power Yb: YAG thin-disk multipass amplifier for multi-mJ picosecond laser pulses[C]. *CLEO: Science and Innovations 2014*, Optica Publishing Group, 2014: STu10. 2.
- [34] NEGEL J P, LOESCHER A, VOSS A, *et al.*. Ultrafast thin-disk multipass laser amplifier delivering 1.4 kW (4.7 mJ, 1030 nm) average power converted to 820 W at 515 nm and 234 W at 343 nm[J]. *Optics Express*, 2015, 23(16): 21064-21077.
- [35] LOESCHER A, NEGEL J P, GRAF T, *et al.*. Radially polarized emission with 635 W of average power and 2.1 mJ of

- pulse energy generated by an ultrafast thin-disk multipass amplifier[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(24): 5758-5761.
- [36] NEGEL J P, LOESCHER A, BAUER D, *et al.*. Second generation thin-disk multipass amplifier delivering picosecond pulses with 2 kW of average output power[C]. *Advanced Solid State Lasers 2016*, Optica Publishing Group, 2016: ATu4A. 5.
- [37] NEGEL J P, LOESCHER A, DANNECKER B, *et al.*. Thin-disk multipass amplifier for fs pulses delivering 400 W of average and 2.0 GW of peak power for linear polarization as well as 235 W and 1.2 GW for radial polarization[J]. *Applied Physics B*, 2017, 123(5): 156.
- [38] RÖCKER C, LOESCHER A, BIENERT F, *et al.*. Ultrafast green thin-disk laser exceeding 1.4 kW of average power[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(19): 5522-5525.
- [39] RÖCKER C, LOESCHER A, NEGEL J P, *et al.*. Direct amplification of sub-300fs pulses in a versatile thin-disk multipass amplifier[J]. *Optics Communications*, 2020, 460: 125159.
- [40] DIETZ T, JENNE M, BAUER D, *et al.*. Ultrafast thin-disk multi-pass amplifier system providing 1.9 kW of average output power and pulse energies in the 10 mJ range at 1 ps of pulse duration for glass-cleaving applications[J]. *Optics Express*, 2020, 28(8): 11415-11423.
- [41] HERKOMMER C, KRÖTZ P, JUNG R, *et al.*. Ultrafast thin-disk multipass amplifier with 720 mJ operating at kilohertz repetition rate for applications in atmospheric research[J]. *Optics Express*, 2020, 28(20): 30164-30173.
- [42] KEPPLER S, WANDT C, HORNUNG M, *et al.*. Multipass amplifiers of POLARIS[J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8780: 87800I.
- [43] JUNG R, TÜMMLER J, NUBBEMEYER T, *et al.*. Two-channel thin-disk laser for high pulse energy[C]. *Advanced Solid State Lasers 2015*, Optica Publishing Group, 2015: AW3A. 7.

作者简介:



陈毅(1991—),男,新疆昌吉人,博士,工程师,2020年于哈尔滨工业大学获得博士学位,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



孙俊杰(1994—),女,吉林长春人,硕士,助理研究员,2017年于国防科技大学获得硕士学位,主要从事新型激光技术及应用研究。E-mail: 15143115236@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