

## 基于平凹多通腔的非线性脉冲压缩技术\*

李聘滨<sup>1)2)</sup> 滕浩<sup>2)3)†</sup> 田文龙<sup>1)</sup> 黄振文<sup>4)</sup> 朱江峰<sup>1)‡</sup>钟诗阳<sup>2)</sup> 运晨霞<sup>2)</sup> 刘文军<sup>4)</sup> 魏志义<sup>2)3)</sup>

1) (西安电子科技大学光电工程学院, 西安 710071)

2) (中国科学院物理研究所, 北京凝聚态物理国家研究中心, 北京 100190)

3) (中国科学院大学物理学院, 北京 100049)

4) (北京邮电大学理学院, 北京 100876)

(2024 年 1 月 17 日收到; 2024 年 4 月 22 日收到修改稿)

采用平凹多通腔和固体薄片组的非线性脉冲光谱展宽与压缩方案开展了 100 W 皮秒激光非线性脉冲压缩的研究. 以多片熔融石英薄片作为非线性介质, 在平凹腔中皮秒激光通过自相位调制将光谱宽度由 0.24 nm 展宽至 4.8 nm, 用光栅对进行色散补偿压缩, 实现压缩后的脉冲宽度为 483 fs, 对应压缩比为 22, 最终输出飞秒激光的平均功率为 44.2 W. 相对于常规多通腔方案, 该平凹腔结构紧凑, 光路稳定性好, 压缩比高, 非常有利于非线性光谱展宽与压缩的实现.

**关键词:** 多通腔, 自相位调制, 非线性脉冲压缩, 超快激光**PACS:** 42.60.-v, 42.65.Re, 42.65.-k**DOI:** 10.7498/aps.73.20240110

## 1 引言

高功率飞秒激光由于其极窄的脉冲宽度和高峰值功率的优点, 在科研、工业加工、医学等领域有重要的应用<sup>[1]</sup>. 飞秒激光经过 30 多年的发展, 已经由早期的低峰值功率、低重频的第一代发展为高峰值功率、高平均功率的第三代<sup>[2]</sup>. 由于大量应用和大装置项目的需求, 更高峰值功率且高重频的飞秒激光是未来超快光源发展的方向. 自从 1990 年代掺钛蓝宝石 (Ti: Sapphire) 飞秒激光器实现以来, 由于其宽带高增益特性, 采用啁啾脉冲放大技术 (chirped-pulse amplification, CPA)<sup>[3]</sup> 比较容易实现脉冲宽度小于 50 fs<sup>[4,5]</sup> 的激光输出, 也是超快现象研究的主要光源<sup>[6]</sup>, 但受限于绿光激光泵浦源,

其重复频率比较低<sup>[7]</sup>, 也限制了其应用. 掺镱 (Yb) 离子晶体的发射波长为 1  $\mu\text{m}$ , 吸收带宽在 900—1000 nm. 可以采用 InGaAs 半导体激光二极管泵浦, 其中以 Yb:YAG, Yb:KGW 等晶体作为放大增益介质的研究比较多, 结合薄片<sup>[8,9]</sup>、板条<sup>[10–12]</sup>、传统块状<sup>[13]</sup>等放大结构和 CPA 放大方案实现百瓦、百飞秒量级的激光输出. 但这些放大装置相对复杂, 对散热要求高, 其中 Yb:YAG 薄片激光放大器增益模块制作难度大, 而且价格昂贵, 板条激光放大器在一个方向上的热透镜效应严重, 导致光斑呈椭圆输出. 掺 Yb 的光纤放大<sup>[14]</sup>也是一种非常有效的放大方案, 但受限于光纤芯径较小, 光纤激光放大过程中非线性效应明显, 功率的进一步提升受到受激拉曼散射 (SRS) 效应, 模式不稳定, 以及光纤热应力、热损伤效应的限制. 掺钕 (Nd) 离子

\* 国家重点研发计划 (批准号: 2022YFA1604200) 和国家自然科学基金 (批准号: 12034020) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: hteng@iphy.ac.cn

‡ 通信作者. E-mail: jfzhu@xidian.edu.cn

晶体上能级寿命长、量子亏损低、放大效率高,并且采用二极管激光作为泵浦源,通过棒状、板条、碟片等 MOPA 放大方式可以直接放大到千瓦量级<sup>[15-19]</sup>,但输出脉冲宽度通常被限制在皮秒量级,无法直接输出飞秒激光.

为了能够获得高功率飞秒脉冲,研究者们提出了一种新的技术——后压缩技术<sup>[20,21]</sup>.根据傅里叶变换受限脉冲的时间带宽积理论,要获得更短的脉冲输出,首先要将光谱展宽,将高功率超短脉冲激光聚焦到光学介质中,利用非线性效应如自相位调制将入射激光的光谱在两侧进行展宽,展宽过程中引入的色散将由负色散压缩器进行色散补偿,使其压缩至更短的脉冲宽度,从而获得高峰值功率飞秒脉冲激光<sup>[22]</sup>.

迄今为止,激光光谱的展宽已经发展了多种方案,如光子晶体光纤<sup>[23]</sup>、充气空芯光纤<sup>[24-26]</sup>等,但这些方法都受限于光纤波导芯径的尺寸,当高能量的脉冲注入时容易引起强非线性效应,所以光纤波导方案不适用高能量脉冲激光的压缩.为此,研究人员提出了使用多通腔 (multi-pass cell, MPC) 进行光谱展宽的方法,即用两个凹面反射镜构成多通腔,让激光在腔内来回反射,非线性介质放在腔内,激光每通过一次非线性介质就会由于自相位调制展宽光谱,多次通过非线性介质后得到较大的展宽倍数,实现均匀的光谱展宽.这种腔型结构最初由 Herriott 等<sup>[27]</sup>发明,所以也被称为 Herriott 型多通腔.2016 年,Schulte 等<sup>[28]</sup>首次使用固体 MPC 非线性脉冲压缩技术,在输入功率大于 400 W、脉冲宽度 850 fs、重复频率 10 MHz 的条件下,实现

了平均功率 375 W、脉冲宽度 170 fs 的脉冲压缩,压缩比为 5;2020 年, Grebing 等<sup>[29]</sup>使用充惰性气体 (氙气) 的 MPC 非线性脉冲压缩技术,在输入功率为 1040 W、脉冲宽度 200 fs、重复频率 1 MHz 的脉冲参数下,获得了平均功率 1000 W、脉冲宽度 31 fs 的激光输出,压缩比为 6.45;2021 年 Kaumanns 等<sup>[30]</sup>使用充惰性气体的 MPC 装置将单脉冲能量提高至 100 mJ.表 1 列出了近年来单级 MPC 非线性脉冲压缩技术的研究进展<sup>[28,31-39,42]</sup>,可以看出当输入脉冲为飞秒激光,单级压缩比为 5—10;当输入脉冲为皮秒激光,单级压缩比为 20—30.使用多级级联的 MPC 非线性脉冲压缩装置可以获得更好的压缩效果,同时由于每级的压缩比较小则不会出现频谱调制,因此不会出现侧脉冲等基底.2020 年 Balla 等<sup>[40]</sup>使用两级级联的气体 MPC 非线性脉冲压缩技术将 1.2 ps 激光脉冲后压缩至 13 fs,在平均功率 200 W 的脉冲条件下,单级压缩系数约为 40,而在降低功率时,总压缩比大于 90.2023 年 Viotti 等<sup>[41]</sup>采用两级级联固体 MPC 非线性脉冲压缩技术将峰值功率为 0.1 GW 的 1 ps 脉冲激光压缩至 8.2 fs,峰值功率为 2.9 GW,总压缩比高达 122.级联 MPC 技术可以将脉冲宽度压缩至周期量级,但增加了实验的复杂性和成本,并且伴随峰值功率的上升需要增大占地面积.随着 MPC 技术的逐渐成熟,为了能够获得更高平均功率、更高单脉冲能量的超短脉冲激光,同时使实验装置更加紧凑,减小占地面积,新型 MPC 非线性脉冲压缩技术也不断被提出,并且获得了非常好的实验结果.例如对 MPC 腔型的优化,采用凹凸型

表 1 单级 MPC 非线性脉冲压缩技术研究进展  
Table 1. Progress in single-stage MPC nonlinear pulse compression technique.

输入功率/W	输入脉宽/fs	重复频率/MHz	输出功率/W	输出脉宽/fs	压缩比	介质	文献
416	850	10	375	170	5	FS	[28]
95	230	18.5	84	35	6	FS	[31]
34	300	0.2	30	31	10	FS	[32]
112	1240	1	65	39	31	FS	[33]
1.6	12500	0.008	1.23	601	20	FS	[34]
24	275	0.15	24	33	8	Ar	[35]
320	730	0.1	250	56	13	Ar	[36]
550	590	0.5	530	30	19	Ar	[37]
8.6	1200	0.001	7.9	44	27	Ar	[38]
65	138	0.3	51	35	4	Ar	[39]
210	670	0.1	203	134	5	Ar	[42]

MPC<sup>[42]</sup> 和领结式 MPC<sup>[43]</sup> 展宽光谱, 实现高能量、紧凑的实验装置; 也研究了改变输入激光的空间模式<sup>[30]</sup>, 将高斯光束转换为一阶螺旋拉盖尔-高斯光束, 实现了能量为 100 mJ 的 MPC 非线性脉冲压缩; 另外将 MPC 与其他后压缩方法<sup>[44-46]</sup> 结合可以实现更大压缩倍数, 从而获得高功率周期量级飞秒脉冲输出. 综上所述, MPC 非线性脉冲压缩技术不仅可以实现高功率大能量的脉冲压缩, 还具有对入射光束指向性不敏感, 光谱均匀性好, 效率高, 成本和复杂性低, 灵活性好的优点, 因此, 近年来 MPC 非线性脉冲压缩技术成为获得高功率短脉冲的主要方案之一.

本文对传统 MPC 腔型进行了改进, 将常规的双凹面镜腔改进为平凹腔结构, 即构成 MPC 的其中一个凹面镜更换成为平面镜, 同时腔长缩短一半. 为了实现较大的展宽倍数和避免熔融石英玻璃片产生自聚焦效应损坏光学元件, 将熔融石英 (FS) 分成较薄的薄片组插入到平凹腔内. 与现有的固体皮秒多通腔非线性脉冲压缩结果相比较, 平凹多通腔与固体薄片组结合的方案使我们能够在更紧凑的腔型下实现较大的光谱展宽, 获得较高的脉宽压缩倍数. 最终, 采用这种方案将 10.7 ps 的激光脉冲压缩到 483 fs, 压缩比为 22, 压缩后脉冲的平均功率为 44.2 W. 该结果表明, 我们发展的紧凑型平凹腔 MPC 非线性脉冲压缩方案在腔长减半的情况下, 能有效地实现脉冲光谱的展宽与压缩.

## 2 实验装置及结果讨论

### 2.1 平凹 MPC 与常规双凹 MPC 的等价关系

本文设计的平凹 MPC 结构如图 1 所示, 平凹 MPC 展宽系统由一个 2 in (1 in = 2.54 cm) 的凹面反射镜 (CM1) 和一个 2 in 的平面反射镜 (CM2) 组成, CM1 的曲率半径  $R = 300$  mm, CM1 和 CM2 表面镀有 1064 nm 高反射率涂层, 反射率大于 99.8%, 腔长  $L = 212.5$  mm, 通过计算该平凹腔内的本征模分别为  $2\omega_1 = 0.79$  mm 和  $2\omega_0 = 0.43$  mm, 4 片 12 mm 厚的熔融石英片作为非线性介质分别放置在平凹腔内, 两个 3 mm×10 mm 的方形镜作为导入导出镜. 与常规双凹 MPC 相比, 平凹 MPC 的腔长可以缩短一半, 实现更紧凑化的腔型结构.

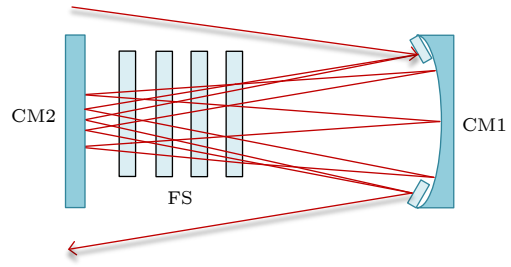


图 1 平凹多通腔结构示意图

Fig. 1. Schematic diagram of plano-cancave multi-pass cavity structure.

根据几何光学可知, 如果两个凹面反射镜的焦距均为  $f$  且间距为  $L$ , 那么常规双凹 MPC 系统等价于间距为  $L$ , 焦距为  $f$  的共轴薄透镜组, 如图 2 所示. 如果一个凹面反射镜的焦距为  $f$ , 并与另一平面反射镜的间距为  $L$ , 那么平凹 MPC 系统等价于间距为  $2L$ , 焦距为  $f$  的共轴薄透镜组, 如图 3 所示. 当常规双凹 MPC 的腔长为  $L$ , 平凹 MPC 的腔长为  $L/2$  时, 它们是等价的. 因此平凹腔 MPC 可以将常规双凹腔腔长缩短一半, 且激光在平凹腔内往返次数是其两倍, 采用 TracePro 软件对其模拟仿真可以验证.

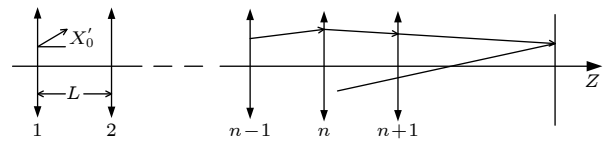


图 2 常规双凹多通腔原理示意图

Fig. 2. Schematic diagram of conventional double concave multi-pass cavity principle.

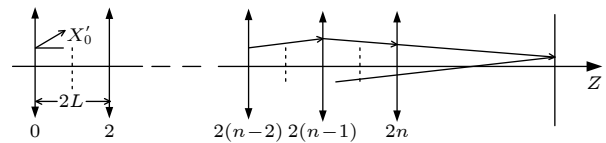


图 3 平凹多通腔原理示意图

Fig. 3. Schematic diagram of plano-cancave multi-pass cavity principle.

在常规双凹多通腔非线性脉冲压缩实验中, 我们知道如果希望在凹面反射镜上构成均匀完美的圆, 需要满足  $2n\theta = 2\mu\pi$ , 其中  $n$  的为激光往返次数,  $\theta = \arccos(1 - L/R)$  为激光传输一次在凹面反射镜上旋转的角度,  $\mu$  为光点旋转的圈数, 由此可知当  $L = R = 300$  mm 时, 激光在腔内往返两次就可以构成一个圆. 因此为了使模拟仿真具有特殊性, 我们取常规双凹 MPC 腔长  $L = 300$  mm, 凹

面反射镜曲率半径  $R = 300$  mm, 平凹 MPC 腔长  $L = 150$  mm, 凹面反射镜曲率半径  $R = 300$  mm. 如图 4 和图 5 所示, 常规双凹 MPC 腔长  $L = 300$  mm, 可以实现腔内光束往返两次, 平凹多通腔腔长  $L = 150$  mm, 可以实现腔内光束往返 4 次, 验证了平凹 MPC 与双凹 MPC 的等价性, 并且平凹 MPC 可以在腔长缩短一半的情况下实现往返通次是常规双凹 MPC 的两倍.

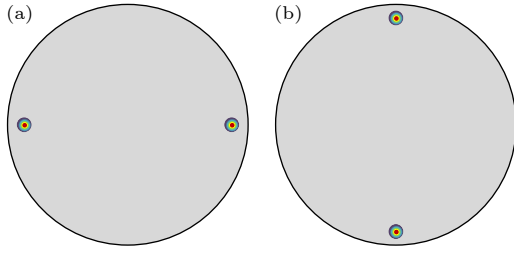


图 4 常规双凹 MPC 光斑分布示意图 (a) 凹面反射镜 1; (b) 凹面反射镜 2

Fig. 4. Schematic diagram of conventional double concave MPC spot distribution: (a) Concave mirror 1; (b) concave mirror 2.

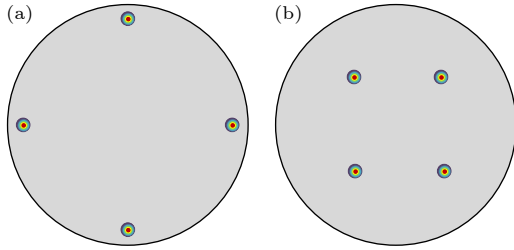


图 5 平凹 MPC 光斑分布示意图 (a) 凹面反射镜 1; (b) 平面反射镜 2

Fig. 5. Schematic diagram of plano-cancave MPC spot distribution: (a) Concave mirror 1; (b) plano mirror 2.

## 2.2 实验装置

本实验是在综合极端条件实验装置阿秒激光实验站上开展的. 图 6 所示为平凹 MPC 非线性脉冲压缩实验示意图. 以 1064 nm 的皮秒激光器作为激光源, 输出平均功率 100 W, 脉冲宽度为 10.7 ps, 重复频率为 500 kHz, 输出光谱如图 7(a) 所示, 中心波长为 1064.64 nm, 光谱半高宽 (FWHM) 为 0.24 nm; 皮秒激光器输出的脉冲宽度使用自相关仪测量, 测量结果如图 7(b) 所示, 使用双曲正割函数拟合, 拟合后的脉冲宽度为 10.7 ps.

整个实验分为 4 个部分, 第 1 部分是皮秒激光器的输出系统, 用于输出平均功率 100 W, 重复频率 500 kHz, 脉冲宽度 10.7 ps 的激光脉冲; 第 2 部分为模式匹配系统, 使入射光的光斑大小和发散角与 MPC 本征模保持一致, 进而获得较好的注入耦合和非线性光谱展宽, 也避免镜片和熔融石英损坏, 模式匹配系统由透镜组 L1, L2, L3 构成; 第 3 部分为 MPC 光谱展宽系统, 模式匹配好的入射光经  $3\text{ mm} \times 10\text{ mm}$  的方形镜导入 MPC 内部, 使其多次往返经过非线性介质, 实现光谱展宽, 平凹 MPC 展宽系统由一个 2 in 的凹面反射镜 (CM1) 和一个 2 in 的平面反射镜 (CM2) 组成, CM1 的曲率半径  $R = 300$  mm, CM1 和 CM2 表面镀有 1064 nm 高反射率涂层, 反射率大于 99.8%, 腔长  $L = 212.5$  mm, 通过计算该平凹腔内的本征模分别为  $2\omega_1 = 0.79$  mm 和  $2\omega_0 = 0.43$  mm, 4 片 12 mm 厚的熔融石英片作为非线性介质, 前后表面镀宽带增透膜, 透过率大于 99.8%, 间距 25 mm, 最左侧

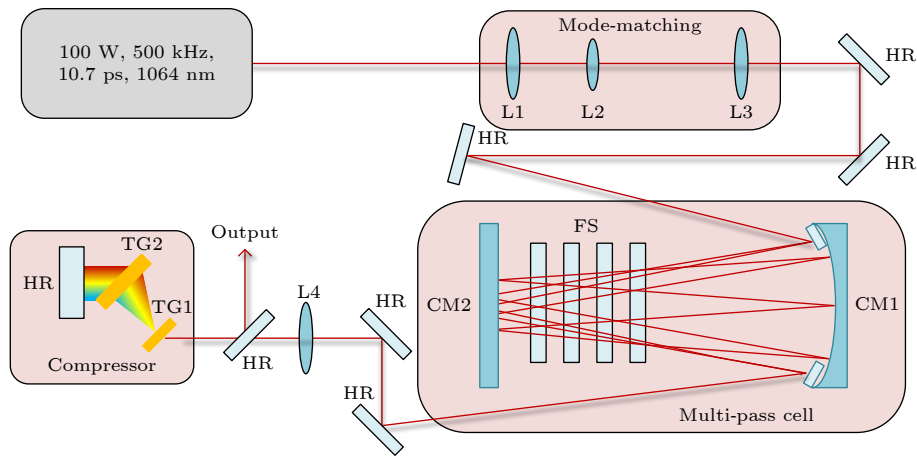


图 6 平凹 MPC 非线性脉冲压缩装置示意图 (HR, 高反镜; L1—L4, 透镜; TG1 和 TG2, 光栅)

Fig. 6. Schematic diagram of plano-cancave MPC pulse nonlinear compression device. HR, high reflective mirrors; L1—L4, Lens; TG1 and TG2, transmission gratings.



熔融石英片与平面反射镜相距 30 mm, 激光在腔内往返 33 次后将其导出; 第 4 部分为脉冲压缩系统, 导出后的光束通过透镜 L4 准直扩束, 使用一对 1000 线/mm 的透射光栅对光谱展宽脉冲进行色散补偿.

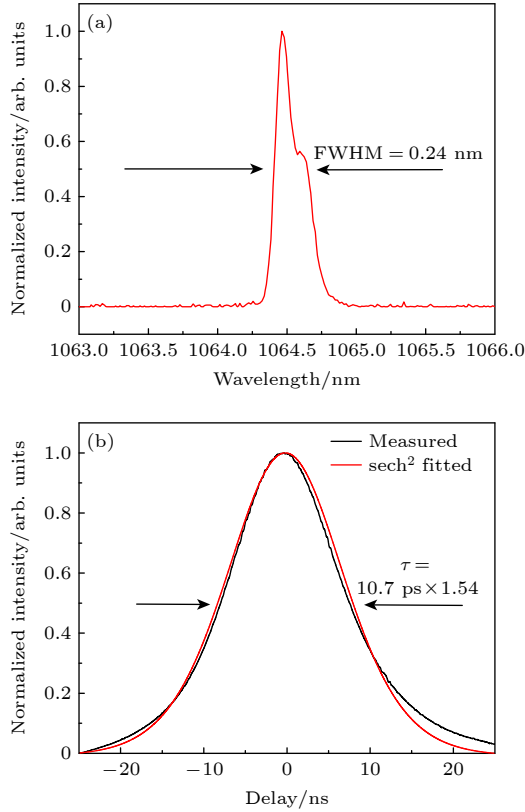


图 7 皮秒激光器输出特性 (a) 输出光谱; (b) 输出脉冲宽度自相关信号

Fig. 7. Output characteristics picosecond of laser: (a) Output spectrum; (b) autocorrelation signal of output pulse width.

### 2.3 实验结果与讨论

将前述的 100 W 皮秒激光经过模式匹配后导入 MPC 腔内部, 4 片 12 mm 的熔融石英片作为非线性介质, 激光在腔内往返 33 次, 66 次通过非线性介质, 使用功率计测量 MPC 输出功率为 53.9 W, MPC 系统的效率为 53.9%, 这里功率损耗的主要原因为两端腔镜与插入的多片非线性介质产生的光学损耗. 假设两端的腔镜的反射率和熔融石英的透过率均为 99.9%, 则 MPC 装置的效率可估计为  $0.999^{330} = 71.88\%$ , 如果两端腔镜的反射率和熔融石英的透过率为 99.8%, 则 MPC 装置的效率可估计为  $0.998^{330} = 51.56\%$ , 所以 MPC 装置的传输效率与光学元件的镀膜有着重要关系. 后续为提高

传输效率, 可以采用透过率大于 99.9% 的融石英片; 或者减少融石英的片数, 为增强非线性效应可以增大单片融石英的厚度或者增加激光在腔内的往返次数; 另外还可以定制腔镜中平面镜的镀膜参数, 使用熔融石英作为基底, 一面镀有透过率大于 99.9% 的高透膜, 一面镀有反射率大于 99.9% 的高反膜, 平面镜既可以作为腔镜, 也可以作为非线性介质, 提高传输效率. 使用光谱仪 (OSA, YOKOGAWAAQ6370C) 测量 MPC 展宽后的光谱, 展宽后的光谱与初始光谱对比如图 8 所示, 其中红色曲线为 MPC 展宽后的光谱, 黑色曲线为初始光谱.

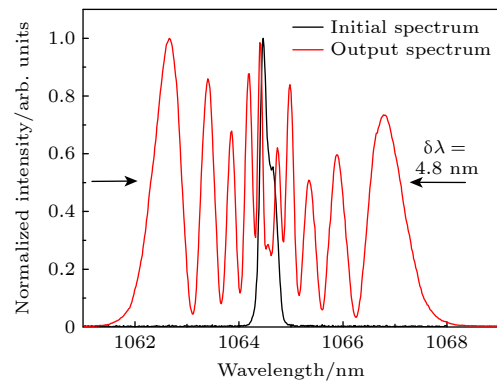


图 8 MPC 展宽前后的光谱示意图

Fig. 8. Spectral schematic before and after MPC broadening.

在光谱展宽过程中, 通过控制腔内模式和功率大小, 使得皮秒激光在熔融石英片内实现光谱展宽的三阶非线性效应主要为自相位调制, 色散主要为线性啁啾, 由于输入光源为皮秒脉冲, 产生的二阶色散的量级大致为  $10^6 \text{ fs}^2$ , 我们选用透射光栅对进行色散补偿. 从 MPC 腔输出的激光脉冲以  $32.1^\circ$  的利特罗角入射到透射光栅上, 当两个光栅的距离为 190 mm 时, 光栅对提供的二阶色散和三阶色散分别为  $-1.336 \times 10^6 \text{ fs}^2$  和  $4.058 \times 10^6 \text{ fs}^3$ , 单个光栅的衍射效率为 97%, 经过 4 次透射光栅后, 光栅对的衍射效率为 88.5%. 使用自相关仪 (APE, pulse check 50) 测量压缩后的脉冲宽度, 经过优化后测得输出脉冲宽度为 483 fs, 如图 9 所示, 脉冲压缩比大于 22 倍. 经过光栅对压缩后的输出平均功率为 44.2 W, 整个系统的总传输效率为 44.2%.

使用  $M^2$  光束质量分析仪分别对皮秒激光器的输出光束质量和 MPC 输出光束质量进行测量, 测量结果如图 10 所示, 图 10(a) 为皮秒激光器在

水平方向和垂直方向上的光束质量, 分别为  $M_x^2 = 1.320$ ,  $M_y^2 = 1.290$ ; 图 10(b) 为 MPC 在水平方向和垂直方向上的光束质量, 分别为  $M_x^2 = 1.447$ ,  $M_y^2 = 1.435$ , 可以看出, 光束质量经过 MPC 后略有下降, 但是变化不大, 由此证明采用我们设计的平凹 MPC 非线性脉冲压缩系统不会导致输出光束质量恶化.

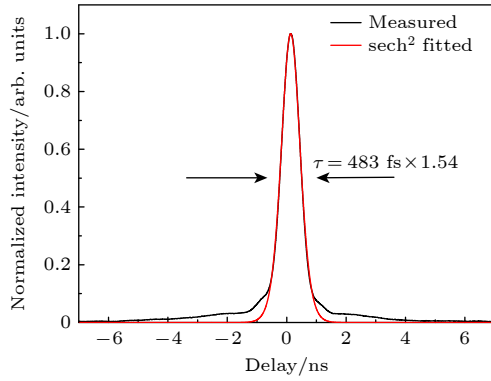


图 9 MPC 压缩后的脉冲自相关曲线

Fig. 9. Measured autocorrelation signal of output pulse after MPC compression.

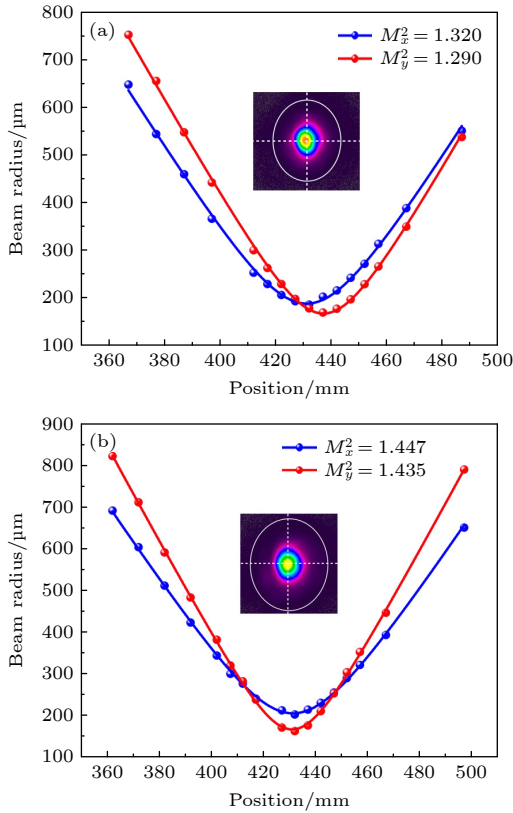


图 10 输出光束质量 (a) 皮秒激光器输出光束质量; (b) MPC 输出光束质量

Fig. 10. Output beam quality: (a) Picosecond laser output beam quality; (b) MPC output beam quality.

### 3 结 论

本文报道了一种基于平凹 MPC 与固体薄片组结合的非线性脉冲压缩方案. 平面反射镜与凹面反射镜构成多通腔结构, 4 片 12 mm 厚的熔融石英片作为非线性介质用于展宽光谱, 放置于平凹腔内, 光谱展宽后的脉冲采用一对透射光栅进行色散补偿实现压缩. 以平均功率 100 W, 重复频率 500 kHz, 脉冲宽度 10.7 ps 的激光注入到平凹 MPC 腔中, 经过 66 次通过熔融石英非线性介质, 光谱从 0.24 nm 展宽至 4.8 nm, 使用一对刻线为 1000 线/mm 的透射光栅进行补偿色散, 脉冲宽度由 10.7 ps 压缩至 483 fs, 压缩比为 22, 最终由 MPC 输出的功率为 53.9 W, 经过光栅压缩器后输出功率为 44.2 W. 从 MPC 腔输出激光的光束质量为  $M_{xy}^2 = 1.447 \times 1.435$ , 与输入的光束质量相差不大. 实验结果表明, 采用改进的平凹 MPC 装置结构紧凑, 光路稳定性好, 压缩比高, 为实现高功率飞秒激光光源提供了新的方案. 由该方案产生的高功率飞秒激光将在微纳精密加工、高精度医疗手术、非线性光学和超快动力学等领域有着广泛的应用前景.

感谢综合极端条件实验装置对本文的支持.

### 参考文献

- [1] Mourou G 2019 *Rev. Modern Phys.* **91** 030501
- [2] Fattahi H, Barros H G, Gorjan M, Nubbemeyer T, Alsaif B, Teisset C Y, Schultze M, Prinz S, Haefner M, Ueffing M, Alismail A, Vámos L, Schwarz A, Pronin O, Brons J, Geng X T, Arisholm G, Ciappina M, Yakovlev V S, Kim D E, Azzeer A M, Karpowicz N, Sutter D, Major Z, Metzger T, Krausz F 2014 *Optica* **1** 45
- [3] Strickland D, Mourou G 1985 *Opt. Commun.* **55** 447
- [4] Brabec T, Krausz F 2000 *Rev. Modern Phys.* **72** 545
- [5] Kärtner F X, Morgner U, Ell R, Ippen E P, Fujimoto J G, Scheuer V, Angelow, Tschudi T 2001 *The 4th Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics Chiba, Japan, July 15–19, 2001* pTuJ3\_1
- [6] Li W Q, Gan Z B, Yu L H, Wang C, Liu Y Q, Guo Z, Xu L, Xu M, Hang Y, Xu Y, Wang Z Y, Huang P, Cao P, Yao B, Zhang X B, Chen L R, Tang Y H, Li S, Liu X Y, Li S M, He M Z, Yin D J, Liang X Y, Leng Y X, Li R X, Xu Z Z 2018 *Opt. Lett.* **43** 5681
- [7] Bagnoud V, Salin F 2000 *Appl. Phys. B* **70** S165
- [8] Sun D, Gao J, Wang W, Du X, Gao Y X, Gao Z C, Liang X Y 2021 *IEEE Photonics J.* **13** 1
- [9] Schneider W, Ryabov A, Lombosi C S, Metzger T, Major Z S, Fülöp Z A, Baum P 2014 *Opt. Lett.* **39** 6604
- [10] Wang D, Du Y L, Wu Y C, Xu L, An X C, Cao L Q, Li M, Wang J T, Sahng J L, Zhou T J, Tong LX, Gao Q S, Zhang

- K, Tang C, Zhu R H 2018 *Opt. Lett.* **43** 3838
- [11] Gao Q S, Zhou T J, Shang J L, Wang D, Li M, Wu Y C, Wang J T, Wang Y N, Xu L, Du Y L, Chen X M, Zhang K, Tang C 2020 *High Power and Particle Beams* **32** 121009
- [12] Russbueldt P, Mans T, Weitenberg J, Hoffmann H D, Poprawe P 2010 *Opt. Lett.* **35** 4169
- [13] Veselis L, Bartulevicius T, Madeikis K, Michailovas A, Rusteika N 2018 *Opt. Express* **26** 31873
- [14] Knall J M, Engholm M, Boilard T, Bernier M, Dignonnet M J 2021 *Phys. Rev. Lett.* **127** 013903
- [15] Gao Q S, Hu H, Pei Z P, Tong L X, Zhou T J, Tang C 2012 *Chin. J. Lasers* **39** 7 (in Chinese) [高青松, 胡浩, 裴正平, 童立新, 周唐建, 唐淳 2012 中国激光 **39** 7]
- [16] Dietz T, Jenne M, Bauer D, Scharun M, Sutter D, Killi A 2020 *Opt. Express* **28** 11415
- [17] Wang H L, Dong J, Liu H Y, Hao J J, Zhu X, Zhang J W 2021 *Acta Photonica Sin.* **50** 117 (in Chinese) [王海林, 董静, 刘贺言, 郝婧婕, 朱晓, 张金伟 2021 光子学报 **50** 117]
- [18] Nubbemeyer T, Kaumanns M, Ueffing M, Gorjan M, Alismail A, Fattahi H, Brons J, Pronin O, Barros H G, Major Z, Metzger T, Sutter D, Krausz F 2017 *Opt. Lett.* **42** 1381
- [19] Dong X Y, Li P X, Li Y, Wang T T, Yang M 2021 *Chin. J. Lasers* **48** 41 (in Chinese) [董雪岩, 李平雪, 李舜, 王婷婷, 杨敏 2021 中国激光 **48** 41]
- [20] Khazanov E A 2022 *Quantum Electron.* **52** 208
- [21] Nagy T, Simon P, Veisz L 2021 *Adv. Phys. X* **6** 1845795
- [22] Viotti A L, Seidel M, Escoto E, Rajhans S, Leemans W P, Hartl I, Heyl C M 2022 *Optica* **9** 197
- [23] Jocher C, Eidam T, Hädrich S, Limpert J, Tünnermann A 2012 *Opt. Lett.* **37** 4407
- [24] Nisoli M, De Silvestri S, Svelto O 1996 *Appl. Phys. Lett.* **68** 2793
- [25] Hädrich S, Krebs M, Hoffmann A, Klenke A, Rothhardt J, Limpert J, Tünnermann A 2015 *Light Sci. Appl.* **4** e320
- [26] Rothhardt J, Hädrich S, Carstens H, Herrick N, Demmler S, Limpert J, Tünnermann A 2011 *Opt. Lett.* **36** 4605
- [27] Herriott D, Kogelnik H, Kompfner R 1964 *Appl. Opt.* **3** 523
- [28] Schulte J, Sartorius T, Weitenberg J, Vernaleken A, Russbueldt P 2016 *Opt. Lett.* **41** 4511
- [29] Grebing C, Müller M, Buldt J, Stark H, Limpert J 2020 *Opt. Lett.* **45** 6250
- [30] Kaumanns M, Kormin D, Nubbemeyer T, Pervak V, Karsch S 2021 *Opt. Lett.* **46** 929
- [31] Weitenberg J, Saule T, Schulte J, Russbueldt P 2017 *IEEE J. Quantum Electron.* **53** 1
- [32] Raab A K, Seidel M, Guo C, Sytceovich I, Arisholm G, Anne L H, Cord L A, Viotti A L 2022 *Opt. Lett.* **47** 5084
- [33] Seidel M, Balla P, Li C, Arisholm G, Winkelmann L, Hartl I, Heyl C M 2022 *Ultraf. Sci.* **17** 9754919
- [34] Song J J, Wang Z H, Wang X Z, Lü R C, Teng H, Zhu J F, Wei Z Y 2021 *Chin. Opt. Lett.* **19** 093201
- [35] Lavenu L, Natile M, Guichard F, Zaouter Y, Delen X, Hanna M, Mottay E, Georges P 2018 *Opt. Lett.* **43** 2252
- [36] Viotti A L, Alisauskas S, Tünnermann H, Escoto E, Seidel M, Dudde K, Manschwetus B, Hartl I, Christoph M H 2021 *Opt. Lett.* **46** 4686
- [37] Russbueldt P, Weitenberg J, Schulte J, Meyer R, Meinhardt C, Hoffmann H D, Poprawe R 2019 *Opt. Lett.* **44** 5222
- [38] Rajhans S, Velpula P K, Escoto E, Shalloo R, Farace B, Pöder K, Osterhoff J, Leemans W P, Hartl I, Heyl C M 2021 *Advanced Solid State Lasers* Washington, DC, USA, October 3–7, 2021 paper AW2A.6
- [39] Gierschke P, Grebing C, Abdelaal M, Lenski M, Buldt J, Wang Z, Heuermann T, Mueller M, Gebhardt M, Rothhardt J, Limpert J 2022 *Opt. Lett.* **47** 3511.
- [40] Balla P, Wahid A B, Sytceovich I, Guo C, Viotti A L, Silletti L, Cartella A, Alisauskas S, Tavakol H, Grosse-Wortmann U, Schönberg A, Seidel M, Trabattori A, Manschwetus B, Lang T, Calejari F, Couairon A, L'Huillier A, Arnold C L, Hartl I, Heyl C M 2020 *Opt. Lett.* **45** 2572
- [41] Viotti A L, Li C, Arisholm G, Winkelmann L, Hartl I, Heyl C M, Seidel M 2023 *Opt. Lett.* **48** 984
- [42] Omar A, Vogel T, Hoffmann M, Saraceno C J 2023 *Opt. Lett.* **48** 1458
- [43] Heyl C M, Seidel M, Escoto E, Schönberg A, Carlström S, Arisholm G, Lang T, Hartl I 2022 *J. Phys. Photonics* **4** 014002
- [44] Tsai C L, Meyer F, Omar A, Wang Y C, Liang A X, Lu C H, Hoffmann M, Yang S D, Saraceno C J 2019 *Opt. Lett.* **44** 4115
- [45] Lavenu L, Natile M, Guichard F, Délen X, Hanna M, Zaouter Y, Georges P 2019 *Opt. Express* **27** 1958
- [46] Daniault L, Cheng Z, Kaur J, Hergott J F, Réau F, Tcherbakoff O, Daher N, Délen X, Hanna M, Rodrigo L M 2021 *Opt. Lett.* **46** 5264

# Nonlinear pulse compression technique based on in multi-pass plano-cancave cavity\*

Li Pin-Bin <sup>1)2)</sup> Teng Hao <sup>2)3)†</sup> Tian Wen-Long <sup>1)</sup> Huang Zhen-Wen <sup>4)</sup>  
 Zhu Jiang-Feng <sup>1)‡</sup> Zhong Shi-Yang <sup>2)</sup> Yun Chen-Xia <sup>2)</sup>  
 Liu Wen-Jun <sup>4)</sup> Wei Zhi-Yi <sup>2)3)</sup>

1) (*School of Telecommunications Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China*)

2) (*Beijing National Laboratory for Condensed Matter Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

3) (*School of Physical Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

4) (*School of Science, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China*)

( Received 17 January 2024; revised manuscript received 22 April 2024 )

## Abstract

Ultrafast femtosecond laser system with hundreds of microjoules of energy, operating at a repetition frequency of several kilohertz, has very important applications in many fields such as medicine, mid-infrared laser generation, industrial processing, and vibrational spectroscopy. The chirped pulse amplification technique provides a feasible path to obtain light sources with those parameters. However, the use of chirped pulse amplification increases the technical complexity and cost of the laser system. Recently, the proposal of a multi-pass cell (MPC) nonlinear pulse compression technique has enabled us to obtain high power ultrafast femtosecond pulses with reduced technical complexity and cost. The device requires only two concave mirrors and a nonlinear medium in between. In the past seven years, the multi-pass cell nonlinear pulse compression technique has made great progress, making it possible to obtain ultrashort pulses with average power of more than a few kW and peak power of tens to hundreds of TW.

In this work, we achieve nonlinear pulse compression of a 100-W picosecond laser by using an improved nonlinear pulse compression scheme that combines a hybrid of a plano-cancave multi-pass cell and multi-thin-plate. Using fused silica plates in plano-cancave cavity, the spectral bandwidth (FWHM) of input picosecond laser is broadened from 0.24 nm to 4.8 nm due to self-phase modulation effect, the pulse is compressed to 483 fs by dispersion compensation using grating pairs, which corresponds to a compression factor of 22, and the final output power of 44.2 W is obtained. Compared with traditional MPC, the plano-cancave cavity scheme we developed is a very promising solution for nonlinear compression due to its compactness, more stability and large compression ratio.

**Keywords:** multi-pass cell, self-phase modulation, nonlinear pulse compression, ultrafast laser

**PACS:** 42.60.-v, 42.65.Re, 42.65.-k

**DOI:** [10.7498/aps.73.20240110](https://doi.org/10.7498/aps.73.20240110)

\* Project supported by the National Key R&D Program of China (Grant No. 2022YFA1604200) and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 12034020).

† Corresponding author. E-mail: [hteng@iphy.ac.cn](mailto:hteng@iphy.ac.cn)

‡ Corresponding author. E-mail: [jfzhu@xidian.edu.cn](mailto:jfzhu@xidian.edu.cn)





## 基于平凹多通腔的非线性脉冲压缩技术

李聘滨 滕浩 田文龙 黄振文 朱江峰 钟诗阳 运晨霞 刘文军 魏志义

### Nonlinear pulse compression technique based on in multi-pass plano-cancave cavity

Li Pin-Bin Teng Hao Tian Wen-Long Huang Zhen-Wen Zhu Jiang-Feng Zhong Shi-Yang Yun Chen-Xia Liu Wen-Jun Wei Zhi-Yi

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 124206 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20240110

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240110>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 基于色散管理的自相位调制光谱展宽滤波技术

Dispersion management dual-pass self-phase modulation-enabled spectral selection

物理学报. 2023, 72(9): 094205 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230088>

#### 基于锯齿波脉冲抑制自相位调制的高功率窄线宽单频脉冲光纤激光放大器

High-power narrow-linewidth single-frequency pulsed fiber amplifier based on self-phase modulation suppression via sawtooth-shaped pulses

物理学报. 2021, 70(21): 214202 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210496>

#### 基于自相位调制光谱选择驱动的无标记自发荧光多倍频显微镜系统

Simultaneous label-free autofluorescence-multiharmonic microscopy driven by femtosecond sources based on self-phase modulation enabled spectral selection

物理学报. 2022, 71(10): 104204 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212282>

#### 基于脉冲非线性压缩技术的71.3 W飞秒激光产生

Pulse nonlinear compression generated 71.3 W femtosecond laser

物理学报. 2023, 72(14): 144205 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230746>

#### 基于二维材料异质结可饱和吸收体的超快激光器

Ultrafast pulse lasers based on two-dimensional nanomaterial heterostructures as saturable absorber

物理学报. 2020, 69(18): 188102 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20201235>

#### 时空耦合畸变对超快超强激光参数测试及性能评估的影响

Influence of spatiotemporal coupling distortion on evaluation of pulse-duration-characterization and focused intensity of ultra-fast and ultra-intensity laser

物理学报. 2022, 71(17): 174204 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220563>