

激光与光电子学进展

基于多层薄板的飞秒激光非线性压缩及光束质量优化研究(特邀)

牛昊天¹, 邹锦阳¹, 宋雨泽¹, 黄玉涛³, 胡明列^{1,2*}¹天津大学精密仪器与光电子工程学院超快激光研究室, 天津 300072;²天津大学佐治亚理工深圳学院, 广东 深圳 518055;³北京盛镭科技有限公司, 北京 101102

摘要 非线性压缩技术能在展宽光谱的同时有效减小时域脉宽。基于多层薄板实现光谱展宽,通过理论仿真分析光在空间中的传播特性、光经过熔融石英片时的光谱展宽情况,以及在不损伤材料的前提下获得最大光谱展宽量的熔融石英片最佳摆放位置。实验中,将单脉冲能量为 250 μJ 、重复频率为 20~200 kHz 的掺镱激光器脉宽从 570 fs 压缩至 107 fs,压缩后的横向光束质量因子为 1.384,纵向光束质量因子为 1.413,光斑椭圆度达到 0.978,功率压缩效率约为 78.5%。此外,通过分析不同功率下束腰的变化及其对光束质量的影响,探讨了如何在实现较窄脉冲的同时保持较高的光束质量,并提出了优化策略。

关键词 超短脉冲激光; 非线性固体压缩; 自相位调制; 色散补偿; 超快光学

中图分类号 O437 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP250851

Nonlinear Compression and Beam Quality Optimization of Femtosecond Laser Based on Multilayer Thin Plate (Invited)

Niu Haotian¹, Zou Jinyang¹, Song Yuze¹, Huang Yutao³, Hu Minglie^{1,2*}¹Ultrafast Laser Laboratory, School of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;²Georgia Tech Shenzhen Institute, Tianjin University, Shenzhen 518055, Guangdong, China;³Beijing Superwave Technology Co., Ltd., Beijing 101102, China

Abstract The nonlinear compression technique reduces the time-domain pulse width while simultaneously broadening the spectrum. This study employs multilayer thin plate for spectrum broadening. Through theoretical simulations, the spatial propagation of light, spectrum broadening upon traversing fused silica plates, and the optimal placement of these plates to achieve maximum spectral broadening without material damage are determined. Experimental results demonstrate that pulse width of a ytterbium-doped laser with a single pulse energy of 250 μJ and a repetition rate range of 20~200 kHz is compressed from 570 fs to 107 fs. After compression, the lateral beam quality factor is 1.384, the longitudinal beam quality factor is 1.413, the spot ellipticity is 0.978, and the compression efficiency is about 78.5%. By analyzing variations in beam waist at different power levels and their effects on beam quality, this work investigates methods to enhance beam quality while achieving narrower pulses and proposes corresponding optimization strategies.

Key words ultrashort pulse laser; nonlinear solid compression; self phase modulation; dispersion compensation; ultrafast optics

1 引言

超短脉冲激光具有极短的脉宽和极高的峰值功率,可以实现高时间分辨率与高空间分辨率的精确控制,在驱动高次谐波产生和多波长泵浦探测等研究中

发挥着至关重要的作用^[1-2]。掺镱光纤激光器由于其独特的能级结构与散热性能,表现出较低的量子损耗^[3],其平均功率可轻松突破百瓦甚至千瓦量级^[4]。然而,由于镱离子(Yb^{3+})的增益带宽较窄,其输出时域脉宽仅能达到皮秒或百飞秒量级,难以满足高精密加工

收稿日期: 2025-03-19; 修回日期: 2025-04-16; 录用日期: 2025-04-18; 网络首发日期: 2025-04-21

通信作者: *huminglie@tju.edu.cn

等领域的需求。为缩短激光脉宽,研究人员提出一种非线性压缩方法。对于傅里叶变换极限脉冲,其时域脉宽与光谱宽度的乘积为常数,被称为时间带宽积。因此,脉冲的时域脉宽与光谱宽度成反比关系^[5]。为获得更窄的脉宽,需先对光谱进行展宽。首先通过非线性效应使脉冲在时域上产生相位变化,形成啁啾,从而实现光谱展宽,随后通过色散补偿消除啁啾,即可生成更窄的脉宽。这种非线性压缩方法被称为后压缩(放大后压缩)^[6]。

随着非线性压缩技术的快速发展,各种新型压缩方法不断涌现,根据展宽方式的不同,可分为多层薄板展宽^[7]、多通腔展宽^[8]、成丝展宽^[9]和波导展宽^[10]。其中,多通腔的腔体较大、对指向性要求极高,且需解决多次通过带来的散热问题,空芯光纤存在端面指向性要求高、对弯折损耗敏感和制备工艺复杂等问题。相比之下,多层薄板具有热量分布均匀、结构紧凑、易于集成到工业激光器等优势,更适合工业化生产。非线性压缩的可用介质较广泛,满足特定条件的固体^[11]、液体^[12]和气体^[13]均可作为其展宽介质。其中,固体介质相较于其他 2 类介质,具有非线性系数大、环境适应性强、易于控制等优点。2019 年, Lu 等^[14]基于 2 级多层薄板系统,将重复频率为 1 kHz、能量为 1.07 mJ 的掺镱激光器的脉宽从 170 fs 压缩至 3.21 fs,但出现了锥形发射。2023 年, Okamoto 等^[15]通过搭建 2 级多层薄板展宽系统,将能量为 80 μ J、重复频率为 1 MHz 的掺镱光纤激光器的脉宽从 184 fs 压缩至 5.7 fs,但经过压缩后,横向光束质量因子(M_x^2)从 1.09 突变至 1.46,纵向光束质量因子(M_y^2)从 1.06 突变至 1.48。因此,改善压缩后的光束质量成为当前研究的重点。

在实际脉冲传播过程中,由于脉冲剖面不同位置的强度不同,介质提供的非线性相移也有所差异。在光束中心处,相移达到最大值,并随着光强沿径向的减弱而逐渐减小。这种现象类似于凸透镜的会聚过程,因此被称为自聚焦效应^[16],其改变了脉冲的空间特性。受该效应影响,实际光束并非理想情况下仅在展宽级经历 1 次聚焦,而是在传播过程中反复聚焦与散焦。这一现象导致非线性量不可控,使得色散无法完全补偿,甚至产生高阶色散,分散输出脉冲的强度,影响输出效率及光束质量。同时,自聚焦效应导致光斑会聚,使介质上的光功率密度骤然升高,若超过损伤阈值,则会对介质造成损坏。为解决上述问题,需避免实际焦点落在介质上,使光在自聚焦程度达到损坏介质之前离开介质,并在空气中完成聚焦与散焦过程。

本文首先分析了自聚焦效应影响下光束在空间传播的实际轨迹,随后对该光斑条件下多层薄板的光谱展宽进行数值仿真,模拟在自相位调制(SPM)和自陡峭效应等非线性效应作用下光谱展宽与时域脉冲的变化情况,最后将上述理论分析应用于实验中,对单脉冲能量为 250 μ J、重复频率为 20~200 kHz 的掺镱激光器

进行非线性压缩。通过对比石英片不同位置及不同脉宽条件下的光束质量,获得一个脉冲较短且光束质量较好的最优解,将脉宽从 570 fs 压缩至 107 fs,压缩后功率均方根(RMS)约为 0.074%,实现了非常稳定的脉冲输出,为后续少周期脉冲压缩提供了良好的条件与方法。

2 基本原理与仿真

2.1 基本原理

脉冲的时域参数与频域参数共同描述了脉冲特性,二者通过傅里叶变换相互关联。根据带宽定理,二者的乘积不能任意小,而是存在最小值。在量子力学中,这被称为海森堡不确定性关系。而在超快光学中,其表达形式^[17]为

$$\Delta t \Delta \omega \geq c_{\text{const}} \quad (1)$$

式中: Δt 为时域脉冲持续时间; $\Delta \omega$ 为频谱带宽; c_{const} 为物理意义为时间带宽积的常数,其值随脉冲波形的不同而变化。例如,当脉冲为高斯波形时,时间带宽积 c_{const} 为 0.441;当脉冲为双曲正割波形时,时间带宽积 c_{const} 为 0.315。对于给定的频谱宽度,当时域脉宽和频谱宽度的乘积等于时间带宽积时,时域光被称为变换极限脉冲。由上述理论可知,若要获得较窄的脉宽,需先获得较宽的光谱宽度。

大部分压缩系统都是基于光学克尔效应引发的 SPM 实现光谱展宽。在光传播过程中,介质的折射率发生变化,导致瞬时频率发生偏移,从而产生新的光谱分量并引起光谱展宽。若折射率变化由传播脉冲本身引起,则称为 SPM;若折射率变化由另一个脉冲引起,如四波混频或受激拉曼散射,则称为交叉相位调制(XPM)。SPM 仅需使用单个脉冲,结构更为简单,且无需考虑多个脉冲的同步问题,因此大部分后压缩系统均基于 SPM 实现光谱展宽。当光强足够大时,介质材料的原子势会发生扭曲,导致价电子发生非谐振荡,从而改变介质的宏观性质,使介质的折射率随光强变化而变化,即:

$$n = n_0 + n_2 I(t, z) \quad (2)$$

式中: n_0 为线性折射率; n_2 为非线性折射率; $I(t, z)$ 为光强; t 为时间; z 为沿 z 轴传播的距离。上述现象被称为光学克尔效应。通过对光脉冲电场的相位项求时间导数,并代入折射率,可得到瞬时频率^[18]:

$$\omega_{\text{inst}}(t, z) = \omega_0 - \frac{\omega_0}{c} n_2 \frac{\partial I(t, z)}{\partial t} z \quad (3)$$

式中: c 为光速; ω_0 为载波角频率。由式(3)可知,随着脉冲强度导数 $\partial I(t, z)/\partial t$ 的变化,会产生瞬时频移,从而产生新的频谱分量,导致光谱展宽。为表征克尔效应对光谱展宽的影响程度,可通过脉冲传播过程中峰值处时域相位 ϕ 累积的非线性相移来描述,该量被称为 B 积分^[19]:

$$B = \frac{\omega_0}{c} \int_0^L n_2(z) I(z) dz = \frac{2\pi}{\lambda_0} n_2 I_0 L_{\text{eff}} \quad (4)$$

式中： λ_0 为中心波长； I_0 为输入脉冲的峰值强度； L_{eff} 为非线性作用的有效长度，其定义为

$$L_{\text{eff}} = \int_0^L \frac{n_2(z) I(z)}{n_2 I_0} dz \quad (5)$$

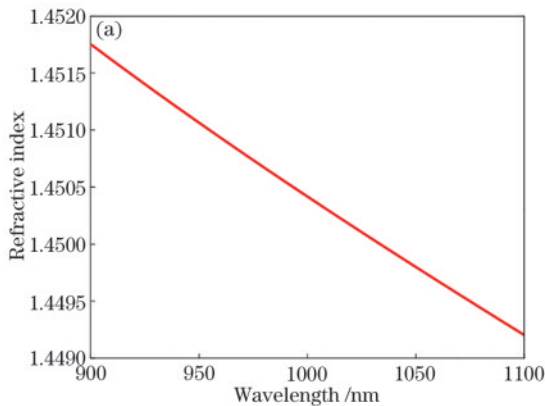
若折射率与光强相关，根据群速度的定义可知，群速度也与光强相关。由于脉冲在时域中心处的光强较强，中心峰值处的折射率相应增大，光速减慢；而在脉冲边缘处，相对较低的光强导致折射率变化较小，光速衰减程度较低。此时，脉冲在中心峰值处相对于后沿的传播速度减慢，表现为脉冲后沿“追赶”峰值的现象，即时域上出现“前平后陡”的形状，这种现象被称为自陡峭效应。在短脉冲或较大的 B 积分条件下，自陡峭效应更为显著。此外，克尔效应不仅在时频域改变脉冲特性，还会影响脉冲的空间特性。当较强的脉冲在克尔介质中传播时，在中心峰值处产生最大的相移，且沿半径方向相移逐渐减小，使光产生类似凸透镜的会聚现象，这种现象被称为自聚焦效应，所产生的等效透镜被称为热透镜，其焦距定义为

$$f = \frac{2\pi R^2 K}{P dn/dT} \quad (6)$$

式中： K 为介质的热导率； P 为介质吸收的功率； R 为光斑半径； dn/dT 为热光系数。极小的自聚焦效应可与光束的自然发散相协调，使光在传播过程中保持尺寸不变。当脉冲功率超过临界功率时，光束将产生聚焦，临界功率^[20]的定义为

$$P_{\text{cr}} = \frac{1}{2\pi} \frac{\lambda_0^2}{n_0 n_2} \quad (7)$$

过强的自聚焦效应可能导致会聚焦点位于介质内部，从而对介质造成损伤。此外，由于光在不同位置获得不同的聚焦效果，光斑会出现畸变，其中一个典型现象是光圈外会产生若干光环，这种现象被称为锥形发射。这不仅会恶化光束质量，而且会因锥形发射的环状光无法被有效利用，从而大幅降低压缩效率。



2.2 理论仿真

非线性压缩的核心在于光谱展宽。为使研究更具实用性，特别是探究该现象在工业生产等领域的应用，后续实验中采用熔融石英作为光谱展宽材料。为实现理想的光谱展宽效果，并尽可能避免石英片位置不当导致某一石英片上的功率密度超过损伤阈值，需先仿真光在熔融石英片间传播时的光谱变化情况，同时计算各石英片位置处的功率密度。仿真中光源参数设置如下：单脉冲能量为 250 μJ ，初始脉宽为 570 fs，中心波长为 1030 nm，初始光斑直径为 2.6 mm，所用熔融石英片厚度均为 0.5 mm，这些参数与实验中的光源参数一致。

为表征 SPM 引起的光谱展宽，需先计算熔融石英的材料色散。通过 Sellmeier 方程可计算出材料随光波长 λ 变化的折射率曲线，Sellmeier 方程表达式如下：

$$n = \sqrt{1 + \sum_{i=1}^N \frac{B_i \lambda^2}{\lambda^2 - C_i^2}} \quad (8)$$

式中： N 为阶数； B_i 、 C_i 分别为对应各阶的 Sellmeier 系数。熔融石英的 Sellmeier 系数如表 1 所示。

表 1 不同阶的 Sellmeier 系数
Table 1 Sellmeier coefficients of different orders

Parameter	1	2	3
B_i	0.6961663	0.4079426	0.8974794
C_i	0.0684043	0.1162414	9.8961610

获得折射率表达式后，可通过材料色散与折射率的关系式推导出群速度色散(GVD)系数和三阶色散(TOD)系数的表达式：

$$E_{\text{GVD}} = \frac{d^2 \varphi(\omega)}{d\omega^2} = \frac{\lambda^3 L}{2\pi c^2} \frac{d^2 n(\lambda)}{d\lambda^2} \quad (9)$$

$$E_{\text{TOD}} = \frac{d^3 \varphi(\omega)}{d\omega^3} = \frac{\lambda^4 L}{4\pi^2 c^3} \left[3 \frac{d^2 n(\lambda)}{d\lambda^2} + \lambda \frac{d^3 n(\lambda)}{d\lambda^3} \right] \quad (10)$$

式中： $\varphi(\omega)$ 为频域相位。根据式(9)和(10)，可以确定熔融石英在 900~1100 nm 波长内的色散曲线，如图 1 所示。

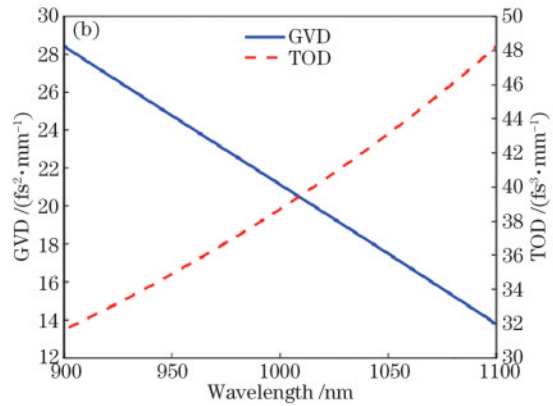


图 1 熔融石英材料的色散特性。(a) 折射率曲线；(b) 色散曲线

Fig. 1 Dispersion characteristics of fused silica material. (a) Refractive index curve; (b) dispersion curve

在获取熔融石英的折射率及色散曲线后,需对实验进行空间模拟。根据中国工程物理研究院在波长为 1064 nm、重复频率为 30 Hz、脉宽为 7 ns 的激光条件下测试的激光损伤阈值^[21],经过脉宽和波长变换计算可知,在本文实验的单脉冲能量条件下,当光斑半径小于 0.193 mm 时,将对熔融石英造成损伤。基于上述计算结果,使用 Zemax 光学设计软件对考虑热透镜效应后

的空间光路进行仿真,以在不损伤材料的前提下获得尽可能大的光谱展宽量。仿真结果如图 2 所示,当第 1 片熔融石英片距离透镜 125 mm,后续片间距分别为 15、15、40、15、15 mm 时,顺序测得熔融石英片上的光斑半径分别为 0.487、0.372、0.234、0.231、0.369、0.483 mm。此时,经过石英片后积累的总 B 积分约为 5,处于较宽水平。

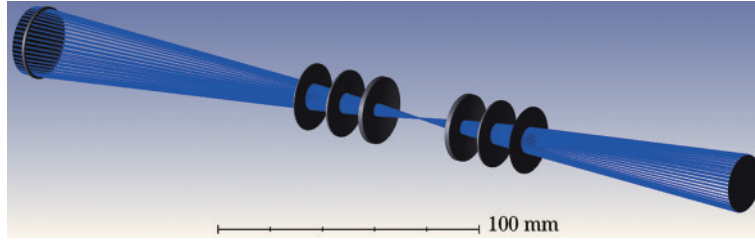


图 2 光束传播的空间光路仿真

Fig. 2 Spatial optical path simulation of beam propagation

基于上述材料色散及空间光分析的结果,采用分步傅里叶法和四阶龙格-库塔法求解非线性薛定谔方程^[22],并对非线性作用下的光谱和时域谱进行模拟。在当前参数条件下,仿真实验主要考虑 GVD、SPM 和自陡峭效应。仿真结果如图 3 所示,可以看出,由于 SPM

的作用,随着光在熔融石英片中传播,逐渐产生新的光谱成分,光谱不断展宽。当使用 2、4、6 片熔融石英片时,光谱分别被展宽至约 7.5、12.0、16.0 nm。同时,受自陡峭效应的影响,长波方向的峰值略高于短波方向。此外,在时域中也观察到轻微的展宽和自陡峭效应。

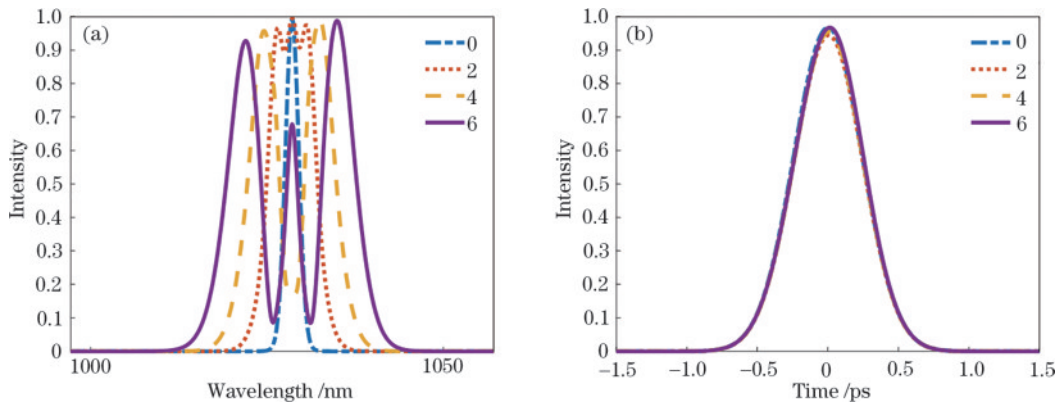


图 3 光谱展宽的时频域随石英片数量的变化。(a) 光谱;(b) 时域脉冲

Fig. 3 Change of spectral broadening in time-frequency domain with number of quartz plate. (a) Spectra; (b) pulse in the time domain

3 实验与分析讨论

3.1 实验过程

为验证上述仿真结果,搭建一套基于多层薄板的非线性压缩系统,如图 4 所示。实验以掺镱飞秒激光器作为光源,其单脉冲能量约为 250 μJ ,重复频率在 20~200 kHz 范围内可调,初始脉宽为 570 fs。光束首先经由焦距分别为 200 mm 和 -50 mm 的 L 1 和 L 2 透镜组进行模式匹配,将光斑直径从 3.5 mm 缩小至约 2.6 mm。随后光束通过聚焦透镜 L 3 进入多层薄板展宽级。在展宽级中使用 6 片厚度均为 0.5 mm 的熔融石英片,这些石英片以布儒斯特角摆放,从而将表面反射降至最低,并对称分布于两侧以消除光束的水平偏折。展宽后的光束经透镜 L 4 准直后,进入由色散

值为 -1000 fs^2 的啁啾镜对组成的压缩级。经过多次反射,啁啾镜对展宽级引入的色散进行补偿。此外,在啁啾镜对后方放置 1 片熔融石英薄片,以尽可能完全补偿色散,从而抑制基底产生及光斑劣化。

3.2 结果分析与讨论

实验中分别测量初始光谱与加入 2、4、6 片熔融石英片时的光谱展宽情况,如图 5(a) 所示。可以看出,随着熔融石英片数量的增加,非线性效应逐渐累积并增强。由于 SPM 产生了新的光谱成分,同时自陡峭效应导致光谱长波(低频)区域较早出现光谱成分且谱峰更高,这些效应的共同作用使光谱展宽至约 16 nm。将实验结果与仿真结果进行对比,二者反映的光谱变化趋势一致,从而相互验证了结果的正确性。

在利用上述光谱展宽级对光谱进行展宽后,需通过

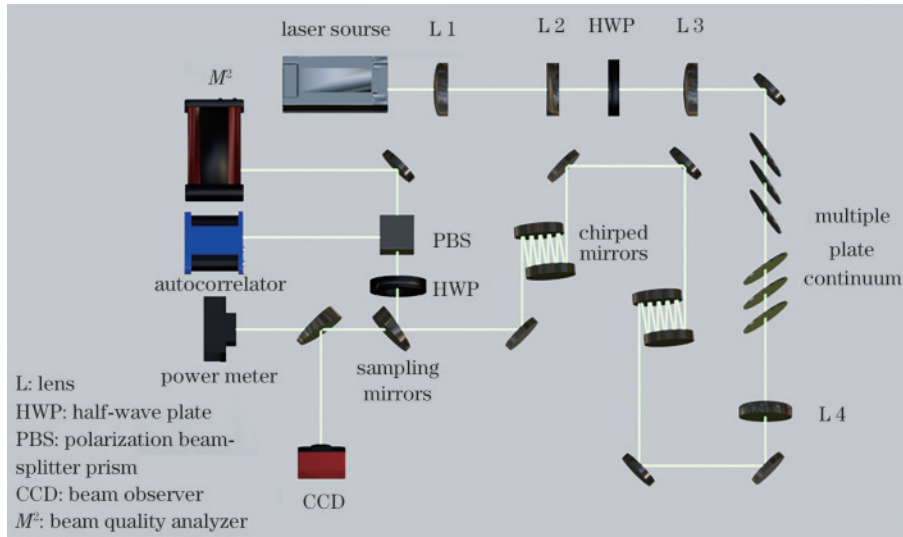


图 4 基于多层薄板的非线性压缩实验装置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of nonlinear compression experimental setup based on multilayer thin plate

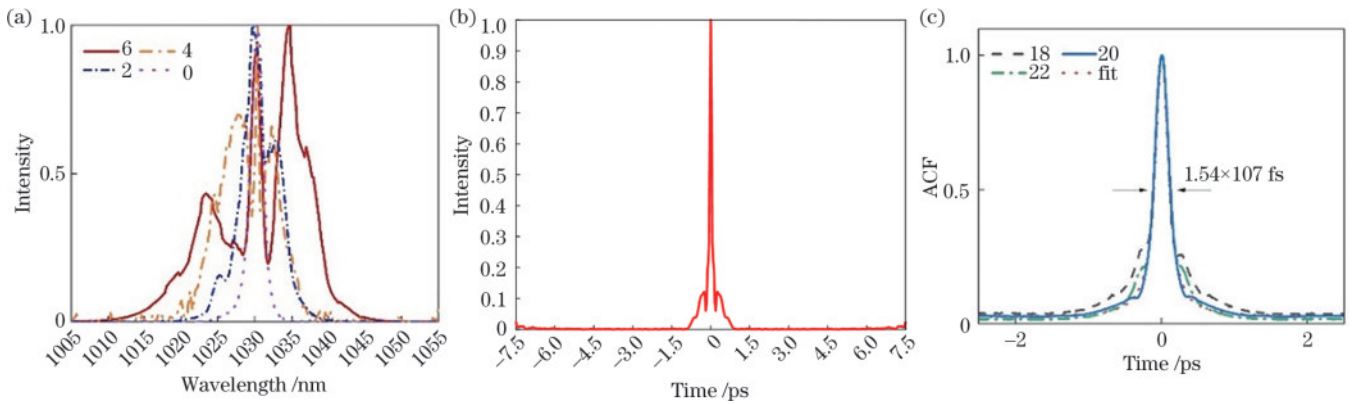


图 5 非线性压缩实验结果。(a)加入 2、4、6 片熔融石英片的光谱展宽图；(b)光谱傅里叶变换极限脉宽；(c)啁啾镜对反射 18、20、22 次的 ACF

Fig. 5 Results of the nonlinear compression experiments. (a) Spectral broadening diagrams with 2, 4, and 6 pieces of fused quartz plate; (b) spectral Fourier transform limit pulse width; (c) ACF of chirped mirror-pair reflections after 18, 20, and 22 iterations

啁啾镜对来对光束进行色散补偿。通过调节光在啁啾镜对内的反射次数,可引入不同的色散值。首先估算所需的色散量,基于第 2 节中的傅里叶变换极限公式,得出变换极限下的时域脉冲形状,如图 5(b)所示,并计算得到变换极限脉宽为 99 fs。代入色散计算公式可知,前端展宽级产生的色散约为 20043 fs²,因此预估需要在单次色散为 -1000 fs²的啁啾镜对上反射 20 次。基于此分析,分别测量在啁啾镜对上反射 18、20、22 次的自相关系数(ACF),结果如图 5(c)所示。可见,当反射 20 次时,时域脉冲基底最小,色散补偿效果最佳。通过进一步微调压缩级后的熔融石英薄片以优化脉冲波形,计算得到的压缩脉宽为 107 fs,接近傅里叶变换极限(99 fs),且与拟合曲线匹配度较高。

对脉冲的空间特性进行分析,使用光束质量分析仪对输出光束质量进行测量,结果如下。压缩前的光束传输比和近场光斑如图 6(a)所示,初始 $M_x^2=1.165$ 、 $M_y^2=1.157$,初始光斑椭圆度为 0.95。经过压缩后测

得的光束传输比如图 6(b)所示, $M_x^2=1.384$ 、 $M_y^2=1.413$,光斑椭圆度为 0.978。

为分析功率变化引起的热效应对光束的影响,在保持器件位置不变的情况下,将激光器重复频率调整为 20 kHz,对应输入功率为 5 W,并在此状态下进行测量,结果如图 6(c)所示。可以观察到光斑出现明显畸变, $M_x^2=1.471$ 、 $M_y^2=1.264$,椭圆度为 0.87,光束质量显著下降。为进一步分析畸变原因,通过 Zemax 软件模拟了 20 kHz 和 200 kHz 条件下的光束传播图,如图 6(d)所示,不同功率下焦点位置发生了变化。这是因为不同功率条件下在展宽级中积累的热效应不同,导致产生的热透镜焦距也有所不同,多个热透镜共同作用从而改变焦点位置,最终引发模式失配。

表 2 展示了不同功率下熔融石英片的相对焦点位置。由表 2 可知,当功率为 5 W 时,由于焦点移位,第 4 片石英片的位置已非常接近焦点。这不仅会使光束的空间特性产生畸变,而且可能对石英片造成损伤。为

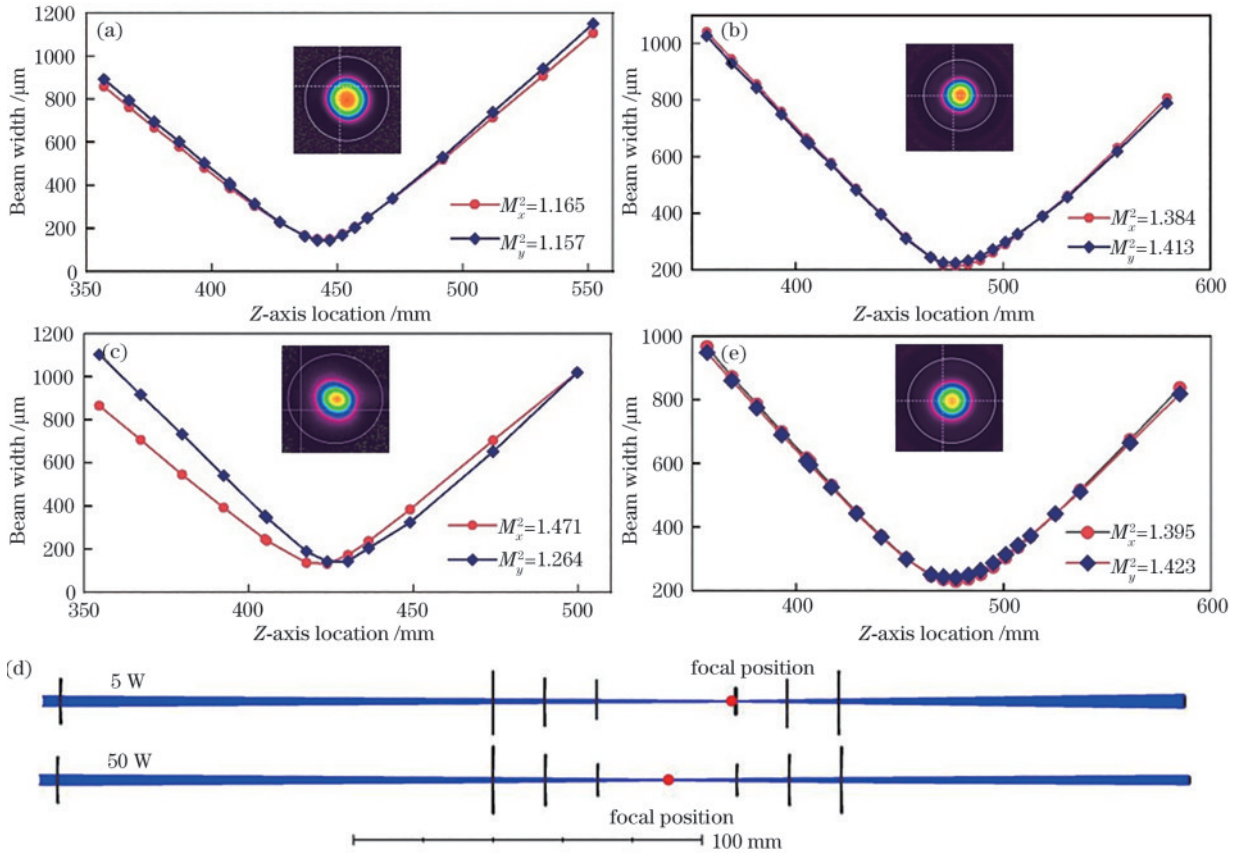


图 6 光束质量分析。(a)初始光束质量;(b)压缩后的光束质量;(c)平均功率为 5 W 时优化前光束质量;(d)平均功率分别为 50 W 和 5 W 时空光分析;(e)平均功率为 5 W 时优化后光束质量

Fig. 6 Analysis of beam quality. (a) Initial beam quality; (b) beam quality after compression; (c) beam quality at average power of 5 W before optimization; (d) spatial light analysis at average powers of 50 W and 5 W; (e) beam quality at average power of 5 W after optimization

表 2 不同功率下 6 片石英片相对焦点位置

Table 2 Relative focal positions of six quartz plates at different powers unit: mm

Power /W	1	2	3	4	5	6
50	63.5	40.5	20.1	-19.9	-34.9	-49.9
5	72.2	57.4	41.2	0.8	-14.3	-29.4

解决这一问题,可按照第 2 节所述方法,对功率为 5 W 的光束进行空间分析,并依据计算结果调整熔融石英片的位置。调整后,光束传输比的测量结果如图 6(e)

所示。可以看到,在平均功率为 5 W 时, $M_x^2 = 1.395$ 、 $M_y^2 = 1.423$,较之前有所改善,椭圆度恢复至 0.97,达到较好的水平。

在不损伤熔融石英片的前提下,适当缩小其与焦点的距离,经色散补偿后获得该激光器的极限压缩脉宽,如图 7(a)所示,此时的脉宽为 76 fs。测量对应的光束质量因子,结果如图 7(b)所示。可以看出,引入过量的 B 积分导致脉冲出现高阶色散基底,同时过量像差的引入使得光束质量显著下降。因此,在综合考虑脉宽和光束

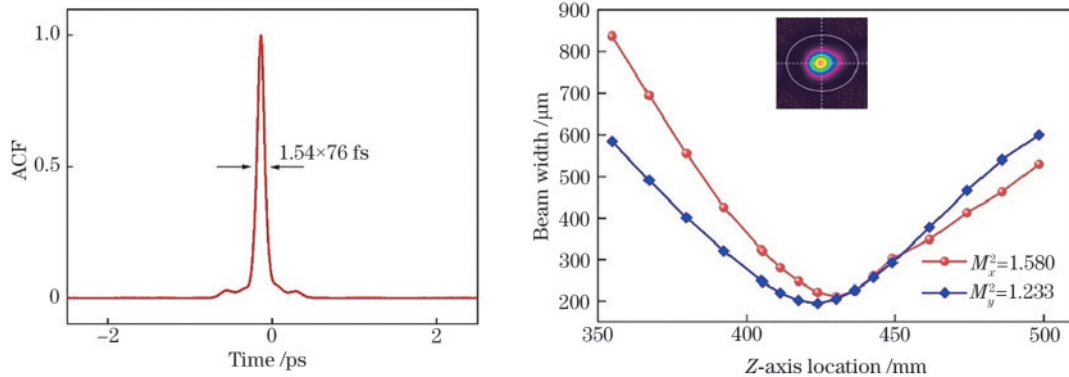


图 7 极限压缩实验结果。(a)自相关曲线;(b)光束质量

Fig. 7 Results of the extreme compression experiments. (a) Autocorrelation curve; (b) beam quality

质量后,图 5 所示的 107 fs 为最佳脉宽。

测量脉冲经过压缩系统后的输出功率及其功率稳定性,如图 8 所示。压缩前的功率为 50 W,压缩后输出功率为 39.25 W,计算得到功率压缩效率约为 78.5%。测量 45 min 的功率稳定性,结果显示功率最大值与最小值之差为 0.16 W,RMS 约为 0.074%,表明该压缩系统具有较高的稳定性,适用于工业化及科研应用。

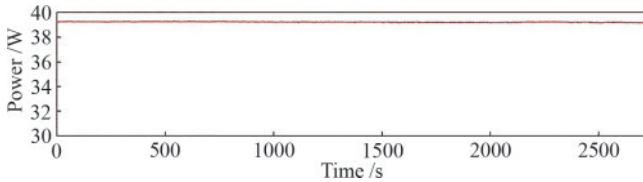


图 8 压缩系统输出功率

Fig. 8 Output power of compression system

4 结 论

本文主要研究基于多层薄板的非线性压缩技术,计算熔融石英在激光波段附近的色散值,并通过仿真光束传输获得光在熔融石英中传播时的空间变化。基于上述计算得到的色散值及空间位置信息,采用分步傅里叶法和龙格库塔法分析时频域的光谱展宽特性。通过搭建非线性压缩系统,成功获得光束质量较高且效率较好的更短脉冲。通过实验分析不同能量密度条件下经过同一压缩系统的光束质量及光斑变化情况,结果表明,光束质量的变化主要归因于热透镜效应引起的光束束腰变化。通过优化板间位置,可获得具有较大椭圆度和良好光束质量的光斑,从而在较小影响光束质量的前提下实现较为理想的脉冲压缩。以上研究为改善非线性压缩后的光束质量及效率提供了重要参考,为高能短脉冲工业化激光器的生产奠定了理论与实验基础。

参 考 文 献

- [1] 姚嘉泰,刘嘉月,杜进旭,等. 基于气体高次谐波的高亮度超快相干极紫外光源的研发[J]. 中国激光, 2024, 51(19): 1901016.
Yao J T, Liu J Y, Du J X, et al. Development of high-photon-flux ultrafast coherent extreme-ultraviolet light source based on gas high harmonic generation[J]. Chinese Journal of Lasers, 2024, 51(19): 1901016.
- [2] Dörner R, Mergel V, Jagutzki O, et al. Cold target recoil ion momentum spectroscopy: a 'momentum microscope' to view atomic collision dynamics[J]. Physics Reports, 2000, 330(2/3): 95-192.
- [3] Petit J, Goldner P, Viana B. Laser emission with low quantum defect in Yb:CaGdAlO₄[J]. Optics Letters, 2005, 30(11): 1345-1347.
- [4] 王小林,曾令筏,叶云,等. LD泵浦新型高功率掺镱光纤激光器研究(特邀)[J]. 中国激光, 2024, 51(19): 1901013.
Wang X L, Zeng L F, Ye Y, et al. Directly LD pumped

- novel high power ytterbium-doped fiber laser (invited)[J]. Chinese Journal of Lasers, 2024, 51(19): 1901013.
- [5] Champeney D C. Fourier transforms and their physical applications[M]. New York: Academic Press, 1973.
- [6] Rothhardt J, Hädrich S, Delagnes J C, et al. High average power near-infrared few-cycle lasers (laser photonics rev. 11(4)/2017)[J]. Laser & Photonics Reviews, 2017, 11(4): 1770041.
- [7] Seo M, Tsendsuren K, Mitra S, et al. High-contrast, intense single-cycle pulses from an all thin-solid-plate setup[J]. Optics Letters, 2020, 45(2): 367-370.
- [8] Viotti A L, University L, Li C, et al. Few-cycle pulse generation by double-stage hybrid multi-pass multi-plate nonlinear pulse compression[J]. Optics Letters, 2023, 48(4): 984-987.
- [9] Zair A, Guandalini A, Schapper F, et al. Spatio-temporal characterization of few-cycle pulses obtained by filamentation[J]. Optics Express, 2007, 15(9): 5394-5405.
- [10] 程起,袁浩,曹华保,等. 基于掺镱激光器的近单周期脉冲后压缩理论研究[J]. 光子学报, 2023, 52(6): 0614002.
Cheng Q, Yuan H, Cao H B, et al. Theoretical study of near single-cycle post compression for Yb doped lasers [J]. Acta Photonica Sinica, 2023, 52(6): 0614002.
- [11] He P, Liu Y Y, Zhao K, et al. High-efficiency supercontinuum generation in solid thin plates at 0.1 TW level[J]. Optics Letters, 2017, 42(3): 474-477.
- [12] Schmidt C, Pertot Y, Balciunas T, et al. High-order harmonic source spanning up to the oxygen K-edge based on filamentation pulse compression[J]. Optics Express, 2018, 26(9): 11834-11842.
- [13] Ouillé M, Vernier A, Böhle F, et al. Relativistic-intensity near-single-cycle light waveforms at kHz repetition rate[J]. Light: Science & Applications, 2020, 9: 47.
- [14] Lu C H, Wu W H, Kuo S H, et al. Greater than 50 times compression of 1030 nm Yb:KGW laser pulses to single-cycle duration[J]. Optics Express, 2019, 27(11): 15638-15648.
- [15] Okamoto T, Kunihashi Y, Shinohara Y, et al. Operation at 1 MHz of 1.7-cycle multiple plate compression at 35-W average output power[J]. Optics Letters, 2023, 48(10): 2579-2582.
- [16] Diels J C, Rudolph W. Ultrashort laser pulse phenomena [M]. Amsterdam: Academic Press, 2006: 205-207.
- [17] Tian L, Peng Z M. Minimal generalized time-bandwidth product method for estimating the optimum fractional Fourier order[J]. Journal of Computer and Communications, 2015, 3(3): 8-12.
- [18] Nagy T, Simon P, Veisz L. High-energy few-cycle pulses: post-compression techniques[J]. Advances in Physics: X, 2021, 6(1): 1845795.
- [19] 陈俊言,臧宏伟,曹锦程,等. 基于孤子模式的少周期飞秒激光脉冲[J]. 中国激光, 2024, 51(22): 2201006.
Chen J Y, Zang H W, Cao J C, et al. Soliton-based few-cycle femtosecond laser pulse[J]. Chinese Journal of Lasers, 2024, 51(22): 2201006.
- [20] 韩岳豪,冯汝毅,刘又铭,等. 基于多层薄板的全固态

- 高能量飞秒激光脉冲非线性压缩技术[J]. 中国激光, 2024, 51(2): 0201003.
- Han Y H, Feng R Y, Liu Y M, et al. All-solid-state high-energy femtosecond laser pulse nonlinear compression technology based on multilayer thin plates [J]. Chinese Journal of Lasers, 2024, 51(2): 0201003.
- [21] 刘红婕, 王凤蕊, 罗青, 等. K9 和熔石英玻璃纳秒基频激光损伤特性的实验对比研究[J]. 物理学报, 2012, 61(7): 076103.
- Liu H J, Wang F R, Luo Q, et al. [Experimental comparison of damage performance induced by nanosecond \$1\omega\$ laser between K9 and fused silica optics](#) [J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(7): 076103.
- [22] 薛嘉云, 陶诗诗, 郭兰军, 等. 高能量掺镱飞秒激光多薄片非线性压缩的数值模拟[J]. 光子学报, 2023, 52(1): 0114001.
- Xue J Y, Tao S S, Guo L J, et al. Numerical simulation of nonlinear pulse compression of high-energy ytterbium-doped femtosecond laser based on multiple thin solid plates[J]. Acta Photonica Sinica, 2023, 52(1): 0114001.