

5 PW 超短脉冲空间滤波器色差对时间信噪比的影响

朱 坪^{1,2}, 谢兴龙^{1*}, 朱健强¹

¹中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理联合实验室, 上海 201800;

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 研究了大口径级联空间滤波器中色差造成的离焦色散与传输时间延迟对超短脉冲波形与时间信噪比的影响。针对神光-5 PW 高功率超短脉冲系统, 通过数值模拟, 定量分析了光束口径、色差等因素与近远场脉冲波形畸变和时间信噪比退化的关系。从脉冲波形和时间信噪比的角度, 给出了大口径空间滤波器消色差后残余色差的容忍范围, 为高功率超短脉冲系统中空间滤波器的设计与优化提供了理论依据。

关键词 激光光学; 超快光学; 空间滤波器; 色差; 脉冲波形; 时间信噪比

中图分类号 O436 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0914005

Influence of Chromatic Aberration from Spatial Filters for 5 PW Ultra-Short Pulses on Temporal Contrast

Zhu Ping^{1,2}, Xie Xinglong¹, Zhu Jianqiang¹

¹Joint Laboratory on High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract The influences of defocus dispersion and propagation time delay, which are caused by the chromatic aberration in cascade large-diameter spatial filters, on the ultra-short pulse shape and the temporal contrast are investigated. The relationship among beam diameter, chromatic aberration, pulse shape distortion and temporal contrast degradation in both near and far fields is quantitatively analyzed by the numerical simulation. From the perspective of pulse shape and temporal contrast, the tolerance range of residual chromatic aberration from large-diameter spatial filters after achromatism is given, which provides a theoretical foundation for the design and optimization of spatial filters in a high power ultra-short pulsed laser system.

Key words laser optics; ultrafast optics; spatial filter; chromatic aberration; pulse shape; temporal contrast

OCIS codes 140.7090; 320.7120; 120.4820; 080.1010; 230.2035

1 引 言

近年来,高功率超短脉冲激光广泛应用于惯性约束核聚变快点火、强场物理、激光等离子体等研究领域。为了获得更高的峰值功率和聚焦功率密度,高功率超短脉冲激光系统的规模也越来越大。拍瓦(PW)级激光器的聚焦功率密度达到 $10^{25} \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ ^[1], 可以应用于相对论光学领域中。聚焦功率密度达到 $10^{29} \text{ W}/\text{cm}^2$ 的艾瓦激光^[2]可用于非线性量子动力学领域中。由于预电离效应的存在,如此高的聚焦功率密度对脉冲时间信噪比有极高的要求。传统提升信噪比的方案有双啁啾脉冲放大(DCPA)时域滤波^[3]、交叉极化波(XPW)^[4]、

收稿日期: 2017-05-05; **收到修改稿日期:** 2017-05-18

基金项目: 国家 863 计划(2013AA8044010)、国家自然科学基金(11304332)

作者简介: 朱 坪(1990—),男,博士研究生,主要从事超短脉冲光学系统设计、波前质量控制方面的研究。

E-mail: zhp1990@siom.ac.cn

导师简介: 朱健强(1964—),男,研究员,博士生导师,主要从事激光驱动器的总体光学设计、结构设计相关检测技术和测控技术等方面的研究。E-mail: jqzhu@mail.shcnc.ac.cn

* **通信联系人.** E-mail: xiexl329@mail.shcnc.ac.cn

自衍射^[5]、等离子镜^[6]等。当前高功率超短脉冲激光系统主要采用啁啾脉冲放大^[7]和光参量啁啾脉冲放大(OPCPA)^[8-9]技术,系统主要由前端种子源、展宽器、多级放大器、多级空间滤波器(SFs)、压缩器、离轴抛物面聚焦透镜等构成^[10-11]。已有研究工作分析讨论了激光系统不同单元对信噪比的影响,如放大过程中的增益饱和^[12]、参量荧光^[13]、脉冲展宽压缩过程中的光谱剪切^[14]、聚焦过程中的中高频噪声调制^[15]等,但关于整体分析激光系统引入的调制与噪声对最终聚焦输出波形和时间信噪比的影响研究鲜有报道。

激光器系统能量越大,脉宽越窄,聚焦焦斑越小,聚焦功率密度就越大。同时,大口径超短脉冲的光束近场质量对输出的时间信噪比有很大影响^[15]。因此,大口径超短脉冲激光系统通常采用多级 SFs 结构,该结构一方面可以起到扩束作用,另一方面可以滤除光束中的空间高频噪声,同时还可以控制像传递面,提高光束近场质量。传统 SF 一般为两个正透镜与一个小孔结构,小孔位于透镜的傅里叶面上以滤除高频空间噪声。但是,与窄带单色激光不同,宽光谱脉冲经过透镜后不可避免地引入色差,导致输出的不同波长具有不同程度的离焦(离焦色散)^[16],不同径向位置具有不同的传输时间延迟(PTD)^[17]。针对 SF 的 PTD 问题,已有研究提出了超短脉冲系统 SF 的消色差透镜设计^[18]与色差补偿器设计^[19-20]。离轴抛物面镜(OAPM)全反射式 SF 虽然可以避免引入色差,但是成本昂贵、机械设计难度高且系统调试复杂。消色差后的残余色差经过压缩器后仍可能导致脉冲波形畸变和时间信噪比退化,需要进一步研究残余色差对脉冲波形畸变和时间信噪比退化的影响,并针对脉冲波形和时间信噪比提出消色差设计指标。

本文建立了 SF-压缩器-聚焦超短脉冲传输系统模型,理论推导了大口径 SF 中色差造成的离焦色散与 PTD 对超短脉冲波形与聚焦时间信噪比的影响,并通过仿真,定量分析计算了光束口径、色差等因素与近远场脉冲波形畸变和时间信噪比退化的关系。讨论了 SF 的消色差设计,通过数值模拟得到了残余色差的容忍范围。

2 神光-5 PW 超短脉冲系统的传输建模

神光(SG)-5 PW 高功率超短脉冲激光系统采用中心波长为 808 nm、压缩脉宽为 30 fs、聚焦能量为 150 J 的多级 OPCPA 设计。如图 1 所示,由前端种子源与展宽器产生未放大的小口径啁啾脉冲,经过多级放大器与多级 SFs(图 1 中以一个放大器与 SF 为例)放大并扩束得到大口径啁啾脉冲;在压缩器中补偿啁啾获得放大的超短脉冲,压缩器由两个对称的平行光栅对(四块相同的光栅 G_1, G_2, G_3, G_4)组成;最后 OAPM 将高功率超短脉冲聚焦到靶上,与物质发生相互作用,得到预期实验结果。

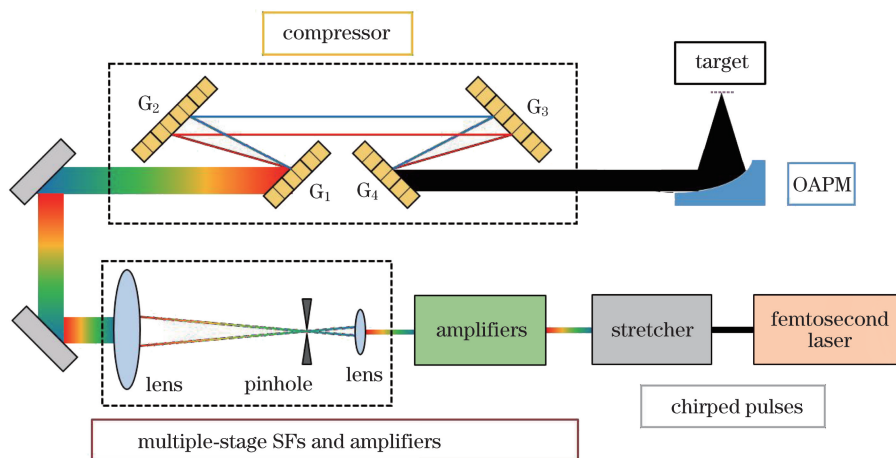


图 1 高功率超短脉冲激光系统示意图

Fig. 1 Schematic of high power ultra-short pulsed laser system

SG-5 PW 中有五级 SFs,每一个 SF 均由输入透镜、输出透镜和小孔组成。级联空间滤波器 SF1~SF5 的数据见表 1,输入为直径 2.5 mm 的圆光束。通常用于放大的大口径非线性晶体和压缩器中的大口径光栅都为方形,制作困难、价格昂贵,为了充分利用晶体和光栅,提取更多的能量,在 SF3 之后,将直径为

75 mm 的圆光束整形为 60 mm×60 mm 的方光束,级联 SFs 将光束口径扩大到 290 mm×290 mm。压缩器的第一块光栅设计的注入角度为 56°,光栅刻线密度为 1740 lp/mm,光栅对间距为 712.3 mm。当级联 SFs 采用非消色差透镜设计时,可以通过消色差透镜或者色差补偿器来实现级联 SFs 的消色差。

表 1 SG-5 PW 系统多级 SFs 设计参数

Table 1 Design parameters of multiple-stage SFs in SG-5 PW system

Parameter		SF1	SF2	SF3	SF4	SF5
Input beam	Diameter /mm	2.5	8.7	20		
	Size /(mm×mm)				60×60	145×145
Focal length of input lens /mm		240	700	400	2480	2860
Focal length of output lens /mm		960	1930	1500	6000	5720
Output beam	Diameter /mm	10	24	75		
	Size /(mm×mm)				145×145	290×290

在建立 SF-压缩器-聚焦超短脉冲传输系统的理论模型时,有以下假设:1)输入种子源不含噪声与畸变,时间上为理想高斯脉冲(傅里叶变换极限脉宽),空间上均匀分布(小口径);2)放大器完美放大,对脉冲不引入调制和噪声;3)展宽器与压缩器完美补偿,在理想情况下没有残余啁啾与高阶色散;4)OAPM 可理想聚焦,面型完美,无像差,无中高频粗糙度面型调制。

2.1 大口径超短脉冲的表征

通常认为小口径的脉冲在空间上均匀分布,脉冲光场的电场分布为 $E(t) = A(t)\exp[i\phi(t)]$,其中 $A(t)$ 为时间强度, $\phi(t)$ 为时间相位, t 为时间。光谱为 $\tilde{E}(\lambda) = \mathcal{F}[E(t)] = \tilde{A}(\lambda)\exp[i\varphi(\lambda)]$,其中 λ 为波长, $\tilde{A}(\lambda)$ 为光谱强度, $\varphi(\lambda)$ 为光谱相位, \mathcal{F} 表示傅里叶变换。大口径的超短脉冲不但存在空间分布,同时还可能存在时空耦合^[21],因此大口径超短脉冲的光场为空间、时间 (x, y, t) 的复函数 $E(x, y, t) = A(x, y, t)\exp[i\phi(x, y, t)]$,其时空分布的光谱为 $\tilde{E}(x, y, \lambda) = \tilde{A}(x, y, \lambda)\exp[i\varphi(x, y, \lambda)]$ 。

光学系统可以视作对空间、波长 (x, y, λ) 的调制函数,经过光学系统后输出脉冲的时空分布可以表示为

$$E_{\text{out}}(x, y, t) = \mathcal{F}^{-1}\{\tilde{E}_{\text{in}}(x, y, \lambda)\xi_{\text{M}}(x, y, \lambda)\exp[i\psi_{\text{M}}(x, y, \lambda)]\}, \quad (1)$$

式中 $\tilde{E}_{\text{in}}(x, y, \lambda)$ 为输入脉冲的光谱时空分布, $\xi_{\text{M}}(x, y, \lambda)$ 为系统强度调制函数, $\psi_{\text{M}}(x, y, \lambda)$ 为系统相位调制函数, \mathcal{F}^{-1} 表示时间傅里叶逆变换。

2.2 宽带 SF 引起的离焦色散

通常大口径激光系统 SF 为开普勒式两片正透镜结构,通过两片透镜的焦距匹配实现扩束功能,如图 2 所示。在第一片透镜的焦点处为输入光场的傅里叶成像,该处放置小孔,可以滤除光场的空间高频噪声。如果焦点处光强过大, SF 需抽真空。

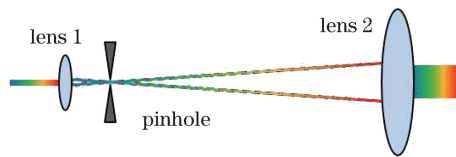


图 2 SF 示意图

Fig. 2 Schematic of SF

对于单色光场,理想 SF 不引入任何像差,输入波前为平面,输出波前也为平面;但是如果输入为复色光场,透镜焦距 (f) 与材料折射率 (n) 有关,材料折射率又与波长有关,即

$$f(\lambda) = \frac{1}{\frac{1}{n(\lambda)} - 1} \frac{1}{\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}} = \frac{n(\lambda_0) - 1}{n(\lambda) - 1} f(\lambda_0), \quad (2)$$

式中 R_1, R_2 分别为透镜前后表面的曲率半径; λ_0 为 SF 的设计波长,通常也是超短脉冲的中心波长。则 SF

的光学矩阵可以表示为

$$\mathbf{M}_{\text{SF}}(\lambda) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_2(\lambda)} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & f_1(\lambda_0) + f_2(\lambda_0) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_1(\lambda)} & 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中 f_1 、 f_2 分别为透镜 1,2 的焦距。若输入光场半径为 r_0 ，平行入射 N 级级联 SFs，则输出光线矩阵为

$$\begin{bmatrix} r_N(\lambda) \\ \theta_N(\lambda) \end{bmatrix} = \mathbf{M}_{\text{SF}_N}(\lambda) \cdots \mathbf{M}_{\text{SF}_2}(\lambda) \mathbf{M}_{\text{SF}_1}(\lambda) \begin{bmatrix} r_0(\lambda) \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中 r 为光线到光轴的距离， θ 为光线与光轴的夹角。因此，从级联 SFs 输出的复色光场不再是理想平面波。当波长偏离中心波长时，波前将偏离平面产生离焦现象，且不同波长具有不同的波前曲率 $K(\lambda)$ 和不同的曲率半径 $R(\lambda)$ ，即离焦色散：

$$K(\lambda) = \frac{1}{R(\lambda)} = -\frac{\theta_N(\lambda)}{r_N(\lambda)}. \quad (5)$$

根据以上理论推导，SF 的色差导致波前畸变，不同波长有不同的离焦，其中中心波长的波前为平面，其他波长的波前为不同曲率的曲面。如果未进行任何消色差设计或者色差补偿，理论上 SF 级联的个数越多，其引起的离焦越大，利用(2)~(5)式计算 SF1~SF5 输出的波前离焦情况，如图 3 所示，可以看到，中心波长 808 nm 的波前曲率为 0.426 km^{-1} ，838 nm 的波前曲率为 -0.398 km^{-1} ，短波长波前呈微会聚，长波长波前呈微发散。同时，波前离焦量与波长不是线性关系，定义离焦色散为离焦波前曲率随波长变化的量，即 $dK/d\lambda$ ，得到 778 nm 处离焦色散量为 -14199 m^{-2} ，838 nm 处离焦色散量为 -13278 m^{-2} ，因此，该级联 SFs 的平均离焦色散量为 -13721 m^{-2} 。

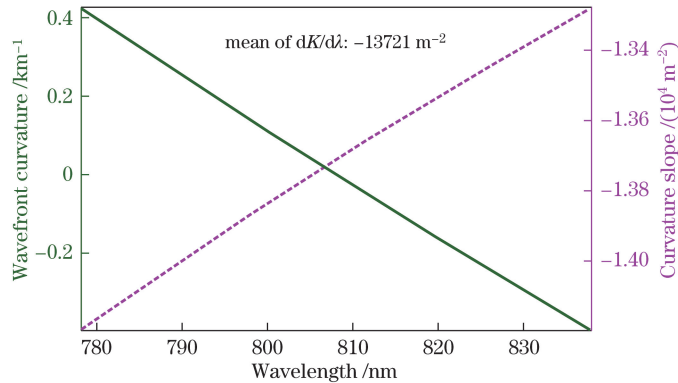


图 3 多级 SFs 造成的波前离焦色散

Fig. 3 Wavefront defocus dispersion from multiple-stage SFs

2.3 宽带 SF 引起的 PTD

SF 中正透镜为边缘薄、中心厚，光束中心比边缘经历更多的材料长度，获得更多的材料色散延迟量。因此，中心相对边缘存在 PTD，前人对 PTD 已有较为深入的研究^[15]，级联 SFs 的 PTD 可以表示为

$$\Delta T_{\text{SFs}}(\lambda, r) = \sum \Delta T_{\text{lens}}(\lambda, r) = \sum \frac{r_0^2 - r^2}{2cf(\lambda)[n(\lambda) - 1]} \left(-\lambda \frac{dn}{d\lambda} \right), \quad (6)$$

式中 c 为光速。

如果未进行任何消色差设计或者色差补偿，由(6)式计算得到级联 SFs 最终在 $290 \text{ mm} \times 290 \text{ mm}$ 口径上的累积延迟分布如图 4 所示，其中蓝线中心位置比边缘延迟 401.2 fs，绿线中心位置比边缘延迟 388.2 fs，红线中心位置比边缘延迟 377.9 fs。

综合离焦色散和 PTD 这两个因素，经过级联 SFs 后的输出光场为

$$E_{\text{SFs}}(\lambda, r) = E_0(\lambda, r) \exp \left[\frac{i\omega r^2}{2cR(\lambda)} \right] \exp \left[-i(\omega - \omega_0) \Delta T_{\text{SFs}}(\lambda, r) \right], \quad (7)$$

式中 ω 为角频率， ω_0 为中心频率。

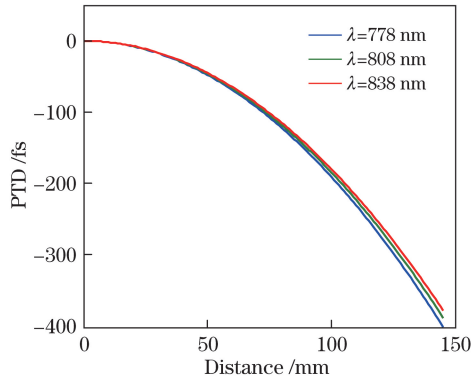


图 4 级联 SFs 的 PTD

Fig. 4 PTD of cascade SFs

2.4 光栅压缩器引起的空间色散失配

大口径激光系统采用四块光栅结构,可补偿一个光栅对造成的空间啁啾,抵消展宽器引入的啁啾并实现超短脉冲的压缩,得到最短的脉宽。计算时可先分析一个光栅对,压缩器的色散量为其中一个光栅对的两倍,光栅对示意图如图 5 所示。 G_1, G_2 为两块刻线密度均为 d 的光栅,光栅对间距为 G ,光线入射角为 γ ,衍射角为 β ,光线经过光栅对产生的相位为^[22]

$$\varphi(\lambda) = \frac{2\pi G}{\lambda \cos(\gamma - \beta)}(1 + \cos \beta) - \frac{2\pi G}{d} \tan(\gamma - \beta), \quad (8)$$

式中前一项为光程引入的相位,后一项为光栅对的附加相位。

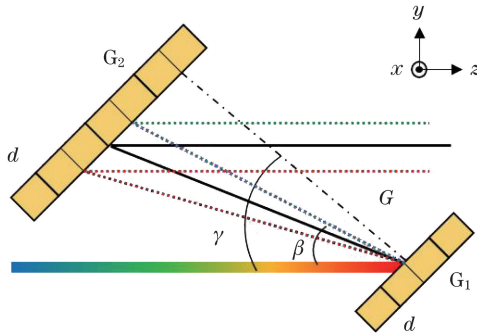


图 5 光栅对示意图

Fig. 5 Schematic of grating pair

在理想平面波入射时,空间上每一个点的色散量相同。但是,如果输入光场为(7)式描述的级联 SFs 输出光场,由于离焦色差的存在,不同位置的入射角与设计值有不同的偏差,且不同波长的偏差不同,此时光栅方程应写为

$$\sin[\gamma(\lambda, y)] + \sin[\gamma(\lambda, y) - \beta(\lambda, y)] = \frac{m\lambda}{d}, \quad (9)$$

式中 y 为垂直光栅刻线方向上光线与光轴的距离, m 为光栅衍射级次。入射角的偏差将导致色散量的改变,最终压缩器输出的光场为

$$E_{\text{compressor}}(\lambda, y) = E_{\text{SFs}}(\lambda, y) \exp[-i2\varphi(\lambda, y)]. \quad (10)$$

将带有离焦波前的啁啾脉冲以设计角度注入压缩器,假设平面波入射时该设计值可以理想补偿展宽器引入的脉冲啁啾,可将脉冲压缩至傅里叶变换极限的最短脉宽。但是,由于经过级联 SFs 之后的非理想输入,不同波长、不同空间位置有着不同的入射角,不同入射角度意味着不同的色散量,这将导致空间色散失配,即存在空间分布的残余啁啾,造成压缩畸变,影响超短脉冲的时间波形。压缩畸变引入的不同空间位置上的光谱相位调制如图 6 所示。

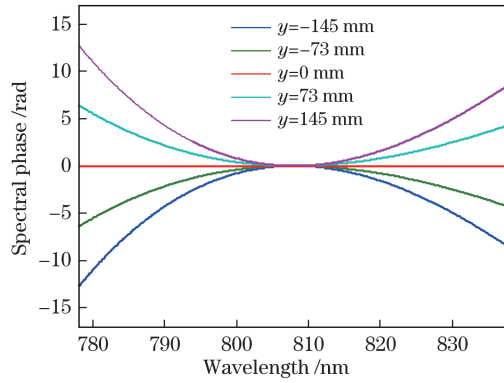


图 6 不同空间位置上压缩畸变导致的残余色散量

Fig. 6 Residual dispersion due to compression distortion at various spatial positions

3 超短脉冲传输系统的时空仿真结果

3.1 压缩后超短脉冲在不同口径处的时间特性

根据以上分析,大口径超短脉冲在经过压缩器之后,近场不同空间位置受到不同程度的调制,时间波形变化如图 7(a)所示,可以看出,边缘位置的脉冲领先于中心位置的脉冲。时间延迟情况如图 7(b)所示,可以看到,中心位置相对边缘延迟 800 fs。脉冲形状在中心位置保持不变,边缘位置的脉冲被展宽,且上下边缘畸变不同,如图 7(c)所示,上边缘展宽 15 倍,下边缘展宽 10 倍。脉冲信噪比的空间分布如图 8 所示,可以看出,中心位置为理想完美脉冲,信噪比优于 10^{20} ,边缘位置信噪比退化严重,仅为 10^7 ,1/5 口径位置处信噪比为 10^{10} ,位置对信噪比的影响很大。由于级联 SFs 色差导致压缩后的超短脉冲在不同位置发生延迟(提前)、畸变(展宽)、信噪比退化,因此大口径超短脉冲比小口径的情况复杂得多。

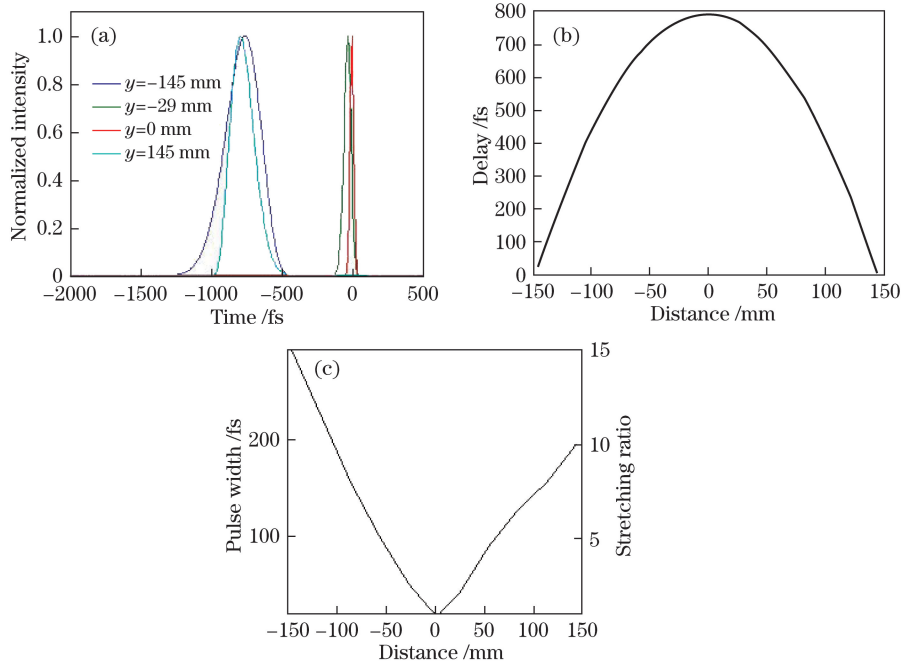


图 7 (a)压缩后不同空间位置的脉冲波形;(b)脉冲延迟的空间分布;(c)脉宽畸变的空分布

Fig. 7 (a) Pulse shapes at different spatial positions after compression; (b) spatial distribution of pulse delay; (c) spatial distribution of pulse width distortion

3.2 SF 色差对压缩聚焦后超短脉冲信噪比的影响

由于高功率超短脉冲最终的评价指标是聚焦到靶上的激光性质,因此分析大口径 SF 对超短脉冲时间特性的影响也应考虑远场的情况。因为分析时不考虑其他像差且将 OAPM 视作理想系统进行聚焦,所以

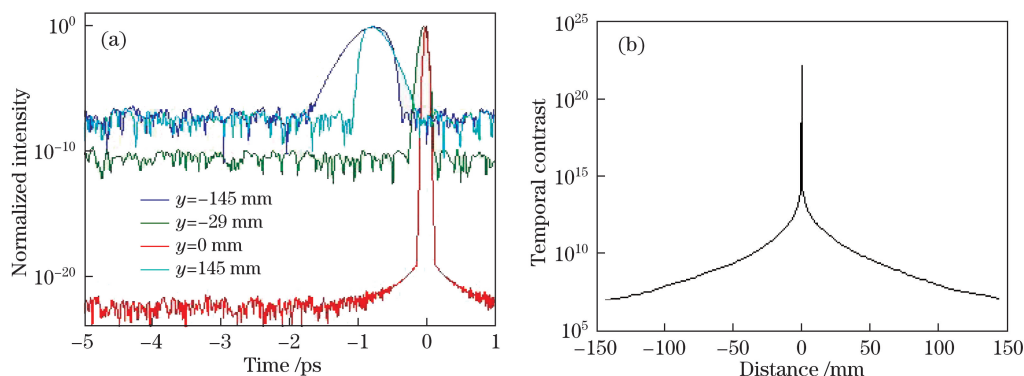


图 8 (a) 压缩后不同空间位置的时间信噪比; (b) 时间信噪比的空间分布

Fig. 8 (a) Temporal contrasts at different spatial positions after compression; (b) spatial distribution of temporal contrasts

采用几何光学方法处理聚焦过程,通过叠加得到焦点处的时间强度,如图 9 所示,其中黑色虚线为没有畸变的理想情况,绿色实线为仅考虑离焦色散时压缩器引入的色散畸变情况,红色实线为仅考虑 PTD 的情况,蓝色实线为 SF 影响的实际情况,包括离焦色散以及 PTD 的影响。脉冲前沿 1 ps 范围内有一个明显的台阶,对脉宽的影响较小,但是信噪比从 10^{25} 退化为 10^7 ,如图 9 中蓝色实线所示。若仅考虑一种效应,如图 9 中绿色实线所示,可以看出,离焦色散是导致信噪比退化的主要原因。如图 9 中红色实线所示,时间信噪比仍优于 10^{12} ,PTD 是导致脉冲前沿台阶出现的主要原因。

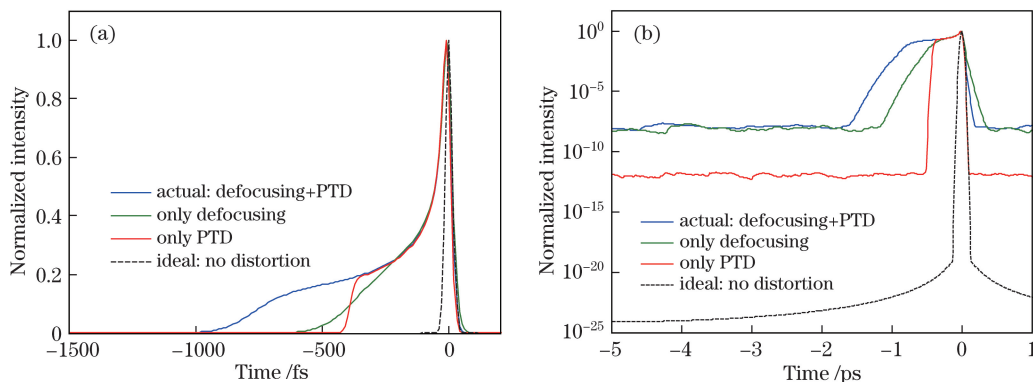


图 9 (a) 焦点处脉冲波形; (b) 焦点处时间信噪比

Fig. 9 (a) Pulse shapes at focal point; (b) temporal contrasts at focal point

4 大口径 SF 的消色差要求

根据级联 SFs 不同畸变对激光系统输出时间特性的不同影响,可以量化分析 SF 色差造成的离焦色散与 PTD 对脉冲波形和时间信噪比的影响,并由此提出对大口径 SF 色差补偿的量化要求。现阶段高功率超短脉冲激光系统要求输出脉宽小,能量集中,信噪比优于 10^{12} 。

首先考虑离焦色散对聚焦后时间信噪比的影响,如图 10 所示,其中黑色虚线为理想无畸变情况,信噪比为 10^{25} ;当离焦色散为 13.721 m^{-2} 时,信噪比退化为 10^{15} ;当离焦色散为 137.21 m^{-2} 时,信噪比退化为 10^{13} ;当离焦色散为 6860.6 m^{-2} 时,信噪比退化为 10^9 ;当离焦色散为 13721 m^{-2} 时,信噪比退化为 10^8 。因此,当单纯考虑离焦色散时,若要信噪比优于 10^{12} ,离焦色散应小于 137.21 m^{-2} 。其次考虑 PTD 对聚焦后时间波形的影响,如图 11 所示。当 PTD 为 389 fs 时,脉冲前沿台阶范围大小为 400 fs;当 PTD 为 194 fs 时,脉冲前沿台阶范围大小为 200 fs;当 PTD 为 77.7 fs 时,脉冲前沿台阶范围大小为 100 fs;当 PTD 为 38.9 fs 时,脉冲前沿无明显台阶;当 PTD 为 3.89 fs 时,对脉冲波形几乎没有影响。在以上情况下,聚焦后脉冲信噪比都优于 10^{12} ,因此在单纯考虑 PTD 的情况下,若要消除主脉冲前沿的台阶,PTD 应小于 38.9 fs。

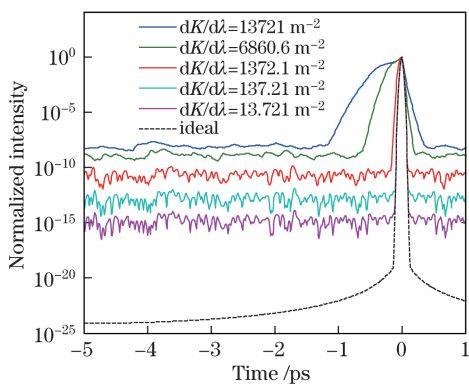


图 10 不同离焦情况下的焦点处时间信噪比

Fig. 10 Temporal contrasts at focal point under various defocus conditions

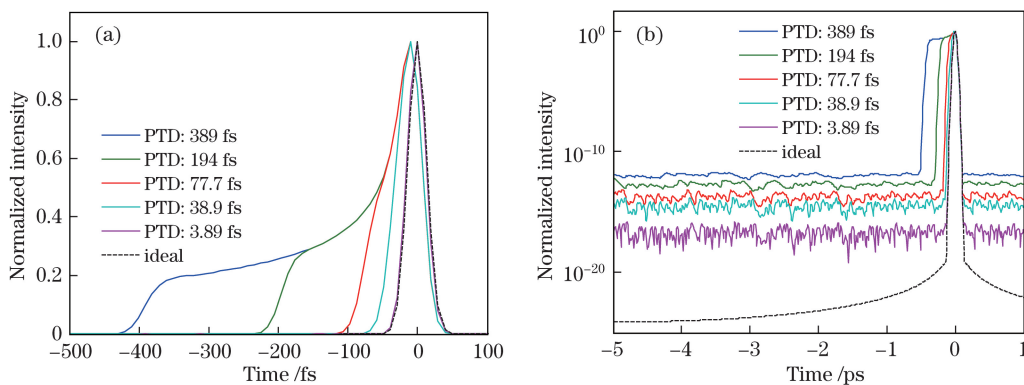


图 11 不同 PTD 情况下的焦点处(a)脉冲波形和(b)时间信噪比

Fig. 11 (a) Pulse shapes and (b) temporal contrasts at focal point under various PTD conditions

对 SF 消色差的方案主要有消色差透镜的设计、负透镜色差补偿、衍射元件色散补偿等^[18-20],对 SF 引起的离焦和 PTD 的补偿效果是同比例的。实际情况应同时考虑离焦色散与 PTD 的影响,因此,不同程度补偿后残余的 SF 色差对聚焦后脉冲波形与时间信噪比的影响如图 12 所示。未消色差时,离焦色散为 13721 m^{-2} ,PTD 为 389 fs,如前文分析,脉冲前沿台阶明显,时间信噪比退化严重。补偿 90% 的 SF 色差后,离焦色散为 1372.1 m^{-2} ,PTD 为 38.9 fs,消除了脉冲前沿台阶,可以满足激光系统脉冲波形的要求,但时间信噪比为 10^{10} 。补偿 99% 的色差后,时间信噪比为 10^{12} ,达到激光系统脉冲时间信噪比要求,此时离焦色散为 137.21 m^{-2} ,PTD 为 3.89 fs;进一步补偿可以更加优化系统输出。

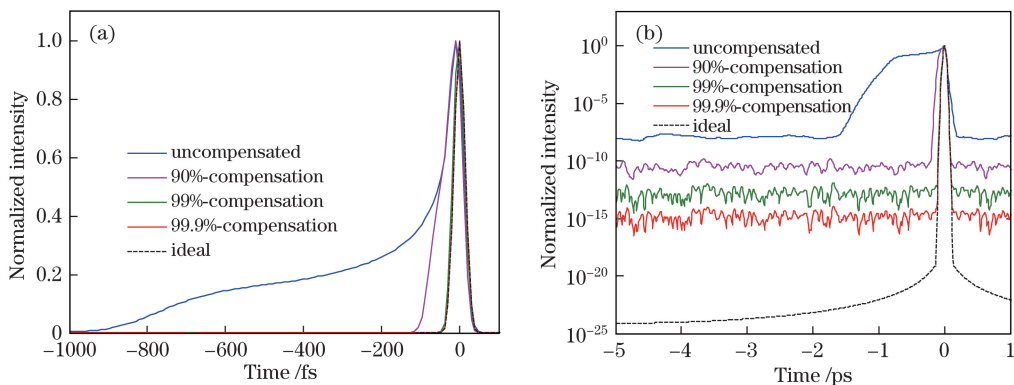


图 12 不同补偿情况下的焦点处(a)脉冲波形和(b)时间信噪比

Fig. 12 (a) Pulse shapes and (b) temporal contrasts at focal point under various compensation situations

因此,在口径为 290 mm 的超短脉冲系统中,若仅要求脉冲波形不畸变,消色差后 SF 残余色差导致的离焦色散应小于 1372.1 m^{-2} ,PTD 应小于 38.9 fs;如果还要求时间信噪比优于 10^{12} ,那么消色差后 SF 残余

色差导致的离焦色散应小于 137.21 m^{-2} , PTD 应小于 3.89 fs 。

5 结 论

建立了 SF-压缩器-聚焦超短脉冲传输系统模型,分析了大口径激光系统中级联 SFs 的色差对最终输出时间特性的影响。理论推导了大口径 SF 色差造成的离焦色散与 PTD 对超短脉冲波形与聚焦时间信噪比的影响,通过仿真定量分析了光束口径与近场脉冲波形畸变和时间信噪比的关系,得出离焦色散与 PTD 对聚焦后超短脉冲波形和时间信噪比的定量影响。该研究以理想高斯型脉冲作为种子源模型,而对于非理想脉冲情况,由于种子源输入是小口径脉冲,可近似为空间均匀,其影响传输到后级大口径时也是呈空间分布均匀,因此最终输出结果仅受到与小口径非理想脉冲相同的调制,但是在非理想脉冲情况下,SF-压缩器-聚焦传输过程中的色差对输出的影响规律与理想脉冲情况下的相同,与本文的分析结果一致。从脉冲波形和时间信噪比的角度,针对特定的高功率超短脉冲系统的时间特性要求,对大口径 SF 消色差后的残余色差提出了要求,为高功率超短脉冲系统中 SF 的设计与优化提供了理论依据,有助于优化超短脉冲激光系统的总体设计。

参 考 文 献

- [1] Chambaret J P, Canova F, Lopez-Martens R, *et al.* ILE 25PW single laser beamline: the French step for the European Extreme Light Infrastructure(ELI)[C]. Conference on Lasers & Electro-Optics, 2007: JWC4.
- [2] Mourou G, Mironov S, Khazanov E, *et al.* Single cycle thin film compressor opening the door to Zeptosecond-Exawatt physics[J]. The European Physical Journal Special Topics, 2014, 223(6): 1181-1188.
- [3] Kalashnikov M P, Risse E, Schönagel H, *et al.* Double chirped-pulse-amplification laser: a way to clean pulses temporally[J]. Optics Letters, 2005, 30(8): 923-925.
- [4] Xu Y, Leng Y, Guo X, *et al.* Pulse temporal quality improvement in a petawatt Ti:sapphire laser based on cross-polarized wave generation[J]. Optics Communications, 2014, 313(4): 175-179.
- [5] Liu J, Okamura K, Kida Y, *et al.* Temporal contrast enhancement of femtosecond pulses by a self-diffraction process in a bulk Kerr medium[J]. Optics Express, 2010, 18(21): 22245-22254.
- [6] Thaury C, Quéré F, Geindre J P, *et al.* Plasma mirrors for ultrahigh-intensity optics[J]. Nature Physics, 2007, 3(6): 424-429.
- [7] Strickland D, Mourou G. Compression of amplified chirped optical pulses[J]. Optics Communications, 1985, 55(6): 447-449.
- [8] Cerullo G, De Silvestri S. Ultrafast optical parametric amplifiers[J]. Review of Scientific Instruments, 2003, 74(1): 1-18.
- [9] Sun Meizhi, Kang Jun, Zhang Yanli, *et al.* Analysis on phase matching and compression of amplified chirped pulse for various deuteration level DKDP crystals[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(12): 1219002.
孙美智, 康俊, 张艳丽, 等. 不同含氘量 DKDP 晶体参量匹配与放大啁啾脉冲压缩特性分析[J]. 光学学报, 2015, 35(12): 1219002.
- [10] Perry M D, Pennington D, Stuart B C, *et al.* Petawatt laser pulses[J]. Optics Letters, 1999, 24(3): 160-162.
- [11] Wang Z, Liu C, Shen Z, *et al.* High-contrast 1.16 PW Ti:sapphire laser system combined with a doubled chirped-pulse amplification scheme and a femtosecond optical-parametric amplifier[J]. Optics Letters, 2011, 36(16): 3194-3196.
- [12] Li Chuandong, Zhang Zhengquan, Xu Zhizhan. Effects of gain saturation in chirped pulse amplification[J]. Acta Optica Sinica, 1996, 16(3): 299-304.
李传东, 张正泉, 徐至展. 增益饱和在啁啾脉冲放大中的影响[J]. 光学学报, 1996, 16(3): 299-304.
- [13] Wang Bopeng, Su Jingqin, Zeng Xiaoming, *et al.* Impact of optical parametric fluorescence on temporal contrast for various pump profiles[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(6): 0614005.
王波鹏, 粟敬钦, 曾小明, 等. 不同抽运波形条件下参量荧光对信噪比的影响[J]. 光学学报, 2016, 36(6): 0614005.
- [14] Yang Qingwei, Guo Ailin, Xie Xinglong, *et al.* Effects of asymmetric spectral clipping in the stretcher on the output pulse contrast[J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(12): 1970-1974.
杨庆伟, 郭爱林, 谢兴龙, 等. 展宽器中非对称光谱剪切对输出脉冲对比度的影响[J]. 中国激光, 2008, 35(12): 1970-1974.
- [15] Zhu P, Xie X, Ouyang X, *et al.* Output temporal contrast simulation of a large aperture high power short pulse laser

- system[J]. High Power Laser Science and Engineering, 2014, 2: e42.
- [16] Born M, Wolf E. Principles of optics: electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light[M]. New York: Elsevier, 1980.
- [17] Bor Z. Distortion of femtosecond laser pulses in lenses and lens systems[J]. Journal of Modern Optics, 1988, 35(12): 1907-1918.
- [18] Heuck H M, Neumayer P, Kühl T, *et al.* Chromatic aberration in petawatt-class lasers[J]. Applied Physics B, 2006, 84(3): 421-428.
- [19] Gaul E W, Martinez M, Blakeney J, *et al.* Demonstration of a 1.1 petawatt laser based on a hybrid optical parametric chirped pulse amplification/mixed Nd:glass amplifier[J]. Applied Optics, 2010, 49(9): 1676-1681.
- [20] Bahk S W, Bromage J, Zuegel J D. Offner radial group delay compensator for ultra-broadband laser beam transport[J]. Optics Letters, 2014, 39(4): 1081-1084.
- [21] Akturk S, Gu X, Bowlan P, *et al.* Spatio-temporal couplings in ultrashort laser pulses[J]. Journal of Optics, 2010, 12(9): 093001.
- [22] Treacy E. Optical pulse compression with diffraction gratings[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1969, 5(9): 454-458.