

文章编号: 0258-7025(2009)Supplement 1-0298-04

# 激光参数诊断系统在超短脉冲中的应用

李小燕<sup>1</sup> 樊鸿嘉<sup>2</sup> 欧阳小平<sup>1</sup> 唐顺兴<sup>1</sup> 徐光<sup>1</sup> 王韬<sup>3</sup> 朱宝强<sup>1</sup> 朱健强<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800; <sup>2</sup>上海市交通管理局, 上海 200003)  
<sup>3</sup>上海激光等离子体研究所, 上海 201800)

**摘要** 大型激光装置中的参数诊断系统需要使用缩束系统, 将被测脉冲转换为小口径光束, 以匹配相应的参数测量仪器。由于超短脉冲具有较宽的光谱, 因此在实际使用中会产生色散, 从而影响参数测量结果的准确性。分析了缩束系统的光学特性, 以及取样镜产生的群速度色散(GVD), 为诊断系统的设计提供依据。分析结果表明, 带楔角的取样反射镜与后续光路中使用楔形真空窗口构成了一对棱镜, 产生负的群速度色散。其数值与楔角的大小、传输距离成正比。对于脉冲宽度大于 50 fs 的超短脉冲, 可以认为其脉冲宽度没有发生变化。这样就可以知道该参数诊断系统的工作范围。

**关键词** 测量; 超短脉冲; 参数诊断; 群速度色散

中图分类号 O437 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL200936s1.0298

## Laser Diagnostic System Applied in Ultra-Short Pulse Facility

Li Xiaoyan<sup>1</sup> Fan Hongjia<sup>2</sup> Ouyang Xiaoping<sup>1</sup> Tang Shunxing<sup>1</sup> Xu Guang<sup>1</sup> Wang Tao<sup>3</sup>  
Zhu Baoqiang<sup>1</sup> Zhu Jianqiang<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)  
<sup>2</sup>Shanghai Urban Transport Bureau, Shanghai 200003, China  
<sup>3</sup>Shanghai Institute of Laser Plasma, Shanghai 201800, China)

**Abstract** It needs a down-collimator to convert big beams of a large laser facility into smaller beams in diameter to fit measurement instruments in diagnostic system. Because ultra-short pulses have wide spectrum, dispersion will be important to measurement. This paper provides some advice about diagnostic system designed by analyzing the down-collimator's characteristic and group velocity dispersion of the sampling mirror. The result shows that the edged sampling mirror and the edged vacuum window can be treated as a pair of prisms, which generates negative group velocity dispersion. And the group velocity dispersion increases with the edged angle and the optical path. When input pulse width is above 50 fs, the output one will not change. So we can obtain the work range of this diagnostic system.

**Key words** measurement; ultra-short pulse; diagnostic; group velocity dispersion

## 1 引言

超短脉冲激光是用于研究极短时间内的物理现象和实现极高激光功率密度的一个重要工具。超短超强激光脉冲在多光子电离、高次谐波、激光-等离子体相互作用和 X 射线激光等多个领域中被广泛应用。为了得到峰值功率在太瓦级(TW), 甚至拍瓦级(PW)以上的超短脉冲, 需要使用 OPCPA 技术。该技术将锁模振荡器输出的超短脉冲经过展宽

器展宽, 采用 OPCPA 技术进行放大, 最后经过压缩器重新成为超短脉冲。这样激光脉冲焦点处的功率密度能够达到  $10^{19}$  W/cm<sup>2</sup> 以上<sup>[1~5]</sup>。

为了实现超短脉冲的精密诊断, 需要针对压缩后的超短脉冲进行取样和缩束, 并用导光反射镜传输到测量仪器中。超短脉冲的取样, 不能在光路中插入不镀膜取样反射镜, 进行小角度取样。因为这样会产生过大的 B 积分, 破坏后续的光学元件, 影

**作者简介:** 李小燕(1979—), 女, 博士研究生, 主要从事激光传输方面的研究。E-mail: xiaoyanli@siom.ac.cn

**导师简介:** 朱健强(1964—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事高功率激光驱动器方面的研究。

E-mail: jqzhu@mail.shenc.ac.cn

响光束的聚焦性能。因此只能采取反射镜的膜后取样方式,利用主光路中反射镜后表面透过的小比例光束进行分析诊断。

## 2 方 法

在超短脉冲激光装置中,压缩之后的超短脉冲激光经过两块反射镜之后,由一块离轴抛物面镜实现聚焦功能,从而得到  $10^{19}$  W/cm<sup>2</sup> 以上的聚焦功率密度。为了避免反射镜后表面的反射光对焦点处的靶球造成的不良影响,还需要将反射镜加工成具有一定的楔角。对于激光参数测量,这个楔角是不利的,因为它会像棱镜一样,宽带的超短脉冲经过它之后会产生角色散。随着传输距离的增加,光束的几何尺寸会发生改变,最终导致测量结果的不准确。因此需要在测量光束中放置一块对应的楔形玻璃,以抵消角色散的不利影响。由于大能量的压缩脉冲工作在真空压缩室内,因此我们将在诊断系统的输出窗口上增加楔角,与诊断系统的取样镜构成一对棱镜。它们中间还存在着一个缩束系统。

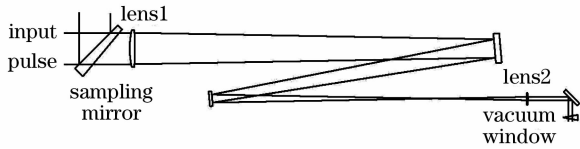


图1 超短脉冲参数诊断系统光路图

Fig.1 Schematic of the diagnostic system for ultra-short pulses

下面将利用  $ABCD$  矩阵来分析缩束系统在角色散中的影响。构成缩束系统的两个透镜,其焦距分别为  $f_1, f_2$ , 而且  $f_1 = Mf_2, M$  为缩束系统的缩孔比。

入射光束为

$$X_1 = \begin{bmatrix} x_1 \\ \theta_1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

出射光束为

$$X_2 = \begin{bmatrix} x_2 \\ \theta_2 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中  $x_1, x_2$  表示光束高度,  $\theta_1, \theta_2$  表示光束与光轴的夹角。

如果缩束系统内不存在折叠反射镜,则

$$X_2 = \begin{bmatrix} 1 & l_3 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & l_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & l_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ \theta_1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中  $l_1$  为入射光束  $X_1$  到第一块透镜的距离,  $l_3$  为第二块透镜到出射光束  $X_2$  的距离。 $l_2$  为两块透镜的间距,因此  $l_2 = f_1 + f_2$ 。

通过求解该矩阵,可以得到

$$X_2 = \begin{bmatrix} -\frac{x_1}{M} - \frac{l_1\theta_1}{M} + (M+1)f_2\theta_1 - Ml_3\theta_1 \\ -M\theta_1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

出射光束与光轴的夹角等于入射光束与光轴夹角的  $M$  倍。当入射光束为平行光束,且正入射时,  $\theta_1 = 0$ 。

$$X_2 = \begin{bmatrix} -x_1/M \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

它表示出射光束高度为入射光束的  $1/M$ , 而且也是与光轴平行的。

由于诊断楔角系统中存在楔角引起的角色散,因此对于入射光束的一部分  $\theta_1 \neq 0$ 。这样出射光束与光轴的夹角就是  $M\theta_1$ , 并且光束的高度也发生了一定的变化。对于缩束系统内部存在折叠反射镜的情况,可以得到同样的结论。因此,用于补偿角色散的真空窗口的楔角应是取样镜楔角的  $M$  倍,才能够实现角度匹配。它们构成了一个棱镜对,会在超短脉冲中产生负群速度色散(GVD)。

## 3 误差分析

通常情况下,棱镜对产生的群速度色散为

$$\frac{d^2\phi}{d\omega^2} = \frac{\lambda^3}{2\pi c^2} \frac{d^2P}{d\lambda^2}, \quad (6)$$

式中  $\phi$  为超短脉冲的相位,  $\omega$  为频率,  $\lambda$  为波长,  $c$  为光速,  $P$  为光程。

参考 Martinez 等的文献可以得到<sup>[6,7]</sup>

$$P = l \cos \beta, \quad (7)$$

$$dP/d\beta = -l \sin \beta, \quad (8)$$

$$d^2P/d\beta^2 = -l \cos \beta, \quad (9)$$

$$\frac{d^2\phi}{d\omega^2} = \frac{\lambda^3}{2\pi c^2} \left\{ \left[ \frac{d^2n}{d\lambda^2} \frac{d\beta}{dn} + \left( \frac{dn}{d\lambda} \right)^2 \frac{d^2\beta}{dn^2} \right] \frac{dP}{d\beta} + \left( \frac{dn}{d\lambda} \right)^2 \left( \frac{d\beta}{dn} \right)^2 \frac{d^2P}{d\beta^2} \right\}, \quad (10)$$

式中  $l$  为超短脉冲经过棱镜对时的直线距离,  $\beta$  为超短脉冲的偏折角。根据 Selleimer 方程可以得到折射率  $n$  相对于波长的一阶导数、二阶导数。BK7 玻璃的 Selleimer 方程为

$$n^2 = 2.2703591 - 1.0089638 \times 10^{-2} \lambda^2 + 1.0869608 \times 10^{-2} \lambda^{-2} + 9.2665795 \times 10^{-5} \lambda^{-4} + 1.2457198 \times 10^{-5} \lambda^{-6} - 7.3845982 \times 10^{-7} \lambda^{-8}, \quad (11)$$

可以得到  $dn/d\lambda = -0.0133$ ,  $d^2n/d\lambda^2 = 0.0113$ 。

超短脉冲在第一块楔形镜前表面上的入射角为  $\phi_1$ , 折射角为  $\phi'_1$ , 传输到后表面上的入射角为  $\phi'_2$ , 折射角为  $\phi_2$ 。因为  $d\beta/dn = -(d\phi_2/dn)$ ,  $d^2\beta/dn^2 = -(d^2\phi_2/dn^2)$ , 由(10)式可得

$$\frac{d^2\phi}{d\omega^2} = \frac{\lambda^3}{2\pi c^2} \left\{ \left[ -\frac{d^2n}{d\lambda^2} \frac{d\phi_2}{dn} - \left( \frac{dn}{d\lambda} \right)^2 \frac{d^2\phi_2}{dn^2} \right] \frac{dP}{d\beta} + \left( \frac{dn}{d\lambda} \right)^2 \left( -\frac{d\phi_2}{dn} \right)^2 \frac{d^2P}{d\beta^2} \right\}. \quad (12)$$

大型超短脉冲激光装置中, 参数诊断系统的取样反射镜上的入射角  $\phi_1 = 45^\circ$ 。当楔形镜的楔角为  $\alpha$  时, 有  $\phi'_2 = \phi'_1 - \alpha$ 。结合 Snell 定理, 则有

$$\frac{d\phi_2}{dn} = \frac{\sin \phi'_2 - \cos \phi'_2 \tan \phi'_1}{\cos \phi_2}, \quad (13)$$

$$\frac{d^2\phi_2}{dn^2} = -n \tan \phi'_1 \frac{\cos \phi'_2 + \sin \phi'_2 \tan \phi'_1 - \cos \phi'_2 \sec^2 \phi'_1}{\cos \phi_2} + \frac{(\sin \phi'_2 - \cos \phi'_2 \tan \phi'_1) \sin \phi_2}{\cos^2 \phi_2} \frac{d\phi_2}{dn}, \quad (14)$$

结合(12)式~(14)式, 可以得到该参数诊断系统中的群速度色散。

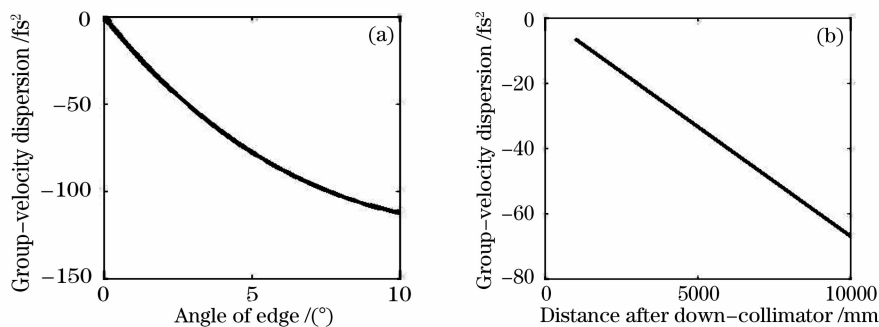


图 2 诊断系统产生的群速度色散。(a) 楔角与群速度色散的关系曲线; (b) 传输距离与群速度色散的关系曲线

Fig. 2 Group velocity dispersion of the diagnostic system. (a) Group velocity dispersion versus  $\alpha$ ; (b) group velocity dispersion versus optical path

从图 2 可以发现, 参数诊断系统中的楔角产生的群速度色散为负值, 并且随着楔角和传输距离的增加而增加。这一点与棱镜对的效果是类似的。它可以在一定程度上抵消玻璃材料引入的正群速度色散, 减小超短脉冲时间波形的变化。输入脉冲与输出脉冲的关系为

$$\tau_{\text{out}}^2 = \tau_{\text{in}}^2 + 16 \left( \frac{d^2\phi}{d\omega^2} \ln 2 \right)^2 / \tau_{\text{in}}^2, \quad (15)$$

由(15)式可以得到超短脉冲经过参数诊断系统之后的宽度变化情况, 如图 3 所示。以 1% 变化量为判

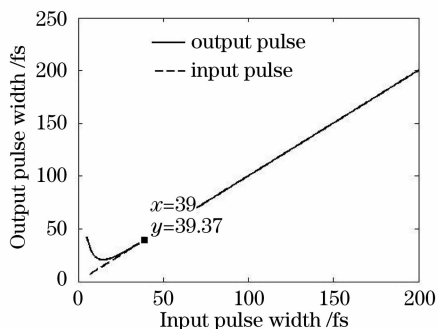


图 3 输出脉冲与输入脉冲的关系曲线

Fig. 3 Output pulse width versus input pulse width

断依据, 输入脉冲为 39 fs 时, 输出脉冲为 39.37 fs, 对应的脉冲宽度变化为 0.95%, 此时可近似认为当输入脉冲大于 39 fs 时群速度色散对输出脉冲宽度无影响。

## 4 结 论

通过上述分析可知, 该参数诊断系统对输入光束的角度变化会产生放大作用, 放大倍率等于缩束系统的倍率。这不仅会影响后续空间类参数测量仪器的精度和工作范围, 它自身也会产生群速度色散, 改变超短脉冲的时间特性。脉冲宽度发生变化的区间在 39 fs 以下, 大于 39 fs 的超短脉冲经过该参数诊断系统, 其脉冲宽度不会产生变化。

大型超短脉冲激光装置的参数诊断是一项重要且崭新的工作。常见的超短脉冲激光装置的光束直径都在 100 mm 以下, 而且能量也不高。为了适应大型超短脉冲激光装置的发展需求, 需要开展超短脉冲激光参数诊断系统的研究工作。和以往的纳秒级脉冲相比, 需要考虑超短脉冲激光的特殊性, 即较宽的光谱带宽和较短的脉冲时间宽度。

## 参 考 文 献

- 1 M. D. Perry, D. Pennington, B. C. Stuart *et al.*. Petawatt laser pulses[J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(3): 160~162
- 2 Wang Chuncan, Zhang Fan, Geng Rui *et al.*. Study on the improved high-power femtosecond pulse generation system[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(5): 655~660  
王春灿,张帆,耿蕊等. 改进的高功率飞秒脉冲系统理论研究[J]. *中国激光*, 2007, **34**(5): 655~660
- 3 Yang Xuedong, Xia Lan, Ma Weixin *et al.*. Experiment of real-time monitoring and adjusting of rotation error about tiled gratings[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(9): 1222~1226  
杨学东,夏兰,马伟新等. 光栅拼接旋转偏差实时监测调节实验[J]. *中国激光*, 2007, **34**(9): 1222~1226
- 4 Ouyang Xiaoping, Zhang Fuling, Zha Penzheng *et al.*. Second order autocorrelation applied on femtosecond laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(3): 742~745  
欧阳小平,张福领,张攀政等. 短脉冲激光的二阶自相关研究[J]. *中国激光*, 2009, **36**(3): 742~745
- 5 Ouyang Xiaoping, Zhang Fuling, Tang Shunxing *et al.*. Calibration of pulse signal-to-noise measurement for femtosecond laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(4): 945~948  
欧阳小平,张福领,唐顺兴. 短脉冲激光信噪比测量的标定方法[J]. *中国激光*, 2009, **36**(4): 945~948
- 6 R. L. Fork, O. E. Martinez, J. P. Gordon. Negative dispersion using pairs of prisma[J]. *Opt. Lett.*, 1984, **9**(5): 150~152
- 7 O. E. Martinez, J. P. Gordon, R. L. Fork. Negative group-velocity dispersion using refraction[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1984, **1**(10): 1003~1006