

# 基于自聚焦透镜耦合光纤取样的高功率激光装置 调频脉冲时间波形测量技术

李磊<sup>1,2,3</sup>, 张波<sup>1</sup>, 夏彦文<sup>1</sup>, 彭志涛<sup>1</sup>, 董军<sup>1</sup>, 孙志红<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900;

<sup>2</sup>等离子体物理重点实验室, 四川 绵阳 621900;

<sup>3</sup>中国工程物理研究院研究生院, 北京 100088

**摘要** 提出了一种基于自聚焦透镜耦合单模光纤测量调频小宽带脉冲时间波形的技术方案。理论分析和实验结果表明:自聚焦透镜耦合光纤的取样能量随透镜与光束夹角增大而减小,但同一角度下各级次光谱耦合效率一致,取样过程不会引入附加的调频-调幅(FM-AM)效应,耦合效率下降一半时允许的光束角漂量为 1 mrad。该技术方案除具有便于集成、低成本、抗光束扰动能力和电磁干扰能力强等优点外,还通过自聚焦透镜扩大了取样面积,有效提高了取样能量,并抑制了光束截面能量起伏对测量系统的不良影响。该技术方案为高功率激光装置脉冲波形测量技术的改进研究提供了一定的理论和实验基础。

**关键词** 测量; 自聚焦透镜; 脉冲时间波形; 高功率激光

中图分类号 TN247

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0504002

## Pulse Temporal Profile Measurement Technology of Frequency Modulation Based on Self-Focusing Lens Coupling Optical Fiber Sampling for High Power Laser Facility

Li Lei<sup>1,2,3</sup>, Zhang Bo<sup>1</sup>, Xia Yanwen<sup>1</sup>, Peng Zhitao<sup>1</sup>, Dong Jun<sup>1</sup>, Sun Zhihong<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China;

<sup>2</sup>Science and Technology on Plasma Physics Laboratory, Mianyang, Sichuan 621900, China;

<sup>3</sup>Graduate School of China Academy of Engineering Physics, Beijing 100088, China

**Abstract** In this paper, a pulse temporal profile measurement scheme based on self-focusing lens coupling of single-mode optical fiber for small broadband frequency modulation pulse is introduced. Theoretical analysis and experimental results show that sampling energy with self-focusing lens coupling fiber decreases with the increase of the angle between lens and beam, but spectrum coupling efficiency of different orders is the same at the same angle. It means that the process of sampling will not introduce additional frequency modulation leading to amplitude modulation (FM-AM) effect. When the coupling efficiency drops in a half, the allowable drift angle of beam is 1 mrad. The technique scheme has advantages such as convenient to integrating, low cost and resistant to beam disturbance and electromagnetic interference. Besides, the sampling area has been expanded through the self-focusing lens that effectively improves the sampling energy and suppresses the adverse impact of beam cross section energy ups and downs on the measurement system. The technical scheme provides a certain theoretical and experimental basis for the improvement research of high power laser facility temporal profile measurement technology.

收稿日期: 2016-11-15; 收到修改稿日期: 2017-01-17

基金项目: 国家自然科学基金(61377102, 61605185)、中物院激光聚变研究中心青年人才成长基金

作者简介: 李磊(1989—), 男, 硕士研究生, 主要从事高功率脉冲激光参数测量方面的研究。

E-mail: lilei201213@sina.cn

导师简介: 彭志涛(1972—), 男, 博士, 研究员, 主要从事损伤在线检测和参数测量方面的研究。

E-mail: peng\_zhitao@163.com(通信联系人)

**Key words** measurement; self-focusing lens; pulse temporal profile; high power laser

**OCIS codes** 120.4570; 060.2300; 140.3295; 140.3460

## 1 引 言

高功率激光装置中,脉冲时间波形是表征脉冲功率特性的重要参数<sup>[1-4]</sup>。脉冲波形的精确测量对于束间功率平衡调节和物理实验结果分析具有重要意义<sup>[5-6]</sup>。高功率激光装置中光束传输过程中的微扰<sup>[7]</sup>和液晶等元件<sup>[8]</sup>会影响激光脉冲的空间分布均匀性,给脉冲波形的取样测量带来一定困难。目前,时间波形测量主要有两种取样方式:空间光直接取样方式和缩束透镜耦合单模光纤取样方式。空间光直接耦合大口径光电管取样方式具有取样能量大、抗扰动能能力强的特点,但存在建设成本高、时分复用困难和信号传输易受电磁干扰等难题;缩束透镜耦合单模光纤取样方式具有易于集成、可靠性高、建设成本低、抗电磁干扰能力强的特点,但取样能量小,抗光束空间扰动能力较弱<sup>[9-11]</sup>。

本文提出了一种基于自聚焦透镜耦合(SFLC)单模光纤取样的高功率装置脉冲时间波形测量技术方案。该技术方案除具有光纤取样便于集成、成本低、抗电磁干扰能力强等优点外,还通过自聚焦透镜扩大了取样面积和区域,有效提高了取样耦合能量并抑制了光束截面内能量起伏对测量系统稳定性的不良影响。

## 2 光谱耦合效率的理论分析

自聚焦透镜可实现光束以平滑的方式远场耦合进单模光纤,且具有体积小、易与光纤集成的特点,现在广泛用作半导体激光或空间光耦合光纤的耦合器。当采用自聚焦透镜耦合单模光纤进行光束取样时,自聚焦透镜可以等效为一个焦距为  $f$ 、口径为  $D$  的薄透镜,如图 1 所示,自聚焦透镜焦平面与光纤端面重合,透镜光轴位于光纤芯径内。

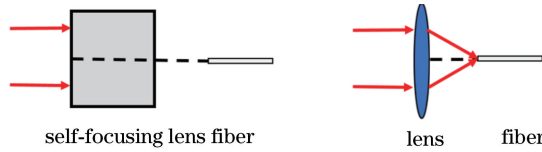


图 1 平行光束耦合进光纤时,自聚焦透镜的等效示意图

Fig. 1 Equivalent diagram of self-focusing lens when parallel beam is coupled into the fiber

高功率激光装置为了抑制受激布里渊散射(SBS)效应和改善束匀滑效果,前端通常采用调频小宽带脉冲作为注入种子源。调频小宽带脉冲光谱中有多个分立的光谱分量<sup>[12]</sup>。当各光谱分量的取样耦合效率不一致时会引起调频-调幅(FM-AM)效应<sup>[13]</sup>。此时测量结果不能反映被测光束的真实波形。为评价自聚焦耦合光纤取样测量系统的波形保真能力,首先对自聚焦透镜的光谱耦合效率进行分析模拟。

平行光光束经透镜会聚到光纤端面上,耦合效率  $\eta$  由光纤端面上光场  $E_A(r)$ <sup>[14]</sup> 和光纤模场  $M(r)$ <sup>[15]</sup> 的重叠积分给出<sup>[16]</sup>:

$$\eta = \frac{\left| \int_0^{2\pi+\infty} \int_0^{2\pi+\infty} M(r) E_A(r) r dr d\theta \right|^2}{\int_0^{2\pi+\infty} \int_0^{2\pi+\infty} |E_A(r)|^2 r dr d\theta \cdot \int_0^{2\pi+\infty} \int_0^{2\pi+\infty} |M(r)|^2 r dr d\theta}, \quad (1)$$

$$\eta = \left| \int_0^{+\infty} \frac{2\sqrt{2}}{\omega_0} J_1(3.83r/\omega_1) \exp\left(-\frac{r^2}{\omega_0^2}\right) dr \right|^2, \quad (2)$$

式中  $\lambda$  是波长,  $J_1$  是一阶第一类贝塞尔函数,  $\omega_1$  是艾里斑半径,  $\omega_0$  为单模光纤模场半径。

此外,由于光束耦合过程中不同光谱成分等效焦距不同,对各光谱分量引入离焦量  $\Delta f$ 。离焦量可表示为:

$$\Delta f(\lambda) = f(\lambda) - f(\lambda_0), \quad (3)$$

$$f(\lambda) = \frac{1}{n_0 \sqrt{A} \sin(\sqrt{A} z)}, \quad (4)$$

式中自聚焦透镜中心折射率  $n_0$  和折射率梯度系数  $\sqrt{A}$  分别为:

$$n_0 = 1.5927 + \frac{8.14 \times 10^{-3}}{\lambda^2}, \quad (5)$$

$$\sqrt{A} = 0.3331 - \frac{5.364 \times 10^{-3}}{\lambda^2} - \frac{2.626 \times 10^{-4}}{\lambda^4}. \quad (6)$$

考虑到光路存在的自聚焦透镜角度偏转误差,使得光束与透镜轴存在夹角  $\theta = \sqrt{\Delta\varphi_x^2 + \Delta\varphi_y^2}$ ,  $\Delta\varphi_x$  和  $\Delta\varphi_y$  为透镜轴与  $yo_z$  和  $xoz$  平面之间的角度。会聚光斑偏离光纤中心,  $\Delta r = f \tan \theta = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}$ ,  $\Delta x$  和  $\Delta y$  为艾里斑中心与光纤中心在  $x$  轴和  $y$  轴上的位移。光谱成分耦合效率公式修正为:

$$\eta = \left| \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \frac{2\sqrt{2}}{\omega_0} J_1(3.83r/\omega_1) \exp(ik_0 \Delta f) \exp \left[ -\frac{(r \cos \theta - \Delta x)^2 + (r \sin \theta - \Delta y)^2}{\omega_0^2} \right] \times \right. \\ \left. \exp \left\{ j2\pi \left[ \frac{r \cos \theta}{\lambda} \sin(\Delta\varphi_y) + \frac{r \sin \theta}{\lambda} \sin(\Delta\varphi_x) \right] \right\} dr d\theta \right|^2, \quad (7)$$

式中

$$\omega_1 = \frac{1.22\lambda f}{D} = 1.22\lambda F. \quad (8)$$

高功率激光装置中通常采用正弦相位调制的调频小宽带脉冲作为注入种子源,时间波形表达式为:

$$E(t) = \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{t}{t_0} \right)^{2m} \right] \exp [i2\pi\nu_0 t + iM \sin(2\pi\nu_m t)], \quad (9)$$

由(9)式傅里叶变换得脉冲光谱为:

$$\tilde{E}(\nu) = \tilde{E}_0 \sum_{k=-\infty}^{\infty} A(k, M) \cdot \delta(\nu - k\nu_m - 2\pi\nu_0), \quad (10)$$

式中  $m$  为超高斯阶数,  $t_0$  为脉冲  $1/e$  脉宽,  $\nu_m$  为相位调制频率,  $M$  为相位调制深度,  $\nu_0$  为中心频率,  $k$  为光谱级次,  $A(k, M)$  为光谱幅度包络。

结合激光装置光谱色散匀滑(SSD)技术的要求及抑制受激布里渊散射的需要,模拟理论选取的脉冲函数参数为:  $m=40$ , 脉冲半峰全宽为 3 ns,  $1/e$  脉宽为 1.512 ns,  $f_m = 2.5$  GHz,  $M = 7.45$ , 中心波长  $\lambda_0 = 1053$  nm,  $\nu_0 = 2.8517 \times 10^5$  GHz, 光谱带宽  $\Delta\lambda = 0.15$  nm, 此时脉冲的时间波形和光谱分别如图 2(a)和(b)所示。

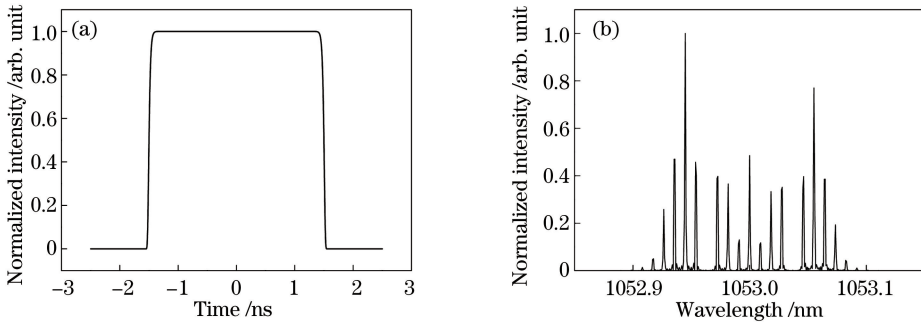


图 2 调频小宽带脉冲(a)时间波形和(b)光谱图

Fig. 2 (a) Temporal profile and (b) spectrum for small broadband frequency modulation pulse

图 2(b)中光谱级次  $k_0, k_1, k_2, k_3, k_5, k_6, k_7, k_8$  对应的波长为 1053, 1053.0195, 1053.0375, 1053.057, 1053.0945, 1053.1125, 1053.132, 1053.15, 1053.168 nm。光谱级次  $k_{-1}, k_{-2}, k_{-3}, k_{-5}, k_{-6}, k_{-7}, k_{-8}$  对应波长与上述波长关于  $k_0$  对称分布。 $k_{\pm 4}$  级光谱缺失。

对图(2)所示脉冲经自聚焦透镜和光纤后的光谱耦合效率进行计算,所用自聚焦透镜长度周期  $l = 2\pi/\sqrt{A}$ , 自聚焦棒长  $z = 0.23l$ ,  $\sqrt{A} = 0.328$ ,  $n_0 = 1.6$ , 自聚焦棒截面半径  $r_0 = 0.9$  mm, 自聚焦透镜等效焦距  $f_0 = 1.92$  mm(该自聚焦透镜参数为光纤通信中常用自聚焦透镜参数,可满足前期实验要求,在后期实际测

量应用中还需改进)。光束与透镜轴夹角为  $0^\circ$  时的输入和输出光谱以及各级次光谱耦合效率随自聚焦透镜与光束夹角变化关系分别如图 3(a) 及 (b) 所示。

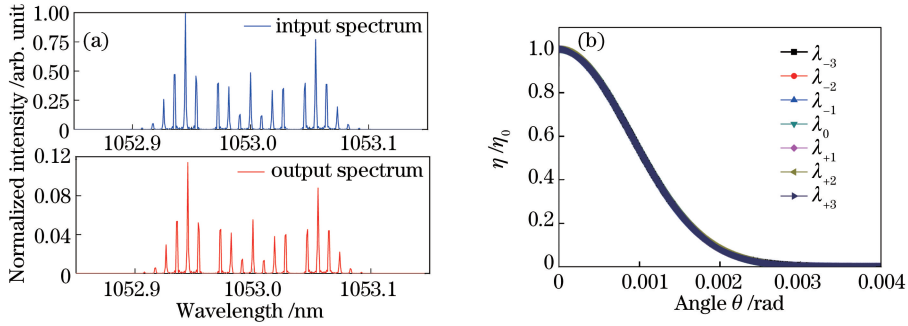


图 3 模拟结果。(a)输出光谱与输入光谱;(b)耦合效率随光束与自聚焦透镜夹角的变化曲线

Fig. 3 Results of simulation. (a) Input and output pulse spectra; (b) curves of coupling efficiency along with angle between beam and self-focusing lens

图 3(a)中,光束与透镜轴夹角为  $0^\circ$  时输出光谱与输入光谱分布总体保持一致,输入谱中各级次波长关于中心波长严格对称,输出谱中各级次光谱波长关于中心波长基本对称。经计算输出谱中边缘光谱级次  $k_8$  和  $k_{-8}$  远离中心波长,与中心频率  $k_0$  的耦合效率差异最大,  $k_8$  耦合效率比  $k_0$  多  $0.029\%$ ,  $k_{-8}$  耦合效率比  $k_0$  少  $0.029\%$ ,根据傅里叶变换计算得到由于各级光谱耦合效率的微小偏差引起的波形强度调制度为  $0.0045\%$ ,可忽略不计,此时的取样耦合效率为  $\eta_0 = 11.4\%$ 。

图 3(b)为模拟得到中心频率附近几级光谱分量的耦合效率变化曲线,  $k_0$  级、 $k_{\pm 1}$  级、 $k_{\pm 2}$  级、 $k_{\pm 3}$  级光谱分量耦合效率均随自聚焦透镜与光束夹角的增大而减小,但同一角度下各光谱分量的取样耦合效率一致,光谱成分均匀地耦合进光纤,不会引入 FM-AM 效应。

结合图 3(a)及图 3(b)可知,对于实验中带宽为  $0.15 \text{ nm}$  的调频小宽带脉冲,模拟结果显示自聚焦透镜耦合光纤取样方式的取样能量随透镜与光束夹角增大而减小,但同一角度下各级次光谱耦合效率保持一致,取样过程不会引入附加的 FM-AM 效应;当光束与透镜轴夹角为  $0^\circ$  时耦合效率最大,为  $11.4\%$ ,耦合效率下降一半时光束的角漂量(光束与透镜夹角的变化量)约为  $1 \text{ mrad}$ 。

### 3 实验结果与分析

为对光谱耦合效率的理论模拟结果进行验证,搭建了如图 4 所示的实验装置,调频脉冲光束经过光阑和分光镜,  $30\%$  能量进入自聚焦透镜耦合单模光纤取样测量系统,  $70\%$  能量经反射镜直接进入一个大口径光电管 ( $\Phi 10 \text{ mm}$ ),两者的输出信号通过一高速示波器检测记录,通过比较两者的测量结果对自聚焦耦合光纤取样方式的波形保真能力进行验证。

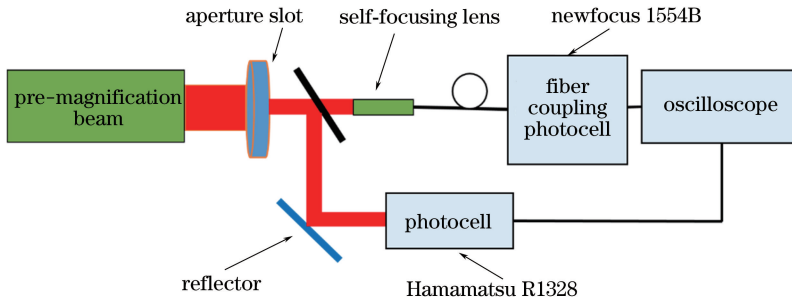


图 4 调频脉冲波形测量实验原理图

Fig. 4 Experimental schematic diagram of waveform measurement for frequency modulation pulse

实验结果如图 5(a)所示,自聚焦耦合光纤取样方式测量得到的时间波形的调制深度略大于光电管直接取样测得的时间波形,但这并不是光束耦合过程中所引入的附加 FM-AM 效应,而是由于所用的光电探测器

和信号电缆的频率响应特性不一致引起的。实验中自聚焦透镜耦合光纤取样探测器的响应时间为 35 ps,其到示波器的电缆长度为 0.5 m,总响应时间约为 35 ps;光电管响应时间为 45 ps,其到示波器的电缆长度为 3 m,总响应时间约为 100 ps。

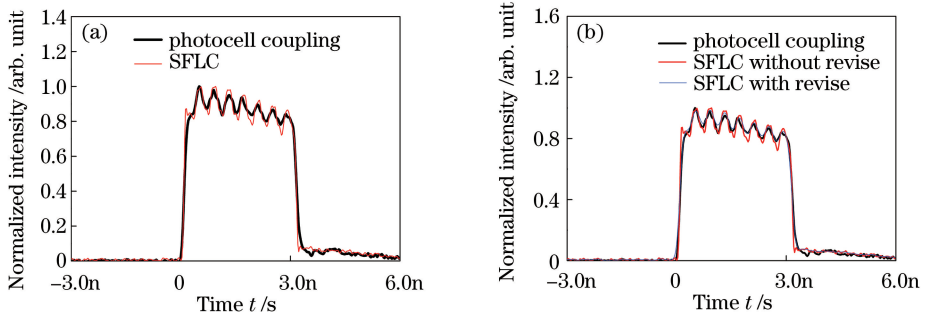


图 5 调频脉冲波形测量的实验结果。(a)测量结果;(b)处理后结果

Fig. 5 Experimental results of frequency modulation pulse measurement. (a) Measurement results; (b) results after treatment

自聚焦透镜耦合光纤取样测量系统的响应时间比光电管快得多,可认为前者响应为  $\delta$  响应。自聚焦透镜耦合光纤取样测量系统的修正波形为  $g_1(t)$ 。将输入脉冲波形  $f(t)$  经响应时间为  $T_0 = 100$  ps 的模拟探测系统响应输出,得到光电管测量系统的修正波形  $g_2(t)$ ,表示为:

$$h_1(t) = \delta(t), \tag{11}$$

$$g_1(t) = \int f(\tau) h_1(t - \tau) d\tau = f(t), \tag{12}$$

$$h_2(t) = \exp\left[-\left(\frac{t}{T_0}\right)^2\right], \tag{13}$$

$$g_2(t) = \int f(\tau) h_2(t - \tau) d\tau = \int g_1(\tau) h_2(t - \tau) d\tau. \tag{14}$$

自聚焦透镜耦合光纤取样测量系统的修正波形和光电管系统波形如图 5(b)所示,从图中可以看出,与修正前相比,修正后的自聚焦耦合光纤取样测量波形强度调制轮廓特征不变,调制度变小;修正后的脉冲波形与光电管直接取样测量得到的波形特征和调制大小基本一致。

为了对自聚焦耦合光纤取样方式光谱耦合效率的理论模拟结果进行验证,实验中对缩束透镜耦合 200  $\mu\text{m}$  光纤(3 m 长,光谱成分全部耦合)和自聚焦透镜耦合光纤两种取样方式得到的输出光谱分布进行了测量比较,结果如图 6 所示。结果显示自聚焦透镜耦合光纤输出光谱与缩束透镜后端输出光谱分布基本一致,自聚焦透镜耦合光纤取样不会导致各级次光谱耦合能量的差异及 FM-AM 效应的产生,取样结果能够准确反映被测口径内调频脉冲的时间波形状况。

此外,实验中还对比了波形调制度和耦合能量(效率)随光束与透镜轴夹角  $\theta$  变化规律的理论模拟结果进行

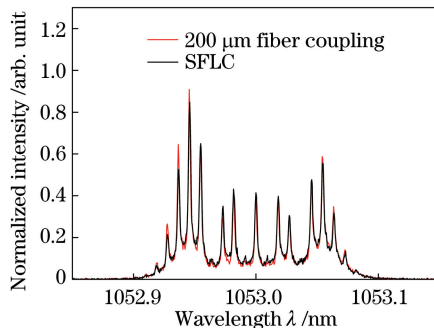


图 6 两种测量方式的脉冲光谱图

Fig. 6 Pulse spectrum with two measurement methods

了验证,改变 $\theta$ ,得到的输出脉冲强度调制度和脉冲能量随 $\theta$ 的变化曲线如图7所示。从图7(a)中可以看出,脉冲波形强度调制度随夹角变化有微小起伏,光束与透镜轴夹角 $\theta$ 在 $\pm 3$  mrad内变化,波形强度调制度变化小于0.01,可以认为其值保持不变;图7(b)中耦合能量随自聚焦透镜与光束夹角增大而减小,耦合能量衰减一半对应的 $\theta$ 值约为0.9 mrad(理论分析结果为1 mrad)。实验结果与理论分析基本吻合。当光束与透镜轴夹角为 $0^\circ$ 时,耦合效率最大,经计算为9.1%,小于理论分析结果11.4%。这主要是因为自聚焦透镜的耦合效率易受角度影响,在实验中很难保证两个方向上角度均为零。

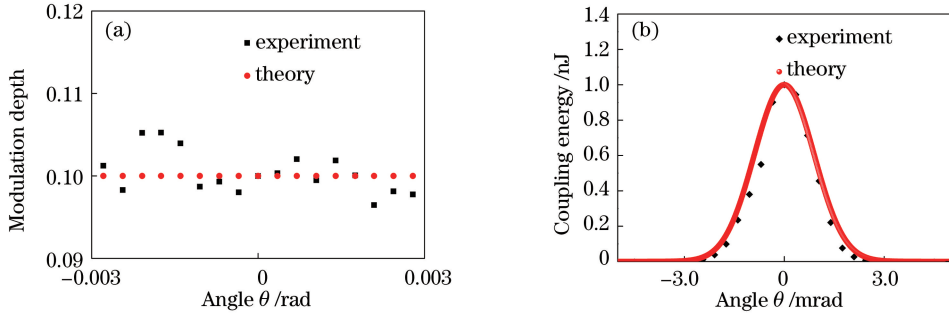


图7 自聚焦透镜耦合测量系统的波形调制度和耦合能量随夹角的变化曲线。(a)调制度;(b)耦合能量

Fig. 7 Curve of modulation depth and coupling energy along with the change of angle in self-focusing lens coupling measurement system. (a) Modulation depth; (b) coupling energy

根据图7(b),耦合能量随夹角变化曲线近似为余弦函数,自聚焦透镜耦合光纤取样的取样能量主要取决于自聚焦透镜取样面积,实验中当自聚焦透镜与光束夹角为 $0^\circ$ 时,自聚焦透镜的取样面积为 $2.5 \text{ mm}^2$ ,取样能量为 $2 \text{ nJ}$ 。由于透镜组缩束比和单模光纤内径的限制,缩束透镜耦合单模光纤取样方式由于受限于单模光纤芯径的大小,其取样面积通常不超过 $0.0006 \text{ mm}^2$ 。相比缩束透镜耦合单模光纤取样方式,自聚焦透镜耦合光纤取样方式更容易获得较大的取样面积,实现对接收面内的光束能量的空间分布起伏的匀滑作用,降低光束空间分布不均匀对测量系统稳定性的不良影响。

## 4 结 论

本文提出了一种基于自聚焦透镜耦合单模光纤取样的高功率装置脉冲时间波形测量技术方案,理论分析和实验结果均表明自聚焦耦合光纤取样方式取样能量随透镜与光束夹角增大而减小,基本呈余弦变化规律。同一角度下各级次光谱耦合效率一致,取样过程不会引入附加FM-AM效应,所得到的测量结果能够准确反映被测口径内调频脉冲的时间波形。该技术方案除具有光纤取样便于集成、成本低、抗电磁干扰能力强等优点外,还通过自聚焦透镜扩大了取样面积,尤其是可根据装置要求,改进自聚焦透镜设计获得更大的接收口径,有效提高了取样能量并抑制了光束截面能量起伏对测量系统稳定性的不良影响。研究工作为高功率激光装置脉冲波形测量系统的改进提供了一定的理论和实验工作基础。

## 参 考 文 献

- [1] Glenzer S, Jones O, Speck D R, *et al.*  $3\omega$  power balance procedure on the NIF[R]. UCRL-ID-142777, 2001: 1-10.
- [2] Sun Zhihong, Wang Wenyi, Li Hua, *et al.* The technology of power balance measurement of multi-beam laser[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(6): 1493-1497.  
孙志红, 王文义, 刘 华, 等. 多路激光功率平衡测量技术研究[J]. 中国激光, 2009, 36(6): 1493-1497.
- [3] Li Hai, Liang Yue, Zhao Runchang, *et al.* Waveform control technique of high power laser pulse shaping[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(9): 2377-2380.  
李 海, 梁 越, 赵润昌, 等. 高功率激光整形脉冲波形控制技术[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(9): 2377-2380.
- [4] Zhao Dongfeng, Wang Li, Lin Zunqi, *et al.* Experimental study of 351 nm propagation with high fluence on No. 9 system of SG-II laser facility[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(7): 0702001.  
赵东峰, 王 利, 林尊琪, 等. 在神光 II 装置第九路系统开展 351 nm 波长激光高通量传输的实验研究[J]. 中国激光, 2011, 38(7): 0702001.

- [5] Lindl J D, Amendt P, Berger R L, *et al.* The physics basis for ignition using indirect-drive targets on the National Ignition Facility[J]. *Physics of Plasmas*, 2004, 11(2): 339-491.
- [6] Hüller S, Porzio A, Robiche J. Order statistics of high-intensity speckles in stimulated Brillouin scattering and plasma-induced laser beam smoothing[J]. *New Journal of Physics*, 2013, 15(2): 025003.
- [7] Cao Tingfen, Xiong Zhao, Li Keyu, *et al.* Research on precise alignment for transport system installation of shenguang-III laser driver[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(11): 112201.  
曹庭分, 熊 召, 李恪宇, 等. 神光-III 主机装置光传输系统安装精度准直技术研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(11): 112201.
- [8] Lei Yu, Tong Qing, Zhang Xinyu. Liquid crystal microlens array for dual model imaging[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(5): 0511004.  
雷 宇, 佟 庆, 张新宇. 基于双模成像的液晶微透镜阵列[J]. *光学学报*, 2016, 36(5): 0511004.
- [9] Sun Zhihong, Dong Jun, Xia Yanwen, *et al.* Temporal profile measurement of frequency modulation beams for high power laser facility[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(11): 1102009.  
孙志红, 董 军, 夏彦文, 等. 高功率激光装置调频脉冲时间波形测试技术研究[J]. *中国激光*, 2013, 40(11): 1102009.
- [10] Lu Zonggui, Xia Yanwen, Tang Jun, *et al.* Pulse-shape measurement technology for multi-beams infrared laser[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(6): 1129-1132.  
卢宗贵, 夏彦文, 唐 军, 等. 多路红外激光脉冲波形测量技术[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(6): 1129-1132.
- [11] Xia Yanwen, Sun Zhihong, Zhao Runchuang, *et al.* Improvement of infrared temporal profile measurement system for SG-III prototype laser facility[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 40(6): 1453-1457.  
夏彦文, 孙志红, 赵润昌, 等. 神光III 原型装置红外脉冲波形测量系统的研究[J]. *红外与激光工程*, 2012, 40(6): 1453-1457.
- [12] Tian Xiaocheng, Zhang Kun, Zhu Na, *et al.* Research on linear chirped pulse generated by direct phase modulation[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(3): 0302002.  
田小程, 张 崑, 朱 娜, 等. 直接相位调制产生线性啾啾脉冲特性研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(3): 0302002.
- [13] Liao Bo. Theoretical study of FM to AM issue on ICF facility[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2006: 50-51.  
廖 波. 高功率激光装置中幅度调制效应的研究[D]. 上海: 中国科学院上海光学精密机械研究所, 2006: 50-51.
- [14] Goodman J W. Introduction to Fourier optics[M]. New York: McGraw-Hill, 1996.
- [15] Hirooka T, Hori Y, Nakazawa M. Gaussian and sech approximations of mode field profiles in photonic crystal fibers[J]. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2004, 16(4): 1071-1073.
- [16] Chen Xuekun, Zhang Lu, Wu Zhiyong, *et al.* Coupling efficiency of free-space laser coupling into single mode fiber and photonic crystal fiber[J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(2): 208-215.  
陈雪坤, 张 璐, 吴志勇, 等. 空间激光与单模光纤和光子晶体光纤的耦合效率[J]. *中国光学*, 2013, 6(2): 208-215.