

基于线性调频脉冲的光谱色散 平滑技术实验研究^{*}

张 锐[†] 王建军 栗敬钦 刘兰琴 邓青华

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

(2009 年 2 月 18 日收到; 2009 年 6 月 8 日收到修改稿)

在激光驱动惯性约束聚变研究中, 束靶高效耦合依赖于采用合适的束匀滑措施. 目前, 结合光谱色散平滑 (smoothing by spectral dispersion, 简称 SSD)、相位板和光束叠加的技术是固体激光驱动器采用的主流束匀滑技术. 瞄准间接驱动, 实验研究了一套基于线性调频脉冲的 SSD 技术. 在采用该技术后, 远场色散方向上的高频调制得到了匀滑, 色散后的近场也得到了匀滑. 测量得到的光谱结构与理论模拟接近. 该方法不需要相位调制器, 而这类器件在传统 SSD 技术中是一个关键器件.

关键词: 远场, 近场, 光谱色散平滑, 惯性约束聚变

PACC: 4280F, 4281, 4260K, 5255M

1. 引 言

大于 10 μm 的靶面高频光强调制容易引起等离子体成丝, 是进洞条件下间接驱动束平滑作用的主要目标. 光谱色散平滑 (SSD) 的概念起先由罗彻斯特大学的 Skupsky 等^[1]提出, 后来美国的 OMEGA 升级装置和国家点火装置 (national ignition facility, 简称 NIF) 相继采用了该技术. 该技术可在相位板基础上对靶面光束进行时域平滑. 其优点是在光栅的像传递面上只有位相发生改变, 而近场保持不变, 因此避免了自聚焦和非线性光谱展宽等可能限制高功率玻璃激光装置放大的因素. 它的另一个重要优点是可以实现高效三倍频. 由于一维 SSD 不足以实现允许的发散角内的束平滑, 研究人员又提出在两个正交方向上加入光谱角色散的二维 SSD 方案^[2]. 经过简化, 标准二维 SSD 中的第一块光栅被去掉, 调制器间的两块光栅合成一个旋转了一定角度的光栅. 2002 年, Miyaji 和 Miyanaga 等^[3]采用三方向光谱角色散来降低二维 SSD 中不可避免的相干斑现象, 辐照均匀性进一步获得提高, 但结构更加复杂. 目前, 二维和三方向 SSD 技术主要用于对

靶面辐照均匀性要求较高的直接驱动中. 对间接驱动, 目前主要的驱动器研究者仍以采用一维 SSD 技术为主. 对于一维 SSD 技术, 其关键又在于产生具有可满足束匀滑需要的带宽且时间平滑的调频脉冲. 目前国际上主要采用微波驱动的相位调制器来产生调频脉冲, 这其中典型的包括美国国家点火装置^[4]和法国兆焦耳激光装置^[5]所采用的波导相位调制器, 以及美国水星 Mercury 装置采用的体相位调制器^[6]. 但这种方案对脉冲放大过程中由于光谱缺失会产生调频到调幅的转变, 即 FM-to-AM 效应^[7], 对这种现象的控制要采取复杂的系统的控制. 国内, 2006 年江秀娟等^[8,9]用数值方法研究了激光驱动器系统中使用正弦调频脉冲光谱色散平滑技术后光束的衍射特性, 模拟结果表明, 光谱色散会使光束衍射光斑变大, 近场空间强度均匀性改善, 而远场光斑内部存在光强接近于均匀分布的区域.

瞄准间接驱动, 我们研究了基于线性调频脉冲的 SSD 技术^[10]. 理论上线性调频脉冲是由频率随时间线性分布的矩形脉冲周期性分布而成, 而实际应用中获得这样的脉冲非常困难, 这里采用线性啁啾脉冲堆积的方法来获得调频脉冲, 这种脉冲也可以

^{*} 国家自然科学基金 (批准号: 60878058) 资助的课题.

[†] E-mail: zrsnowmanzr@hotmail.com

称为周期性啁啾脉冲. 该方法还便于满足多功能激光驱动器对前端脉冲任意整形能力、快上升沿和主脉冲与其他各类脉冲精密同步的需求.

2. 理论模型

由正弦调频脉冲的 SSD 理论, 可以推导出基于周期性啁啾脉冲的 SSD 理论^[11] (见图 1). 建立脉冲

堆积模型时, 用振幅叠加求合成电场

$$E(t) = \sum_{k=0}^n \alpha_k \exp \left[- \frac{(t - krT_{FWHM})^{2m}}{2\tau^{2m}} - ib \frac{(t - krT_{FWHM})^2}{2\tau^2} \right] e^{-i\omega_0(t - krT_{FWHM})}, \quad (1)$$

其中 n 为堆积脉冲数, α_k 是第 k 个啁啾脉冲的强度调制因子, r 是脉冲重叠因子, b 是输入脉冲啁啾参数, 有关系 $\Delta\omega_{\perp}T_{0\perp} = \sqrt{1+b^2}$.

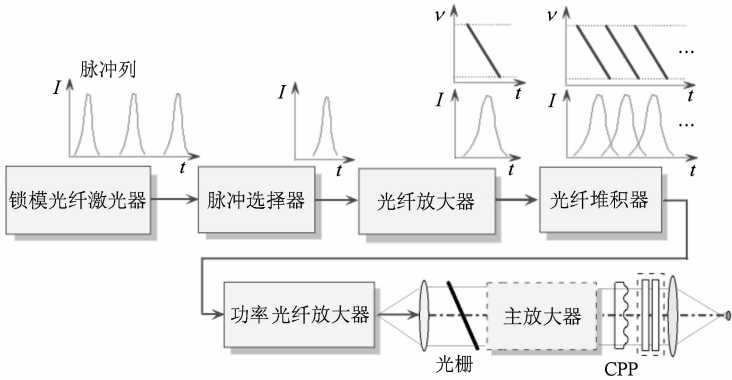


图 1 基于线性调频脉冲的光谱色散平滑技术示意图

由此得到光栅后的电场为

$$E'(t) = \sum_{k=0}^n \alpha_k \exp[-i\omega_0(t - krT_{FWHM})] \times \exp \left[- \frac{1 + ib}{2\tau^2} \left(t - krT_{FWHM} + \frac{\Delta\theta}{\Delta\lambda} \frac{\lambda}{c} Y - \frac{Z}{c} \right)^2 \right]. \quad (2)$$

光束截面上的频率变化可以理解为截面不同部位时间延迟不同而引起的. 由 (2) 式, 总时间延迟与光

栅色散和光束口径 D 成正比.
将 Y 前因子定义为
$$\xi \equiv (\Delta\theta/\Delta\lambda) \cdot (\lambda/c),$$

得到

$$\xi = t_D/D.$$

色循环数这里定义为

$$N_c \equiv t_D/T_{FWHM}.$$

可以通过图 2 对此进行理解.

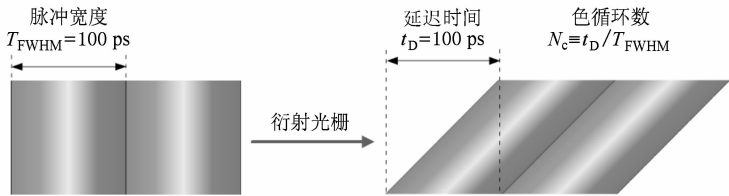


图 2 色循环数的定义 $N_c = 1$ 的情况

3. 实验研究

实验的主要目的是考核线性调频脉冲色散后的近场和焦斑的基本匀滑规律. 实验光路如图 3 所示. 采用的闪耀光栅刻线密度为 883 1/mm, 闪耀角

为 27.7°. 取得的主要实验结果如下.

3.1. 远场

采用的科学级 CCD 像元尺寸为 24 $\mu\text{m} \times 24 \mu\text{m}$, 包含 512 $\times$ 512 像素, 图像水平宽度为 12.288 mm. 在采集图 4(c) 和 (d) 时在 1/4 波片后插入了一

块相位片来引入波前畸变,以模拟高功率激光装置中钼玻璃带来的波前畸变.

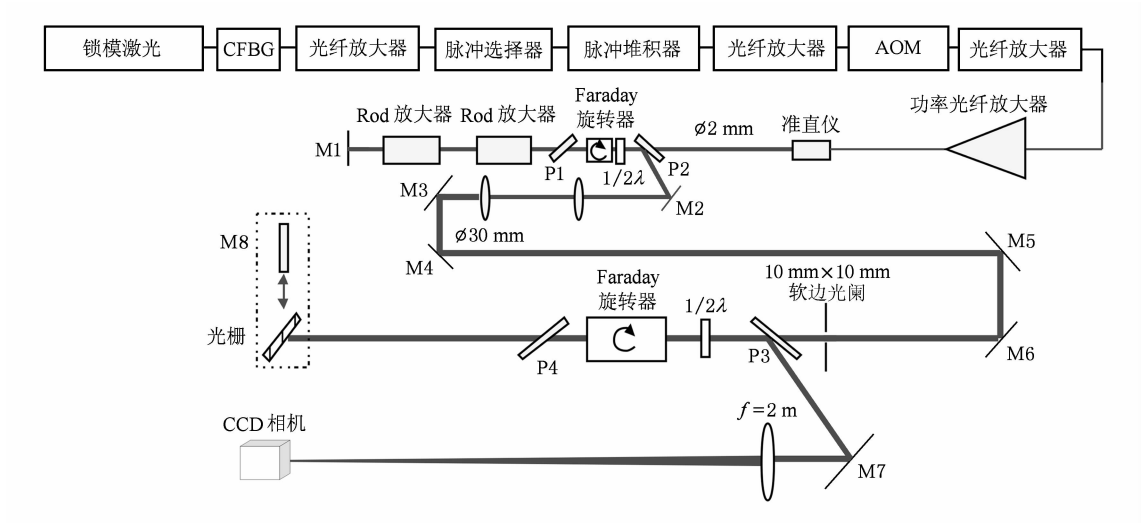


图 3 基于线性调频脉冲的光谱色散平滑台面实验光路图

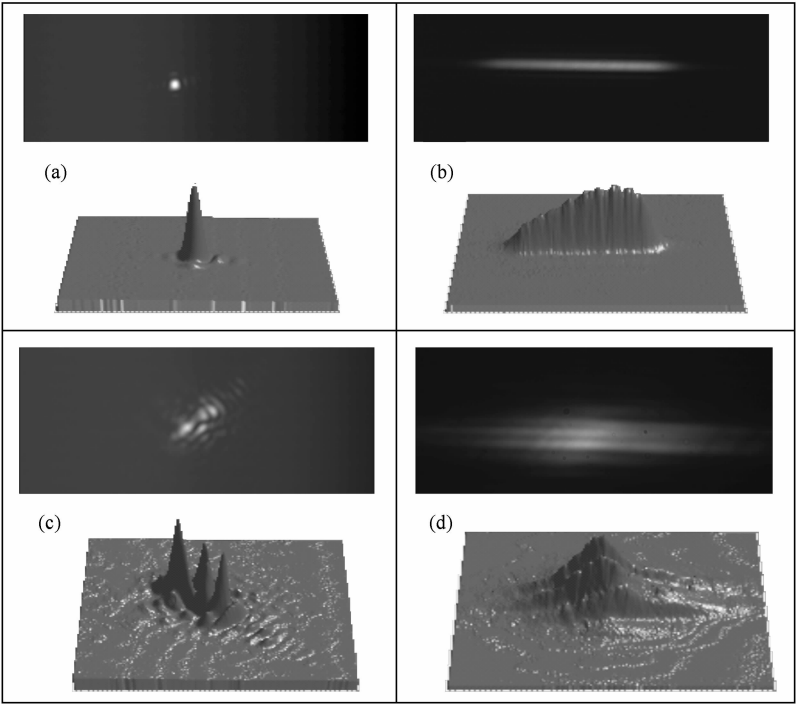


图 4 科学级 CCD 采集到的堆积脉冲时间积分远场焦斑 (a) 不加波前畸变、不加光栅色散时的焦斑,(b) 不加波前畸变、加光栅色散时的焦斑,(c) 加波前畸变、不加光栅时的远场焦斑,(d) 加波前畸变、加光栅时的远场焦斑

图 4 验证了闪耀光栅 Littrow 角应用下的光谱角色散结构,得到了一维扫动的束平滑焦斑. 在扫动方向焦斑高频调制得到了匀滑. 与之垂直方向上匀滑需要在该维度内引入光谱角色散. 图 5 给出了在原型装置光路参数下,带入一发动态波前畸变得到的焦斑和相应的插入 883 l/mm 闪耀光栅后的时间积分焦斑. 可见,在小的拉伸量下焦斑色散方向

得到了非常光滑的分布.

3.2. 近场

在光栅色散后 1 m、偏振片输出后 30 cm 处用 512×512 像素科学级 CCD 触发采集测得的近场分布如图 6 所示. 由图 6 可知周期性啁啾脉冲冲光谱角色散后近场均匀性有很大改善. 近场调制度由加

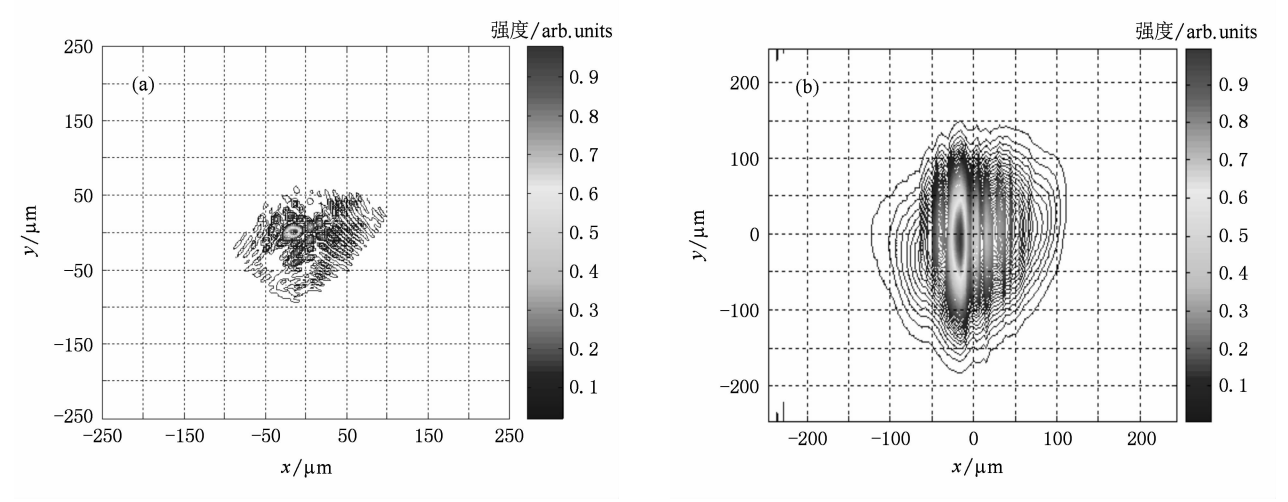


图 5 在原型装置条件下模拟得到的焦斑分布 (a)不加光栅色散,(b)加光栅色散

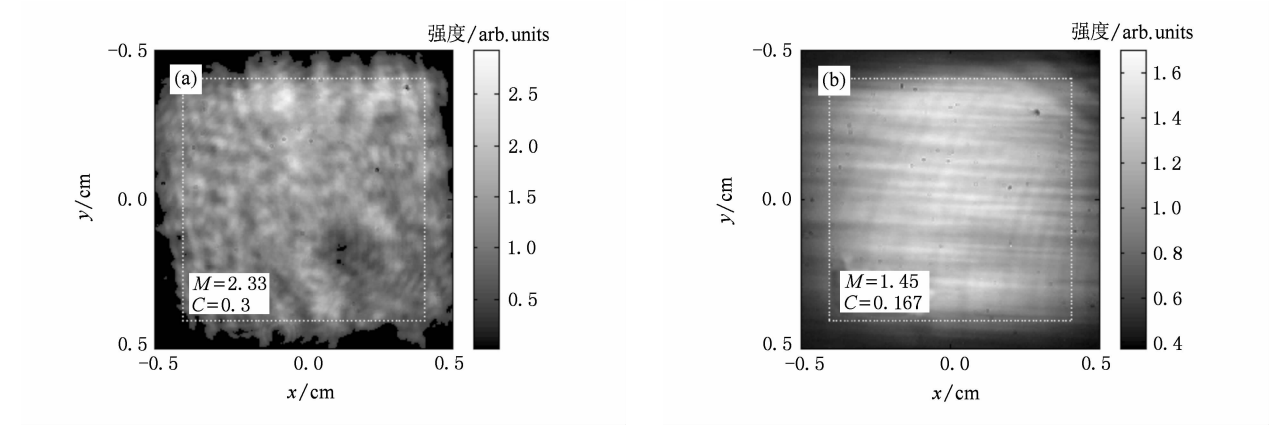


图 6 在传输 1 m 处用科学级 CCD 测得的近场分布 (a)加光栅前,(b)加光栅后

光栅前的 $M=2.33$ 下降到加光栅后的 $M=1.45$,对比度由 $C=0.3$ 下降到 $C=0.167$. 图 7 给出了数值模拟下径向光谱角色散对灰尘点的影响,由图 7 可知近场色散方向上的中高频调制得到了匀滑,这与

实验结果一致.说明光束近场“运动”的确可以在时间积分效果上消除高频调制,从而减轻近场不均匀对放大器钽玻璃片的积累损伤风险,提高装置负载.

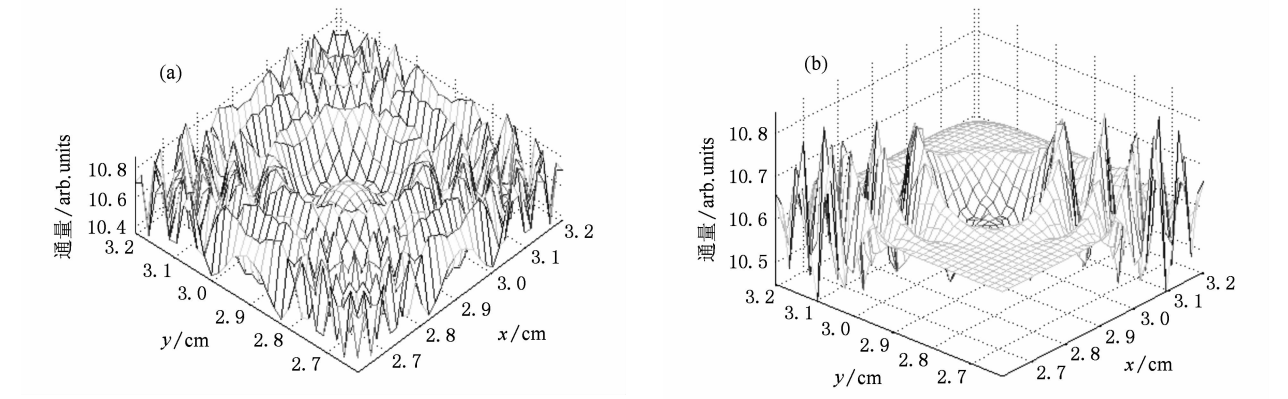


图 7 返回光传输 1 m 处灰尘点附近的通量分布 (a)不加色散时,(b)加色散时

3.3. 时间波形

时间波形采用 Tektronix 光电探测器 SD-43 加 6 GHz 采样精度的 LeCroy 示波器测得(见图 8). 图 8 说明周期性啁啾脉冲作光谱角色散后在空间点局部位位置用光纤取样测得的时间波形与色散前波形没有差异.

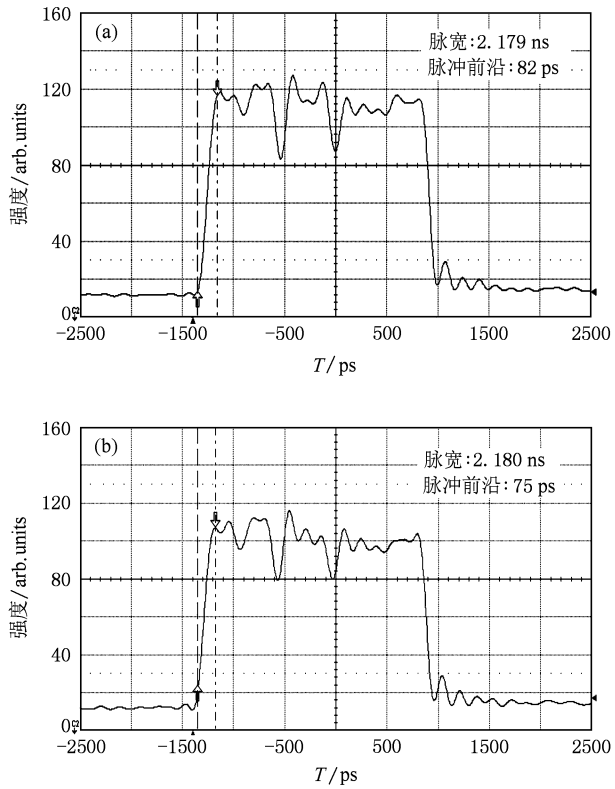


图 8 加光栅角色散前和色散后的时间波形对比 (a)色散前, (b)色散后

3.4. 光谱

目前对单次脉冲光谱的测量分辨率仍然受到测量工具的限制,而对高重频信号则可以达到较高的光谱分辨率. 实验中采用扫描光纤光谱仪 ADVANTEST Q8347 测量,光谱仪的分辨率带宽为 0.01 nm,波长精度为 0.002 nm. 测量得到的 32 路堆积脉冲光谱如图 9 所示. 得到的结果中心波长为 1053.55 nm,光谱半高宽为 0.85 nm. 图 9(b)给出了 32 个啁啾脉冲堆积得到的线性调频脉冲的光谱,高斯型包络下的频率梳的周期在 0.05 nm 附近. 更精细的间隔 200 ps 的两个半高全宽 140 ps 的啁啾脉冲堆积实验表明理论和实验结果非常接近,梳状谱的间隔都是 20 pm.

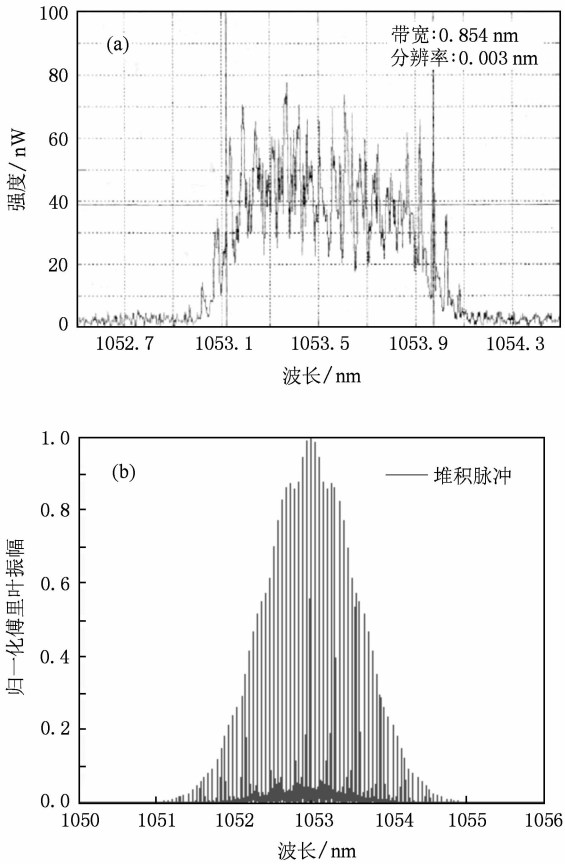


图 9 光纤光谱仪测得的 32 路堆积脉冲光谱和模拟结果 (a)光谱测得结果,(b)模拟结果

4. 加连续相位板时的远场分布模拟

为了进一步改善靶面辐照均匀性,可以在终端光学组件中插入连续相位板(CPP),来与线性调频脉冲和光谱角色散一同作用. 设计了初步的 CPP,可以通过湿法刻蚀来加工得到. 图 10 给出了单独采用 CPP 时得到的时间积分焦斑和采用线性调频脉冲、光谱角色散和 CPP 时得到的时间积分焦斑,二者均未考虑主放的波前畸变. 采用的计算参数如下:空间点 512×512 ,时间切片为 1 ps,焦距为 4 m,2 个啁啾脉冲堆积,单个啁啾脉冲的半高全宽 $t_{FWHM} = 100$ ps,色循环数 N_c 取 0.5.

5. 结 论

在间接驱动中,为了提高靶腔注入率,需要焦斑有高的能量集中度、低旁瓣,同时具有束匀滑的功能,从而抑制成丝. 这里通过实验和数值模拟研究

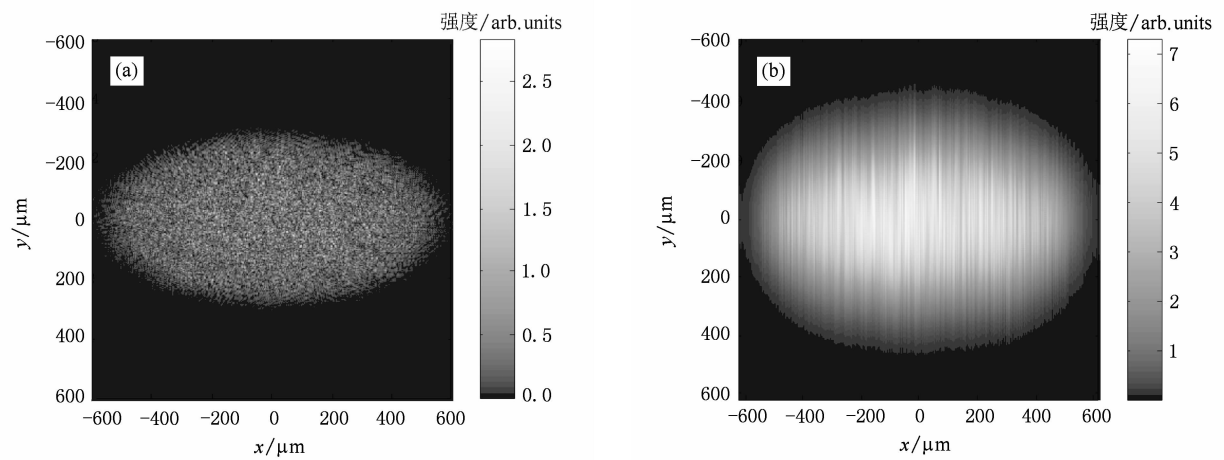


图 10 采用线性调频脉冲扫频前和扫频后的时间积分焦斑分布 (a) 扫频前, (b) 扫频后

了一套基于线性调频脉冲的 SSD 技术. 实验的难点在于获得线性调频脉冲, 解决的思路是通过对光纤锁模振荡器产生的种子脉冲进行脉冲选择和利用啁啾光纤光栅进行脉冲展宽, 得到了频率和时间满足线性关系的调频脉冲, 再对这样的基元脉冲进行堆积获得了激光驱动器需要的纳秒级任意整形脉冲. 从实验上观察到线性调频脉冲进行光谱角色散后对近场和

远场都有束匀滑效果, 为采用这种技术进行靶面均匀辐照和提高装置负载能力奠定了基础. 为了更有效地控制靶面光强分布, 需要综合使用时域和空域束平滑技术, 其中不能由相位板控制的一类高频调制在采用线性调频脉冲光谱角色散后可以得到平滑. 与国外传统技术相比, 无需相位调制器, 易于获得宽带光和光学任意整形是这套 SSD 技术的优点和创新点所在.

[1] Skupsky S, Short R W, Kessler T, Craxton R S, Letzring S, Soures J M 1989 *J. Appl. Phys.* **66** 3456

[2] Rothenberg J E 1997 *J. Opt. Soc. Am. B* **14** 1664

[3] Miyaji G, Miyanaga N, Urushihara S, Suzuki K, Matsuoka S, Nakatsuka M, Morimoto A, Kobayashi T 2002 *Opt. Lett.* **27** 725

[4] Rothenberg J E, Browning D F, Wilcox R B 1999 *Pro. SPIE* **3492** 51

[5] Jolly A, Gleyze J F, Penninckx D, Beck N, Videau L, Coïc H 2006 *C. R. Physique* **7** 198

[6] Bibeau C, Bayramian A, Armstrong P, Ault E, Beach R, Benapfl M, Campbell R, Dawson J, Ebberts C, Freitas B, Kent R, Liao Z 2006 *J. Phys. IV* **133** 797

[7] Hocquet S, Penninckx D, Bordenave E, Gouédard C, Jaouën Y 2008 *Appl. Opt.* **47** 3338

[8] Jiang X J, Zhou S L, Lin Z Q, Zhu J 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 4595 (in Chinese) [江秀娟、周申蕾、林尊琪、朱 俭 2006 物理学报 **55** 4595]

[9] Jiang X J, Zhou S L, Lin Z Q, Zhu J 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 5824 (in Chinese) [江秀娟、周申蕾、林尊琪、朱 俭 2006 物理学报 **55** 5824]

[10] Zhang R, Zhang X M, Sui Z, Wang J J, Lin H H, Li M Z, Su J Q, Jing F, Wei X F, Li P, Jia H T 2008 *Opt. Laser Tech.* **40** 1018

[11] Zhang R, Zhang X M, Su J Q, Sui Z, Jing F, Wang W Y 2006 *Acta Opt. Sin.* **26** 1512 (in Chinese) [张 锐、张小民、栗敬钦、隋 展、景 峰、王文义 2006 光学学报 **26** 1512]

Experimental study on smoothing by spectral dispersion using linear frequency-modulated pulse^{*}

Zhang Rui[†] Wang Jian-Jun Su Jing-Qin Liu Lan-Qin Deng Qing-Hua

(*Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China*)

(Received 18 February 2009; revised manuscript received 8 June 2009)

Abstract

Precise physical experiments place strict requirements on target illumination uniformity in inertial confinement fusion research. Currently, the main stream of beam smoothing technology adopted in solid-state laser driver combines smoothing by spectral dispersion (SSD), phase plate and beam overlapping. A new smoothing method aimed at indirect-drive laser fusion is studied here, which uses linearly modulated light and angular spectral dispersion. After using this technique, high frequency modulations on the far field could be smoothed. In the meantime, near field after the dispersion grating could be smoothed too. Experimental results show that the measured spectrum is similar to the simulated one. Phase modulator is not necessary in this method, while it is a crucial element in traditional SSD method.

Keywords: far field, near field, smoothing by spectral dispersion, inertial confinement fusion

PACC: 4280F, 4281, 4260K, 5255M

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No.60878058).

[†] E-mail: zrsnowmanzr@hotmail.com