

光谱色散匀滑技术与衍射光学器件联用性能的空间频谱分析*

谭峭峰 严瑛白 金国藩

(清华大学精密仪器系精密测试技术与仪器国家重点实验室, 北京 100084)

摘 要 基于空间频谱分析方法, 建立了光谱色散匀滑技术(SSD: Smoothing by Spectral Dispersion)与衍射光学器件(DOE: Diffractive Optical Element)联用性能的简化分析模型, 为 SSD 与 DOE 联用时, SSD 参量的优化提供了理论依据. 数值模拟了 SSD 各参量, 包括脉冲时间、调制频率、位相调制系数、光栅线色散系数等对束匀滑性能的影响. 模拟结果表明, SSD 参量经过优化选取, 且波前畸变随时间快速变化时, 能获得良好的束匀滑性能.

关键词 衍射光学器件; 束匀滑; 光谱色散平滑; 空间频谱

中图分类号 O436.1 **文献标识码** A

0 引言

衍射光学在惯性约束聚变(ICF: Inertial Confinement Fusion)系统中得到了广泛应用^[1~3]. 衍射光学器件(DOE: Diffractive Optical Element)是实现 ICF 束匀滑光强分布的一种行之有效的空域技术途径, 但 DOE 存在着对入射波前畸变敏感、对加工准确度要求高等不足之处, 制约着 DOE 的实际使用. 因此, 除 DOE 外, 需联合使用时域匀滑, 例如光谱色散匀滑(SSD: Smoothing by Spectral Dispersion)等技术才有望满足 ICF 对束匀滑的高要求^[4, 5].

文献[5]在空域分析了 SSD 与 DOE 联合使用时的焦面光强分布, 将其展开为一系列不同权重、不同频率、不同焦面平移量的光强分布的非相干迭加, 并对调制频率等参量的选取给出了指导性意见. 基于衍射光学束匀滑器件的空间频谱分析方法^[6], 本文在空间频域内建立了 SSD 与 DOE 联用性能的新的分析模型, 模拟了 SSD 各参量对束匀滑性能的影响. 这些理论工作同样为 SSD 与 DOE 联用时, SSD 参量的优化选取提供了参考依据.

1 理论模型

为简单起见, 以一维 DOE 为例, 其透过率函数为

$$T(x) = \sum_{p=1}^K \exp(i\varphi_p) \text{rect}\left(\frac{x - pD/K}{D/K}\right) \quad (1)$$

式中, D 为 DOE 的口径, φ_p 为器件第 p 个单元的位相值, K 为 DOE 位相单元数, 且

$$\text{rect}(x) = \begin{cases} 1 & \text{当 } |x| \leq \frac{1}{2} \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (2)$$

根据基尔霍夫衍射理论, 忽略位相因子与 sinc 函数, 远场光强分布为

$$I(x') = \left| \sum_{p=1}^K \exp[i(\varphi_p)] \exp(-i2\pi \frac{pD}{K\lambda f} x') \right|^2 = \sum_{p=1}^K \sum_{q=1}^K \exp[i(\varphi_p - \varphi_q)] \exp(-i2\pi \frac{(p-q)D}{K\lambda f} x') \quad (3)$$

SSD 的工作原理是基于电光晶体的位相调制, 如图 1. 设入射光场为平面波 $U_0 = A \exp[-i\omega_0 t]$, 加在电光晶体上的偏置电场随时间呈余弦变化: $E_z = E_m \cos \omega_m t$, 则晶体后表面输出光场为: $U = A \exp[-i(\omega_0 t + \beta \cos \omega_m t)]$, 其中 β 为位相调制系数, 与 E_m 、电光晶体长度 L 、电光晶体折射率 n_o 、线性电光系数 γ_{63} 等有关.

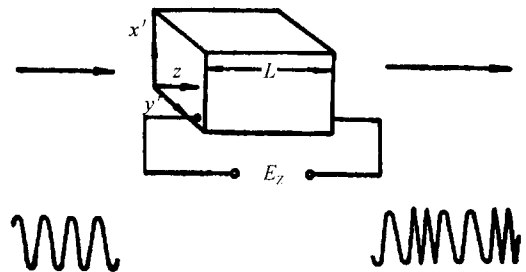


图 1 电光晶体位相调制原理图

Fig. 1 Schematic of phase modulation with an electro-optical crystal

输出光场的瞬时频率为

$$\omega(t) = \omega_0 - \beta \omega_m \sin \omega_m t \quad (4)$$

SSD 的引入, 拓宽了激光频谱, 通过色散器件将不同频率的光聚焦在焦平面不同的位置上. 设 φ_p 为 DOE 相对于激光中心频率 ω_0 的位相分布, 且 ω_0 聚焦在光轴上, 则对于频率为 ω 的激光, 被 DOE 位相调制, 经色散器件后, 远场光强分布为

*国家 863 惯性约束聚变领域(2005AA849027)资助

Tel: 010-62781187 Email: tanqf@mail. tsinghua. edu. cn

收稿日期: 2005-05-24

$$I(x') = \left| \sum_{p=1}^K \exp \left[i \left(\varphi_p \frac{(n(\omega) - 1)\omega}{(n(\omega_0) - 1)\omega_0} \right) \right] \cdot \exp \left(-i2\pi \frac{pD}{K\lambda f} (x' + \delta(\omega - \omega_0)) \right) \right|^2 \quad (5)$$

式中 $n(\omega)$ 为 DOE 材料在 ω 处的折射率; δ 为线色散系数, 在此设为常量.

在此用瞬时频率来近似频率, 将式(4)代入式(5), 忽略 $n(\omega)$ 的变化, 则 t 时刻的远场光强分布为

$$I(x', t) = \left| \sum_{p=1}^K \exp \left[i \left(\varphi_p \frac{\omega_0 - \beta\omega_m \sin \omega_m t}{\omega_0} \right) \right] \cdot \exp \left(-i2\pi \frac{pD}{K\lambda f} (x' - \delta\beta\omega_m \sin \omega_m t) \right) \right|^2 \quad (6)$$

当 $\omega_0 \gg \beta\omega_m$ 时, 式(6)改写为

$$I(x', t) = \left| \sum_{p=1}^K \exp[i(\varphi_p)] \exp \left(-i2\pi \frac{pD}{K\lambda f} (x' - \delta\beta\omega_m \sin \omega_m t) \right) \right|^2 = \sum_{p=1}^K \sum_{q=1}^K \exp \left[i \left(\varphi_p - \varphi_q + \frac{2\pi(p-q)D\delta\beta\omega_m}{K\lambda f} \sin \omega_m t \right) \right] \exp \left(-i2\pi \frac{(p-q)D}{K\lambda f} x' \right) \quad (7)$$

在积分时间段 ΔT 内, 若设激光脉冲是矩形, 则非相干迭加的焦面光强分布为

$$I_{\Delta T}(x') = \int_{-\Delta T/2}^{\Delta T/2} \sum_{p=1}^K \sum_{q=1}^K \exp \left[i \left(\varphi_p - \varphi_q + \frac{2\pi(p-q)D\delta\beta\omega_m}{K\lambda f} \sin \omega_m t \right) \right] \exp \left(-i2\pi \frac{(p-q)D}{K\lambda f} x' \right) dt \quad (8)$$

令

$$G(p-q) = \int_{-\Delta T/2}^{\Delta T/2} \exp \left[i \left(\frac{2\pi(p-q)D\delta\beta\omega_m}{K\lambda f} \sin \omega_m t \right) \right] dt \quad (9)$$

则式(8)变为

$$I_{\Delta T}(x') = \sum_{p=1}^K \sum_{q=1}^K G(p-q) \exp \left[i \left(\varphi_p - \varphi_q \right) \right] \cdot \exp \left(-i2\pi \frac{(p-q)D}{K\lambda f} x' \right) \quad (10)$$

与不采用 SSD 的焦面光强分布式(3)相比, 只多了一个调制项 $G(p-q)$. 该调制项由光学系统参量 λ, f, D, K 与 SSD 参量 $\delta, \beta, \omega_m, \Delta T$ 确定.

DOE 设计参量为: $\lambda = 1.053 \mu\text{m}, f = 600 \text{ mm}, D = 100 \text{ mm}, K = 256$. 下面将不考虑 δ 与 β , 只分析 ω_m 与 ΔT 对束匀滑性能的影响.

2 ω_m 给定, ΔT 对联用性能的影响

设 $\omega_m = 1 \text{ GHz}$ 且 $\delta\beta\omega_m = 40 \mu\text{m}$, 当 ΔT 分别为 1 ns 与 10 ns 时, $G(p-q)$ 如图 2(a)、(b), 均是低通滤波. 以参考文献[6]中精细化设计结果为例进行对比分析. 在不采用 SSD、 ΔT 分别为 $100 \text{ ps}, 1 \text{ ns}$ 与 10 ns 时, 远场光强分布如图 3, 光能利用率 η 与顶部不均匀性 rms 分别为 $94.0\%, 9.2\%, 93.6\%, 8.0\%, 86.1\%, 16.8\%, 70.8\%, 20.6\%$.

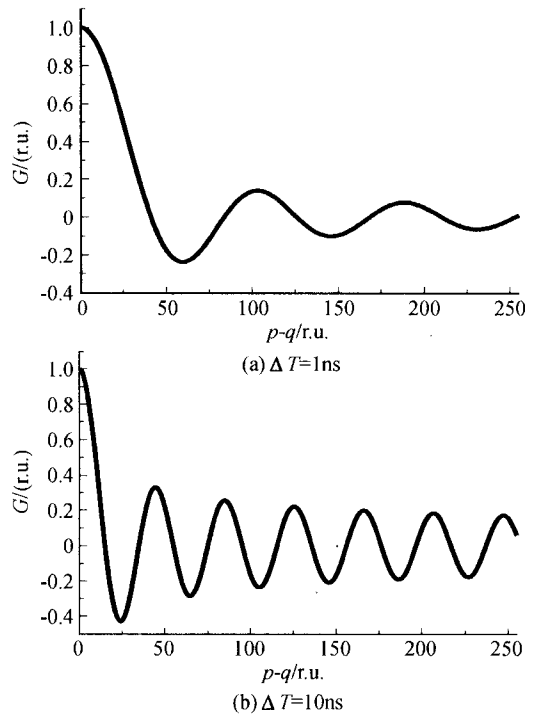


图 2 不同 ΔT 时的 $G(p-q)$
Fig. 2 $G(p-q)$ with different ΔT

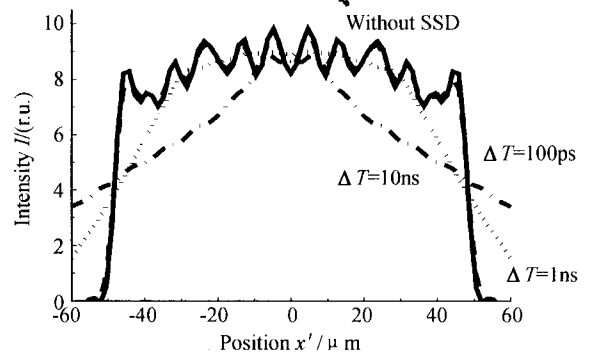


图 3 不同 ΔT 时的远场光强分布
Fig. 3 Far field intensity distributions with different ΔT

3 ΔT 给定, ω_m 对联用性能的影响

DOE 设计参量同前, 且设 $\omega_m = 1 \text{ GHz}$ 时, $\delta\beta\omega_m = 40 \mu\text{m}$. 设 ΔT 为 1 ns , 当 ω_m 分别为 $0.1 \text{ GHz}, 1 \text{ GHz}, 10 \text{ GHz}$ 时, 同样以参考文献[6]中精细化设计结果为例, 进行对比分析, 其远场光强分布如图 4,

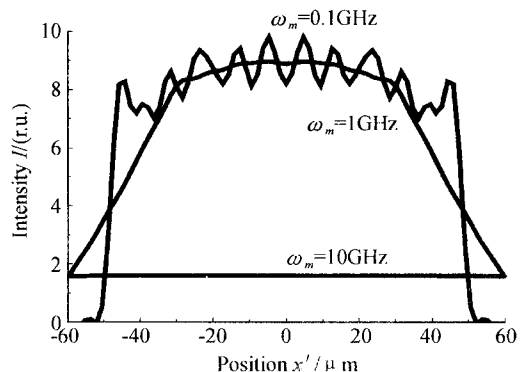


图 4 不同 ω_m 时的远场光强分布
Fig. 4 Far field intensity distributions with different ω_m

η 与rms分别为93.9%、9.2%、86.1%、16.8%、7.4%、0.2%。总体趋势是随着 ω_m 的增大,顶部不均匀性逐步改善,光能利用率也随之下降。

4 波前畸变的影响

上述模拟分析基于理想平面波入射,但在实际强激光系统中,存在较大的波前畸变。如果在SSD过程中,波前畸变保持不变,设第 p 个单元的波前畸变量为 $\Delta\varphi_p$,则在积分时间段 ΔT 内,非相干迭加的焦面光强分布为

$$I_{\Delta T}(x') = \sum_{p=1}^K \sum_{q=1}^K G(p-q) \exp [i(\varphi_p - \varphi_q) + (\Delta\varphi_p - \Delta\varphi_q)] \exp (-i2\pi \frac{(p-q)D}{K\lambda f} x') \quad (11)$$

若以均值为零,方差为 σ 的高斯分布 $N[0, \sigma]$ 来模拟波前畸变。当 $\delta\beta = 40 \mu\text{m}/\omega_m$ 时,在 $\omega_m = 1 \text{ GHz}$ 、 $\Delta T = 1 \text{ ns}$ 与 $\omega_m = 0.2 \text{ GHz}$ 、 $\Delta T = 5 \text{ ns}$ 两种情况下, σ 由0增大到 0.20λ ,每一 σ 处取30个样本,计算相应的 η 与rms,30个样本的均值随 σ 的变化趋势如图5。

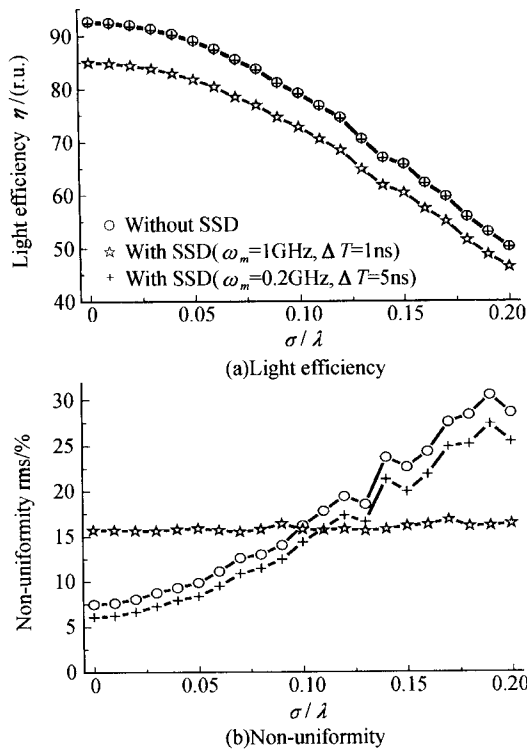


图5 ΔT 内,波前畸变不变时,光能利用率与顶部不均匀性随 σ 的变化

Fig. 5 Variation of light efficiency and non-uniformity with ω when phase distortion is fixed during ΔT

若在SSD过程中,波前畸变随时间而变,则在 ΔT 内,非相干迭加的焦面光强分布为

$$I_{\Delta T}(x') = \sum_{p=1}^K \sum_{q=1}^K G'(p-q) \exp [i(\varphi_p - \varphi_q)] \cdot \exp (-i2\pi \frac{(p-q)D}{K\lambda f} x') \quad (12)$$

其中

$$G'(p-q) = \int_{-\Delta T/2}^{\Delta T/2} \exp [i(\Delta\varphi_p(t) - \Delta\varphi_q(t))] \cdot \exp [i(\frac{2\pi(p-q)D\delta\beta\omega_m}{K\lambda f} \sin \omega_m t)] dt$$

设各时刻波前畸变符合相同的高斯分布,且相互独立,则在波前畸变变化足够快时,若 $p \neq q$, $G'(p-q)$ 趋近于期望值 $G(p-q) \exp(-\sigma^2)$ ^[7]。当 σ 由0增大到 0.20λ , η 与rms随 σ 的变化如图6。

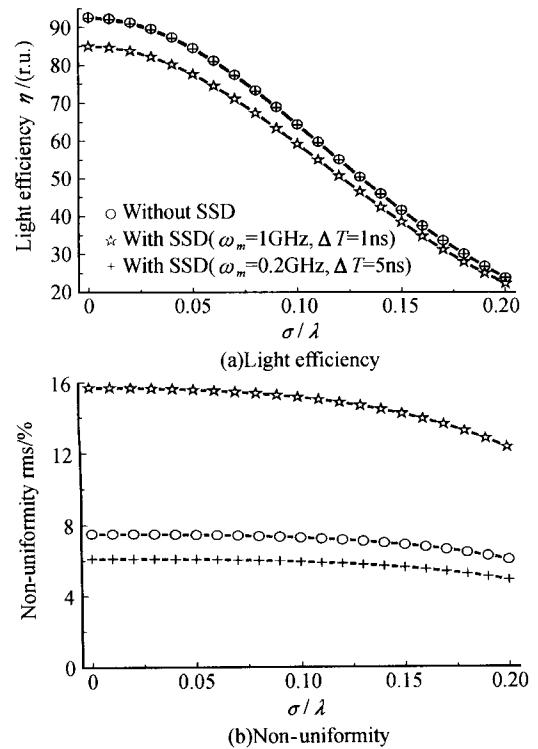


图6 ΔT 内,波前畸变改变时,光能利用率与顶部不均匀性随 σ 的变化

Fig. 6 Variation of light efficiency and non-uniformity with σ when phase distortion is changed during ΔT

从图5、图6可见,选取合适的SSD参量,能提高DOE对波前畸变的宽容度,改善DOE的束匀滑性能。但只有在波前畸变随时间快速变化时,才有望获得良好的束匀滑性能。

5 结论

本文基于空间频谱,建立了分析SSD与DOE联用性能的模型,针对不同的 ω_m 与 ΔT 参量选取情形,数值分析了联用时的束匀滑性能。并且分析了SSD过程中,波前畸变保持不变与随时间变化这两种情形时,束匀滑性能随 σ 的变化规律。只有在波前畸变随时间变化时,才有望获得良好的束匀滑性能。另外,由于SSD导致主焦斑变大,引起光能利用率的下降,在DOE设计时应考虑这一因素。此外,本文只考虑了高斯噪音这一种波前畸变,在实际强激光系统中,波前畸变的分布规律远较此模型复

杂,但定性规律与图 5、图 6 相似.

从模拟分析结果看,SSD 对 DOE 性能的影响是复杂的,SSD 的诸多参量,包括调制频率、积分时间还有调制幅度、调制电场波形、色散系数等对 DOE 性能有影响;波前畸变的分布与时间分布对 DOE 的性能也有影响. 这些影响因素根据本文所建立的模型,均能从理论上定量分析,并可进一步对相关参量进行优化,以获得良好的束匀滑性能.

参考文献

- 1 陈德伟,王炜,李永平. 用于 ICF 的分频光栅的耦合波分析. 光子学报,2002,**31**(4):433~437
Chen D W, Wang W, Li Y P. *Acta Photonics Sinica*, 2002,**31**(4):433~437
- 2 唐雄贵,高福华,高峰,等. 利用严格模式理论分析光栅透镜的衍射特性. 光子学报,2005,**34**(6): 881~884
Tang X G, Gao F H, Gao F, *et al.* *Acta Photonics Sinica*, 2005,**34**(6):881~884
- 3 谭峭峰,严瑛白,金国藩,等. 同时实现多角度非垂轴面均

匀照明的衍射光学器件. 光子学报,2000,**29**(5):431~435

Tan Q F, Yan Y B, Jin G F, *et al.* *Acta Photonics Sinica*, 2000,**29**(5):431~435

- 4 <http://www.lle.rochester.edu/pub/review/v69/1-two.pdf>, Two-dimensional SSD on OMEGA, LLE Review, 1996,**69**:1~10
- 5 张家泰,杨国林. 激光辐照均匀性与相息相位板计算研究. 计算物理,1999,**16**(5):543~551
Zhang J T, Yang G L. *Chinese J Computational Physics*, 1999,**16**(5):543~551
- 6 谭峭峰,严瑛白,金国藩,等. 衍射光学束匀滑器件性能之空间频谱分析. 中国激光,2002,**A29**(8): 699~702
Tan Q F, Yan Y B, Jin G F, *et al.* *Chinese J Lasers*, 2002,**A29**(8):699~702
- 7 Tan Q F, Yan Y B, Jin G F. Statistic analysis of influence of phase distortion on diffractive optical element for beam smoothing. *Opt Express*, 2004,**12**(14):3270~3278

Spatial Frequency Analysis of Beam Smoothing Performance Realized by the Diffractive Optical Element and the Smoothing by Spectral Dispersion Technique

Tan Qiaofeng, Yan Yingbai, Jin Guofan

State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Department of Precision Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084

Received date:2005-05-24

Abstract A theoretical model to analyze the beam smoothing performance, realized by the diffractive optical element (DOE) and the smoothing by spectral dispersion (SSD) technique, is setup based on the spatial frequency spectra analysis method. Utilizing this theoretical model, the parameters, including the integration time, the modulation frequency, the phase modulation coefficient and the linear dispersion of the diffraction grating, of the SSD technique can be optimized to improve the beam smoothing performance. The influences of the parameters of the SSD technique on the beam smoothing performance are numerically analyzed. Furthermore, the simulated results show that the phase distortion should be changed during the integration time in order to obtain a good beam smoothing performance.

Keywords Diffractive optical element; Beam smoothing; Smoothing by spectral dispersion; Spatial frequency spectrum



Tan Qiaofeng received his B. S. degree and Ph. D. degree in Optical Engineering from Tsinghua University in 1996 and 2000, respectively. Now he is an associate professor in the Department of Precision Instruments, Tsinghua University. His main research interests include diffractive optics and optical information processing.