

文章编号: 0258-7025(2005)02-0200-04

# 衍射光学束匀滑器件的自相关系数 与性能参数

谭峭峰, 严瑛白, 金国藩

(清华大学精密测试技术与仪器国家重点实验室, 北京 100084)

**摘要** 根据衍射光学束匀滑器件透过率函数的自相关系数,重新定义了表征衍射光学器件(DOE)焦面光强分布束匀滑性能的两个参数:光能利用率和顶部不均匀性。此种定义是对利用衍射光学器件焦面光强分布的空间频谱进行的性能参数定义的一种近似,对于精细化设计,两种定义计算结果非常吻合;而对于传统设计,两种定义计算结果有较大偏差。当衍射光学束匀滑器件与光谱色散平滑(SSD)技术联合使用时,模拟计算结果表明,对于精细化设计与传统设计,定义的性能参数均能反映衍射光学器件的实际使用性能。

**关键词** 光学器件;衍射光学;束匀滑;自相关系数;性能参数

**中图分类号** O 436.1 **文献标识码** A

## Autocorrelation Coefficient and Performance Parameter of Diffractive Optical Element for Beam Smoothing

TAN Qiao-feng, YAN Ying-bai, JIN Guo-fan

(State Key Laboratory of Precision Measurement Technology  
and Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract** In this paper, based on the autocorrelation coefficient of the transmittance function of the diffractive optical element (DOE) for beam smoothing, two performance parameters, light efficiency and top non-uniformity, are re-defined. This definition is a kind of approximation of that defined by the spatial frequency spectra of the far field intensity distribution of the DOE for beam smoothing. The simulated results calculated with two definitions are almost same for the precise designed DOE, but different for the traditional designed DOE. When smoothing by spectral dispersion (SSD) is used with the DOE to realize beam smoothing, the simulated results show that the definition in this paper can reflect the practical performance of the DOE for beam smoothing, no matter whether the DOE for beam smoothing is designed with the precise design method or the traditional design method.

**Key words** optical devices; diffractive optics; beam smoothing; autocorrelation coefficient; performance parameter

## 1 引 言

衍射光学器件(DOE)在许多要求光束匀滑的领域中得到应用,例如惯性约束聚变<sup>[1,2]</sup>。为真实准确地描述衍射光学器件的光束匀滑性能,根据其焦面光强分布的空间频谱,溯源性地定义了光能利用率及顶部不均匀性这两个性能参数<sup>[3]</sup>;根据空间

频谱,还可在空间频域内分析“热传导”等物理效应的“抹平”效应<sup>[4]</sup>。这些为研制实用器件提供了一种新的设计评价标准。

在惯性约束聚变中,为实现最终的顶部均匀性要求,需联合采用多种时域、空域束匀滑技术,包括衍射光学器件、光谱色散平滑(SSD)、多光束叠加、偏振光楔等,其中光谱色散平滑对光束匀滑性能的

收稿日期:2003-10-14;收到修改稿日期:2004-04-28

基金项目:国家 863 计划(863-804-9-2)资助项目。

作者简介:谭峭峰(1974—),男,江西都昌人,清华大学精仪系副研究员,博士,主要从事衍射光学器件的研制。E-mail: tanqf@mail. tsinghua. edu. cn

影响表现在对衍射光学器件的自相关进行了修正<sup>[5]</sup>。考虑到在分析随机信号时,自相关是通常采用的处理方法,而在参考文献[5]中,不均匀性的定义反映的是光强分布的平滑程度,并未反映主瓣的“平顶”性能,为此,本文根据衍射光学器件的自相关,重新定义了光能利用率与顶部不均匀性,此定义是对利用空间频谱进行定义的一种近似,在精细化设计时,两种定义计算结果相吻合。

## 2 自相关系数与性能参数定义

为简单起见,以一维衍射光学器件为例,考虑到不能对优化得到的离散相位分布进行 sinc 函数插值获得连续的纯相位分布函数,故优化设计后,衍射光学器件是多阶相位的,设其尺寸为  $D$ ,并等分为  $N$  相位单元,则其透过率函数为

$$T(x) = \sum_{j=1}^N \exp(i\varphi_j) \text{rect}\left[\frac{x - (2j-1)a/2}{a}\right], \quad (1)$$

其中  $\varphi_j$  为器件第  $j$  个单元的相位值,  $a = D/N$ , 且

$$\text{rect}(x) = \begin{cases} 1, & |x| \leq \frac{1}{2} \\ 0, & |x| > \frac{1}{2} \end{cases}.$$

平面波入射时,根据基尔霍夫衍射理论,其焦面的光强分布为

$$I(x') = |\mathcal{F}[T(x)]|^2|_{f_x = \frac{x'}{\lambda f}}, \quad (2)$$

其中  $\mathcal{F}$  代表傅里叶变换。

(2) 式可改写为

$$I(x') = \mathcal{F}[T(x) \otimes T^*(x)]|_{f_x = \frac{x'}{\lambda f}}, \quad (3)$$

其中  $\otimes$  代表相关,  $*$  代表共轭。

如果在计算  $T(x)$  的自相关时,  $T(x)$  不进行周期化延拓,则自相关系数有  $2N-1$  个,即  $a(-N), a(-N+1), \dots, a(0), \dots, a(N-1)$ , 其中  $a(m)$  代表平移  $m$  位的相关结果,  $a(0)$  与衍射光学器件的相位分布无关,是一反映总光强的常数,这与参考文献[3]中的空间频谱是等价的。当  $T(x)$  进行周期化延拓后,自相关系数只有  $N$  个,分别为  $a(-N/2), a(-N/2+1), \dots, a(0), \dots, a(N/2-1)$ , 此时根据(3)式,则

$$I(x') = \sum_{m=-N/2}^{N/2-1} a(m) \exp\left(-i \frac{2\pi m x' D}{N\lambda f}\right), \quad (4)$$

其中对焦面上非传统采样点的光强通过插值求得,是一种近似结果。

考虑到光强分布是非负的实数且  $T(x)$  对称时,  $a(m)$  也为实数,因此

$$I(x') = \sum_{m=-N/2}^{N/2-1} a(m) \cos\left(\frac{2\pi m x' D}{N\lambda f}\right). \quad (5)$$

从式(5)可以看出,平面波经衍射光学束匀滑器件后,在透镜焦面的光强分布可转化为一组不同频率、振幅[由  $a(m)$  的大小决定]、初始相位[0 或  $\pi$ , 由  $a(m)$  的正负决定]的余弦函数的叠加。此结论同参考文献[3]的结论是相同的,但最高空间频率不同,振幅、初始相位分布不同。

同样地,令  $y = \frac{2\pi D}{N\lambda f} x'$ , 则根据(5)式,可以计算在焦面束匀滑分布区域  $d_1 \leq x' \leq d_2$ , 即  $y_1 = \frac{2\pi D d_1}{N\lambda f} \leq y \leq \frac{2\pi D d_2}{N\lambda f} = y_2$  内的总光强为

$$I = \int_{d_1}^{d_2} \sum_{m=-N/2}^{N/2-1} a(m) \cos\left(\frac{2\pi m x' D}{N\lambda f}\right) dx' = \int_{y_1}^{y_2} \sum_{m=-N/2}^{N/2-1} a(m) \frac{N\lambda f}{2\pi D} \cos(my) dy = \frac{N\lambda f}{2\pi D} \left[ a(0)(y_2 - y_1) + \sum_{m=-N/2, m \neq 0}^{N/2-1} a(m) \frac{\sin(my_2) - \sin(my_1)}{m} \right]. \quad (6)$$

顶部不均匀性定义为二阶矩,即

$$\Delta = \sqrt{\frac{\int_{y_1}^{y_2} [I(y) - \bar{I}]^2 dy}{(y_2 - y_1) \bar{I}^2}}, \quad (7)$$

其中  $\bar{I}$  为  $y_1 \leq y \leq y_2$  区域内的平均光强,且  $\bar{I} = I/(y_2 - y_1)$ 。

根据式(6)可计算焦面总光强,此时  $y_1 = -\pi$ ,  $y_2 = \pi$ , 可知总光强为  $\frac{N\lambda f}{D} a(0)$ , 因此光能利用率为

$$\eta = \frac{DI}{N\lambda f a(0)}. \quad (8)$$

## 3 模拟计算结果

以参考文献[3]中传统设计结果与精细化设计结果为例进行模拟计算。首先计算其自相关系数,传统设计与精细化设计的结果分别如图 1(a), (b) 所示,与精细化设计的空间频谱相比较,在  $m \in [0, N/2-1]$  重合区域,曲线分布非常接近,但对于传统设计,差别是非常明显的。

对于传统设计,按照(7)式计算出的顶部不均匀性为 4.8%, 与按照空间频谱计算得到的 68.6% 相差甚远,而与其按照传统采样间隔计算得到的

3.3%接近。对于精细化设计,按照(7)式计算出的顶部不均匀性为9.6%,与按照空间频谱计算得到

的9.2%非常接近。因此(5)式的近似对于精细化设计的衍射光学束匀滑器件具有足够高的精度,而对于传统设计的衍射光学器件,(5)式的近似不成立;从图1(a),(b)中自相关系数与空间频谱在  $m \in [0, N/2 - 1]$  区内的近似程度也可以定性得出此结论。

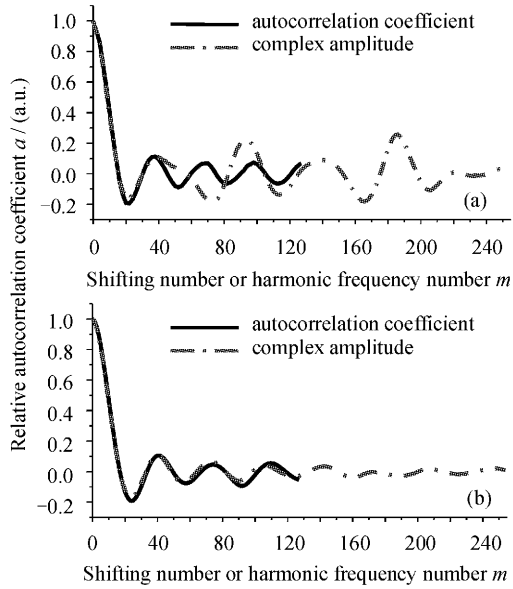


图1 归一化自相关系数与复振幅的比较  
(a) 传统设计;(b) 精细化设计

Fig.1 Relative autocorrelation coefficient and complex amplitude of diffractive optical element for traditional design (a) and precise design (b)

### 4 分析讨论

对于传统设计的衍射光学束匀滑器件,本文的定义较大地偏离了真实值,但在惯性约束聚变领域的应用中,由于光谱色散平滑的时域平滑,其对自相关系数的修正为贝塞尔函数形式<sup>[5]</sup>,逐步振荡减小,因此对顶部不均匀性起作用的是低频段。例如,以600 μm束匀滑大焦斑为例,传统设计与精细化设计结果分别如图2(A),(B)所示,其中在分析光谱色散平滑影响时,低频波前畸变以相位均方根梯度描述<sup>[6]</sup>

$$\Delta\phi(x) = \beta \cdot \text{rand}(-1,1) \otimes \exp[-(x/x_s)^2], \tag{9}$$

其中  $\text{rand}(-1,1)$  为区间  $(-1,1)$  上的均匀噪声,  $\otimes$  代表卷积,  $x_s$  为决定相位噪声空间起伏的参数,  $\beta$  反映畸变大小。

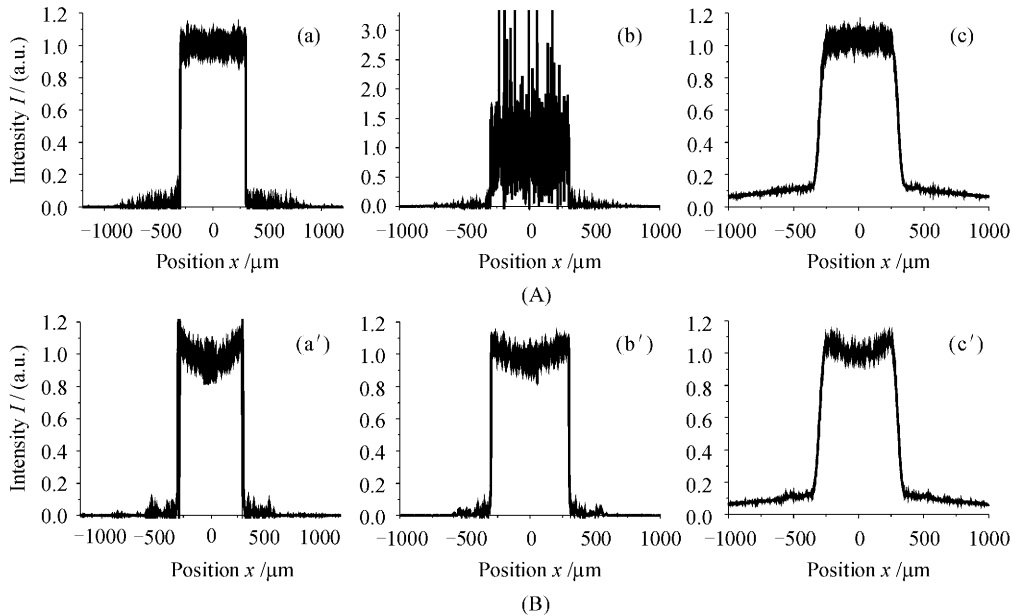


图2 传统设计结果(A)和精细化设计结果(B)

(a) 传统采样间隔时的光强分布,(a') 精细化采样间隔时的光强分布;

(b),(b') 2 μm 采样间隔时的光强分布;(c),(c') 加光谱色散平滑后的光强分布

Fig.2 Simulated results with the traditional design (A) and the precise design (B)

(a) intensity distribution with the traditional sampling interval, (a') intensity distribution with the precise sampling interval;

(b),(b') intensity distribution with 2 μm sampling interval; (c),(c') intensity distribution with SSD

高频波前畸变以高斯随机噪声进行描述

$$\Delta\phi = N[0, \sigma], \quad (10)$$

其中  $N[0, \sigma]$  代表均值为零、方差为  $\sigma$  的高斯分布。

光谱色散平滑的作用以具有不同波前畸变(低频噪声峰谷值为  $3\lambda$ , 高频噪声  $\sigma$  为  $0.15\lambda$ ) 的不同角度入射(也即不同的垂轴平移量)的焦面光强分布的叠加(1001 次)来模拟。

从图 2(c), (c') 可知, 考虑光谱色散平滑, 其顶部束匀滑性能与图 2(a), (a') 基本相同并有所改善, 因此本文定义的性能参数可以反映器件的实际使用性能; 其次, 由于光谱色散平滑的引入, 衍射光学器件具有足够高的抗波前畸变能力, 克服了限制衍射光学在惯性约束聚变领域光束匀滑中应用的最大瓶颈; 另外, 在设计应用于惯性约束聚变的衍射光学束匀滑器件时, 无需采用精细化设计, 只需采用传统设计, 因此可采用许多成熟的迭代算法, 大大节约优化时间。

## 5 结 论

通过对衍射光学束匀滑器件透过率函数进行周期延拓后的自相关系数, 对光能利用率与顶部不均匀性进行了重新定义。进一步模拟分析了衍射光学束匀滑器件与光谱色散平滑技术联用时的焦面光强分布及其性能。模拟计算结果表明, 对于精细化设计与传统设计, 定义的性能参数均能反映衍射光学器件与光谱色散平滑技术联用性能。但对于此联用

性能, 本文给出的仅仅是初步模拟结果, 结论是定性的, 需对我国惯性约束聚变系统中的波前畸变状态、光谱色散平滑的参数等进一步明确后才能进行定量分析; 而光谱色散平滑对自相关系数如何修正, 以及如何在设计中考虑此影响, 研制出高顶部均匀性的衍射光学束匀滑器件, 尚有待进一步工作。

## 参 考 文 献

- 1 S. N. Dixit, J. K. Lawson, K. R. Manes *et al.*. Kinoform phase plates for focal plane irradiance profile control [J]. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(6):417~419
- 2 Tan Qiaofeng, Yan Yingbai, Jin Guofan *et al.*. Study and fabrication of binary optical element for ICF target uniform illumination [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1999, **11**(4):445~449  
谭峭峰, 严璞白, 金国藩等. 实现 ICF 束匀滑的二元光学器件设计与制作[J]. *强激光与粒子束*, 1999, **11**(4):445~449
- 3 Tan Qiaofeng, Yan Yingbai, Jin Guofan *et al.*. Spatial frequency spectrum analysis of the performance of the diffractive optical element for beam smoothing [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(8):699~702  
谭峭峰, 严璞白, 金国藩等. 衍射光学束匀滑器件性能的空间频谱分析[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(8):699~702
- 4 Qiaofeng Tan, Qingsheng He, Yinbai Yan *et al.*. Spatial-frequency spectrum analysis of the performance of diffractive optical element for beam smoothing [J]. *Optik*, 2002, **113**(4):163~166
- 5 Two-dimensional SSD on OMEGA [R]. *LLE Review*, 1996, **69**:1~10
- 6 Su Jingqin, Wei Xiaofeng, Ma Chi *et al.*. Simulation on the model of low frequency distorted wavefront of laser beam [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2000, **12**(s1):163~166  
粟敬钦, 魏晓峰, 马 驰等. 激光束低频畸变波前模型的计算模拟[J]. *强激光与粒子束*, 2000, **12**(增刊):163~166