

文章编号 : 0258-7025(2002)08-0699-04

# 衍射光学束匀滑器件性能的空间频谱分析

谭峭峰, 严瑛白, 金国藩, 邬敏贤, 徐端颐

(清华大学精密测试技术与仪器国家重点实验室, 北京 100084)

**提要** 采用空间频谱方法分析了衍射光学束匀滑器件的焦面光强分布,重新定义了光能利用率及顶部不均匀性两个参数,由于其定义的溯源性,能够真实准确地评价束匀滑器件的设计性能。最后,采用这两个参数对精细化设计前后的衍射光学束匀滑器件性能进行了对比,结果证明了精细化设计的有效性。

**关键词** 空间频谱, 衍射光学器件, 束匀滑, 精细化设计

中图分类号 O 436.1 文献标识码 A

## Spatial Frequency Spectrum Analysis of the Performance of the Diffractive Optical Element for Beam Smoothing

TAN Qiao-feng, YAN Ying-bai, JIN Guo-fan, WU Min-xian, XU Duan-yi

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

**Abstract** In this paper, the performance of the diffractive optical element (DOE) for beam smoothing is analyzed by using the spatial frequency spectrum. Two parameters, light efficiency and top non-uniformity, are re-defined based on the spatial frequency spectrum. These two parameters can truly and exactly evaluate the performance of the DOE for beam smoothing, because their definitions go back to the origin. Finally, these two performance parameters are calculated, whether the precise design of the DOE for beam smoothing is adopted or not. The calculated results show the validity of the precision design of the DOE.

**Key words** spatial frequency spectrum, diffractive optical element, beam smoothing, precise design

### 1 引 言

衍射光学器件应用在许多要求光束匀滑的领域中,例如惯性约束聚变<sup>[1,2]</sup>、热加工<sup>[3]</sup>等。为描述衍射光学器件的光束匀滑性能,采用顶部不均匀性<sup>[2]</sup>、不均匀度<sup>[4]</sup>及考虑横向电子热传导效应(TETCE)引入低频滤波进行修正<sup>[5]</sup>等参数来定量描述。衍射光学器件的位相设计通常转化成优化问题,进行离散化数值求解。已提出并采用了多种算法,且已获得了良好的束匀滑分布<sup>[1~3,6]</sup>,但所计算出的性能参数,只是优化设计中所选采样点(其测度为零)的性能,并不能准确真实地描述束匀滑器件的实际性能,

若改变采样点分布,计算出的性能参数急剧变化<sup>[7]</sup>,难以再保持束匀滑分布。采用精细化设计方法<sup>[7]</sup>,虽可获得更真实的束匀滑分布,顶部不均匀性与所选采样点基本无关,但仍是零测度性能,难以真实准确地全面定量衡量束匀滑性能。由于定义的不同,顶部不均匀性等上述性能参数之间不具有可比性,无法评价衍射光学束匀滑器件设计性能的优劣,应建立起衍射光学束匀滑器件设计性能的评价标准,为研制实用化器件提供基础。

为此,本文采用空间频谱分析方法,推导出束匀滑器件焦面光强分布的空间频谱,并进一步根据该空间频谱,重新定义了光能利用率及顶部不均匀性

收稿日期 2001-06-17;收到修改稿日期 2001-09-14

基金项目:国家高技术项目(863-804-9-2),国家重点基础研究项目(973-G19990330),国防科技重点实验室基金试点项目(JS77-9)与中国博士后科学基金资助项目。

作者简介:谭峭峰(1974—),男,清华大学精仪系博士后,主要从事衍射光学器件的研制。E-mail: tanqf@post. pin. tsinghua.

两个性能参数。由于其定义的溯源性,能够真实准确地评价衍射光学束匀滑器件的设计性能。最后,采取这两个重新定义的参数,对精细化设计前后的衍射光学束匀滑器件的性能进行了计算对比,结果表明精细化设计计算出的性能参数非常接近真值,能获得所需的束匀滑分布。

## 2 理论分析

以一维衍射光学器件为例,考虑到不能对优化得到的离散位相分布进行 sinc 函数插值获得连续纯位相分布函数,故优化设计后,衍射光学器件是多相位相的,设其尺寸为  $D$ ,并等分为  $N$  位相单元,则其透过率函数为

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

其中  $\varphi_j$  为器件第  $j$  个单元的位相值,  $a = D/N$ , 且

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

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

$$K(x', f) = \left| \sum_{j=1}^N \exp(i\varphi_j) a \operatorname{sinc}\left(a \frac{x'}{\lambda f}\right) \times \exp\left[-i2\pi(2j-1)\frac{a}{2} \frac{x'}{\lambda f}\right] \right|^2 \quad (2)$$

其中

$$\operatorname{sinc}(x) = \begin{cases} 1 & \text{当 } x = 0 \\ \frac{\sin(\pi x)}{\pi x} & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

忽略常数因子与位相因子,且考虑到束匀滑时,束匀滑光斑大小  $d$  所确定的  $M = dD/(2\lambda f)$  远小于  $N$ ,即  $\operatorname{sinc}(M/N) \approx 1$ , sinc 函数可忽略,则式(2)可写为

$$K(x', f) = \left| \sum_{j=1}^N \exp(i\varphi_j) \exp\left(-i2\pi \frac{ajx'}{\lambda f}\right) \right|^2 \quad (4)$$

展开式(4),有

$$\begin{aligned} K(y, f) &= \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N \cos[\varphi_j - \varphi_k + (j-k)y] = \\ &N + 2\left\{ \sum_{k=2}^N \cos(\varphi_k - \varphi_{k-1} + y) + \right. \\ &\sum_{k=3}^N \cos(\varphi_k - \varphi_{k-2} + 2y) + \dots + \\ &\sum_{k=N-1}^N \cos[\varphi_k - \varphi_{k-N+2} + (N-2)y] + \\ &\left. \cos[\varphi_N - \varphi_1 + (N-1)y] \right\} = \\ &N + 2 \sum_{m=1}^{N-1} A_m \cos(my + B_m) \quad (5) \end{aligned}$$

$$\text{其中 } y = -\frac{2\pi a}{\lambda f} x',$$

$$\begin{aligned} A_m &= \\ &\sqrt{\left[ \sum_{k=m+1}^N \cos(\varphi_k - \varphi_{k-m}) \right]^2 + \left[ \sum_{k=m+1}^N \sin(\varphi_k - \varphi_{k-m}) \right]^2} \\ B_m &= \arctan\left[ \frac{\sum_{k=m+1}^N \sin(\varphi_k - \varphi_{k-m})}{\sum_{k=m+1}^N \cos(\varphi_k - \varphi_{k-m})} \right] \end{aligned}$$

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、初始位相的余弦函数的叠加,其最高空间频率为  $\frac{N-1}{N} \frac{D}{\lambda f} < \frac{D}{\lambda f}$ ,也即被光学系统参数与位相采样点数所限定。

根据式(5),在焦面束匀滑分布区域  $d_1 \leq x' \leq d_2$  内的总光强为

$$\begin{aligned} I &= \int_{y_1}^{y_2} K(y, f) dy = \\ &\int_{y_1}^{y_2} \left[ N + 2 \sum_{m=1}^{N-1} A_m \cos(my + B_m) \right] dy = \\ &N(y_2 - y_1) + 2 \sum_{m=1}^{N-1} \frac{A_m}{m} \times \\ &[\sin(my_2 + B_m) - \sin(my_1 + B_m)] \quad (6) \end{aligned}$$

其中

$$y_i = \frac{2\pi a}{\lambda f} d_i, \quad i = 1, 2$$

顶部不均匀性定义为二阶矩,即

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

其中,  $\bar{I}$  为束匀滑分布区域内的平均光强,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  $2\pi N$ ,因此光能利用率为

$$\eta = I/(2\pi N) \quad (8)$$

式(7)(8)所定义的顶部不均匀性与光能利用率不再是零测度定义,而是基于物理本质的、可溯源的、能真正描述束匀滑性能的两个参数,可以作为衍射光学束匀滑器件设计性能的评价标准。

下面,根据这两个性能参数,对精细化设计前后的衍射光学束匀滑器件的性能进行计算对比,来说明精细化设计的有效性。光学系统如下:器件口径  $D = 100 \text{ mm}$ ,透镜焦距  $f = 600 \text{ mm}$ ,工作波长  $\lambda = 1.053 \mu\text{m}$ ,选取  $N = 256$ ,所需束匀滑光斑大小约  $100 \mu\text{m}$ 。

### 3 模拟计算结果

采用爬山-模拟退火算法进行优化设计,精细化设计前后,位相分布与焦面光强分布分别如图 1、2 所示,详细设计过程见参考文献 [6]。光能利用率与

顶部不均匀性分别为 96.1%、3.3% 与 94.1%、7.6%,该光能利用率与顶部不均匀性的定义与式 (7)、(8) 不同,是由零测度的设计采样点所确定,其定义见参考文献 [2]。

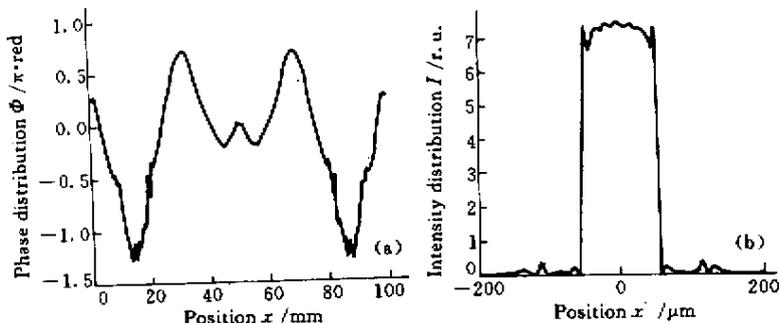


图 1 未精细化设计的结果

(a) 位相分布 (b) 焦面光强分布

Fig.1 Simulated results without precise design

(a) phase distribution ;(b) intensity distribution

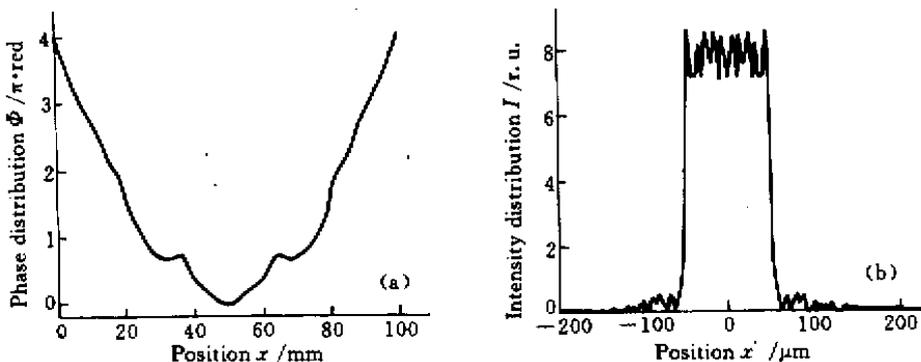


图 2 精细化设计的结果

(a) 位相分布 (b) 焦面光强分布

Fig.2 Simulated results with precise design

(a) phase distribution ;(b) intensity distribution

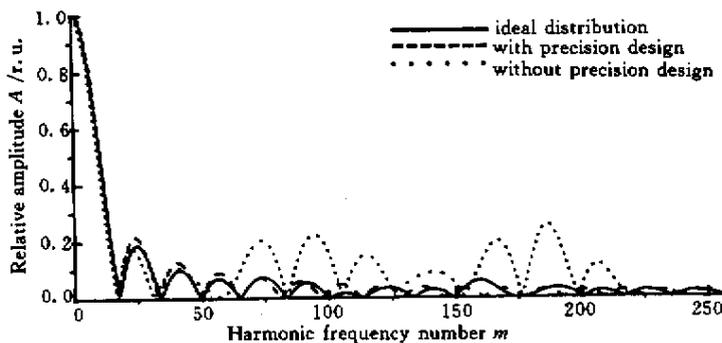


图 3 空间频谱振幅分布的比较

Fig.3 Comparison of the amplitude distributions of the spatial frequency spectrum

虽然图 1 设计性能优于图 2,但并不能表明图 1

获得了更好的束匀滑性能,恰恰相反,进一步的模拟

计算结果表明图 2 获得了更真实的束匀滑分布<sup>[6]</sup>。因此,通过设计中所选采样点的光强分布而计算出的性能参数,不能准确评价束匀滑器件的设计性能。

根据式(5)计算焦面光强分布的空间频谱,图 1、2 所示位相分布的归一化振幅谱如图 3 所示,初始位相谱如图 4 所示。由于在器件设计中,位相分

布为对称分布,因此各个空间频率的初始位相非零即  $\pi$ 。图 3、4 中的理想谱是相应尺寸的矩形分布在最高空间频率  $\frac{N-1}{N} \frac{D}{\lambda f}$  内的分布情况。从图 3 可以看出,精细化设计后,焦面光强分布的振幅谱与理想谱非常接近,而未采用精细化设计时,存在较大差距。对于初始位相谱,精细化设计也更接近理想谱。

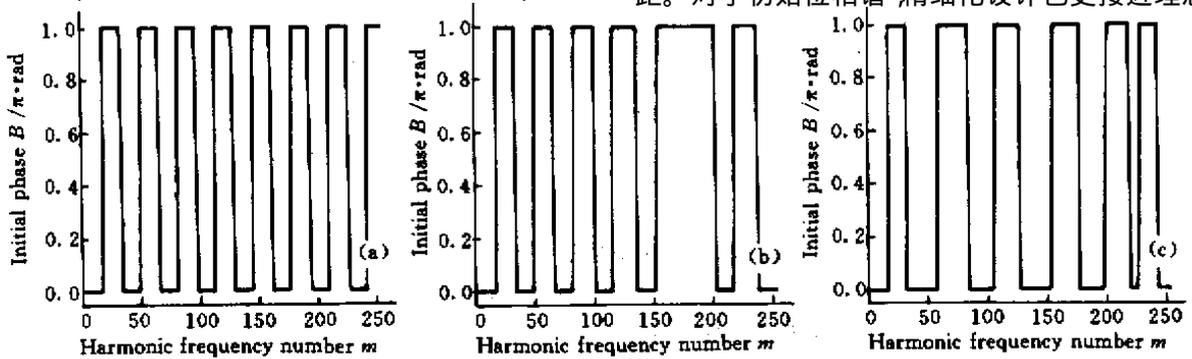


图 4 空间频谱初始位相分布的比较

(a)理想分布 (b)精细化设计 (c)未精细化设计

Fig. 4 Comparison of the initial phase distributions of the spatial frequency spectrum

(a) ideal distribution ;(b) with precise design ;(c) without precise design

利用式(7)、(8)计算精细化设计前后衍射光学束匀滑器件的顶部均匀性与光能利用率。精细化设计前这两个性能参数分别为 68.6%、82.8%,图 1 的 3.3%、96.1%的设计结果离此真值相差甚远;而精细化设计后分别为 9.2%、94.0%,图 2 的 7.6%、94.1%的设计结果非常接近真值。这表明精细化设计计算出的性能参数是可信的,能获得真实的束匀滑分布。

## 4 结 论

本文推导出衍射光学束匀滑器件的焦面光强分布的振幅谱与初始位相谱,并基于该空间频谱,重新定义了光能利用率与顶部不均匀性这两个性能参数,由于其定义的溯源性,能够真实准确地评价衍射光学束匀滑器件的性能。利用这两个参数,对精细化设计前后的衍射光学束匀滑器件的性能进行了计算对比,结果表明精细化设计计算出的性能参数是可信的,能获得真实的束匀滑分布。因此在设计衍射光学束匀滑器件时,应采用精细化设计方法并可将式(7)、(8)定义的性能参数作为一种评价标准。

该空间频谱分析方法可适用于任意衍射光学光束整形器件,为其设计、性能对比提供一个基准。为

更细致地分析衍射光学光束整形器件的性能,还可以定义其高阶矩,在此就不一一列出。

## 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* (强激光与粒子束), 1999, **11**(4): 445 ~ 449 (in Chinese)
- 3 Chen Yansong, Li Dehua, Sheng Yunlong. Beam-shaping element with reduced sensitivity to input variation [J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(3): 568 ~ 571
- 4 Qiu Yue, Qian Liejia, Huang Hongyi *et al.*. Improve illumination uniformity by suppressing the diffraction of a lens array [J]. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1995, **A22**(1): 27 ~ 31 (in Chinese)
- 5 Deng Xuegong, Li Yongping, Qiu Yue *et al.*. Quantitative description of beam quality in uniform illumination experiments [J]. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1996, **A23**(11): 1021 ~ 1026 (in Chinese)
- 6 Tan Xin, Gu Benyuan, Yang Guozhen *et al.*. Diffractive phase elements for beam shaping: a new design method [J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(8): 1314 ~ 1320
- 7 Tan Qiaofeng, Yan Yingbai, Jin Guofan *et al.*. Precise design of diffractive optical element for beam smoothing [J]. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 2002, **A29**(1): 29 ~ 32 (in Chinese)