

文章编号: 0258-7025(2003)03-0206-05

圆对称衍射光学束匀滑器件的精细化设计

王金玉, 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 利用爬山-模拟退火混合优化算法,对圆对称衍射光学束匀滑器件进行了精细化设计。对比选取不同的焦面采样间隔进行的束匀滑器件的设计结果,发现其采样间隔严重影响设计结果的真实性和完整性,设计计算中仅仅满足采样定理是不够的。为了获得真实的束匀滑分布,采样间隔必须小于/等于0.5倍传统采样间隔,只有这样才能同时控制住焦面采样点和其他非采样点处的光强分布,使其满足束匀滑分布。

关键词 物理光学;衍射光学器件;混合优化算法;束匀滑;精细化设计

中图分类号 O 436.1 文献标识码 A

Precise Design of Circular-symmetrical Diffractive Optical Element for Beam Smoothing

WANG Jing-yu, 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, by using the hybrid algorithm merging hill-climbing with simulated annealing, the precise design of the circular-symmetrical diffractive optical element (DOE) for beam smoothing is completed. By comparing between the designed results of different sampling interval on focal plane, it is found that the facticity of designed result is greatly influenced by the sampling intervals. During the designing process, it is insufficient to sample only according to the sampling theory. To get the faithful intensity distribution for beam smoothing, the sampling interval must be less than or equal to 1/2 of the traditional sampling interval. Only under this condition, both the intensity of samples and other points on focal plane can be controlled to meet the requirements of beam smoothing.

Key words physical optics; diffractive optical element; hybrid algorithm; beam smoothing; precise design

1 引言

衍射光学器件应用在许多要求束匀滑光强分布的领域中,例如惯性约束核聚变^[1,2]、热加工^[3]等。衍射光学器件的位相设计通常转化成优化问题,进行数值求解。已提出和采用了多种算法,例如 Gerchberg-Saxton(GS)^[4,5]、杨-顾(YG)^[6,7]等迭代算法,爬山-模拟退火混合优化^[8]等搜索算法,均获得了良好的束匀滑分布。但如果采样间隔选取不正确,所获得的束匀滑分布只在离散采样点上满足,而其他非采样点则难以满足所需的束匀滑光强分布,即优化得到的束匀滑分布是不真实的。为获得真实的束匀滑分布,针对一维情形,经过定性分析,选取

特定的焦面采样间隔进行了精细化设计,不仅控制了采样点上的光强分布,还间接控制了非采样点上的光强分布^[9]。

本文针对圆对称情形,通过类比分析得出采样间隔选取应满足的条件,利用爬山-模拟退火混合优化算法对圆对称衍射光学束匀滑器件进行了精细化设计,同时控制了采样点与非采样点上的光强分布。任选采样间隔进行光强分布计算,其束匀滑性能基本保持不变,表明获得了真实的束匀滑分布。

2 设计原理

圆对称时,极坐标下衍射光学器件的透过率函

收稿日期:2001-12-10;收到修改稿日期:2002-03-01

基金项目:国家高技术项目(863-804)、国家重点基础研究项目(973-G19990330)及中国博士后科学基金资助项目。

作者简介:王金玉(1972),男,博士,主要从事衍射光学器件的研制。E-mail: wangjy@mails.tsinghua.edu.cn

数设为 $T(\rho)$, 当平面波入射时, 根据基尔霍夫衍射理论, 忽略常数因子, 其焦面的光强分布为

$$I_f(r) = \left| \int_0^R T(\rho) J_0\left(\frac{2\pi r \rho}{\lambda f}\right) \rho d\rho \right|^2 \quad (1)$$

其中 J_0 为零阶贝塞尔函数, ρ 为器件坐标, r 为焦面坐标, λ 为入射激光波长, f 为透镜焦距, $R = D/2$, D 为器件口径。

在器件位相优化设计与套刻加工中, 器件需离散化为多台阶位相结构。设位相等分为 N 单元, 则其透过率函数可写为

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

其中 φ_j 为器件第 j 个单元的位相值, $a = R/N$

$$\text{rect}(x) = \begin{cases} 1 & \text{当 } |x| \leq \frac{1}{2} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

将式(2)代入式(1), 利用贝塞尔函数性质, 焦面光强分布为

$$I_f(r) = \begin{cases} \left| \sum_{j=1}^N \exp(i\varphi_j) \frac{\lambda f a}{2\pi r} \left\{ j J_1\left(j \frac{2\pi r r}{\lambda f}\right) - (j-1) J_1\left[(j-1) \frac{2\pi r r}{\lambda f}\right] \right\} \right|^2, & r \neq 0 \\ \left| \sum_{j=1}^N \exp(i\varphi_j) 2\pi(2j-1) \right|^2, & r = 0 \end{cases} \quad (4)$$

其中 J_1 为一阶贝塞尔函数。

利用爬山-模拟退火混合优化算法, 不象 GS, YG 等算法需利用正反变换迭代求解, 只需利用正变换过程, 其焦面采样间隔 Δ 可任意选取。但为了获得真实的束匀滑分布, 采样间隔的选取需满足一定的限制条件。

分析一维情形与圆对称情形时的空间频谱, 其输入光场的最高空间截止频率均为 $D/(2\lambda f)$ 。一维情形下, 焦面采样间隔选取应满足 $\Delta \leq (\lambda f/D)/2$, 而非传统的 $\Delta \leq (\lambda f/D)$, 以此进行设计, 才可获得真实的束匀滑分布^[9]。类比于一维情形, 圆对称情形下, 采样间隔也应选取为 $\Delta \leq (\lambda f/D)/2$, 才能在焦面获得真实的束匀滑分布。

下面选取不同的焦面采样间隔进行圆对称衍射光学束匀滑器件的设计, 设计结果表明上述类比分析是正确的, 采样间隔满足 $\Delta \leq (\lambda f/D)/2$ 时, 才能获得真实的束匀滑分布。

3 设计结果

为进行比较, 以不同的采样间隔进行圆对称束匀滑器件的设计。光学系统参数 λ, f, D 分别为 $1.053 \mu\text{m}, 800 \text{ mm}$ 与 100 mm , 束匀滑焦斑大小 d 为 $250 \mu\text{m}$, 不考虑上述采样间隔选取限制, 焦面采样间隔 Δ 选为 $5 \mu\text{m}$, 小于传统采样间隔 $\lambda f/D = 8.424 \mu\text{m}$, 但大于 $(\lambda f/D)/2 = 4.212 \mu\text{m}$, 设计结果如图 1 所示, 其光能利用率与顶部不均匀性分别为 90.0% , 4.0% , 其中光能利用率与顶部不均匀性的定义详见文献[2]。

由于焦面采样间隔 Δ 选为 $5 \mu\text{m}$, 不满足 $\Delta \leq (\lambda f/D)/2$, 图 1(b) 显示的束匀滑分布是不真实的, 仅控制了算法中所选采样点的光强分布。保持图 1(a) 的位相分布不变, 选取不同的 Δ , 例如 $2.5 \mu\text{m}$, 利用式(4)重新计算光强分布, 如图 2 所示, 焦斑光强分布轮廓与光能利用率 (90.0%) 基本保持不变, 但顶部出现了大的强度调制, 不均匀性为 39.2% , 与 $\Delta = 5 \mu\text{m}$ 采样时计算出的 4.0% 的设计结果相差甚远。由于顶部不均匀性变化剧烈而光能利用率基本保持不变, 因此仅比较不同焦面采样情形下的顶部不均匀性的变化情况。仍保持位相分布不变 (图 1(a)), 选取不同的 Δ 进行光强分布计算, 其顶部不均匀性与 Δ 的关系如图 3 所示, 除了优化算法中所选采样间隔 ($5 \mu\text{m}$), 其他间隔采样点计算出的光强分布顶部均包含大的强度调制, 这说明以采样间隔 $5 \mu\text{m}$ 设计的圆对称衍射光学器件获得的束匀滑分布是不真实的。当 $\Delta \geq (\lambda f/D)$ 时, 更不可能获得真实的束匀滑分布, 选取不同采样间隔计算所优化的衍射光学束匀滑器件的焦面光强分布, 不仅顶部出现大的强度调制, 其焦斑光强分布轮廓也难以保持, 在此不一一举例说明。

类比于一维情形, 保持设计参数不变, 选取采样间隔为 $(\lambda f/D)/2 = 4.212 \mu\text{m}$, 重新进行圆对称衍射光学束匀滑器件的精细化设计, 设计结果如图 4 所示, 其光能利用率与顶部不均匀性分别为 90.8% , 17.9% 。同样保持位相分布 (图 4(a)) 不变, 选取不同的 Δ , 为了与非精细化设计结果 (图 1) 对比, 也选为 $2.5 \mu\text{m}$, 按照式(4)重新计算光强分

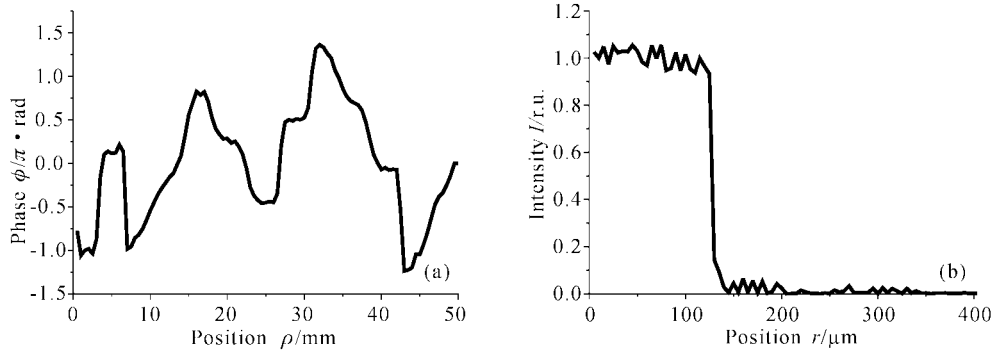


图 1 设计间隔大于 $(\lambda f/D)/2$ 时,衍射光学束匀滑器件的设计结果
(a) 位相分布;(b) 强度分布

Fig. 1 Design results of the diffractive optical element for beam smoothing when the design interval is larger than $(\lambda f/D)/2$
(a) phase distribution; (b) intensity distribution

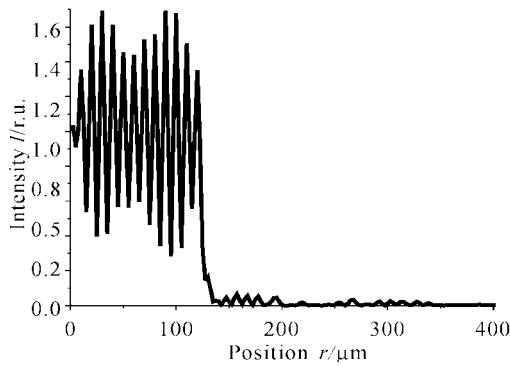


图 2 设计间隔大于 $(\lambda f/D)/2$ 时,采样 $2.5 \mu\text{m}$ 时的焦面光强分布

Fig. 2 Intensity distribution with $2.5 \mu\text{m}$ sampling interval when the design interval is larger than $(\lambda f/D)/2$

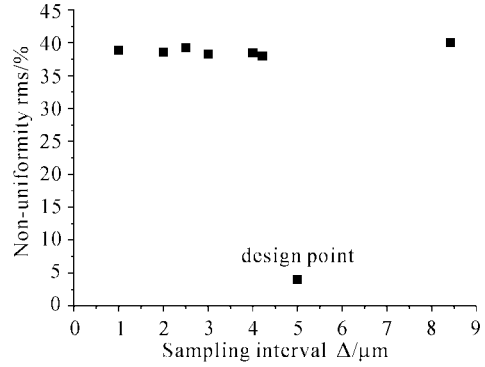


图 3 设计间隔大于 $(\lambda f/D)/2$ 时,顶部不均匀性与焦面采样间隔的关系

Fig. 3 Relationship between rms and sampling interval when the design interval is larger than $(\lambda f/D)/2$

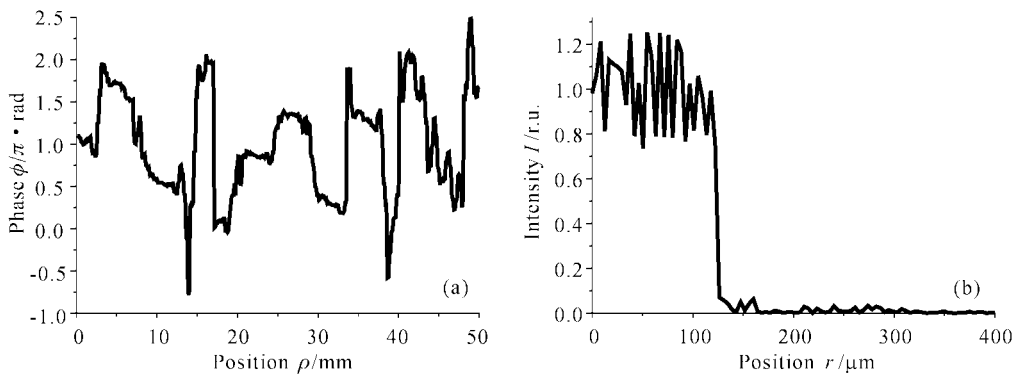


图 4 设计间隔等于 $(\lambda f/D)/2$ 时,衍射光学束匀滑器件的设计结果
(a) 位相分布;(b) 强度分布

Fig. 4 Design results of the DOE for beam smoothing when the design interval is equal to $(\lambda f/D)/2$
(a) phase distribution; (b) intensity distribution

布,如图 5 所示,不仅光强轮廓与光能利用率(90.6%)基本保持不变,顶部不均匀性也基本保持

不变(17.8%);进一步选取不同的 Δ 进行光强分布计算,其顶部不均匀性与 Δ 的关系如图 6 所示,顶部

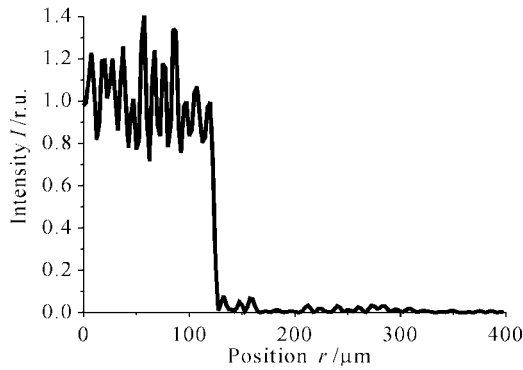


图 5 设计间隔等于 $(\lambda f/D)/2$ 时,采样 $2.5 \mu\text{m}$ 时的焦面光强分布

Fig. 5 Intensity distribution with $2.5 \mu\text{m}$ sampling interval when the design interval is equal to $(\lambda f/D)/2$

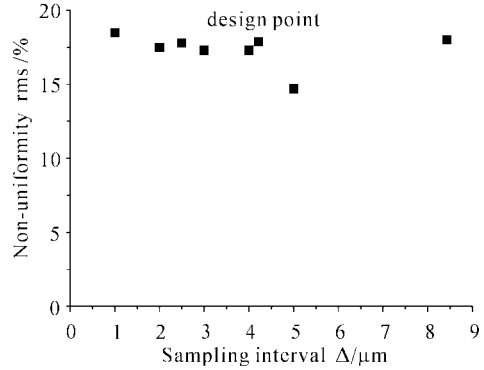


图 6 设计间隔等于 $(\lambda f/D)/2$ 时,顶部不均匀性与焦面采样间隔的关系

Fig. 6 Relationship between rms and sampling interval when the design interval is equal to $(\lambda f/D)/2$

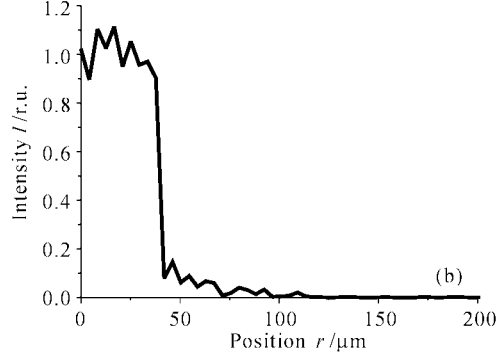
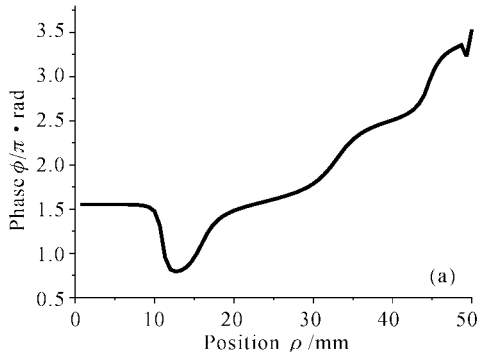


图 7 设计间隔小于 $(\lambda f/D)/2$ 时,衍射光学束匀滑器件的设计结果 (a) 位相分布;(b) 强度分布

Fig. 7 Design results of the DOE for beam smoothing when the design interval is smaller than $(\lambda f/D)/2$ (a) phase distribution; (b) intensity distribution

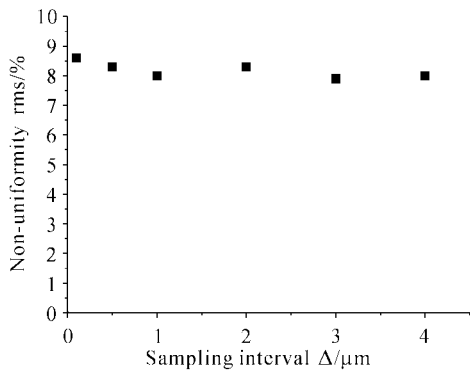


图 8 设计间隔小于 $(\lambda f/D)/2$ 时,顶部不均匀性与焦面采样间隔的关系

Fig. 8 Relationship between rms and sampling interval when the design interval is smaller than $(\lambda f/D)/2$

当采样间隔选取满足 $\Delta < (\lambda f/D)/2$ 时,显然更能在焦面获得真实的束匀滑分布。重新选取光学系统参数, λ, f, D 分别为 $1.053 \mu\text{m}, 800 \text{ mm}$ 与 100 mm ,束匀滑焦斑大小 d 约为 $80 \mu\text{m}$,焦面采样间隔 Δ 选为 $4.2 \mu\text{m} < (\lambda f/D)/2 = 4.212 \mu\text{m}$,设计结果如图 7 所示,其光能利用率与顶部不均匀性分别为 81.0% , 7.7% 。

根据图 7(a)的位相分布,选取不同的 Δ 进行光强分布计算,其顶部不均匀性与 Δ 的关系如图 8 示,均控制在 9% 以下,可见在焦面上获得了真实的束匀滑分布。

4 结 论

本文类比于一维衍射光学束匀滑器件精细化设计方法,进行了圆对称衍射光学束匀滑器件的精细化设计。选取不同的焦面采样间隔进行了束匀滑器

不均匀性均保持小于 19% ,这说明在焦面上获得了真实的束匀滑分布。

件的设计,其模拟结果显示,为了获得真实的束匀滑分布,焦面采样间隔必须小于/等于 0.5 倍传统采样间隔。只有这样获得的采样结果才是真实的,其他非采样点处的光强分布也符合束匀滑要求。

模拟结果显示定性分析是正确的,但如何严格证明,从理论上指导束匀滑或其他功能衍射光学器件的设计;如何参照一维束匀滑器件的空间频谱分析^[10],以连续的焦面光强分布而不是以离散采样点上的光强分布来评价圆对称衍射光学束匀滑器件的性能;从图 4 与图 7 设计结果可知,光能利用率与顶部不均匀性难以同时获得良好性能,其相互制约关系如何以及怎样改善束匀滑性能等等,这些问题还有待进一步的研究。

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 R. W. Gerchberg, W. O. Saxton. Phase determination from image and diffraction plane pictures in the electron microscope [J]. *Optik*, 1971, **34**(3):275~284
- 5 R. W. Gerchberg, W. O. Saxton. A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures [J]. *Optik*, 1972, **35**(2):237~246
- 6 Yang Guozhen, Gu Benyuan. On the amplitude-phase retrieval problem in optical system [J]. *Acta Physica Sinica* (物理学报), 1981, **30**(3):410~413 (in Chinese)
- 7 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
- 8 Tan Qiaofeng, Yan Yingbai, Jin Guofan *et al.*. Composite diffractive optical array element for generating a uniform focal spot [J]. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1999, **A26**(9):803~807 (in Chinese)
- 9 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)
- 10 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* (中国激光), 2002, **A29**(8):699~702 (in Chinese)