

文章编号: 0258-702X(2002)01-0029-04

衍射光学束匀滑器件的精细化设计

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 修正了衍射光学束匀滑器件一维设计公式, 利用爬山-模拟退火混合优化算法, 进行了束匀滑器件的精细化设计, 不仅获得了算法中焦面采样点上的束匀滑光强分布, 还使焦面上其他非采样点也满足束匀滑光强分布。

关键词 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

Precise Design of 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 conventional formula, used to design diffractive optical element (DOE) for beam smoothing, is modified. By using the hybrid algorithm merging hill-climbing with simulated annealing, the precise design of the DOE for beam smoothing is completed. Besides the used sampling points in the optimization, the intensity distribution of any uncontrolled points and with any sampling interval on the focal plane is consistent with the demand for beam smoothing.

Key words diffractive optical element, 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。已提出并采用了多种算法, 例如 Gerchberg-Saxton(GS)算法^[4,5]、杨-顾(YG)算法^[6,7]等迭代算法, 爬山-模拟退火混合优化算法^[8]等, 均获得了理想的束匀滑分布。但 GS 等迭代算法存在两个不足。首先, GS 等迭代算法是基于快速傅氏变换(FFT)进行正反迭代求解, 原理上可通过对离散数据进行 sinc 插值得到连续分布的数据; 但在衍射光学束匀滑器件的设计中, 若对优化得到的离散位相分布进行 sinc 函数插值, 不仅有位相调制, 还包含振幅调制, 与纯位相器件的要求相矛盾。其次, 在优化

算法中所获得的性能良好的束匀滑分布仅在采样点上满足, 在其他非采样点上难以实现束匀滑光强分布。

本文针对一维情形, 修正了设计公式, 选取原始焦面采样间隔的一半来进行束匀滑器件的精细化设计, 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。计算具有相同采样间隔、不同平移量的焦面上各组采样点的光强分布, 或任选焦面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

一维情形, 根据基尔霍夫衍射理论, 若衍射光学器件的透过率函数为 $T(x)$, 平面波入射时, 忽略常

收稿日期 2000-10-23; 收到修改稿日期 2000-12-22

基金项目: 国家高技术项目(863-416-2), 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.pim.tsinghua.edu.cn

数因子,其焦面的光强分布为

$$K(x', f) = \left| \int T(x) \exp(-i2\pi f_x x) dx \right|^2 \Big|_{f_x = \frac{x'}{\lambda f}} \quad (1)$$

在优化设计中,需离散化。在GS等迭代算法中,符合采样定理是为了能保证正反迭代过程不失真且满足能量守恒定律,并可对离散的采样点进行sinc函数插值重建出连续数据。在束匀滑器件的设计中,对优化得到的离散位相分布进行sinc函数插值,其透过率函数不再是纯位相函数,因此,实际上不能通过插值操作获得连续的纯位相分布。在爬山-模拟退火混合优化算法中,只利用了正变换过程,位相分布是搜索得出的,其焦面采样间隔可不满足采样定理的限制,故本文采用该算法进行束匀滑器件的设计。

考虑到通常采用套刻进行衍射光学器件的加工,因此,在设计中考虑位相单元尺寸。设器件大小为 D ,位相等分为 N 单元,则其透过率函数可写为

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

其中, φ_j 为器件第 j 个单元的位相值, $a = D/N$,

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

平面波入射时,其焦面光强分布为

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

其中

$$\text{sinc}(x) = \begin{cases} 1 & \text{当 } x = 0 \\ \frac{\sin(\pi x)}{\pi x} & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

在数值计算中,只考虑某些离散点的光强值与理想值的距离,以此作为算法评价函数。若取 $x' = m\lambda f/D$, $m = 0, 1, 2, 3, \dots$,此时符合采样定理,忽略常数 a ,则采样点的光强分布为

$$K(m) = \left| \text{sinc}\left(\frac{m}{N}\right) \sum_{j=1}^N \exp(i\varphi_j) \exp\left(-i2\pi \frac{mj}{N}\right) \right|^2 \quad (6)$$

若仅考虑一个周期,即 $m = 0, 1, 2, \dots, N-1$,则式(6)可写为

$$K(m) = \left| \text{sinc}\left(\frac{m}{N}\right) \text{DFT}_m[\exp(i\varphi_j)] \right|^2 \quad (7)$$

其中,DFT代表离散傅氏变换,且

$$\text{DFT}_m(x_j) = \sum_{j=1}^N x_j \exp\left(-i2\pi \frac{mj}{N}\right) \quad (8)$$

与传统的设计公式

$$K(m) = |\text{DFT}_m[\exp(i\varphi_j)]|^2 \quad (9)$$

相比,只多了一个位相单元尺寸的sinc函数包络。在束匀滑时,均匀焦斑大小 d 所确定的 $M = dD/(2\lambda f)$ 远小于 N 时,即 $\text{sinc}(M/N) \approx 1$,式(7)与式(9)等同。进一步分析式(7)可知,焦面光强分布虽然受 sinc^2 函数包络,但对于束匀滑,主瓣以外的小光强分布对应于 sinc^2 函数的旁瓣极值点,而中心主瓣对应 sinc^2 函数的零点附近,因此该包络对束匀滑性能几乎没有影响。

以式(9)进行优化设计,选取器件口径 $D = 100$ mm,透镜焦距 $f = 600$ mm,激光波长 $\lambda = 1.053 \mu\text{m}$,焦斑大小 $d = 100 \mu\text{m}$ 。采用的爬山-模拟退火算法与顶部不均匀性、光能利用率的定义见参考文献[8]。优化的位相分布与焦面光强分布如图1(a),(b)所示,光能利用率与顶部不均匀性分别为96.1% 3.25%。

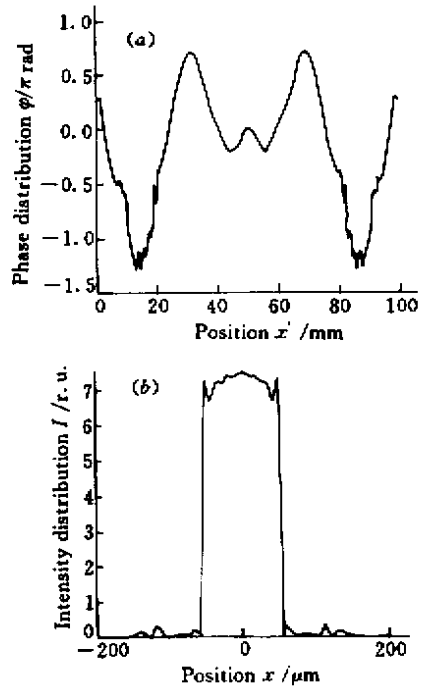


图1 $x' = m \frac{\lambda f}{D} = m \frac{\lambda f}{Na}$ 采样时设计结果

(a)位相分布 (b)焦面光强分布

Fig.1 Simulated design results with $x' = m \frac{\lambda f}{D} = m \frac{\lambda f}{Na}$

(a) phase distribution ;(b) intensity distribution

在焦面上,算法采样点的光强分布满足束匀滑性能,但是非采样点难以满足束匀滑要求。计算焦面上具有相同采样间隔 $\Delta = \lambda f/D$,不同平移量 $\Delta x'$

的十几组采样点上的光强分布,其顶部不均匀性与 $\Delta x'/\Delta$ 的关系如图 2 所示,顶部不均匀性急剧变化,并在平移量为 $\pm \Delta/2$ 处,顶部均匀性最差。

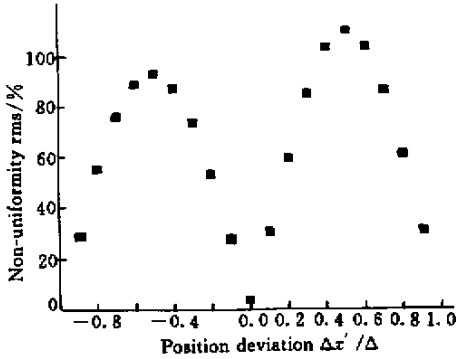


图 2 顶部不均匀性与焦面平移量的关系

Fig.2 Relationship between the non-uniformity and the position deviation

定性分析图 2 可知,如果在设计中,除控制式(9)所示焦面采样点上的光强分布外,还控制焦面上具有采样间隔 Δ , $\pm \Delta/2$ 平移量的那组采样点上的光强分布,使其均满足束匀滑要求,则其他组焦面采样点上的光强将被限制为束匀滑分布。

而焦面上具有采样间隔 Δ , $\pm \Delta/2$ 平移量的一组采样点的光强分布为

$$K(m) = \left| \text{DFT}_m \left[\exp(i\varphi_j - i\frac{j\pi}{N}) \right] \right|^2 \quad (10)$$

综合式(9)(10),相当于在式(4)中,选取焦面采样间隔为 $\Delta/2$,即 $x' = n \frac{\lambda f}{2D} = n \frac{\lambda f}{2Na}$, $n = 0, 1, 2, 3, \dots, 2N - 1$,忽略 sinc 函数,其光强分布为

$$K(n) = \left| \sum_{j=1}^N \exp(i\varphi_j) \exp(-i2\pi \frac{nj}{2N}) \right|^2 \quad (11)$$

3 模拟计算

选取相同的设计参数,按式(11)进行优化设计,位相分布与焦面光强分布如图 3 所示,顶部不均匀性与光能利用率分别为 7.6% 和 94.2%。

为验证在焦面是否获得了真实的束匀滑光强分布,计算了焦面上具有相同采样间隔 Δ ,不同平移量 $\Delta x'$ 的 20 组光强分布,其顶部不均匀性与 $\Delta x'/\Delta$ 的关系如图 4 所示,顶部不均匀性均限制在 10% 以下。

以焦面采样间隔分别为 $1 \mu\text{m}$, $1.5 \mu\text{m}$ 与 $2 \mu\text{m}$ 进行了光强分布计算,如图 5 所示,其顶部不均匀性分别为 10.7%, 13.6%, 8.8%, 光能利用率分别为

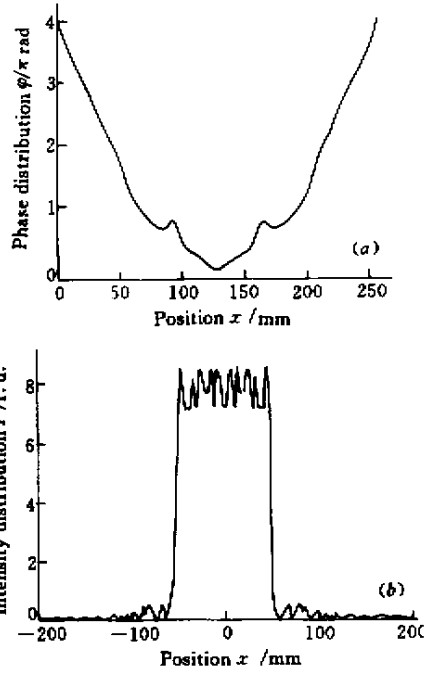


图 3 $x' = n \frac{\lambda f}{2D} = n \frac{\lambda f}{2Na}$ 设计结果

(a) 位相分布 (b) 焦面光强分布

Fig.3 Simulated design results with $x' = n \frac{\lambda f}{2D} = n \frac{\lambda f}{2Na}$

(a) phase distribution ;(b) intensity distribution on the focal plane

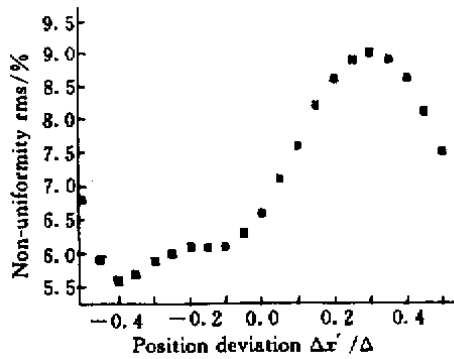


图 4 顶部不均匀性与焦面平移量的关系

Fig.4 Relationship between the non-uniformity and the position deviation

94.6% 95.0% 94.2%。

4 结论

本文修正了传统的一维衍射光学束匀滑器件的设计公式,选取 $\lambda f/(2D)$ 而非 $\lambda f/D$ 为焦面采样间隔进行器件位相优化设计,从模拟结果看,不仅控制了焦面采样点的光强分布,使其满足束匀滑分布,其

他非采样点处的光强分布仍然符合束匀滑要求,在焦面获得了真实束匀滑分布。

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,束匀滑性能并不随着焦面采样间隔的增大而改善(图5),顶部不均匀性与焦面平移量绝对值的非单调关系(图4)等,说明焦面光强分布的复杂性,这些问题的解决还有待进一步的工作。

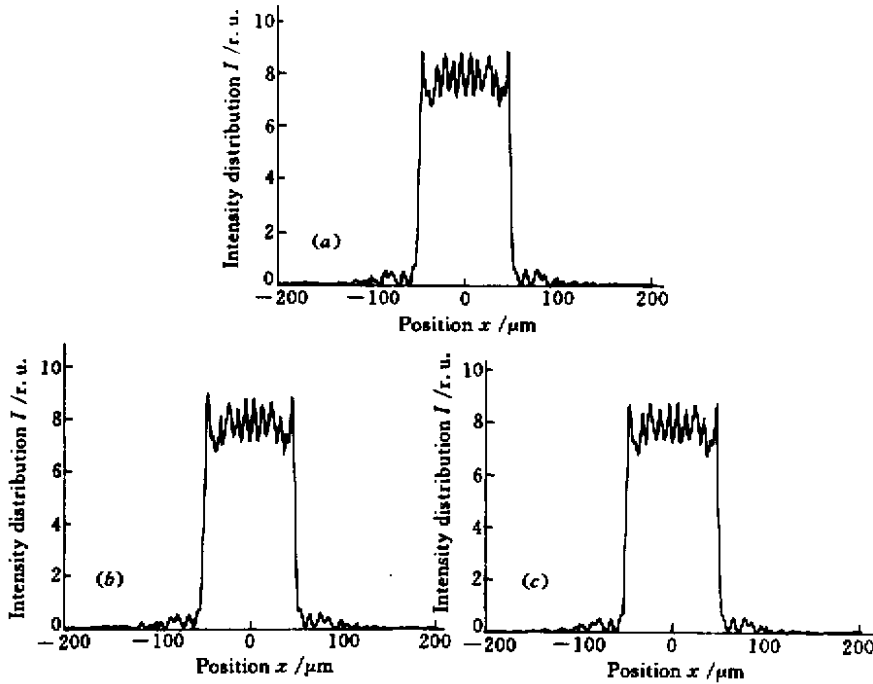


图5 不同焦面采样间隔的光强分布

Fig.5 Intensity distributions with different sampling interval
(a) $1 \mu\text{m}$; (b) $1.5 \mu\text{m}$; (c) $2 \mu\text{m}$

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.*. Design and manufacture of continuous phase diffractive optical element to realize beam transform [J]. *Optical Technique (光学技术)*, 1999, (6) 74 ~ 76 (in Chinese)
- 3 Chen Yansong, Li Dehua, Sheng Yunlong. Beam-shaping element with reduced sensitivity to input variations [J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(3) 568 ~ 571
- 4 R. W. Gerchberg, W. O. Saxton. Phase determination for 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 systems [J]. *Acta Physica Sinica (物理学报)*, 1981, **30**(3) 410 ~ 413 (in Chinese)
- 7 Xin Tan, Benyuan Gu, Guozhen Yang *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)