

产生均匀焦斑的组合式衍射光学阵列器件*

谭峭峰 严瑛白 金国藩 邬敏贤

(清华大学精密测试技术及仪器国家重点实验室 北京 100084)

提要 提出并设计了一种不同尺寸的方形单元组成的衍射光学阵列器件,其外形逼近于圆形,以产生平顶、陡边、小旁瓣的焦斑光强分布。对输入圆形光束有较大的填充因子,充分利用了光能。在设计上将二维简化为一维,且加工简单。基于爬山法和模拟退火法相结合的混合算法,设计了器件的位相分布。模拟计算结果表明了这种方法的有效性。

关键词 组合式衍射光学阵列器件,均匀焦斑,混合算法

1 引言

在许多应用场合,对激光光束焦斑的光强分布有特殊要求,例如在激光加工及激光核聚变中,要求激光焦斑光强是一种平顶、陡边、无旁瓣分布。利用随机位相板(RPP)^[1]、相息图(KPP)^[2,3]等衍射光学器件、透镜阵列(LA)^[4]等可实现焦斑均匀化。因衍射光学器件设计灵活,能获得高的光能利用率,越来越受到重视。

实现焦斑均匀化的衍射光学器件可设计为整体式或阵列式。阵列式器件由于抗入射光波畸变、抗加工误差等方面优于整体式,可通过阵列单元设计上的灵活性来获取不同形状的焦斑,并能设计大尺寸器件。阵列器件的单元形状可以是方形、圆形、六边形等。为简化计算,阵列单元形状选为方形,将二维设计转化为一维设计。对于大多数圆形输入光束,通常采用内接于圆的方形阵列,其填充因子为63.7%,光能利用率很低。为此,本文提出并设计了一种组合式的衍射光学阵列器件,利用几种不同尺寸的阵列单元来逼近圆形,实现大的填充因子,来提高光能利用率。

衍射光学阵列器件位相分布的设计可利用G-S算法、杨-顾算法^[5]、模拟退火算法^[6,7]、遗传算法^[8]等实现。为充分利用算法本身的优点,避免其缺点,可采用混合算法来进行位相设计。本文利用爬山法与模拟退火算法相结合,通过位相随机初始化来获取满足焦斑均匀化的位相分布。

2 原理

对于衍射光学阵列器件,其透过率函数可写为

* 国家高技术 863-416 专题项目和国家自然科学基金资助课题。

收稿日期: 1998-03-27; 收到修改稿日期: 1998-05-22

$$T(x', y') = \sum_j \{ \exp[i\Phi_j(x', y')] * \delta(x' - x_j, y' - y_j) \} \quad (1)$$

其中, $\Phi_j(x', y')$ 为第 j 个阵列单元的位相分布。

设输入光场为均匀分布, 根据基尔霍夫衍射理论, 阵列器件的远场分布可表示为

$$E(x, y, f) = CF[T(x', y')]|_{f_x=\frac{x}{\lambda f}, f_y=\frac{y}{\lambda f}} \quad (2)$$

其中 C 为常数, λ 为入射激光波长, f 为傅氏变换透镜焦距。

忽略常数 C , 根据卷积定理可得出

$$E(x, y, f) = \sum_j F\{\exp[i\Phi_j(x', y')]\} \times \exp\left[-i\frac{2\pi}{\lambda f}(xx' + yy')\right] \quad (3)$$

其远场光强分布为

$$I(x, y, f) = \left\| \sum_j F\{\exp[i\Phi_j(x', y')]\} \times \exp\left[-i\frac{2\pi}{\lambda f}(xx' + yy')\right] \right\|^2 \quad (4)$$

其中 $\exp\left[-i\frac{2\pi}{\lambda f}(xx' + yy')\right]$ 引入了阵列单元间的干涉调制, 但不影响焦斑光强包络, 也不会降低光能利用率。在某些应用场合, 此干涉调制还可通过某些特定的物理过程抹平, 例如在激光核聚变中, 所产生的热传导效应可消除此种干涉调制。所以若每个阵列单元自身的焦斑光强满足平顶陡边无旁瓣分布, 则可认为阵列器件的焦斑光强也具有这种分布。

3 算 法

本文采用的优化算法是基于爬山法与模拟退火法相结合的混合算法。充分利用爬山法的强局部寻优能力和模拟退火法的全局优化潜力, 通过位相随机初始化, 来得到满足焦斑均匀化所要求的位相分布。算法流程如图 1 所示。

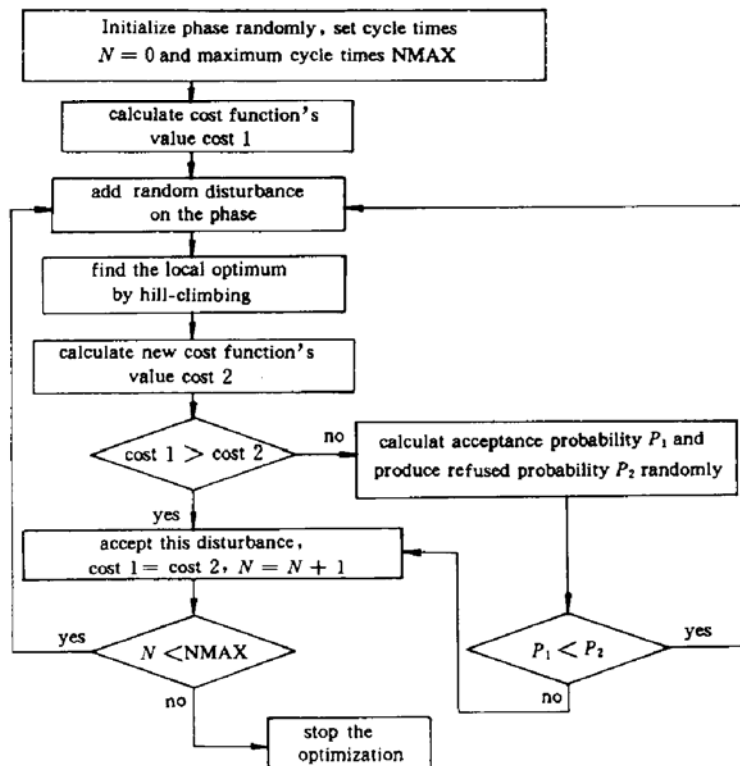


图 1 算法流程图

Fig. 1 The basic structure of the hybrid algorithm

4 阵列器件设计及模拟结果

为提高填充因子,提高光能利用率,采用不同尺寸的方形阵列单元来逼近圆。所选方形阵列单元尺寸越小,就越能逼近于圆。对于几种选定尺寸的阵列单元,不同的几何结构对填充因子和光能利用率会有一些影响。

设计参数如下:输入圆形光束直径为 $\phi 141 \text{ mm}$,入射激光波长 $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$,傅氏变换透镜焦距 $f = 800 \text{ mm}$,所需焦斑边长为 $a = 600 \mu\text{m}$ 。阵列单元尺寸选取为 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 和 $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 两种,它们的单元设计的位相分布及焦斑光强分布、性能参数分别如图 2,图 3 所示。每种单元位相设计时采样点数均为 256 点。

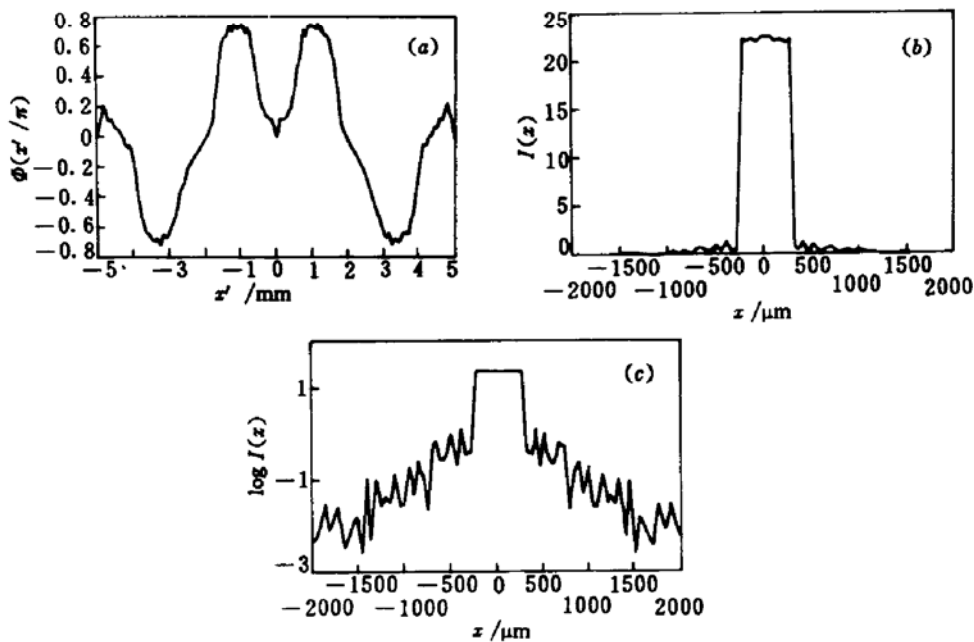


图 2 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 阵列单元位相设计结果

(a) 位相分布图;(b) 焦斑光强分布图;(c) 焦斑光强对数分布图。光能利用率 $\eta = 95.1\%$,光斑均匀性 $\text{rms} = 1.2\%$

Fig. 2 Simulated results of $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ array unit

(a) phase distribution; (b) intensity distribution in the focal spot;

(c) logarithm intensity distribution in the focal spot. $\eta = 95.1\%$, $\text{rms} = 1.2\%$

本文仅分析由其构成的两种几何结构的阵列器件。由简单的几何关系,可计算出每种阵列单元的数目。

类型 I

其几何结构如图 4 (a) 所示,包含了 100 个 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 单元,188 个 $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 单元,总填充因子为 93.7%,其中 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 单元和 $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 单元提供的填充因子分别为 63.7%和 30.0%。

此阵列器件的光能利用率为

$$\eta = 63.7\% * 95.1\% * 95.1\% + 30.0\% * 90.0\% * 90.0\% = 81.9\% \quad (5)$$

若仅考虑 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 单元,光能利用率由上式第一项确定,仅为 57.6%。

类型 II

其几何结构如图 4 (b) 所示,包含了 136 个 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 单元和 40 个 $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 单

元,总填充因子为 93.0%, 10 mm×10 mm 单元和 5 mm×5 mm 单元分别提供 86.6%和 6.4%的填充因子。计算可得此阵列器件的光能利用率为 83.5%, 10 mm×10 mm 单元提供的光能利用率为 78.3%。

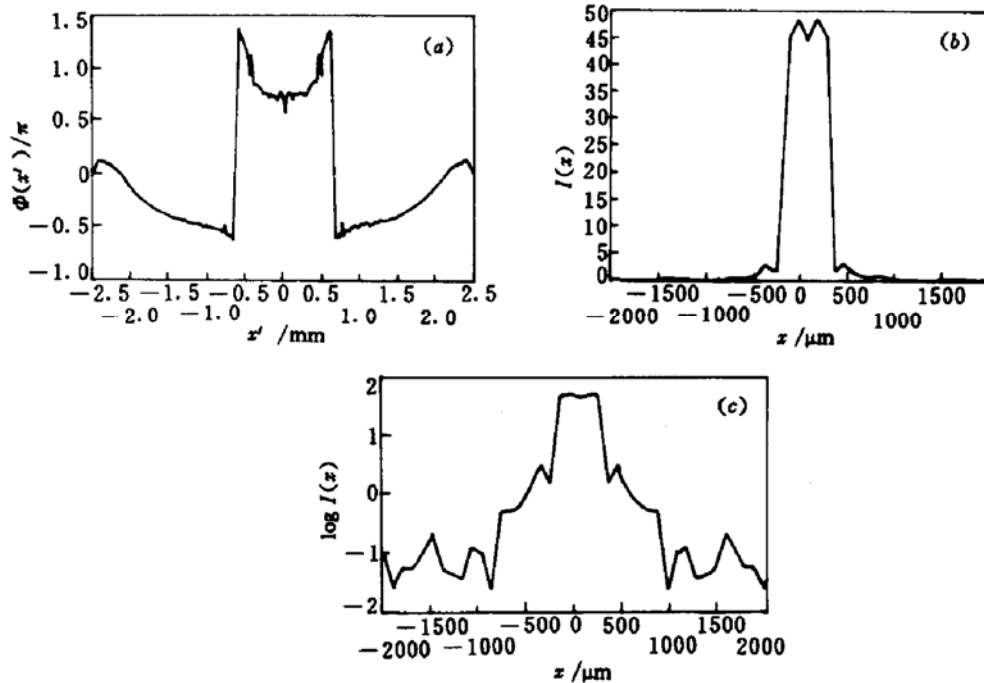


图 3 5 mm×5 mm 阵列单元位相设计结果

(a) 位相分布图; (b) 焦斑光强分布图; (c) 焦斑光强对数分布图。光能利用率 $\eta = 90.0\%$, 光斑均匀性 $rms = 4.4\%$

Fig. 3 Simulated results of 5 mm×5 mm array unit

(a) phase distribution; (b) intensity distribution in the focal spot;

(c) logarithm intensity distribution in the focal spot. $\eta = 90.0\%$, $rms = 4.4\%$

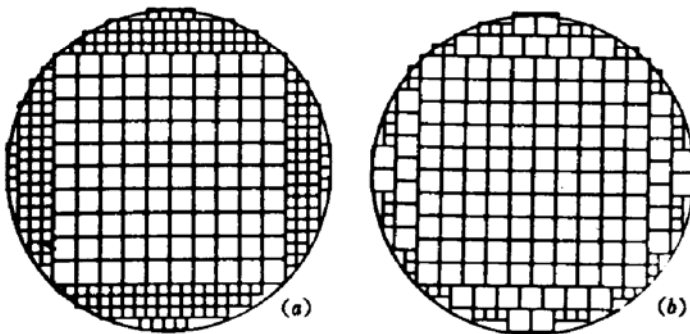


图 4 阵列器件的几何结构

(a) 类型 I; (b) 类型 II

Fig. 4 Geometrical structure of type I (a) and type II (b)

5 讨论与结语

通过以上两种阵列单元的计算机设计模拟结果,可以看出混合优化算法是有效的,对两种尺寸单元设计结果都比较理想。它们各自产生的焦斑光强均满足平顶、陡边、小旁瓣的分布。优化结果随参数 $a\phi/\lambda f$ 增大而变好。

从中可以看出采用两种单元尺寸的阵列,使能量利用率有较大的提高。若选取更多种阵列单元来逼近于圆,将获取更高的填充因子和更大的光能利用率。由于参数 $a\phi/\lambda f$ 的影响,10 mm×10 mm 单元设计结果优于 5 mm×5 mm 单元的,比较图 4 (a), (b) 两种阵列几何结构,图

4(b) 相对于图 4(a), $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 单元数目多, 所提供的填充因子多, 虽然器件总填充因子稍微降低, 器件的光能利用率却增大。因此, 在阵列的几何结构设计上, 应尽量让尺寸较大的单元提供更大的填充因子。

上述位相设计时, 采样点数为 256 点, $5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ 单元的最小线宽约为 $20\text{ }\mu\text{m}$, $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 单元的最小线宽约为 $40\text{ }\mu\text{m}$ 。化学腐蚀、离子刻蚀、激光直写等加工方法的精度都高于此值。若能在位相设计或加工中充分利用加工精度来提高每一单元的能量利用率, 且采用更多种尺寸的阵列单元逼近于圆来获取更大的填充因子, 有望实现高于 90% 的光能利用率。

此种组合式阵列器件设计思想简单, 灵活性强, 优化算法简单。以上所述是实现圆形激光光束输入, 方形焦斑输出。该方法还能应用于其反问题, 即当输入为方形光束时, 可设计一种组合阵列器件, 使输出焦斑为圆形或其他任意形状。

参 考 文 献

- 1 S. N. Dixit, I. M. Thomas, B. W. Woods *et al.*. Random phase plates for beam smoothing on the Nova lase. *Appl. Opt.*, 1993, 32(14):2543~2554
- 2 S. N. Dixit, J. K. Lawson, K. R. Manes *et al.*. Kinoform phase plates for focal plane irradiance profile control. *Opt. Lett.*, 1994, 19(6):417~419
- 3 Y. Lin, T. J. Kessler, G. N. Lawrence. Distributed phase plates for super-Gaussian focal-plane irradiance profile. *Opt. Lett.*, 1995, 20(7):764~766
- 4 Ximing Deng, Xiangchun Liang, Zezun Chen *et al.*. Uniform illumination of large targets using a lens array. *Appl. Opt.*, 1986, 25(3):377~381
- 5 Guozhen Yang, Bizhen Dong, Benyuan Gu *et al.*. Gerchberg-Saxton and Yang-Gu algorithms for phase retrieval in a nonunitary transform system; a comparison. *Appl. Opt.*, 1994, 33(2):209~218
- 6 S. Kirkpatrick, C. D. Galatt, Jr., M. P. Vecchi. Optimization by stimulated annealing. *Science*, 1983, 220(4598):671~680
- 7 Xu Lei. An improved simulated annealing method for combinatorial optimization. *Information and Control*, 1990, 19(3):1~7
- 8 Liviu I. Voicu, Wissam A. Rabadi, Harley R. Myler. Object support reconstruction from the support of its autocorrelation using multiresolution genetic algorithms. *Opt. Eng.*, 1997, 36(10):2820~2827

Composite Diffractive Optics Array Element for Generating a Uniform Focal Spot

Tan Qiaofeng Yan Yingbai Jin Guofan Wu Minxian

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

Abstract In this paper, a kind of composite diffractive optics array element, whose shape is approximately circular by containing some series of square units with different sizes, is designed to obtain a focal spot with flat top, steep edges and low sidelobe intensity distribution. For an incident laser beam with circular shape, a large filling factor can be realized and light energy can be sufficiently used. Two dimensions are converted to one dimension to simplify the design and manufacturing. Hybrid algorithm based on hill-climbing and stimulated annealing is utilized for phase design. Simulated results show the validity of this kind of method.

Key words composite diffractive optics array element, uniform focal spot, hybrid algorithm