

利用模拟退火法实现不等宽单元柱面透镜列阵(CLA)的理论设计

李学春 黄关龙 朱健强 邓锡铭

(中国科学院上海光机所高功率激光物理国家实验室 上海 201800)

摘要 将模拟退火法引入柱面透镜列阵的结构参数优化过程中,并成功地利用该方法实现了不等宽单元 CLA 系统的性能优化工作。结果表明采用不等宽单元技术能大大改善入射光场为高斯分布型的焦线强度分布均匀性。采用不等宽 5 单元系统能获得 < 1% 的调制对比度。

关键词 线聚焦, 高斯分布, 柱面透镜列阵, X 射线激光

1 引言

在 X 射线激光实验中,高强度的抽运激光在靶面上形成强度分布均匀的焦线是获得好的 X 射线激光增益特性^[1~3]的保障。在各种线聚焦方法中,柱面透镜列阵(Cylindrical Lens Array: CLA)-靶镜复合系统^[4,5]能获得良好的大尺度焦线强度分布均匀性。它能在保证透射能量的条件下将圆形口径入射光束变换成强度均匀焦线。以前的 CLA 系统都采用等宽度单元^[4,5],而在本文中则应用模拟退火法探讨 CLA 列阵的单元宽度比变化对系统的改进潜力。主要考虑均匀强度分布及高斯强度分布的两种光束入射情形。

2 理论模型

典型的 CLA-靶镜线聚焦系统如图 1 所示。对于此系统,考虑傍轴几何光学条件有^[3]

$$d_i/g = f_{ci}/f_t \quad (1)$$

式中 d_i, f_{ci} 分别为第 i 个柱面镜单元的宽度和焦距, g 为所要求的焦线长度。入射 x - y 平面上任一点 $p(x, y)$, 在焦线上的对应点是 $p'(0, y')$ 存在着

$$(y - \text{axis}_i)/y' = f_{ci}/f_t \quad (2)$$

式中 y' 为 p' 点在焦线处的坐标, 而 axis_i 为第 i 个单元的轴线位置。为简化起见认为聚焦靶镜像差较小, 焦线沿 x 方向的宽度相等且强度分布均匀。故需要考虑在焦线处沿 y' 方向的大尺度强度分布 $I(y')$, 此时有

$$I(y', \text{axis}_i) = \sum_{i=1}^N \int_{x_1}^{x_2} I_{0i}(x, y) dx \quad (3)$$

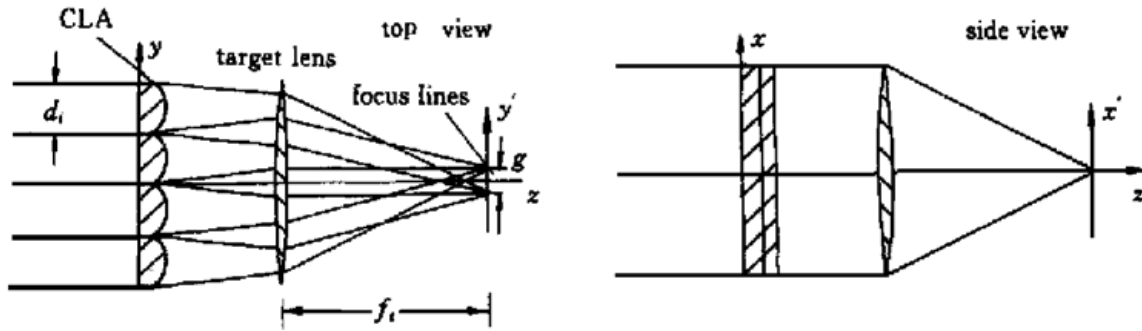


图 1 CLA-靶镜线聚焦系统结构简图

Fig. 1 Schematic diagram of the CLA-target focus line system

式中 $I_{0i}(x, y)$ 为入射光束在靶镜所在平面处的第 i 个单元的入射光场的横向强度分布。由于函数表达式的复杂性, 不能通过对式(3) 的自变量 y' 求导的办法来求得系统处于极值状态时 axis_i 的值。在此可转化为如下式所示的函数问题

$$G(\text{axis}_i) = \int_{-g/2}^{g/2} |I(y', \text{axis}_i) - \langle I(y', \text{axis}_i) \rangle|^2 dy' \quad (4)$$

则问题转化为求解参数 axis_i 使得函数 $G(\text{axis}_i)$ 为极小的过程。该问题可采用模拟退火法来实现 CLA 列阵的结构参数优化问题。而为衡量优化前后的焦线强度分布的均匀特性, 可采用常用的调制对比度的概念来描述

$$\eta = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (5)$$

3 模拟退火法简介

模拟退火法的基本思路是利用随机搜索的方法, 在整个自变量空间寻找满足约束条件的最优解。其基本过程是: 首先要确定一个优化函数, 该函数用以确定和衡量整个系统当前所处的状态及性质的优劣。即优化所要求的目标特性。第二步要确定影响优化函数特性的因素(自变量)及其有效变化范围。最后是在自变量空间内随机取一起点, 并给一个随机变化的步长探索目标函数的变化, 如果目标函数值变好则保留此点作为下次搜索的起点; 如果目标函数值变差, 则按照一定的概率决定此点的取舍。这样本方法就保证了系统收敛于局域最优点的同时, 又有可能跳出不满足要求的局域最优点, 去搜索更理想的最优解。

本文用该方法系统地研究了不同的入射强度分布情况下非等宽单元 CLA 列阵的焦线强度分布优化效果。

4 模拟退火法在柱面透镜列阵优化设计中的应用

对比较典型的工作条件, 焦线长度 $l = 10 \text{ mm}$, CLA 列阵的宽度 $w = 220 \text{ mm}$, 靶镜的焦距为 750 mm 。

等宽单元数目对调制对比度的影响的模拟结果如图 2 所示。可发现随单元数增加, 焦线调制对比度单调下降, 6 单元的调制对比度为 1.5% , 这与文献[3]一致。但单元数目的增加将带来两种不良影响。一是由多光束干涉形成的小尺度调制, 5 单元 CLA 的焦线小尺度调制将

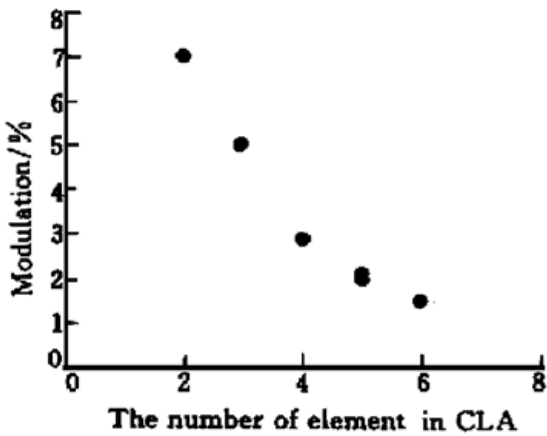


图 2 焦线的大尺度均匀性随 CLA 系统中单元数目的变化

Fig. 2 Large-scale modulation changing with number of elements in CLA

达到 88% 左右^[5]。虽然由热等离子体本身的热扩散平滑可以大大地抑制小尺度调制,但在不影响大尺度均匀性的同时,应尽量避免引入过强的小尺度调制。第二,单元数目的增加会提高拼接的难度,并可能影响聚焦效果。综合以上因素我们只考虑单元数为 3~ 5 块的情况进行优化。CLA 结构为左右对称。

4.1 入射光束横截面为高斯强度分布情形

$$I_{0i}(x, y) = \exp\left[-2\frac{x^2+y^2}{w_0^2}\right] \quad x^2 + y^2 \leq r \quad (6)$$

$$I_{0i}(x, y) = 0 \quad x^2 + y^2 > r$$

代入(4)式进行优化处理。需要调整的参数为各柱面透镜单元的宽度比。这里分别处理了 3, 4, 5 个单元 CLA 列阵的焦线强度分布情况。得到了优化前后效果对比图及相应的单元参数,结果分别如图 3(a)

~ (c) 和表 1 所示。从中可见对强度分布为高斯型的入射光束,改变单元间的宽度比可显著地改进焦线的强度分布。优化后 3 单元不等宽系统的焦线强度调制对比度由等宽的 4.5% 降到 1.5%, 接近于等宽 6 单元的均匀效果(见图 3(a))。而优化后的 4 单元系统则降至 0.7%。这一结果说明不等宽单元技术能显著地改进高斯截面强度分布情况下的焦线强度分布,同时又能避免引入过大的小尺度调制。

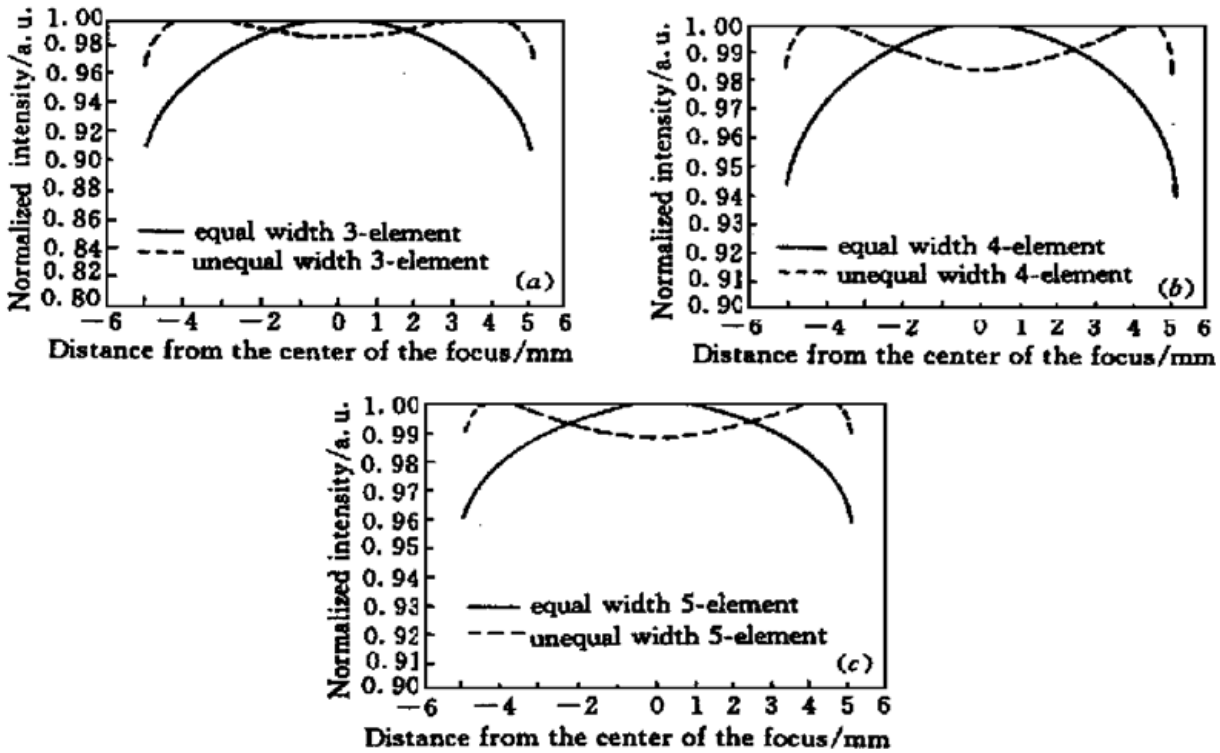


图 3 高斯分布入射时焦线强度分布图

(a) 3 单元; (b) 4 单元; (c) 5 单元

Fig. 3 Intensity distribution along the focus line for 3-element (a), 4-element (b) and 5-element (c) CLA when incident laser is Gaussian distribution

表 1(a) 三单元 CLA 系统优化后的结构参数

Table 1(a) The optimized structure parameter for 3 element CLA (unit: mm)

	Element 1		Element 2		Element 3	
	Width	Focal length	Width	Focal length	Width	Focal length
Gaussian	74.6	5595	70.8	5310	74.6	5595
Uniform	83.3	6248	59.4	4455	83.3	6248

表 1(b) 四单元 CLA 系统优化后的结构参数

Table 1(b) The optimized structure parameter for 4 element CLA (unit: mm)

	Element 1		Element 2		Element 3		Element 4	
	Width	Focal length	Width	Focal length	Width	Focal length	Width	Focal length
Gaussian	86.8	6510	23.2	1740	23.2	1740	86.8	6510
Uniform	34.3	2573	75.7	5678	75.7	5678	34.3	2573

表 1(c) 五单元 CLA 系统优化后的结构参数

Table 1(c) The optimized structure parameter for 5 element CLA (unit: mm)

	Element 1		Element 2		Element 3		Element 4		Element 5	
	Width	Focal length	Width	Focal length	Width	Focal length	Width	Focal length	Width	Focal length
Gaussian	41.0	3075	42.0	3150	54.0	4050	42.0	3150	41.0	3075
Uniform	40.3	3023	54.5	4033	30.4	2288	54.5	4033	40.3	3023

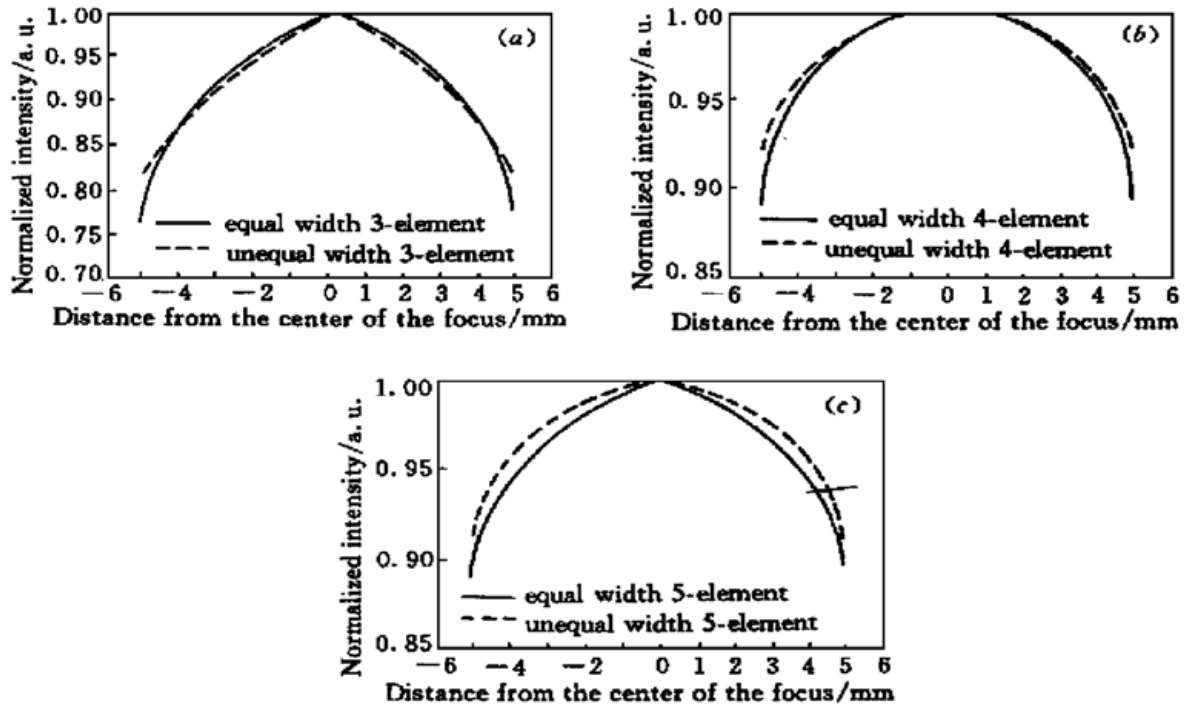


图 4 均匀分布入射时焦线强度分布图

(a) 3 单元; (b) 4 单元; (c) 5 单元

Fig. 4 Intensity distribution along the focus line for 3 element (a), 4 element (b) and 5 element (c) CLA when incident laser is uniform distribution

4.2 均匀强度分布情形

$$\begin{aligned} I_{0i}(x, y) &= 1 & x^2 + y^2 &\leq r \\ I_{0i}(x, y) &= 0 & x^2 + y^2 &> r \end{aligned} \quad (7)$$

对于均匀强度分布入射来讲, 评价函数 $G(\text{axis})$ 也是单元宽度 d 或单元轴线位置 axis_i 的函数。数值优化结果见图 4(a) ~ (c) 和表 1。

单元的宽度调整对焦线强度分布均匀性有一定程度的改善。优化后 3, 4 单元 CLA 的焦线强度调制对比度分别由 12% 下降到 10% 和由 6.5% 下降到 5.5%。表 1 中单元的排列顺序自左到右为 1, 2, ..., M (M 为 CLA 中的单元数目)。

5 结 论

本文成功地将模拟退火法引入到柱面镜结构参数的优化过程中, 系统地研究了在不同入射光束截面分布情况下单元宽度比例变化对焦线强度分布的影响。在高斯分布激光入射情形, 经单元宽度优化后 CLA 列阵的焦线均匀性可得到显著的改善。而对均匀强度分布, 优化后不等宽单元 CLA 也在一定程度上改善焦线上的强度分布均匀性, 但效果不如高斯分布显著。

参 考 文 献

- 1 Wang Xiaofang, Xu Zhizhan, Chen Shisheng *et al.*. Spatial uniformity and its time evolution of linear laser plasmas. *Opt. Eng.*, 1993, **32**(1): 56~ 62
- 2 J. C. Kieffer, M. Chaker, H. Pepin *et al.*. Effects of irradiation nonuniformity on X-ray laser physics. *Opt. Comm.*, 1991, **84**(3~ 4): 208~ 213
- 3 Chen Wannian, Wang Shusen, Chen Bin *et al.*. Cylinder lenses array line focus system for X-ray laser. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1991, **11**(9): 829~ 833 (in Chinese)
- 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 A. Glinz, J. E. Balmer. Investigation on the homogeneity of line plasmas created with the aid of a cylindrical lens array. *Opt. Comm.*, 1994, **111**(3~ 4): 285~ 289

Design of Unequal Width Cylindrical Lens Array by Using Simulated Annealing Method

Li Xuechun Huang Guanlong Zhu Jianqiang Deng Ximing

(National Laboratory of High Power Laser Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

Abstract In this paper the simulating annealing method is introduced into the optimal design process to improve the long-range homogeneity along the line focus. The results show that the unequal width element CLA is able to improve the homogeneity along the focus line for an incident laser with both Gaussian and uniform distribution. The design results are also given.

Key words focusing line, Gaussian distribution, CLA, X-ray laser