

# 混合单元柱面透镜列阵特性及优化

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)

**提要** 提出了结构新颖的混合单元柱面透镜列阵(HECLA)系统,在该系统中引入了半单元结构。数值模拟结果表明,该器件显著地改进了在入射光为超高斯分布条件下的焦线强度分布均匀性。其中准 5 单元 HECLA 系统的调制对比度可以降为 1.7%。这是目前柱面透镜列阵(CLA)系统难以达到的效果。

**关键词** 柱面透镜列阵,线聚焦,X 射线激光

## 1 引 言

在 X 射线激光实验中,获得高增益的 X 射线激光需要强度分布均匀的高功率激光焦线在靶面附近激发出分布均匀的细长的柱状等离子体<sup>[1-3]</sup>。柱面透镜列阵-靶镜系统是获得高质量抽运焦线的有效手段,在实际应用中已得到验证<sup>[4,5]</sup>。

目前的 CLA(Cylindrical lens array)系统(本文称之为经典 CLA)中的各柱面透镜单元的曲率和宽度均相同且单元本身是对称的。尽管经典 CLA 已取得了很好的应用效果,但仍有改进的必要。如对圆形口径大超高斯分布入射激光,6 单元经典 CLA 的大尺度调制对比度在 10%。为此本文提出了一种 Hybrid element CLA(HECLA)系统,结构如图 1 所示。旨在改进超高斯入射条件下的焦线强度分布。在本文中利用数值模拟方法比较了经典 CLA 和 HECLA 系统的均匀化性能,并采用模拟退火法对 HECLA 系统结构参数进行了优化。

## 2 HECLA 结构和均匀化模型

与经典 CLA-靶镜系统比较,HECLA 系统中增加了非对称半柱面透镜单元。HECLA-靶镜与 CLA-靶镜线聚焦系统的工作原理是基本相同的。透过各个柱面透镜单元的入射激光经过靶镜的聚焦作用在靶镜的焦点处并以其为中心形成数条子焦线,它们相互重叠形成一条组合焦线。在圆形口径的光束入射条件下,由于单元本身形状的不对称性和入射光场分布的影响,各子焦线的光强分布是不均匀的。但由于 CLA 中单元排列的对称性,两个对称单元的焦线光强分布也是相对于靶镜焦点对称的。这样数对焦线的光强叠加补偿就得到了光强分布均匀的焦线。经典 CLA 所得到焦线强度分布均为中间强度高,边缘强度低<sup>[4,5]</sup>。而 HECLA 中对称配置的各半柱面透镜单元形成的焦线长度只有组合焦线一半。考虑(2)式的映射关系可知靠

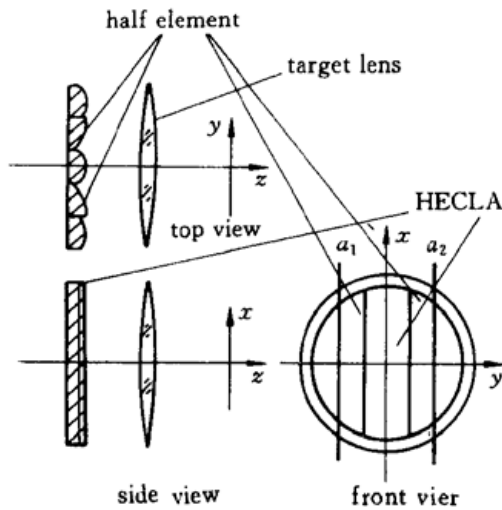


图 1 HECLA-靶镜线聚焦系统结构简图

Fig. 1 The structure scheme for HECLA-target lens focusing system

近柱面透镜轴线的线元映射到焦线的中部, 而远离轴线的线元映射到焦线的边缘。为弥补焦线边缘强度的不足, 采用的半单元轴线远离 HECLA 中心, 而其边缘靠近 HECLA 中心。图 1 中,  $a_1, a_2$  分别为两半单元的轴线位置。由于 HECLA 是圆形口径的, 通过半单元边缘附近的线元长度将大于半单元轴线附近的线元长度, 从而能够补偿焦线边缘强度的不足(见图 1)。

为简化起见, 考虑聚焦靶镜像差修正较好的情况, 可认为在  $x'$  方向的宽度相等且强度均匀<sup>[5]</sup>。考虑傍轴几何条件有

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

式中  $d_i, f_{ci}$  分别为第  $i$  个柱面透镜的宽度和焦距,  $g$  为所要求的焦线长度。现考虑焦线上任一点  $p(0, y')$ , 则在  $y-z$  平面存在对应关系

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

式中  $y'$  为焦线  $p$  点处的坐标, 而  $\text{axis}_i$  为第  $i$  个单元的轴线位置坐标。即对应于焦线的任一点元, 在  $y-z$  平面每个柱面单元都存在一段满足(2)式的线元与之相对应。由于沿焦线长度方向大尺度强度分布对于 X 射线激光增益有着重要的影响<sup>[3]</sup>, 而且由多光束干涉引起的小尺度调制会被等离子体内的热扩散平滑作用明显地抑制和消除, 故只需考虑沿焦线长度方向的大尺度强度分布, 而不考虑多光束干涉引起的小尺度调制。这时可认为焦线沿  $y'$  方向大尺度强度分布  $I(y')$  有

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

式中  $I_{oi}(x, y)$  为第  $i$  个单元的入射光场的截面强度分布。 $N$  为列阵中单元的个数。 $x_1, x_2$  为入射平面上映射到  $(0, y')$  点的对应线元与 HECLA 边缘的上下交点。

### 3 数值模拟与优化

下面将就超高斯分布情形比较经典 CLA 和 HECLA 的焦线强度分布效果, 而后针对系统的最佳性能进行对比讨论。对比较典型的工作条件: 聚焦靶镜的直径和焦距为 220 mm 和 750 mm, 所需要的焦线长度为 10 mm, CLA 和 HECLA 的直径也为 220 mm。在选取柱面透镜单元的结构参数(宽度和焦距)时, 要求满足式(1), 并且各单元的宽度之和恰好为 220 mm。在 CLA 和 HECLA 中单元的配置是左右对称的。

#### 3.1 与经典 CLA 列阵均匀化效果比较

对于超高斯截面分布有

$$I_{oi}(x, y) = \exp\left[-\left(\frac{x^2 + y^2}{w_0^2}\right)^n\right] \quad (4)$$

$$I_{oi}(x, y) = 0$$

式中  $w_0$  为超高斯光束的特征尺寸,  $r$  为光阑半径, 本例中均为 110 mm,  $n = 6$  为超高斯阶数。在此讨论的 HECLA 中的半单元曲率与整单元的是相同的, 其结构形式如图 1 所示。首先利用

数值计算的方法计算(3)式,将经典的 CLA 与 HECLA 系统的均匀化性能进行了比较,结果如图 2,相应结构参数见表 1。数值模拟结果表明这种结构显著地提高了在超高斯分布入射时的焦线强度均匀性。从图 2 中可以看到经典 4 单元 CLA 系统与准 4 单元 HECLA(三只整单元加两只半单元)相比,焦线的强度调制对比度由 6.4% 下降到 3.7%。从中可以看到经典 5 单元 CLA 系统与准 5 单元 HECLA(四只整单元加两只半单元)相比,焦线的强度调制对比度由 4.2% 下降到 2.6%。这一结果表明采用 HECLA 列阵可显著地降低焦线的大尺度强度调制对比度,大大地改善焦线的强度分布均匀性。虽然半单元的引入明显地改善了焦线的强度分布均匀性,但这种技术还有进一步提高改进的可能。表 1 中采用的单元曲率是相同的,因此优化各单元的曲率参数就有可能进一步改进 HECLA 系统的均匀化性能。

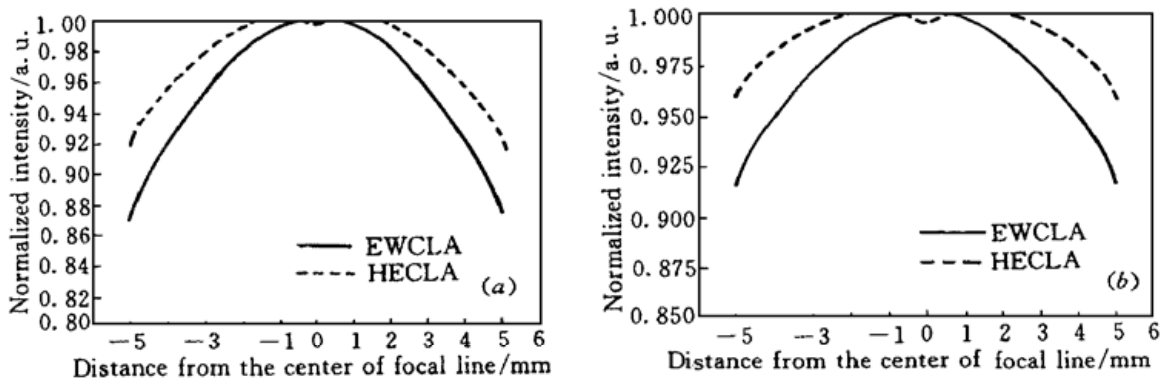


图 2 经典 CLA 和混合单元 CLA 的焦线强度分布图

(a) 4 单元; (b) 5 单元

Fig. 2 The intensity distribution along the focus line for classical CLA and HECLA

(a) 4-element; (b) 5-element

表 1(a) 经典 CLA 4 单元系统与准 4 单元 HECLA 系统结构

Table 1(a) The structure parameters of classical CLA (4 element) and HECLA (quasi 4-element)

|               | Element 1 | Element 2 | Element 3 | Element 4 | Element 5 |
|---------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Classical CLA | $W_1$     | $W_1$     | $W_1$     | $W_1$     | -         |
| HECLA         | $W_1$     | $H_1$     | $W_1$     | $H_1$     | $W_1$     |

Where  $W_1$  presents the whole cylindrical lens element, the width and focal length of which is 55 mm and 4125 mm respectively;  $H_1$  presents the half cylindrical lens element, the width and focal length of which is 27.5 mm and 4125 mm respectively.

表 1(b) 经典 CLA 5 单元系统与准 5 单元 HECLA 系统结构

Table 1(b) The structure parameters of classical CLA (5 element) and HECLA (quasi 5-element)

|               | Element 1 | Element 2 | Element 3 | Element 4 | Element 5 | Element 6 |
|---------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Classical CLA | $W_2$     | $W_2$     | $W_2$     | $W_2$     | $W_2$     | -         |
| HECLA         | $W_2$     | $H_2$     | $W_2$     | $W_2$     | $H_2$     | $W_2$     |

Where  $W_2$  presents the whole cylindrical lens element, the width and focal length of which is 44 mm and 3300 mm respectively;  $H_2$  presents the half cylindrical lens element, the width and focal length of which is 22 mm and 3300 mm respectively.

### 3.2 HECLA 列阵不等宽单元的均匀化效果改进

在此仍考虑入射激光为超高斯分布情形,基本参数同前,采用的优化方法为模拟退火法。数值模拟结果如图 3 所示,相应的单元结构参数见表 2。从图中可以看到经优化后的准 4 单元 HECLA 系统,其调制对比度由等参数条件下的 3.7% 下降到 2.5%;而优化后的准 5 单元 HECLA 系统的调制对比度由 2.6% 下降到 1.7%。而 4,5 单元经典 CLA 系统焦线强度调制对比度分别为 6.4% 和 4.2%。从以上数据可以看到优化后的 HECLA 列阵系统能够更显著地改进焦线的强度分布均匀性。由于超高斯分布是极为典型的高强度激光场的截面分布特性,因此这种新型 HECLA 列阵具有十分重要的实际应用前景。

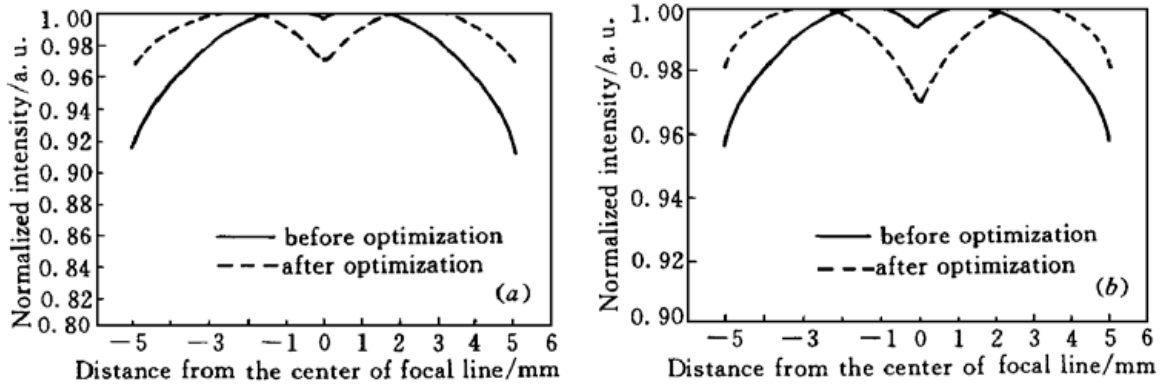


图 3 混合单元 CLA 优化前后的焦线强度分布图

(a) 4 单元; (b) 5 单元

Fig. 3 The intensity distribution along the focus line before and after optimization

(a) 4-element; (b) 5-element

表 2(a) 优化前后的混合单元柱面透镜列阵(HECLA)的结构参数(准 4 单元)(单位: mm)

Table 2(a) The structure parameters of HECLA (quasi 4-element) before and after optimization (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 |
| Before optimization | 55.0      | 4125         | 27.5      | 4125         | 55.0      | 4125         | 27.5      | 4125         | 55.0      | 4125         |
| After optimization  | 42.6      | 3195         | 48.7      | 7305         | 37.4      | 2805         | 48.7      | 7305         | 42.6      | 3195         |

表 2(b) 优化前后的混合单元柱面透镜列阵(HECLA)的结构参数(准 5 单元)(单位: mm)

Table 2(a) The structure parameters of HECLA (quasi 5-element) before and after optimization (Unit: mm)

|                     | Element 1 |              | Element 2 |              | Element 3 |              | Element 4 |              | Element 5 |              | Element 6 |              |
|---------------------|-----------|--------------|-----------|--------------|-----------|--------------|-----------|--------------|-----------|--------------|-----------|--------------|
|                     | Width     | Focal length | Width     | Focal length | Width     | Focal length | Width     | Focal length | Width     | Focal length | Width     | Focal length |
| Before optimization | 44.0      | 3300         | 22.0      | 3300         | 44.0      | 3300         | 44.0      | 3300         | 44.0      | 3300         | 44.0      | 3300         |
| After optimization  | 38.4      | 2880         | 31.7      | 4755         | 39.9      | 2993         | 39.9      | 2993         | 31.7      | 4755         | 38.4      | 2880         |

## 参 考 文 献

- 1 Geun-young Yoon, Takahisa Jitsuno, Yoshiaki Kato *et al.*. High-aspect-ratio line focus for an X-ray laser by a deformable mirror. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(4): 847~ 852
- 2 D. M. Villeneuve, G. D. Enright, H. A. Baldis *et al.*. Novel laser line focus geometry applied to X-ray lasers. *Opt. Commun.*, 1991, **81**(1~ 2): 54~ 58

- 3 Xiaofang Wang, Zhizhan Xu, Shisheng Chen *et al.*. Spatial uniformity and its time evolution of linear laser plasmas. *Opt. Eng.*, 1993, **32**(1): 56~ 62
- 4 Deng Ximing, Liang Xiangchun, Chen Zezun *et al.*. Uniform illumination of large targets using a lens array. *Appl. Opt.*, 1986, **25**(3): 377~ 381
- 5 Chen Wannian, Wang Shusan, Chen Bin *et al.*. Cylinder lenses array line focus system for X-ray laser experiments. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1991, **11**(9): 829~ 843 (in Chinese)

## Description and Optimization of Hybrid Element Cylindrical Lens Array

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** A new kind of cylindrical lens array (CLA), named as hybrid element cylindrical lens array (HECLA), which composed of a few whole elements and two half elements, is proposed in this paper. The intensity distribution along the focal line formed by HECLA-target line focusing system with quasi-four-element and quasi-five-element is calculated. The results show that the using of HECLA is able to improve the intensity uniformity along the focal line greatly. For example, the modulation index decreased to 1.7% for quasi-five-element HECLA in the case of super-Gaussian distribution laser incident.

**Key words** cylindrical lens array, focal line, X-ray laser