

用消衍射方法改善透镜列阵的辐照均匀性*

丘悦 钱列加 黄宏一 范滇元 邓锡铭**

(中国科学院上海光机所, 上海 201800)

提要 用消衍射方法能改善列阵透镜的照明均匀性。本文详细研究了振幅型边缘软化, 位相型边缘软化和硬边波纹光阑等技术在高功率激光靶面均匀照明技术中的应用。

关键词 衍射, 均匀照明, 透镜列阵

1 引言

在激光惯性约束核聚变研究、高压冲击波实验研究中,以及在激光加工等应用技术上,要求靶面或被照物得到非常均匀的光强分布。具体要求是:焦斑上的光强尽可能接近“平顶”分布;焦斑边缘有足够的陡度和不存在“旁瓣”。80年代中期以来,人们作了很大的努力,先后提出了许多方案,诸如随机位相板(RPP)^[1],感应空间非相干(ISI)^[2],光谱色散光滑(SSD)^[3]和自发辐射光放大(ASE)^[4]等技术。这些技术在入射激光束的近场分布不均匀的情况下仍然能得到强度分布包迹较好的焦斑,后三种技术能进一步消除焦斑中的小尺度斑纹,然而,它们所得的焦斑的光强包迹是不理想的,一是存在旁瓣,对实验有害处;二是包迹顶部不平,均匀程度不高,这是由于这两种方法本身所形成的远场花样所决定的;此外,后三种方法还需要宽频带激光输入,其三次谐波转换技术还不成熟。邓锡铭等人提出的透镜列阵(LA)^[5]技术,因焦斑处于光束的准近场处,能有效地抑制旁瓣的产生;并能在入射光束近场分布并不均匀的情况下获得包迹接近“平顶”的焦斑;同时,它也能方便地结合其它技术,诸如RPP, ISI, SSD, ASE等使用。但是,LA仍存在一些问题,由于列阵元的硬边衍射效应,每个列阵元所产生的焦斑的光强分布是不均匀的,因此这些焦斑在焦平面上形成的合成焦斑的光强分布也不可能是“平顶”的。其“平顶”必须通过精确移动靶平面相对聚焦透镜的焦平面来实现,然而靶平面移动的同时会带来强度包迹的“塌边”,即焦斑边缘的强度衰减的陡度变缓;此外其辐照均匀性也有待进一步提高。针对这个问题,本文提出用消除列阵透镜的硬边衍射效应的方法,来进一步提高其辐射均匀性。措施有三:1)振幅型边缘软化;2)位相型边缘软化;3)采用“硬边波纹光阑”。本文基于标量衍射积分方法和旁轴矩阵光学方法,对以上三种方法的特点进行了详细分析和比较,并讨论了其工程可行性。

* 本项研究得到了国家 863-416 经费资助。

** 参加本工作的还有蒋敏华、王树森同志,在此致谢。

收稿日期: 1994年3月29日;收到修改稿日期: 1994年5月5日

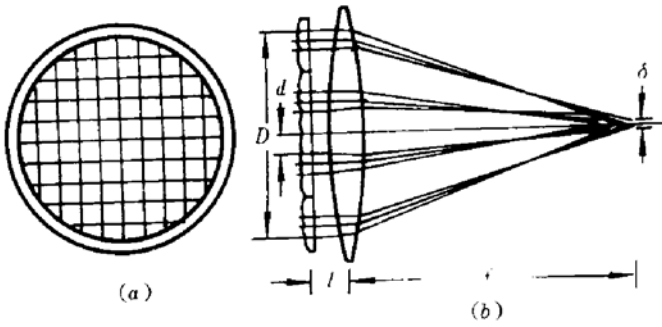


Fig. 1

(a) construction of the lens array;

(b) configuration of the lens array system

2 理论分析和数值计算

我们将用菲涅耳衍射积分和矩阵光学为工具进行分析。在非涅耳数不大时,菲涅耳近似(或傍轴近似)是正确的。对于如图 1 所示的透镜阵列系统,在傍轴近似下,可以将通过阵列透镜的光束看作是聚焦系统的输入,设阵列透镜与聚焦透镜的距离为 l ,聚焦透镜的焦距为 f ,透镜到靶面的距离为 z ,则该聚焦系统的传输矩阵 M 为

$$M = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - z/f & l(1 - z/f) \\ -1/f & 1 - l/f \end{pmatrix} \quad (1)$$

于是,该光学系统的程函可写为^[6]

$$L(x, y; x_i, y_i) = L_0 + \frac{1}{2B} [A(x^2 + y^2) - 2(xx_i + yy_i) + D(x_i^2 + y_i^2)] \quad (2)$$

其中 x, y 和 x_i, y_i 分别为输入面和输出面的坐标。若聚焦透镜口径足够大,则入射光束通过透镜阵列后,各子光束不再遇到硬边光阑,于是只要写出入射光束通过阵列透镜的复振幅表达式 $E_i(x, y)$,则光束在靶面上的总光场分布可由系统的 Collins 公式求得

$$E_t(x_t, y_t) = -\frac{j}{\lambda B} \iint E_i(x, y) \exp [jkL(x, y; x_t, y_t)] dx dy \quad (3)$$

其中 $k = \lambda/2\pi$, λ 为波长。靶面上的光强分布为

$$I_t(x_t, y_t) \propto E_t(x_t, y_t) E_t^*(x_t, y_t) \quad (4)$$

一般将焦斑的不均匀度定义为

$$\eta = \frac{(I_{\max} - I_{\min})/2}{\bar{I}} \quad (5)$$

而将焦斑能量利用率定义为

$$p = \frac{\text{光强大于 } 0.9\bar{I} \text{ 部分的能量}}{\text{焦斑总能量}} \quad (6)$$

这是描述均匀照明的两个重要参数。

对于如图 1 所示的透镜阵列,设其由 $N \times N$ 个方形,边长为 d ,焦距为 f 的阵列元组成,则它对入射光束的复透过函数为

$$t_i(x, y) = \sum_{m=-N/2}^{N/2} \sum_{n=-N/2}^{N/2} \text{rect}\left(\frac{x - x_{mn}}{d}\right) \text{rect}\left(\frac{y - y_{mn}}{d}\right) \exp\left\{-j\frac{k}{2f}[(x - x_{mn})^2 + (y - y_{mn})^2]\right\} \quad (7)$$

其中 x_{mn}, y_{mn} 为第 m 行第 n 列阵列元透镜的中心坐标。当光路中不附加其它光阑时,每个阵列透镜元的边缘就等价于一个硬边光阑。若入射激光束为均幅平面波,则(3)式中的入射复振幅 $E_i(x, y) = t_i(x, y)$ 。设 $f_a = 1 \text{ m}$, $f_c = 90 \text{ m}$, $d = 5 \text{ cm}$,入射激光波长为 $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$,将数据代入以上各式,为方便计,只计算一维情况,结果见图 2。图 2(a)是单个阵列元的焦斑,尽管能量利用率高达 90%,但由于衍射效应,焦斑上有多个衍射峰,不均匀度约达 75%;图 2(b)是四个一维排列的阵列元组合时在聚焦透镜后焦平面上的合成焦斑,由多光束干涉形成的细密条纹可以通过等离子体的热传导效应消除,但因衍射而引起的大尺度不均匀性依然存在。

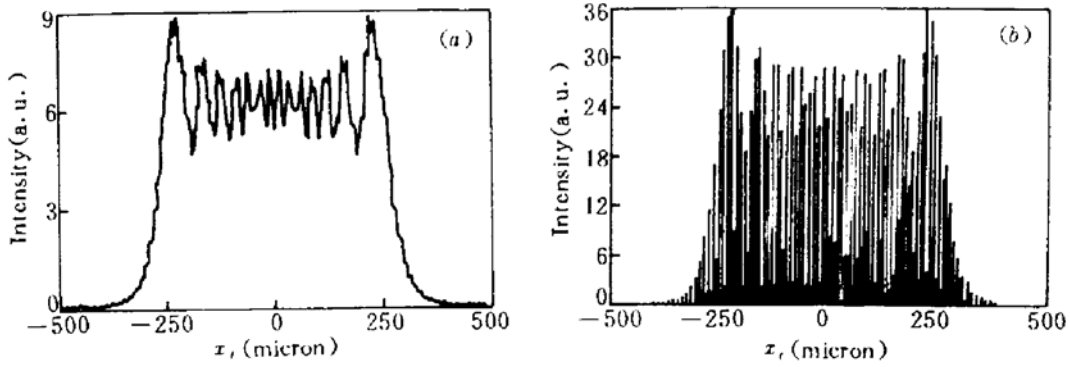


Fig. 2 The focus spot of the lens array

(a) the focus spot of a single lens array element; (b) the focus spot of a one dimension four-element array

根据索末菲的边界衍射波理论^[7],光束通过光阑时,其透射部分可分为中间直接无衍射传输和光阑孔径边缘发生衍射两部分。光束准近场处焦斑上的光强起伏是由于列阵透镜的硬边所产生的衍射子波与直接透射光叠加引起的。因此,如果采取措施消除或抑制边缘子波的产生,则焦斑强度分布的包迹则主要是光束直透部分的投影,若入射光是均匀的,则其包迹也是均匀的。所有列阵元的子焦斑完全叠加在一起,无需移动焦面,就能获得一个光强分布“平顶”的焦斑。这里我们将分别对下述三种具体措施分析研究。

2.1 振幅型边缘软化

采用边缘透过率渐变的列阵透镜元,由于边缘衍射子波强度很小,将会使得焦斑上的衍射光强起伏随之减小。这里,设图 1 中各列阵透镜元的复透过函数为

$$t_e(x, y) = \exp\left[-\left(\frac{x}{x_0}\right)^{2n} - \left(\frac{y}{y_0}\right)^{2n}\right] \exp\left[-j \frac{k}{2f_s}(x^2 + y^2)\right] \quad (8)$$

若令 $x_0 = y_0 = 2.45 \text{ cm}$, $np = 12$, 计算结果见图 3。图 3(a) 是单个列阵元的焦斑,它比图 2(a) 所示的光斑均匀得多, η 仅约 5%; 图 3(b) 是四个列阵元组合时在聚焦透镜后焦平面上的合成焦斑,它无需相对聚焦透镜焦平面移动就能获得很均匀的光强分布, $p = 90.3\%$ 。

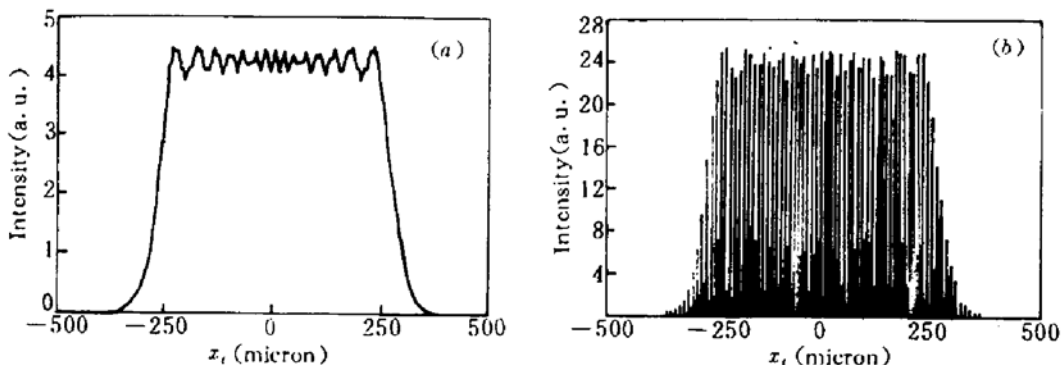


Fig. 3 The focus spot of the lens array with amplitude apodized edge

(a) the focus spot of a single element; (b) the focus spot of a one dimension four-element array

2.2 位相型边缘软化

从位相角度出发,若能使光束中直透部分保持不变,而使入射光束边缘部分发生大角度偏折,与直透部分分离,也能达到抑制衍射的目的。设图 1 中列阵透镜元的复透过率为

$$t_r(x, y) = \exp\left\{jk dl \exp\left[-\left(\frac{x}{x_0}\right)^{np} - \left(\frac{y}{y_0}\right)^{np}\right]\right\} \exp\left[-j \frac{k}{2f_s}(x^2 + y^2)\right] \quad (9)$$

其中 dl 为位相的调制深度,若令 $x_0 = y_0 = 2.5 \text{ cm}$, $np = 40$, $dl = 1 \mu\text{m}$, 单个列阵元的焦斑强度分布见图 4。此时焦斑的辐照均匀度也有较大的提高, η 约为 8%; 但其边缘光强衰减时拖了一条很长的尾巴, 从而使得它的能量利用率只有约 80.2%。这是因为超高斯位相软边光阑实际上不能将光束的中间部分和边缘部分完全分开, 使光束的发散角变大了。

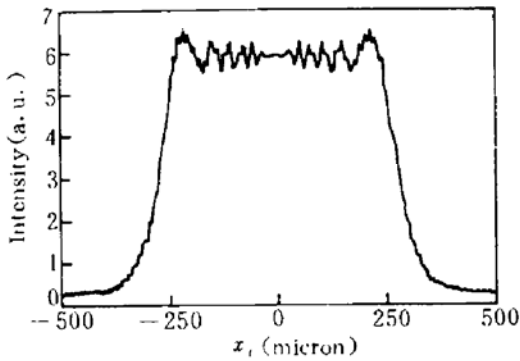


Fig. 4 The focus spot of the lens array element with phase apodized edge

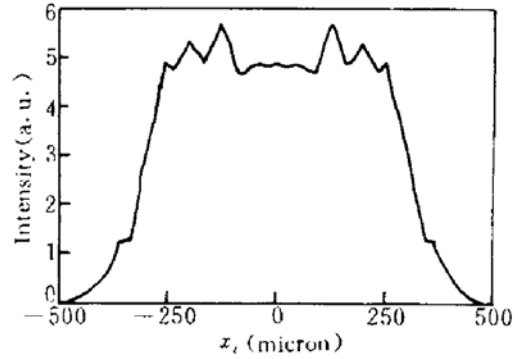


Fig. 5 The focus spot of the lens array element with a serrated aperture

2.3 硬边波纹光阑

由索末菲的边界衍射波理论, 对于一个几何对称的光阑, 其边缘衍射子波的位相也具有几何对称性。但是, 若使透射孔径边缘有无规波纹调制, 那么透射光束在光阑边缘的衍射子波的位相将无规错乱, 使得靶面上的衍射花样变成非对称的无规分布, 这也能减弱由此而引起的大幅度衍射调制^[8]。一个调幅型正弦调制的硬边波纹光阑的形式可以表示为

$$\delta d_x = \alpha \sin(m_1 x) \sin(m_2 x) \quad (10)$$

其中 $\alpha = \Delta d/2d \ll 1$, $m_1 \ll m_2$, 当菲涅耳数 F_s 在下述范围内时, 能获得较好的均匀化效果

$$|\pi F_s \alpha - 2.44| \leq 0.5 \quad (11)$$

设在紧贴列阵透镜元处放置一个硬边波纹光阑, 在 F_s 为 5 时所得的结果如图 5 所示。图中可见, 波纹光阑确实能有效地抑制大幅度的衍射光强起伏, η 约 10%; 但能量利用率只有约 80%。这是因为波纹光阑的锯齿型边缘增加了光束的高频成分, 使得在靠近远场的焦斑边缘的陡度变缓了, 但若设计使得系统的菲涅耳数较大时, 焦斑处于光束的近场区, 这时能使利用率有较大的提高。

3 讨 论

从以上分析可见, 由于硬边衍射效应, 列阵透镜所产生的焦斑的强度分布是不均匀的。需要强调的是, 对于未取消衍射措施的列阵透镜系统, 当靶面有适量的失调焦时, 焦斑将彼此错开叠加, 这也能使焦斑强度分布均匀化。计算表明, 在图 2 条件下, 当靶面相对聚焦透镜后移 $350 \mu\text{m}$ 时, 焦斑均匀度有较大提高, 但能使焦斑均匀化的区域很小, 相差 $50 \mu\text{m}$ 就有较大的变化, 因此需要很精确地对准。实际上, 实验中需要通过多次小能量试打靶来确定其最佳离焦量, 然后才能进行正式打靶实验。此外, 靶面失调焦, 在获得辐照均匀的同时, 焦斑边缘下降变

缓了,这时能量利用率约为 83.7%。

取消衍射措施后,焦斑的辐照均匀度得到明显提高,其中采用振幅型边缘软化方法时,不仅辐照均匀度好,仅 5%左右,而且能量利用率优于 90%。硬边波纹光阑和位相型边缘软化也能有效地抑制硬边衍射效应, η 约 10%, p 优于 80%。通过合理化设计,这些指标还能有所提高。由于单个列阵元的焦斑就是均匀的,因此当靶面在相当大范围内失调焦时,仍能保持合成焦斑是均匀的,只是边缘随失调焦量增大而稍为变缓。这将大大降低实验所需的调焦精度,缩短实验周期,为实际应用带来很大的方便。

振幅型边缘软化可以通过诸如镀变透射率膜、玻璃磨砂等方法实现,其可能的问题是这种光阑的损伤阈值较低,工艺复杂等;位相型边缘软化可以与列阵透镜元进行一体化设计制造,使列阵元具有(9)式所描述的面型,因而损伤阈值高,但工艺也较复杂;硬边波纹光阑是一个空孔,损伤阈值最高,工艺也最简单,但有一定的挡光面,因而有 1~2%的能量损失。

参 考 文 献

- 1 Y. Kate, K. Mima. Random Phase Shifting of Laser Beam for Absorption Profile Smoothing and Instability Suppression in Laser Produced Plasmas. *Appl. Phys. B*, 1982, **29**(3): 186
- 2 R. H. Lehmberg, S. P. Obenschain. Use of Induced Spatial Incoherence for Uniform illumination of Laser Fusion Targets. *Opt. Commun.*, 1983, **46**(1): 27
- 3 S. Skupsky, R. W. Short, T. Kessler *et al.*. Improved Laser-Beam Uniformity Using the Angular Dispersion of Frequency-Modulated Light. *J. Appl. Phys.*, 1989, **66**(8): 3456
- 4 H. Nakano, T. Kanabe, K. Yagi *et al.*. Amplification and Propagation of Partially Coherent Amplified Spontaneous Emission from Nd: Glass. *Opt. Commun.*, 1990, **78**(2): 123
- 5 邓锡铭, 梁向春, 陈泽尊等. 用透镜列阵实现大焦斑面的均匀照射. *中国激光*, 1985, **12**(5): 257
- 6 S. A. Collins. Lens-System Diffraction Integral Written in Terms of Matrix Optics. *J. Opt. Soc. Am.*, 1970, **60**(9): 1168
- 7 M. Born, E. Wolf. *Principles of Optics*, 2nd Edition. New York: Macmillan, 1964. 556
- 8 钱列加, 龚伟, 文国军等. 波纹圆孔光阑的衍射及其设计. *光学学报*, 1994, **15**(1): 117

Improve Illumination Uniformity by Suppressing the Diffraction of a Lens Array

Qiu Yue Qian Liejia Huang Hongyi Fan Dianyuan Deng Ximing
(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai 201800)

Abstract Using the amplitude apodized edge, phase apodized edge and serrated edge, the illumination uniformity of the focus spot can be improved by suppressing the diffraction of the lens array. In this paper, the characters of these three methods are analysed and applied to the uniform illumination of high power lasers.

Key words diffraction, uniform illumination, lens array