

用正交光楔列阵获得连续可调的 均匀方形光斑*

刘忠永

(西南师范大学物理系, 重庆 630715)

蔡邦维 吕百达

(四川大学光电系, 成都 610064)

提要 提出用两组相互正交的光楔列阵系统获得方形光斑,其特点是光斑尺寸在一定范围内连续可调,形状不受入射光截面形状影响,光斑强度空间分布均匀性好,且受入射光强度分布的影响很小。对该系统作了详细的理论分析和数值计算。

关键词 正交光楔列阵,方形光斑,均匀性

1 引言

在激光加工等应用中,需将来自激光器的光束变换会聚成方形光斑,且要求光斑的光强空间分布均匀性好。在高技术激光惯性约束聚变(ICF)研究中,也需把高功率激光器输出的强度空间分布有随机起伏的光束变换成具有高度均匀性的大焦斑。近年来,已有一些文献论述该问题^[1,2]。本文提出的两组相互正交的光楔列阵与球面透镜系统的特点是,(1)即使在入射光强度空间分布极不均匀的情况下,也能获得较高的均匀性;(2)光斑尺寸在一定范围内连续可调;(3)不论入射光束截面形状如何,得到的总是方形光斑。本文对该系统作了详细的理论分析和数值计算。

2 系统设计

光楔列阵(SWA)首先由加拿大的 D. M. Villeneuve 等人用于一维的均匀线聚焦^[3]。它由数个有相同宽度的长条形光楔拼接而成。如图 1 中的 SWA_x 和 SWA_y 。各光楔单元的楔角由下式确定

$$\alpha_m = \frac{1}{n-1} \tan^{-1} \frac{y_m}{L_s} \quad (1)$$

其中 α_m 是第 m 单元的楔角, m 是各单元的排列序号,当总单元数 N 为奇数时,有 $-(N-1)/2 \leq m \leq (N-1)/2$,为偶数时,有 $-N/2 \leq m \leq N/2$, y_m 为第 m 单元中心到光轴(z 轴)的距离, L_s 为光楔列阵的重叠焦距, n 为介质的折射率。用两组相互正交的光楔列阵(SWA_x, SWA_y)与球

* 国家高技术 863-416-2 资助项目。

收稿日期: 1995年8月21日; 收到修改稿日期: 1995年10月6日

面透镜(L)构成的均匀方形聚焦系统如图 1 所示。设 SWA_y 和 SWA_x 的重叠焦距分别为 L_y 和 L_x , 单元总数都为 N (为方便计令 N 为奇数), 单元宽度都是 d , L 的焦距为 f 。因为两光楔列阵相互正交, 由几何光学知, 它们各自独立地在相互正交的两个方向(x, y 方向)上对入射光束产生作用。为此, 我们完全可以将两个方向分离开考虑。在 y (或 y_0) 方向, 焦斑尺寸 W_y 和焦斑到透镜 L 的距离 S_y 可由矩阵光学^[4]得到

$$\begin{cases} W_y = \frac{fd}{f + L_y - P_y} & (2a) \\ S_y = \frac{f(L_y - P_y)}{f + L_y - P_y} & (3a) \end{cases} \quad (0 \leq P_y \leq L_y)$$

同理, 在 x 方向上有

$$\begin{cases} W_x = \frac{fd}{f + L_x - P_x} & (2b) \\ S_x = \frac{f(L_x - P_x)}{f + L_x - P_x} & (3b) \end{cases} \quad (0 \leq P_x \leq L_x)$$

为获得正方形光斑, 而且只用一个透镜, 则需有 $W_y = W_x = W$ 和 $S_y = S_x = S$, 从(2a)~(3b)式可见, 这要求 $L_y - P_y = L_x - P_x$, 即 $P_y - P_x = L_y - L_x$, 由于 L_y 和 L_x 设计时已经确定, 故应调节两 SWA 之间距离, 使之等于 $L_y - L_x$, 设计时, 为使系统结构紧凑, 应尽量使两 SWA 贴近(即 $L_y - L_x$ 趋于 0), 由(2a), (2b)式可见, 改变透镜 L 和两 SWA 之间的距离 P_y 和 P_x , 可使焦斑尺寸 W 在一定范围内连续变化, 如 L 为正透镜, 即 $f > 0$, 则 W 可变范围是 $fd/(f + L_y) \leq W \leq d$; 如 L 为负透镜, 即 $f < 0$, 且 $|f| > L_y$, 则 W 可变范围是 $d \leq W \leq fd/(f + L_y)$ 。实际调节时, 考虑到焦斑作用的工件(靶)位置不变, 可先调整 L 与两 SWA 之间距离, 以满足焦斑尺寸的要求, 之后再 将 L 和两 SWA 整体移动(即移动时不改变它们之间的相对位置), 以满足 L 与靶之间的距离要求。

3 系统焦斑的光强分布

迎着光轴方向看, 两正交 SWA 相当于将入射光束分割成 N^2 个方形子光束, 由于楔角的特殊设计, 则在正交 SWA 之后一适当位置上, 各子光束彼此相互完全重叠, 照在靶上同一区域而形成焦斑。只要各子光束口径 d 不是太小, 即衍射效应不十分明显, 则焦斑应为方形。当分割得足够细时, 每一子光束的光强分布可视为是均匀的, 即可作平面波处理, 当这些平面波再会聚到同一区域上时, 所得焦斑的强度也应是均匀分布的。这就是在均匀照明技术中十分重要的“积分思想”^[2]。因此, 该系统即使在入射光强分布极不均匀的情况下, 也能得到很高的均匀性, 而且焦斑的形状对入射光截面形状不敏感。透镜 L 的作用是使焦斑的大小可调, 它对焦斑光强的总体分布不产生影响。

考虑到实际的激光束具有较高的相干性, 光强分布应按物理光学理论分析。焦斑上光强分布应是各子光束之间干涉和子孔径衍射的卷积。鉴于两个方向(x 和 y) 的相互独立性和相似性, 为简便计, 只对一个方向(y) 上的光强分布进行分析, 这时另一个方向(x) 上的 SWA_x 可视

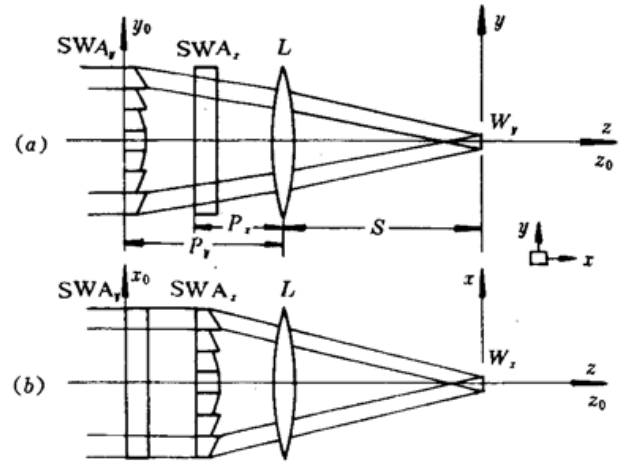


Fig. 1 A schematic illustration of a perpendicular segmented wedge array system
(a) a top view; (b) a side view

为平行透明平板,并进一步作“薄透镜近似”而忽略不计。则从参考面 $x_0o_0y_0$ 到参考面 xoy ,第 m 单元的传播矩阵^[4]为

$$\begin{bmatrix} A & B & E & F \\ C & D & G & H \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & S & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ -1/f & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & P_r & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \Delta/n & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & (1-n)\alpha_m \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

其中 Δ 是光楔单元厚度,作“薄透镜近似”可令 $\Delta = 0$,经计算得

$$\begin{bmatrix} A = 1 - S/f & B = P_r(1 - S/f) + S \\ C = -1/f & D = 1 - P_r/f \\ E = 0 & F = [S + P_r(1 - S/f)](1 - n)\alpha_m \\ G = 0 & H = (1 - P_r/f)(1 - n)\alpha_m \end{bmatrix} \quad (4)$$

失调矩阵的程函为^[5]

$$L_m(y_0, y) = L_0 + \frac{1}{2B} \{ Ay_0^2 - 2yy_0 + Dy^2 + 2(E + F)y_0 + 2[(BG - DE) + (BH - DF)]y \} \quad (5)$$

式中 L_0 为两参考面之间轴线上的光程。焦斑 y 方向上总的光场复振幅分布由 Collins 公式^[5]得

$$U(y) = -\frac{i}{(\lambda B)^{1/2}} \sum_{m=-(N-1)/2}^{(N-1)/2} \int_{md-d/2}^{md+d/2} U_0(y_0) \exp[iKL_m(y_0, y)] dy_0 \quad (6)$$

式中 $U_0(y_0)$ 为入射光场分布,鉴于“积分思想”,可视其为单位平面波,即 $U_0(y_0) = 1, K = 2\pi/\lambda$, λ 为激光波长。

焦斑 y 方向上总的光强分布为

$$I(y) = U(y) \cdot U^*(y) = |U(y)|^2 \quad (7)$$

同理可分析 x 方向上的光强分布。

取系统参数: $N = 7, d = 15 \text{ mm}, L_y = 500 \text{ mm}, L_x = 480 \text{ mm}, f = 200 \text{ mm}, \lambda = 0.6328 \mu\text{m}, n = 1.53$, 取不同的 P_r 值作数值计算,典型结果如图 2(a) ~ (c) 所示。可见,强度是受单元衍射调制的多光束干涉分布,图中大尺度的包络为单元衍射包络,小尺度的剧烈起伏(尖峰)是单元之间干涉的结果。当 P_r 由大变小时,焦斑尺寸变小,但强度的总体分布规律不变,只是由干涉产生的尖峰越来越密。图中的虚线为按(2a)式计算的焦斑几何尺寸,在此系统参数下,焦斑尺寸可在 $4.3 \sim 15 \text{ mm}$ 内连续变化,透镜的焦距越短,可调范围越大。由于衍射效应,两边缘的强度分布并不象几何光学结果那样呈阶跃变化。对于负透镜的情况,有类似结果,但注意这时应有 $|f| > L_r, |f|$ 越接近 L_r, W 可调范围越大。

4 结 论

用正交光楔列阵与球面透镜构成的均匀方形聚焦系统获得的方形光斑,能够满足激光加工中对强度均匀性和尺寸连续可调的要求。

由于对入射光采用了分割后组合的“积分思想”,获得的焦斑光强分布对入射光束本身的强度分布不敏感,所以,无论入射光场分布是何种模式,只要分割得足够细,即 SWA 单元数足够的多,都能获得几乎“平顶”的光强分布。但在另一方面,从数值计算的结果看出,分割后,必

然产生子孔径的衍射和子孔径之间的干涉效应,对均匀性产生一定影响。注意到由干涉引起的尖峰结构(导致小尺度不均匀性)是非常细密的,一般地可通过靶物质自身的横向热传导而平滑化,而且也有一些抑制类似不均匀性的方法^[6,7]可以借鉴。至于衍射引起的包络起伏(导致大尺度不均匀性),在焦斑边缘附近比较明显,在忽略细密的干涉结构的情况下,焦斑强度分布的不均匀性则主要来自这种衍射效应,在本文的计算参数下,不均匀性约 27%,但实际测量中很难探测到边缘象图 2 所示的起伏,这主要是由加工光楔列阵时的楔角公差等原因引起的,这对改善均匀性反而是有利的,若忽略一定的“塌边”,则不均匀可减小到 10%以内,这一点我们已在一维线聚焦实验中得到证实^[8]。同样也有其它方法用于抑制这种效应的影响^[2,9]。

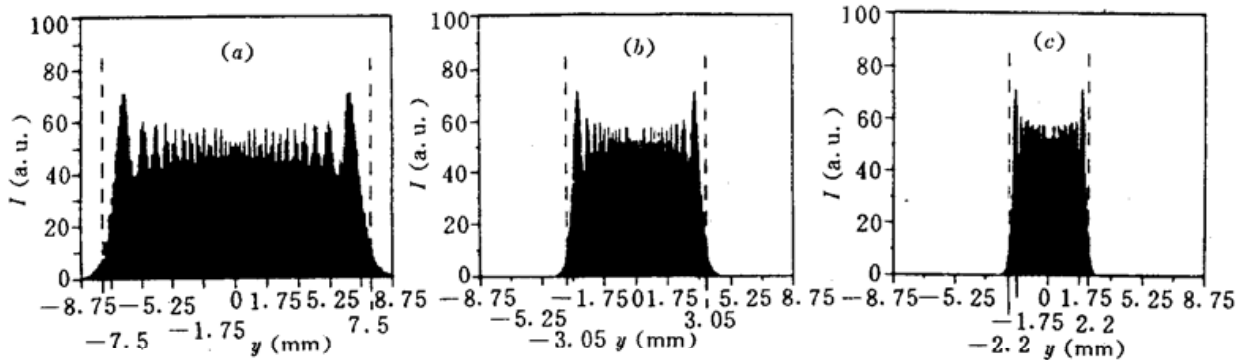


Fig. 2 Calculated intensity distributions of a focus spot along y axis with
(a) $P_f = 500$ mm; (b) $P_f = 310$ mm; and (c) $P_f = 20$ mm

本文提出的系统整形性能好,由于可根据需要分割入射光束,所获焦斑的强度分布和形状几乎不受入射光强度分布的影响,而文献[1]仅对入射光作四等份分割,这对那些近场分布极不均匀的入射光来说,可能达不到较高的均匀性要求,而且光斑形状也可能较大地偏离方形。另一方面,由于光楔是平面加工,较之球面加工更容易,而且因采用两组正交光楔列阵,加工二十条光楔即可将入射光束作一百等份分割,相当于一百只小的蝇眼透镜^[2],因此,本文的系统还具有加工容易,拼接、装校方便,因而造价低的优点。文献[1]和[2]的光斑尺寸是不可调的,除非更换不同焦距的聚焦透镜,而本文的系统能在一定范围内连续调节光斑尺寸。

实验中,可用扩束后的 He-Ne 激光入射,干板照相后用黑度计分析强度分布^[10],或者用 CCD 摄像系统采集数据后分析结果^[8]。有关实验结果我们将另文发表。

为了进一步减少元件,使系统结构紧凑,还可将两光楔列阵加工在一起,即在若干个方形介质块的两个相对面上分别沿 x 和 y 方向加工出一定楔角,再拼接起来,这类似于“蝇眼透镜列阵”系统^[2],但加工上较为容易。

如果将球面透镜换成两相互正交的柱面透镜,则可获得长宽分别连续可调的矩形光斑。

参 考 文 献

- 1 李俊昌. 方形激光斑聚焦器理论及实验. 光学学报, 1992, 12(6): 540
- 2 Ximing Deng, Xiangchun Liang, Zezun Chen *et al.*. Uniform illumination of large targets using a lens array. *Appl. Opt.*, 1986, 25(3): 377
- 3 D. M. Villeneuve, G. D. Enright *et al.*. Novel laser line focus geometry applied to X-ray laser. *Opt. Commun.*, 1991, 11(12): 54
- 4 吕百达. 激光光学. 成都: 四川大学出版社, 1992.

- 5 S. Wang, L. Ronchi. Principles and design of optical arrays. *Progress in Optics*, 1988, 25 : 279
- 6 刘忠永,吕百达,蔡邦维等. 用偏振和有规位相分布抑制光楔列阵系统中的小尺度不均匀性. *光学学报*, 1995, 15(12) : 1626
- 7 R. H. Lehmberg, A. J. Schmitt, S. E. Bodner. Theory of induced spatial incoherence. *J. Appl. Phys.*, 1987, 62(7) : 2680~2701
- 8 蔡邦维,刘忠永,吕百达等. 用楔角偏差改善光楔列阵系统中的大尺度均匀性. *光学学报*, 待发表
- 9 丘悦,钱列加,黄宏一. 用消衍射方法改善透镜列阵的辐照均匀性. *中国激光*, 1995, A22(1) : 27
- 10 蔡邦维,吕百达,刘忠永等. 光楔列阵线聚焦系统的研制. *中国激光*, 1995, A22(6) : 430

Perpendicular Segmented Wedge Arrays Used to Obtain a Uniform Square Focus Spot of Continuously Variable Size

Liu Zhongyong

(Department of Physics, Southwest Normal University, Chongqing 630715)

Cai Bangwei Lü Baida

(Department of Opto-electronic Science & Technology, Sichuan University, Chengdu 610064)

Abstract A novel system used to obtain a square focus spot has been developed, which is composed of a pair of segmented wedge arrays that are mutually perpendicular. The features of this system are that, the size of the focus spot can be varied continuously within a certain extent, the shape of the focus spot may not be influenced by the shape of the cross section of the incident beam, and the intensity distribution of the focus spot is of high uniformity and is influenced very weakly by the intensity distribution of the incident beam. In this paper, detailed theoretical analyses and numerical calculations for this system are presented.

Key words perpendicular segmented wedge arrays, square focus spot, uniformity