

焦线可控的光楔列阵均匀线聚焦系统*

蔡邦维 刘忠永 吕百达 叶一东

(四川大学激光物理与激光化学研究所, 成都 610064)

提要 研制了一种可连续改变焦线宽纵比的光楔列阵均匀线聚焦系统。线长变化后, 焦线宽度、光强分布均匀性、靶面位置仍然不变。实验研究与理论分析结果一致。

关键词 光楔列阵, 均匀照明, 焦线可调

1 引言

在 X 射线激光实验研究中, 要求功率密度高、强度分布均匀的可控的细长焦线照明靶面。D. W. Villeneuve 等人的偶数单元光楔列阵均匀线聚焦系统^[1], 运用“积分”思想, 将入射光束分割成若干子光束, 再将其汇聚到靶面上的同一空间, 如果分割得足够细, 可把各子光束视为光强均匀分布的平面波, 从几何光学角度, 这些子光束在靶面汇聚后总的光强分布将是均匀的。但是, 该系统的不尽完善之处是焦线长度固定而不可调节, 欲按需要改变焦线的长度, 则需另作一套系统, 使用既不方便, 又增加了造价, 采用可变焦列阵柱面透镜系统, 造价也较高^[2]。为此, 我们设计研制了焦线可控的光楔列阵均匀线聚焦系统, 它的优点有结构简单、效率高、造价低、连续可调、光强分布均匀性好和易于靶面瞄准等等。另外, 由于入射激光具有一定的空间相干性, 当对其用列阵分割后, 各子孔径的衍射和子光束之间的干涉将对均匀性引起不可忽视的影响, 本文对此也进行了讨论。

2 焦线可控原理

我们曾经研制了焦线长度固定不变的七单元光楔列阵均匀线聚焦系统^[3], 获得了不受入射光束空间分布不均匀调制的“平顶”光强分布, 为了扩大系统的实用范围, 又发展了可调焦线宽纵比的均匀线聚焦系统。如图 1 所示, 该系统由相互正交的柱透镜 CL_1 、 CL_2 和光楔列阵 (SWA) 组成。由矩阵光学不难导出焦线位置 Z_f 和线长 l 与组合系统参数的关系式

$$Z_f = \frac{f_2(L - S_2)}{f_2 + L - S_2} \quad (0 \leq S_2 \leq L) \quad (1)$$

$$l = \frac{f_2 W_0}{f_2 + L - S_2} \quad (0 \leq S_2 \leq L) \quad (2)$$

* 国家高技术 863 资助项目。

收稿日期: 1995 年 2 月 27 日; 收到修改稿日期: 1995 年 5 月 2 日。

式中, f_2 是柱面透镜 CL_2 的焦距, S_2 是 SWA 与 CL_2 之间的距离, W_0 为单元光楔的宽度, L 为 SWA 到焦线的距离。(2) 式表明, 焦线长度 l 随 S_2 改变而变化。当 CL_2 为正柱透镜, $f_2 > 0$, 减小 S_2 , 焦线由长缩短, f_2 愈小, 线长压缩率愈大; 反之, CL_2 为负柱透镜, $f_2 < 0$, 减小 S_2 , 焦线由短变长, f_2 愈小, 增长率愈高。

焦线的宽度由 CL_1 控制。按照物理光学, 当 $f_1 = S_1 + S_2 + Z_f$ 时, 线宽应是 CL_1 在焦线宽度方向的透光孔的衍射 (Airy) 斑的大小。将 CL_1 沿光轴方向前后移动 ΔZ_1 , 则线宽为

$$\delta = \frac{D}{f_1} \Delta Z_1 \quad (3)$$

其中, D , f_1 分别为 CL_1 的通光口径和焦距。由 (2)、(3) 式可见, 分别调节 CL_1 , CL_2 与 SWA 间距离 S_1, S_2 , 即可控制焦线宽纵比 δ/l 。

焦线上的光强分布应是各 SWA 单元子光束干涉和子孔径衍射两种效应的卷积。为了简化衍射积分方程的计算, 设 CL_1 、SWA、 CL_2 紧贴, 菲涅耳近似成立, SWA 楔角满足小角近似, 入射光场为单位平面波, $U_0(x_0) = U_0(y_0) = 1$ 。SWA 单元长度 $D = 2r_0$, 单元宽度 W_0 , 在如图 1 所示的坐标系下, 组合系统第 m 个单元的透过率函数为

$$T_m(x_0, y_0) = \exp\left(\frac{-ikx_0^2}{2f_1}\right) \exp\left(\frac{-iky_0^2}{2f_2}\right) \exp[ik(n-1)\alpha_m y_0 + i\phi_{0m}] \quad (4)$$

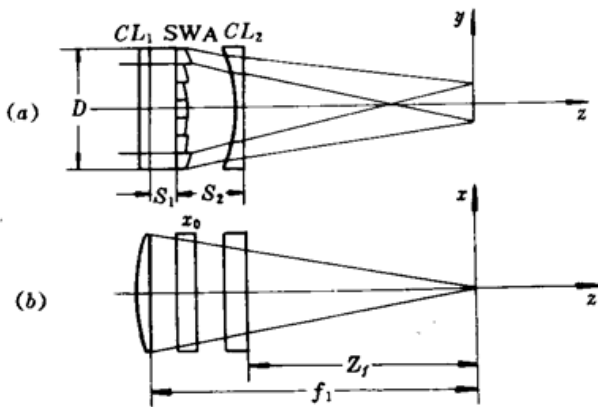


Fig. 1 Schematic illumination of the SWA line focusing system with a variable aspect ratio
(a) a top view;
(b) a side view, CL_1 and CL_2 are cylindrical lenses

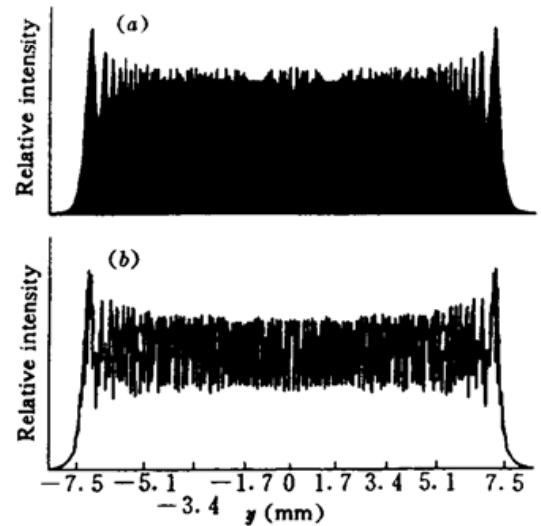


Fig. 2

(a) Calculated intensity distribution of a SWA system along the focus line; (b) The average intensity distribution along line length in (a)

式中, $k = 2\pi/\lambda$, λ 为激光波长, n 为 SWA 材料折射率, α_m 为单元光楔的楔角, ϕ_{0m} 表示初位相, 由各单元厚度决定。据菲涅耳衍射积分, 第 m 单元在焦面上的光强分布应为

$$U_m(x, y) = \frac{1}{i\lambda f_1} \exp\left[\frac{ik}{2f_1}(x^2 + y^2)\right] \int_{-r_0}^{r_0} \exp\left(\frac{-ikxx_0}{f_1}\right) dx_0 \int_{(m-0.5)W_0}^{(m+0.5)W_0} \exp\left\{ik\left[\frac{1}{2}\left(\frac{1}{f_1} - \frac{1}{f_2}\right)y_0 - \left(\frac{y}{f_1} + \frac{mW_0}{L}\right)\right]y_0 + i\phi_{0m}\right\} dy_0 \quad (5)$$

作坐标变换, $y'_0 = y_0 - mW_0$, 并令 $\phi_{0m} = km^2W_0^2/2f_1$, 省去对强度无贡献项, (5) 式经运算整理后为

$$U_n(x, y) = \frac{1}{i\lambda f_1} \int_{-r_0}^{r_0} \exp\left(\frac{-ikxx_0}{f_1}\right) dx_0 \exp\left(\frac{-ikmW_0y}{f_1}\right) \int_{-w_0/2}^{w_0/2} \exp\left\{ik\left[\frac{1}{2}\left(\frac{1}{f_1} - \frac{1}{f_2}\right)y_0^2 - \frac{yy_0}{f_1}\right]\right\} dy_0 \quad (6)$$

焦线的总复振幅及光强分布为

$$U(x, y) = \sum_n U_n(x, y) \quad (7)$$

$$I(x, y) = U(x, y)U^*(x, y) \quad (8)$$

取系统参数: $D = 105 \text{ mm}$, $f_1 = 500 \text{ mm}$, $f_2 = -1000 \text{ mm}$, $N = 7$, $W_0 = 15 \text{ mm}$, $L = 500 \text{ mm}$, $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$, $n = 1.53$, 作数值计算, 焦线沿长度方向的光强分布如图 2(a) 所示, 图 2(b) 是对图 2(a) 作 $34 \mu\text{m}$ 平均结果, 图 3 是焦线宽度方向的光强分布, 宽度约 $6 \mu\text{m}$, 达到衍射极限线宽。显见, 焦线长度方向上的光强分布是受单元衍射调制的多光束干涉分布, 干涉峰主极大间隔为 $[(Z_f + \Delta Z)/W_0]/\lambda \approx 21 \mu\text{m}$ 。理论计算还表明, 当 $\Delta Z = 2.5 \text{ mm}$ 时, 焦线长度方向光强分布不均匀性 $\eta \approx 13\%$, 为该光组的最佳工作状态。

3 焦线可控特性的实验结论

实验采用单模 He-Ne 激光作光源, 经扩束镜后输出口径 $\phi = 100 \text{ mm}$ 准直平行光, 垂直入射如图 1 所示的被测系统, CL_1 和 SWA 参数与数值计算取值相同。同轴准直调整光路, 确定好后焦面的位置, 在焦面屏上形成一定尺度的细长焦线, 并进行测试。分别配置 $f_2 = -1400 \text{ mm}$ 负柱

透镜和 $f_2 = 200 \text{ mm}$ 正柱透镜, 作焦线连续可调增长和连续可调压缩实验。实验结果见表 1, 表 2 及图 4, 当 SWA 与 CL_2 之间距 S_2 由 500 mm 连续减小到 10 mm 时, 对于 $f_2 = -1400 \text{ mm}$ 系统, 线长由 15 mm 连续增长到 23.8 mm , 而 $f_2 = 200 \text{ mm}$ 系统线长由 15 mm 连续压缩到 4.5 mm 。实验和理论曲线二者符合很好。

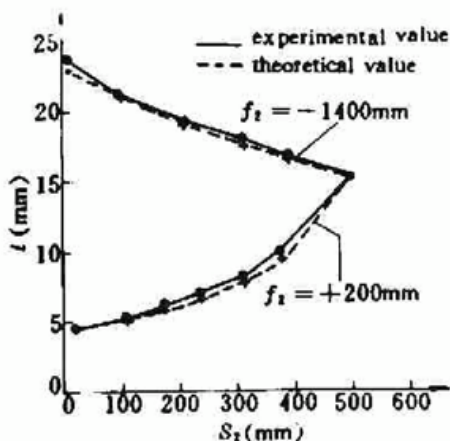


Fig. 4 The variation in line length with S_2 and f_2 , where assume $L = 500 \text{ mm}$

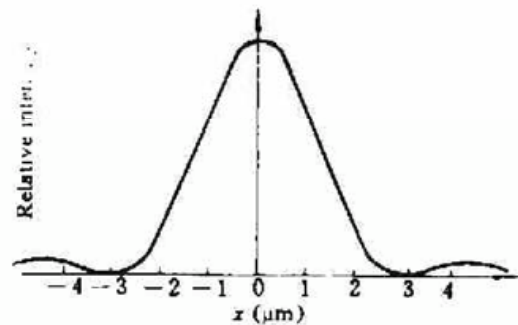


Fig. 3 Calculated intensity distribution along the line width

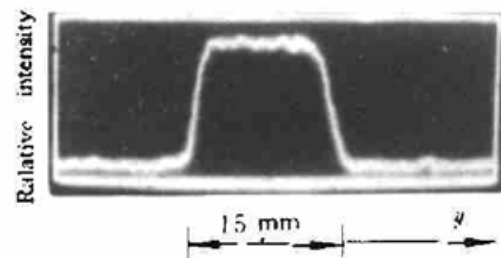


Fig. 5 Intensity distribution of a SWA system along the line detected by a CCD measurement system

线长变化后, 用 1881 CCD 摄像机测量焦线上的光强分布均匀性, 结果如图 5 所示。曲线

上升下降陡峭,仍保持“平顶”光强分布,顶部有少量起伏,塌边微量,能量损失约 8%,不均匀性 $\eta \sim 14\%$ 。

Table 1 Comparison between the theoretical and experimental results. $f_2 = -1400$ mm

S_2 (mm)	500	390	313	212	100	10
l_r (mm)	15	16.5	17.8	19.1	21.2	23.8
l_t (mm)	15	16.3	17.3	18.9	21.0	23.1

Table 2 Comparison between the theoretical and experimental results. $f_2 = 200$ mm

S_2 (mm)	500	375	310	240	175	107	20
l_r (mm)	15	10.0	8.0	7.0	6.0	5.0	4.5
l_t (mm)	15	9.23	7.7	6.52	5.7	5.1	4.4

线长 15 mm 时,用狭缝光电扫描探测器测量的线宽 $\delta \approx 130 \mu\text{m}$,焦线宽纵比为 115。当线长增长到 24 mm 时,宽纵比增为 184。为了改善线长方向光强分布的均匀性,用“离焦”对靶时,在线宽方向,只要使 $f_1 = Z_f + \Delta Z$,则焦线保持最细。调节 S_1 和 S_2 ,同时改变线长和线宽达到所需比例,即可实现宽纵比连续可控,靶面位置仍然保持不变。列阵数 $N = 7$ 为奇数,与为偶数相比,更利于对靶面的瞄准。

参 考 文 献

- 1 D. M. Villeneuve, G. D. Enright, H. A. Baldis *et al.*. Novel laser line focus geometry applied to X-ray laser. *Opt. Commun.*, 1991, 11(12):54
- 2 丘 悦, 黄宏一, 范滇元 等. 可变焦列阵柱面透镜均匀线聚焦系统. *光学学报*, 1994, 14(11):1998
- 3 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

The Segmented Wedge Array Uniform Line Focus System with Controlled Aspect Ratio

Cai Bangwei Liu Zhongyong Lü Baida Ye Yidong

(Institute of Laser Physics & Laser Chemistry, Sichuan University, Chengdu 610064)

Abstract A line focus system with continuously variable aspect ratio for uniform illumination is developed. It is composed of two cylindrical lenses and a segmented wedge array. After the line length varied, the width, intensity distribution along the line length, and the target position are still unchanged. The theoretical analysis agrees with experimental results.

Key words segmented wedge array, uniform illumination, variable focus line