

可变焦列阵柱面透镜均匀线聚焦系统*

丘 悦 黄宏一 范滇元 王树森 陈万年 邓锡铭

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘 要 用两个列阵柱面透镜与非球面透镜组成变焦线聚焦系统, 能将入射激光束会聚成辐照均匀、长度连续可调的焦线, 它可用于 X 光激光实验研究. 文中详细分析了焦线上光场分布的情况, 给出了物理光学分析的结果, 并与已有技术作了比较.

关键词 变焦系统, 列阵柱面透镜, 均匀照明.

1 引 言

在 X 光激光研究中, 无论是复合机制或碰撞激发机制, 为了获得足够高的 X 光增益, 都需要将入射的高功率激光束会聚成一条光强分布均匀的焦线辐射 X 光激光靶, 使靶面形成均匀的等离子体增益区域. 对于复合机制, 焦线的照明均匀性要求更高. 到目前为止已有一些技术来解决这个问题^[1~4], 例如相对旋转柱面透镜, 离轴球面反射镜, 列阵柱面透镜和列阵光劈系统等. 前两种系统能产生长度连续可调的焦线, 但焦线上的光强分布是不均匀的, 中间最强, 两边逐渐减弱为零. 为了获得照明均匀的焦线, 受列阵透镜产生均匀照明光斑的思想^[5]启发, 人们发展了后两种列阵式系统, 使焦线辐照均匀度有了较大的提高, 但它们的共同缺点是焦线长度不可调. 当实验要求焦线长度变化时, 只能更换整个光学系统, 其代价是昂贵的, 应用起来也不方便. 本文报道一种兼有两者优点的新方案——可变焦的列阵柱面透镜系统. 它能在有效利用入射光束能量的情况下, 获得光强分布均匀、高纵横比的焦线, 焦线长度连续可调, 并且焦线的位置、光束入射角等保持不变. 文章对这种系统所产生的焦线的光场分布进行了详细的分析, 并与其它线聚焦系统作了比较.

2 变焦列阵柱面透镜系统

变焦列阵柱面透镜系统的结构和原理如图 1 所示, 它由两个列阵柱面透镜 CA1、CA2 及一个非球面透镜 A 沿光轴依次排列组成. 列阵柱面透镜结构如图 2 所示, 由多块长条形的柱面透镜沿其母线方向平行、紧密排列组合而成, 所有的列阵元具有相同的宽度并有

$$d = D/N \quad (1)$$

* 国家科委 863 高科技项目.

收稿日期: 1993 年 12 月 8 日

式中 D 为入射激光束口径, N 为列阵元数, 两个列阵透镜取向相同并垂直于光轴, 依次放在非球面透镜前面. 设凸透镜的焦距大于 0, 凹透镜的焦距小于 0, CA1 中所有的列阵元的焦距都等于 f_{c1} , CA2 中所有的列阵元的焦距都等于 f_{c2} , 非球面透镜的焦距为 f_a . 入射激光光束通过变焦柱面透镜列阵系统时被分成 N 束子光束, 由于柱面透镜系统的像散作用, 每束子光束在非球面透镜的像空间形成两条互相垂直的子焦线, 一条在非球面透镜的后焦面, 与柱面透镜的母线方向垂直, 另一条在整个变焦柱面透镜与非球面透镜系统的后焦面处, 与柱面透镜的母线方向平行. 其中, 在非球面透镜后焦面上的所有子焦线长度相等, 它们彼此完全重叠在一起形成一条合成的焦线. 当变焦列阵柱面透镜的组合焦距为负时, 非球面透镜后焦面上的合成焦线是“前焦线”, 当组合焦距为正时, 合成焦线是“后焦线”. 由几何光学关系, 不难算出此合成焦线的长度为:

$$L = | -df_a(f_{c1} + f_{c2} - l_1)/f_{c1}f_{c2} | \quad (2)$$

式中, l_1 为两列阵柱面透镜的间距. 由(4)式和图 1, 若使 CA2 与非球面透镜之间的距离固定(即 l_2 不变), 而使 CA1 可沿着光轴自由移动, 则焦线长度 L 将随着 l_1 连续变化而连续变化, 它们之间是一种简单的线性关系, 由于入射光束通过变焦列阵柱面透镜系统时, 折射仅在垂直于柱面母线的方向发生, 在母线方向上仍保持准直, 因此焦线的位置始终在非球面透镜的后焦面上, 焦线的长度随着列阵透镜系统的变焦向两端对称地伸缩, 而线宽保持不变.

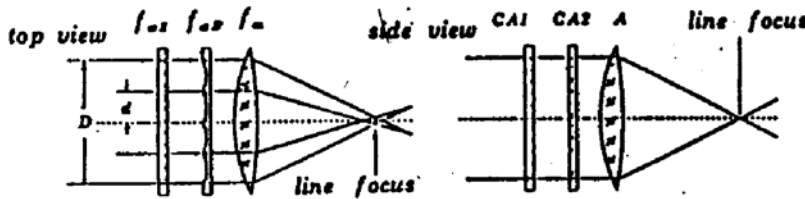


Fig. 1 Configuration of the vari-focal cylinder lenses array and aspherical lens line focus system

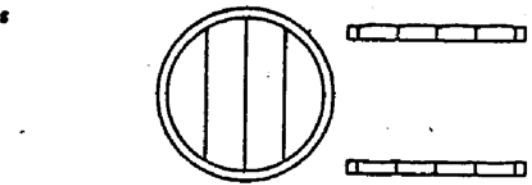


Fig. 2 Cylinder lenses array construction

为了使子光束能全部通过 CA2, 应使 $f_{c1} > 0$. 同时系统中各参数除要满足(2)式外, 还应避免光路中光束过度会聚, 打坏光学元件. 设入射光束直径为 250 mm, $N=4$, $f_a=1000$ mm, $f_{c1}=650$ mm, $f_{c2}=-480$ mm, 则当 l_1 在 20~120 mm 可调时, 焦线长度 L 在 10~30 mm 内连续变化. 光路中光束无实焦点, CA2 上功率密度只增加 23%.

由图 1 可知, 子焦线上每点的光强都是所有列阵元上对应的线元上的光强的积分. 因此, 虽然每束子光束独自产生的焦线的光强分布不一定是均匀的, 但所有子焦线叠加在一起, 相互补偿平均, 便能得到一条辐照均匀的合成焦线. 即使入射光束空间强度分布不均匀, 由于多条焦线的叠加平均, 也能使这种不均匀性降低约 N 倍, 从而对入射光束的光强的空间分布均匀性要求大为降低. 原则上, N 越大, 均匀化效果越好.

3 靶面光场分布分析

对于文献[1]、[2]的线聚焦系统, 它们所获得的焦线的光强分布是缓变的. 采用列阵柱面透镜结构能大大提高照明均匀性. 文献[3]在几何光学近似下分别对入射光束为高斯分布

和平顶分布两种情况作了计算,结果表明,列阵元数 N 越大,均匀化效果越好.然而,由于多光束干涉和列阵元边缘衍射的存在,必然会引起焦线的光场分布的复杂化,这需要用物理光学方法分析才能了解到.对此迄今尚未作过较详尽的分析.

X 光激光实验对焦线长度方向和宽度方向的光强分布都有要求,在线宽方向,主要是要求焦线宽度一致,而且越细越好,一般要小于 $100 \mu\text{m}$;在线长方向,则特别强调照明均匀性.本文着重考虑焦线长度方向的情况.考虑到柱面透镜曲面是一维分布,可按一维方法计算.对于如图 1 所示的变焦系统,可将每一束子光束所经的光学系统看作是一个失调的光学系统,其中第 i 束子光束所经的列阵元 f_{c1i} 、 f_{c2i} 相对于主光轴的平移失调量为:

$$e_i = i \cdot d/2 \quad (i = -N/2, \dots, N/2) \quad (3)$$

它们的角度失调量为 $e'_i = 0$, 于是第 i 束子光束通过该光学系统时的失调传输矩阵 M_i 为^[6]:

$$M_i = \begin{pmatrix} A & B & \alpha e_i & \beta e'_i \\ C & D & \gamma e_i & \sigma e'_i \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

在非球面透镜的后焦面处,有

$$\begin{aligned} A &= -f_s(f_{c1} + f_{c2} - l_1)/f_{c1}/f_{c2}, & B &= f_s(1 - l_2/f_{c2}), \\ C &= -(1 - l_1/f_{c1})(1 - l_2/f_{c2})/f_s - (1 - l_2/f_s)/f_{c1} - (1 - l_1/f_{c1})/f_{c2} \\ D &= 1 - l_1/f_{c2} - (l_1 + l_2)/f_s + l_1 l_2/f_s f_{c2} \\ \alpha &= -A, & \beta &= 0, & \gamma &= -C - 1/f_s, & \sigma &= 0, \end{aligned} \quad (5)$$

利用 M_i , 失调光学系统的程函可写为^[7]:

$$\begin{aligned} L(x, x_i) &= L_i + \{Ax^2 - 2xx_i + Dx_i^2 + 2(\alpha e + \beta e')x \\ &\quad + 2[(B\gamma - D\alpha)e + (B\delta - D\beta)e']x_i\} \end{aligned} \quad (6)$$

若 $f_{c1} > 0$, 且非球面透镜口径足够大,则入射光束通过第一个列阵后,各子光束不再遇到硬边光阑,于是 N 束子光束在靶面上的总光场分布可由失调系统的 Collins 公式求得:

$$E_i(x_i) = - (j/\lambda B) \sum_{i=-N/2}^{N/2} \int E_i(x) \exp [jkL_i(x, x_i)] dx \quad (8)$$

光强分布为: $I_i(x_i) \propto E_i(x_i) \cdot E_i^*(x_i)$ (9)

设入射光束是一束单色均幅平面波,对于可变焦列阵柱面透镜系统,若令:

$$\begin{aligned} \lambda &= 1.053 \mu\text{m}, & D &= 250 \text{ mm}, & N &= 4, & l_1 &= 100 \text{ mm}, & l_2 &= 100 \text{ mm} \\ f_s &= 750 \text{ mm}, & f_{c1} &= 670 \text{ mm}, & f_{c2} &= -455 \text{ mm} \end{aligned}$$

将这些参数代入(3)~(9)式计算,结果见图 3(a).为了看清楚靶面上的光能分布情况,可以取约 $68 \mu\text{m}$ 作一间隔,求光强的平均值,见图 3(b).计算结果显示,与文献[1]、[2]的结果不同,使用柱面透镜列阵后,靶面上总体的光强分布均匀了,但由于干涉和衍射效应的存在,靶面上的光场分布实际是单个列阵元边缘的衍射和多光束干涉的合成,均匀照明一定空间尺度内的光能的平均分布.干涉使得靶面上的强度分布由许多高频调制的条纹组成.由程函公式(6)可估算出,条纹间距为 $\lambda f_s/d$, 约 $12.5 \mu\text{m}$, 中间还有 $N-2$ 个次极大;条纹的宽度与 l_1 有关,即与焦线长度有关,焦线短时条纹略宽.衍射也使焦线上的光强分布有明显的起伏,

这种起伏的空间频率、幅度都较大, 尤其是靠近焦线两端处. 空间频率高的细密条纹造成的照明不均匀一般可以通过等离子体的热传导效应抹平, 但大尺度不均匀不能通过热传导效应消除. 这种分布主要集中在焦线的两端, 而在 X 光实验中通常不用焦线的两个端头.

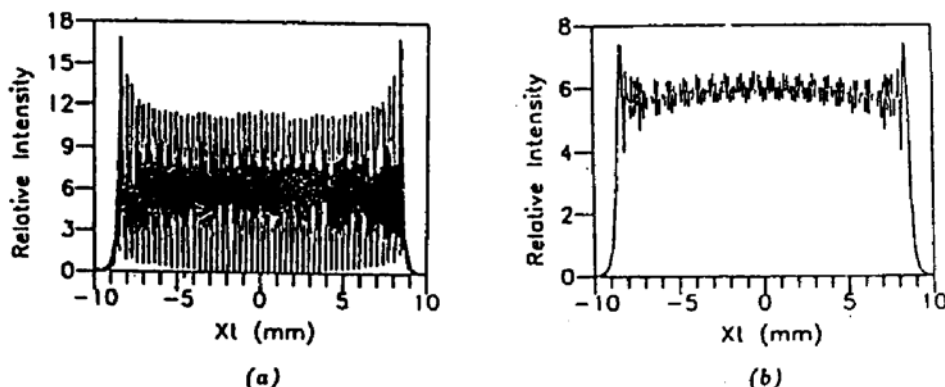


Fig. 3 (a) Calculated intensity along the line focus produced by a perfect vari-focal cylinder lenses array assuming a uniform circular beam (b) Calculated intensity distribution after averaging the intensity every $68 \mu\text{m}$ along the line focus in (a)

对于文献[3]的单列阵柱面透镜与非球面透镜系统, (4)式中相应的失调传输矩阵的矩阵元为:

$$\begin{aligned} A &= -f_s/f_c, & B &= f_s, & C &= -1/f_s - 1/f_c + l/f_s f_c, & D &= 1 - l/f_s, \\ \alpha &= -A, & \beta &= 0, & \gamma &= -C - 1/f_s, & \delta &= 0 \end{aligned} \quad (10)$$

计算结果显示, 单列阵柱面透镜系统所产生的焦线的光场分布与变焦列阵柱面透镜系统所产生的焦线大体相似, 干涉条纹间距仍为 $\lambda f_s/d$, 条纹宽度亦因焦线长度不同而略有不同.

计算还表明, 衍射、干涉效应是列阵透镜系统本身所固有的, 而其引起的照明不均匀性不能通过增加列阵元数目来消除. $N=4\sim 6$ 时能获得较好的结果, 列阵元数目太多亦无益.

一般高功率激光光束的振幅、位相都接近平顶分布. 然而由于激光系统的光路中有上百个光学元件, 几百个表面, 介质的不均匀性、非线性效应、光路中灰尘杂质的衍射等等, 使得其输出光束的强度、位相分布含有小尺度的随机起伏. 多条子焦线叠加时相互补偿、平均, 焦线的照明均匀性对入射光束光强的空间分布并不很敏感, 而波相差的影响却值得注意. 计算发现, 空间频率低的位相起伏, 会使一些干涉条纹次极大变强, 从而使焦线上某些部分的干涉条纹变宽, 光强减弱, 而某些部分的干涉条纹变细, 光强增强, 但即使其波相差大至数个波长, 对焦线光能平均分布影响仍不大. 当位相起伏的空间频率较高时, 较小的波相差就会使焦线上的照明均匀性开始变差. 但只是焦线瞬间的光强分布情况, 若入射激光光束的波相差分布是随时间变的, 则焦线上的光场分布也是随时间变化的, 经时间平均后焦线上的光能分布仍趋于均匀. 从图 1 可知, 由于在线长方向对应于光束的深近场区, 而线宽方向则对应于光束的远场, 因而高频位相调制对线宽方向上的光场分布的影响更为严重, 譬如它能使焦线显著变宽等. 当靶面不在非球面透镜的后焦面上, 而有较小的失调焦时, 焦线长度方向上的光强分布不会有明显变化, 但会使焦线变宽. 单列阵柱面透镜的结果与变焦列阵柱透镜的结果是一致的. 若考虑在列阵柱面透镜元中引入一定的制造公差, 譬如使 CA2 的各列阵元两柱面在与其母线垂直的方向有 ϵ_i 的相对角度失调量, 则(5)式中的 β 、 δ 分别为:

$$\beta = -(n-1)[l_2(1-z/f_s) + z], \quad \delta = -(n-1)(1-l_2/f_s) \quad (11)$$

对于单列阵柱面透镜系统，(10)式的 β 、 δ 分别为：

$$\beta = -(n - 1)B, \quad \sigma = -(n - 1)D \tag{12}$$

给出一定的 ϵ_i ，代入以上各式计算，无论是变焦的柱面透镜列阵系统还是单柱面透镜列阵系统，当引入 ϵ_i 后，类似于入射光束有低频位相调制的情况，焦线上不同部位的干涉条纹会变强或变弱。这种干涉条纹变强或变弱的区域的空间间隔随着 ϵ_i 的增大而缩小。但在 ϵ_i 相当大的变化范围内，焦线上的光能分布的均匀性并未遭到破坏，仍保持均匀，而且焦线两端的强衍射峰也随 ϵ_i 的增大而逐渐消失。这对于某些应用是有利的。当入射激光光束有小尺度位相起伏，各列阵元在与其母线垂直方向上有 ϵ_i 约为 $\pm 150''$ 的相对角度失调量，且附加有一个 $0 \sim 2\pi$ 范围内的随机位相时，所得焦线长度方向上的光强分布如图 4 所示。

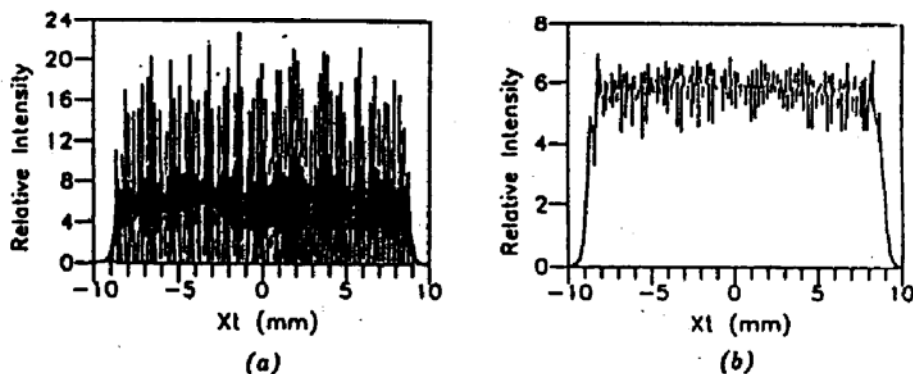


Fig. 4 (a) Calculated intensity along the line focus assuming there are nonuniformities in real laser beam and there are misaligned angles in the cylinder lens elements of the arrays
(b) Calculated intensity distribution after averaging the intensity every 68 μm along the line focus in (a)

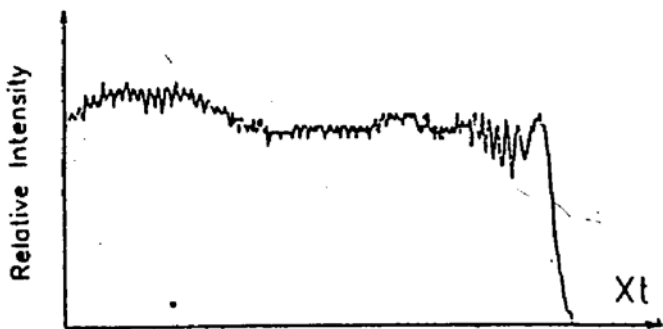


Fig. 5 Intensity distribution along the line focus (only a part of it) detected by a CCD measurement system

文献[3]用光电探测器对单列阵柱面透镜的焦线的照明均匀性进行了测量，给出了粗略的结果，用测量透过狭缝的激光能量的方法测量了焦线的宽度，结果在 $80 \sim 100 \mu\text{m}$ 占有能量的 90% 以上。文献[8]用 $6.6 \text{ mm} \times 8.8 \text{ mm}$ ， 500×582 元的面阵 CCD 和四页面 $512 \times 512 \times 8$ 内存的 AST 计算机、高分辨率监视仪及打印机组成的系统，对单列阵柱面透镜系统的焦线进行了更细致的测量，结果与本文的分析基本相符合。作者也用与文献[8]相同的 CCD 测量系统，对 $N=4$ 单列

阵柱面透镜系统进行了测量，所用激光波长为 $0.6328 \mu\text{m}$ ，焦线长度为 12 mm ，其结果见图 5。由于 CCD 的分辨率不够高，不能显示出多光束干涉条纹，但焦线上的“毛刺”仍部分反映了衍射和干涉的情况。用这种列阵柱面透镜和非球面透镜线聚焦系统，已在“神光”装置上成功地进行了电子碰撞激发机制和复合泵浦机制的 X 光激光实验^[9~11]。

结 论 本文提出了用两个列阵柱面透镜组成的可变焦线聚焦系统，它能产生辐照均匀、长度在一定范围内可调的焦线。进一步理论分析表明，与普通的线聚焦系统相比，使用柱面透镜列阵系统后，能大大提高焦线的照明均匀度。但是，由于列阵透镜元的边缘衍射效应和多

光束干涉效应的存在,使得靶面上的光场分布含有高频调制.干涉使得焦线实际上由许多细密的条纹组成,而衍射则造成一些大尺度的光强起伏,主要集中于焦线的两端.空间小尺度的强度起伏可以通过等离子体的热传导效应抹平,空间大尺度的不均匀性不能通过等离子体的热传导效应来消除,也不能通过增加列阵元的数目来消除,因此过多增加列阵元的数目是无益的.实际高功率激光系统输出的激光束不可能是理想的,焦线长度方向上的照明均匀性对入射光束的光强空间分布不均匀不敏感,对入射光束低空间频率的畸变也有相当大的容忍度.在柱面透镜列阵元中引入与母线方向垂直的相对角失调量后,会使靶面光场分布带来一些新特点,它能消除焦线两端的强衍射峰,在一定范围内对均匀照明是有利的.计算结果表明,单列阵柱面透镜系统与变焦列阵柱面透镜系统所产生的焦线的光线分布的特点是相似的.

参 考 文 献

- [1] L. G. Sappala, Target focusing configuration for X-ray laser experiments. *Laser Program Report (LLNL)*, 1984 : 2~47
- [2] I. N. Ross, J. Boon, R. Corbett *et al.*, Design and performance of a new line focus geometry for x-ray laser experiments. *Appl. Opt.*, 1987, 26(9) : 1585
- [3] 陈万年, 王树森, 陈斌等, 用于 X 射线激光实验研究的列阵柱面透镜线聚焦系统. *光学学报*, 1991, 11(9) : 829
- [4] D. M. Villeneuve, Novel laser line focus geometry applied to X-ray laser. *Opt. Commun.*, 1991, 81(1,2) : 54
- [5] Ximing Deng, Xiangchun Liang, Zezun Chen *et al.*, Uniform illumination of large targets using a lens array. *Appl. Opt.*, 1986, 25(3) : 377
- [6] S. Wang, Review matrix methods in treating decentred optical systems. *Opt. & Quantum Electron.*, 1985, 17(1) : 1
- [7] S. Wang, L. Ronchi, Principles and design of optical arrays. *Progress in Optics*, 1988, 25 : 279
- [8] Shen Liqing, Zhou Fuzheng, Chen Wannian *et al.*, 2D-Imaging of array line focal illumination in x-ray laser experiment. *Proc. SPIE*, 1993 : 2000
- [9] 淳于书泰, 沈华忠, 何绍堂等, 类氟锆 X 光激光增益实验. *强激光与粒子束*, 1990, 2(3) : 280
- [10] Zhizhan Xu, Pinzhong Fan, Zhengquan Zhang *et al.*, Soft-x-ray lasing and its spatial characteristics in a lithium-like silicon plasma. *Appl. Phys. Lett.*, 1990, 56(24) : 2370
- [11] 王世绩, 顾援, 傅思祖等, 高增益的类 Ne 锆软 X 光激光实验. *强激光与粒子束*, 1990, 2(3) : 273

A Uniform Line Focus System

Using A Vari-Focal Cylinder Lenses Array

Qiu Yue Huang Hongyi Fan Dianyuan Wang Shushen

Chen Wannian Deng Ximing

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai 201800)

(Received 8 December 1993)

Abstract A novel line focus system for x-ray laser research is suggested. It is composed of a pair of cylinder lenses arrays and a aspherical lens. The line focus is illuminated uniformly, and it's length is continuously tunable. The intensity distribution along the line focus is analyzed in details with physical optics method. The results are compared with other line focus techniques.

Key words vari-focal, cylinder lenses array, uniform illumination.