

凸柱面透镜列阵线聚焦系统

黄关龙¹⁾ 王世绩²⁾ 林尊琪¹⁾ 顾 援²⁾ 唐华泾²⁾

1), 中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理国家实验室, 上海 201800
2), 上海激光等离子体研究所, 上海 201800

张国平

(应用物理与计算数学研究所, 北京 100088)

Y. Kato H. Daido S. Sezaki S. Hirose Y. Yoon T. Jitsuno Y. Takagi K. Mima
(Institute of Laser Engineering, Osaka University, Suita Osaka 565, Japan)

K. Murai

(Osaka National Research Institute, Ikeda Osaka 563, Japan)

H. Takenaka

(NTT, Advanced Technology, Midorimachi, Musashino 180, Japan)

摘 要 主要描述了柱面透镜列阵聚焦系统的原理及结构, 分析了凹柱面透镜列阵线聚焦系统中非球面透镜损坏的原因, 介绍了凸柱面透镜列阵线聚焦系统的设计原则、性能及在中日合作 X 射线激光实验中的使用情况。

关键词 柱面透镜列阵, 组合焦线, X 射线激光。

近年来, X 射线激光研究取得了很大的进展。在研究中, 为了获得高强度、高增益的 X 射线激光输出, 除了要有一定的泵浦功率外, 还需要在靶面的一定长度范围内造成近乎相同的等离子体条件。为此, 发展了多种线聚焦技术^[1-3]。在发光截面为圆形的激光系统中, 为了得到能量分布均匀的焦线, 人们采用矩形光阑挡光, 但这要损失约 30% 的激光能量。采用柱面透镜列阵与非球面会聚透镜组成的光学系统, 在不损耗激光能量的前提下, 获得了宽度合适的沿焦线长度方向能量分布较为均匀的激光焦线。

1 柱面透镜列阵线聚焦系统的工作原理

柱面透镜列阵线聚焦系统由柱面透镜列阵和非球面会聚透镜组成^[4], 如图 1 所示。

系统的工作原理是将一束圆形截面的激光束, 通过柱面透镜列阵, 分割成波面曲率相同、中心间隔相等的 n 束相互平行的光束。也就是将由单柱面透镜产生的能量分布不均匀的

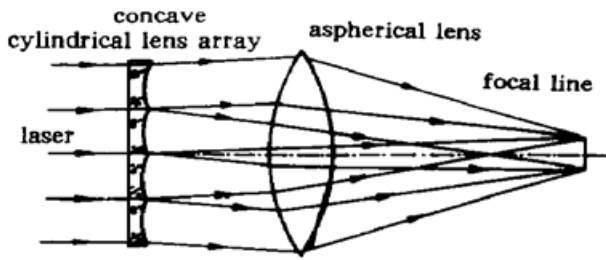


Fig. 1 Principle schematic of concave cylindrical lens line focusing system

焦线，分割成长度比例适当的 n 段焦线单元，再采用光学方法将 n 段焦线单元按一定的方式进行叠合，形成一条宽度不大于焦线单元宽度 20% 的组合焦线。组合焦线的长度 L 和被分割的焦线单元数 n (即柱面透镜列阵中柱面透镜单元数)，激光束口径 d 柱面透镜单元的焦距 f_c ，非球面透镜的焦距 f 之间的关系为：

$$L = \frac{df}{nf_c}$$

尽管各焦线单元上的激光能量分布各不相同，但经过 n 次叠合后，组合焦线上各点的能量被平均化，有效地减少了焦线上各点的能量起伏，形成一条能量均匀分布的激光焦线。

组合焦线上各点的光能量为各焦线单元上相应位置的光能量相加而成。各焦线单元上各点的能量是由相应的柱面透镜单元所占据激光束截面的部位有关。组合焦线上任何一点的光强度，可以近似用下式计算：

$$I_p = \frac{d}{8} I_0 \left[\sqrt{1 - \left(\frac{2X_a}{d}\right)^2} + \sqrt{1 - \left(\frac{2X_b}{d}\right)^2} + \sqrt{1 - \left(\frac{2X_c}{d}\right)^2} + \sqrt{1 - \left(\frac{2X_d}{d}\right)^2} \right]$$

式中

$$\begin{aligned} X_a &= -\frac{3d}{8} + \frac{f_c x}{f}, & X_b &= -\frac{d}{8} + \frac{f_c x}{f}, \\ X_c &= \frac{d}{8} + \frac{f_c x}{f}, & X_d &= \frac{3d}{8} + \frac{f_c x}{f}. \end{aligned}$$

2 凹柱面透镜列阵线聚焦系统及存在的问题

早期使用的是凹柱面透镜列阵线聚焦系统。凹柱面透镜列阵线聚焦系统在神光Ⅰ装置上开展的 X 射线激光实验中使用，取得了较好的实验成果^[5, 6]。

然而在实验中发现，经过一二次大能量激光辐照后，系统中的非球面透镜的后表面出现了有衍射条纹痕迹的竖向条状损坏，如图 2 所示。

图 1 光路显示，柱面透镜列阵上存在着三条宽度为 $20 \mu\text{m}$ 的竖向拼缝。激光经过这些拼缝时，将会产生衍射。同时，由于凹柱面透镜对激光束的发散作用，相邻的两柱面单元的激光束之间存在着重叠区，如图 1 所示。在这区域内，光束将出现干涉。根据有关参数进行的计算表明，光衍射造成的最大光强度为平均光强的 1.4 倍。这光强度不足以造成非球面透镜表面膜层的损坏。而光束干涉造成的亮条纹的强度为平均强度的 4 倍。亮条纹处的激光强度达到 $8 \text{ GW}/\text{cm}^2$ ，已经达到了非球面透镜表面膜层的损坏阈值，造成了非球面透镜表面膜层的损坏。

对非球面透镜膜层损坏区域作显微观测，证实在粗的衍射损坏条纹中，存在着大量的宽度为 $18 \mu\text{m}$ 的竖向干涉条纹，而在没有衍射条纹的区域，同样存在着大量的竖向干涉条纹损坏，见图 3。这说明凹柱面透镜列阵系统中造成非球面透镜表面膜层损坏的根本原因是组成

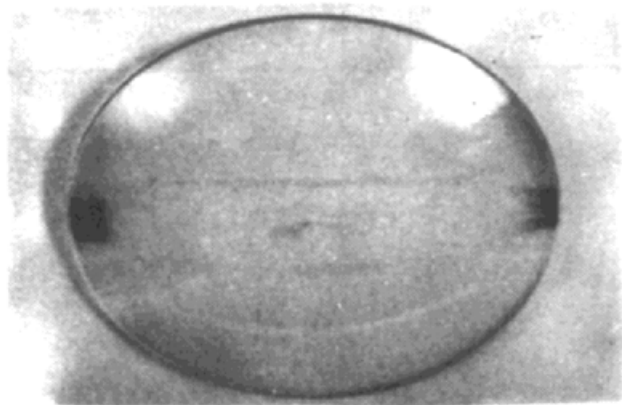


Fig. 2 An aspherical lens with damaged surface

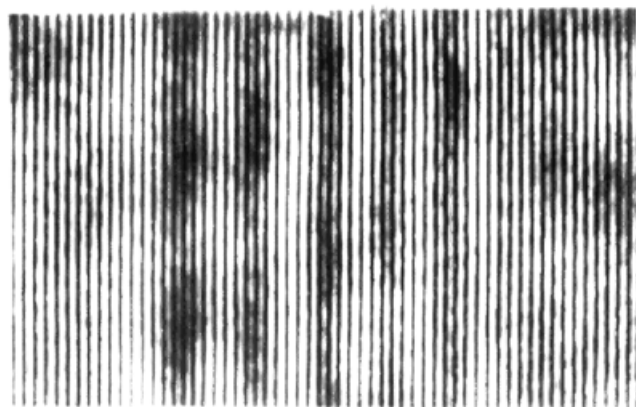


Fig. 3 Interference fringes in the diffraction fringes

柱面透镜列阵的各柱面单元光束重叠产生的干涉, 而光束衍射只是在此基础上加强了损坏程度。没有光的干涉, 衍射造成的光能分布不均匀不足以造成非球面透镜的损坏。

3 凸柱面透镜列阵线聚焦系统的设计与应用

为了消除凹柱面透镜列阵系统中出现的光束干涉, 设计了由凸柱面透镜单元组成的凸柱面透镜列阵。系统的光路排布与图 1 相同。激光经过凸柱面透镜列阵后, 变成四束相互分离的会聚光束。尽管存在着光束衍射现象, 但各光束之间不发生重叠, 不会出现光束干涉, 因而不会造成非球面透镜表面膜层的损坏。

凸柱面透镜列阵线聚焦系统设计的主要目的是: 寻找适当的组合, 获得具有最小焦线宽度及最佳能量分布的焦线。

3.1 焦线宽度的设计考虑

系统焦线的最小宽度是由非球面透镜的聚焦质量, 柱面透镜列阵中各柱面单元的质量和各单元之间的拼接精度所决定。因此必须采用弥散斑直径接近衍射极限的非球面透镜; 此外要求各柱面透镜单元具有相同的柱面曲率, 良好的面形精度, 柱面母线的平行度误差必须小于 $2''$ 。

3.2 沿焦线长度方向激光能量分布均匀性的设计

以 $F = (I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min})$ 作为焦线上能量分布均匀性误差的评价标准, I_{\max} 、 I_{\min} 分别为焦线上的最大光强和最小光强。根据柱面透镜列阵系统的工作原理, 组合焦线由各焦线单元叠合而成, 叠合的单元数越多, 由于焦线上各点之间的能量起伏被光滑化, 能量分布越均匀。计算得到的等曲率、等宽度二单元、三单元、四单元、五单元和六单元柱面透镜列阵形成的焦线上能量分布误差分别是: 26.8%、13.83%、8.8%、6.23% 和 4.71%。

数据证实, 单元数越多, 焦线上能量分布均匀性越好。但是随着单元数的增加, 柱面透镜列阵的制作难度成倍增大, 成本大幅上扬。根据目前的技术条件及 X 射线激光实验的要求采用 $F \leq 10\%$ 的四单元柱面透镜列阵是合适的。

改善焦线上能量分布均匀性的另一途径是调整各焦线单元的长度比例, 并进行组合。以四单元结构为例, 将焦线分割成不同长度比例的 A、B、C、D 四段, 并按图 4 的方式进行叠合。

令 $W = A/B = D/C$, 计算 F 对不同的 W 值的变化曲线, 计算结果如图 5 所示。

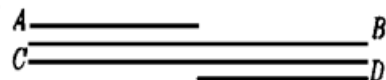


Fig. 4 Schematic diagram of overlapping of focal lines

对于不同的 W 值, 沿焦线长度方向的能量分布曲线如图 6 所示。

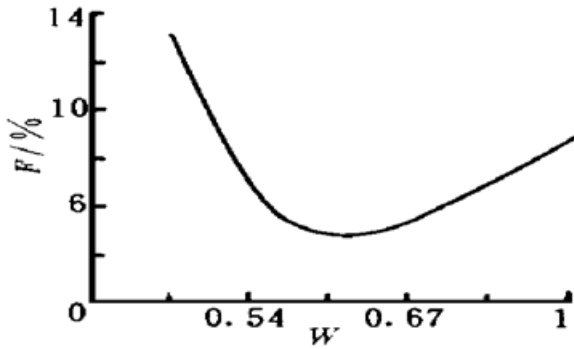


Fig. 5 The relation curve of calculated F versus W

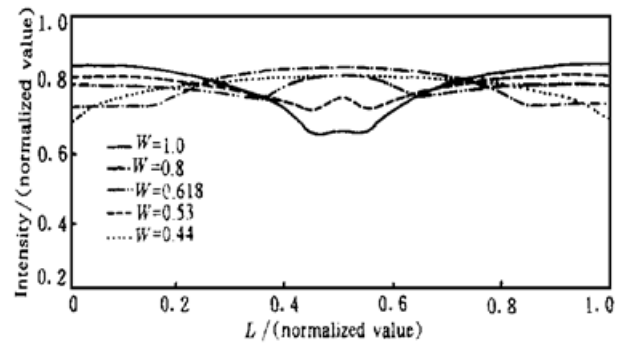


Fig. 6 Energy distribution on the focal line with different values W

数据表明, 当 $W = 0.618$ 时, 即按黄金分割法分割焦线单元的长度比例并进行叠合, 得到的焦线有最小的 F 值。

设计并制作了通光口径为 320 mm, $W = 0.6$, 焦线长度为 26 mm 的等柱面曲率的四单元凸柱面透镜列阵线聚焦系统。并于 1996 年 10 月~ 11 月, 及 1998 年 4 月~ 5 月在日本大阪大学激光工程研究所的 GeKK0XII 装置上进行的中国高功率激光物理实验室与日本大阪大学核聚变研究所合作的 X 射线激光实验中使用, 取得了令人满意的实验结果。研究成果已在 1998 年 8 月在日本京都召开的国际 X 射线激光会议上报告。

在中日合作实验中测得的单柱面透镜及凸柱面透镜列阵系统的靶面 X 射线焦线的 CCD 照片, 见图 7, 图下方是该焦线的沿长度方向的能量分布曲线。实验结果表明, 单柱面透镜系统的焦线上的能量分布曲线呈圆弧形, 而凸柱面透镜列阵系统则为平的, 凸柱面系统产生的焦线, 沿焦线长度方向的能量分布均匀性远好于单柱面系统。

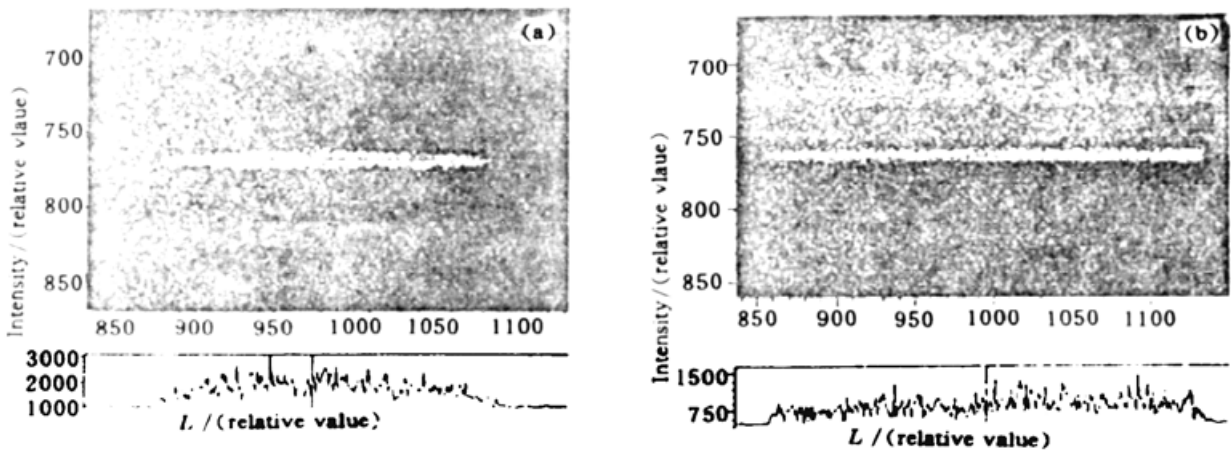


Fig. 7 X-ray focal line shape on the target and the energy distribution profile along the direction of the line axis.

(a) Single cylindrical lens, (b) Cylindrical lens array

对在柱面透镜列阵的设计、加工、检验中参加工作的朱健强、丘悦、王德林、王国兴、强勇华、叶强、龚津华、居玲洁等先生表示感谢。

参 考 文 献

- [1] Ross I N, Boon J, Corbett R *et al.*. Design and Performance of a new line focus geometry for X-ray laser experiment. *Appl. Opt.*, 1987, **26**(9) : 1584~ 1588
- [2] Ross I N, Hoagson E M. Some optical design for the generation of high quality line foci. *J. Phys. (E); Sci. Instrum.*, 1985, **18**(1) : 169~ 172
- [3] Lleneuve D M V, Enright G D, Baldis H A. Novel laser line focus geometry applied to X-ray laser. *Opt. Commun.*, 1991, **81**(1, 2) : 54~ 58
- [4] [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~ 833
- [5] 王世绩, 顾 援, 周关林等. 类氩锕等离子体中软 X 激光饱和增益实验研究. *光学学报*, 1991, **11**(12) : 1135 ~ 1136
- [6] 王世绩, 顾 援, 周关林等. 反射镜多靶串接增益饱和软 X 光激光实验. *强激光与粒子束*, 1993, **5**(4) : 141~ 147
- [7] Wang Shiji, Lin Zunqi, Gu Yuan *et al.*. Intense nickel-like neodymium X-ray laser at 7.9 nm with a double-curved-slab target. *Jpn J. Appl. Phys.*, Part 2 Letters, 1998, **37**(10B) : L1234~ L1237

Convex Cylindrical Lens Array Line Focusing System

Huang Guanlong¹⁾ Wang Shiji²⁾ Lin Zunqi¹⁾
 Gu Yuan²⁾ Tang Huajing²⁾

1), National Laboratory on High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800

2), Shanghai Institute of Laser Plasma, Shanghai 201800

Zhang Guoping

(Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100088)

Y. Kato H. Daido T. Imani S. Sezaki S. Herose

Y. Yoon T. Jitsuno Y. Takagi T. Mima

(Institute of Laser Engineering, Osaka University, Suita Osaka 565 Japan)

K. Murai

(Osaka National Research Institute, Ikeda Osaka 565 Japan)

H. Takenaka

(NTT, Advanced Technology, Midorimachi, Musashino 180 Japan)

(Received 10 April 1998; revised 20 July 1998)

Abstract The principle and configuration of the cylindrical lens array (CLA) line focus system are described. The causes of damage of aspherical lens in aspherical lens in the concave CLA are analyzed. The design principle and performances of the CLA and its operation are introduced.

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