

# 用楔角偏差改善光楔列阵系统 焦线的大尺度不均匀性\*

蔡邦维 刘忠永 吕百达 叶一东 黄文龙

(四川大学光电系, 成都 610064)

**摘 要** 在加工光楔列阵线聚焦系统时,人为地使各单元楔角与精确的理论值之间存在一定的偏差,以使单元衍射引起的大尺度不均匀性得到改善。文中进行了理论计算和实验验证,在既能改善均匀性,又能保证一定的焦线能量利用率的情况下,给出了合理的偏差数据,为优化均匀线聚焦系统的工程设计提供了必要的依据。

**关键词** 大尺度不均匀性, 楔角偏差, 线聚焦, 光楔列阵。

## 1 引 言

为获得足够高的 X 光增益,需将高功率激光束会聚成一条沿长度方向光强均匀分布的焦线,由于高功率激光器输出光束在强度和位相上存在随机起伏,为获得均匀的线聚焦,列阵系统起了独特的作用,它能在入射光束近场分布极不均匀的情况下获得接近“平顶”的光强分布。柱列阵(CLA)<sup>[1]</sup>和光楔列阵(SWA)<sup>[2]</sup>是目前应用的两种列阵系统。作者曾研制了七单元光楔列阵<sup>[3]</sup>,并对加拿大 Villeneuve 等提出的光楔列阵原型进行了改进,克服了原型焦线长度不可调的缺点<sup>[4]</sup>。理论和实验表明,列阵系统由于对入射波面进行了分割,而激光束具有较好的相干性,因而经列阵均匀化后的光强分布含有单元衍射引起的大尺度不均匀和各单元之间干涉引起的小尺度不均匀。为抑制小尺度不均匀,作者提出了“有规偏振分布”的方法<sup>[5]</sup>,对大尺度不均匀,可采用“离焦打靶”<sup>[6]</sup>和“波纹光阑”<sup>[7]</sup>等方法,本文利用加工光楔时人为地留下楔角偏差,使各单元的衍射包络相互稍微错开,从而削弱大尺度衍射不均匀性。本文计算了楔角偏差对光场分布的影响,给出了偏差允许的范围,并和实验结果进行了比较。

## 2 有楔角偏差的光楔列阵光场分布

光楔列阵系统如图 1 所示,会聚柱透镜 CL 焦距为  $F$ ,光楔列阵的“重叠焦距”为  $L$ ,会聚柱透镜和光楔列阵相距  $D$ ,从几何光学可知,只要  $F = D + L$ ,则在“重叠焦面”上可得到一条会聚焦线,线长为光楔列阵各单元的宽度  $d$ 。为保证各子光束在重叠焦面上彼此完全重叠,各单元楔角应满足下式:

\* 国家高技术 863-416 资助项目。

收稿日期:1995年3月26日;收到修改稿日期:1995年8月7日

$$a_m = [1/(n-1)]\tan^{-1}(Y_m/L) \quad (1)$$

式中  $a_m$  为第  $m$  单元的楔角,  $Y_m$  为第  $m$  单元中心到光轴( $Z$  轴)的距离,  $n$  为介质的折射率。在加工时,有意留下相对偏差  $\sigma_m = |\Delta a_m|/a_m$ ,则实际的楔角为

$$a'_m = a_m(1 \pm \sigma_m) \quad (2)$$

为简化计算,设会聚柱透镜和光楔列阵紧贴,即令  $D = 0$ ,  $F = L$ ,入射光为单位平面波,并设旁轴近似成立,则会聚柱透镜和第  $m$  单元光楔的组合系统的复振幅透过率函数为

$$t_m(X_0, Y_0) = \exp(-iKX_0^2/2F) \cdot \exp[-iK(n-1)a'_m Y_0 + i\phi_{0m}]$$

式中  $\phi_{0m}$  为第  $m$  单元的初始位相,它只对场分布的小尺度干涉结构有影响,对大尺度衍射分布的作用可忽略,并注意到  $F = L$  的假设,有

$$t_m(X_0, Y_0) = \exp(-iKX_0^2/2L) \cdot \exp[-iK(n-1)a'_m Y_0] \quad (3)$$

由菲涅耳衍射积分,可得第  $m$  单元在重叠焦面( $XOY$ )上的振幅为

$$U_m(X, Y) = \frac{1}{i\lambda L} \iint t_m(X_0, Y_0) \exp\{i(K/2L)[(X - X_0)^2 + (Y - Y_0)^2]\} dX_0 dY_0 \quad (4)$$

当单元总数  $N$  为奇数时,代入(1)~(3)式和积分限,并作适当坐标变换,最后可得

$$U_m(X, Y) = C(X) \exp\{-i(K/2L)[2Y + md(i \pm 2\delta_m)]md\} \cdot \int_{-d/2}^{d/2} \exp\{-i(K/2L)[2Y \pm 2md\delta_m - Y_0]Y_0\} dY_0 \quad (5)$$

式中  $C(X)$  为只与  $X$  有关的量,当仅考虑线长方向( $Y$  方向)的分布时,可忽略不计。则总的光场振幅分布为

$$U(X, Y) = \sum_{m=-(N-1)/2}^{(N-1)/2} U_m(X, Y) \quad (6)$$

而总光强分布为

$$I(X, Y) = U(X, Y)U^*(X, Y) \quad (7)$$

### 3 理论计算和实验结果的比较

本实验室加工的一套光楔列阵的参数  $L = 500$  mm,  $d = 15$  mm,单元总数为  $N = 7$ , He-Ne 激光波长为  $\lambda = 0.6328$   $\mu\text{m}$ ,考虑不同的  $\delta_m$  分布,作数值计算,典型的计算结果如图 2~图 4。

图 2(a)是无楔角偏差时理想系统的强度分布,细密的尖峰是多光束干涉的结果,为表明大尺度的衍射起伏,取  $60$   $\mu\text{m}$  间隔作强度的平均分布图(下同),如图 2(b)所示,由于近场的菲涅耳衍射,焦线两端附近有明显的大尺度强度起伏,使不均匀性高达约 23%。图中两虚线为线长的几何边界(下同),由于衍射,焦线两端光强分布不象几何光学的结果那样变化陡峭。

图 3(a)是最大楔角偏差  $\delta_{\max} = 1.5\%$ ,而其它楔角偏差逐次减小时的理论强度分布,可见,焦线两端附近明显的大尺度强度起伏消失了,使不均匀性降低到约 6.4%。另一方面,有楔角偏差时,由于各单元的衍射包络相互有微小错开,焦线两端强度上升稍微变缓,这将降低焦线的能量利用率,即所谓的“塌边”现象。比较图 3(a)和图 2(b)可见,在这种偏差下,“塌边”并不明显,能量损失极小,只有约 3.0%,作者认为,这时为最佳工作状态。

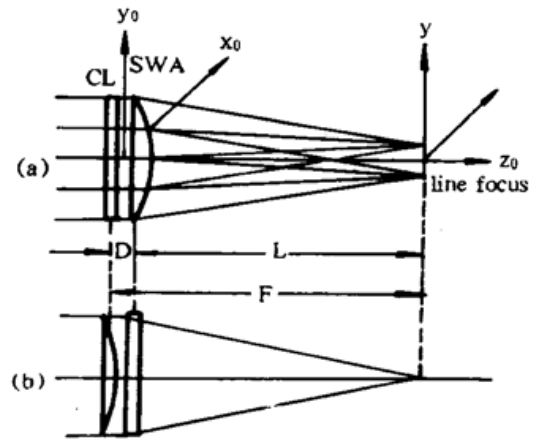


Fig. 1 Diagram of the segmented wedge array (SWA) focussing arrangement. (a) top view, (b) a side view. CL indicates the cylindrical lens

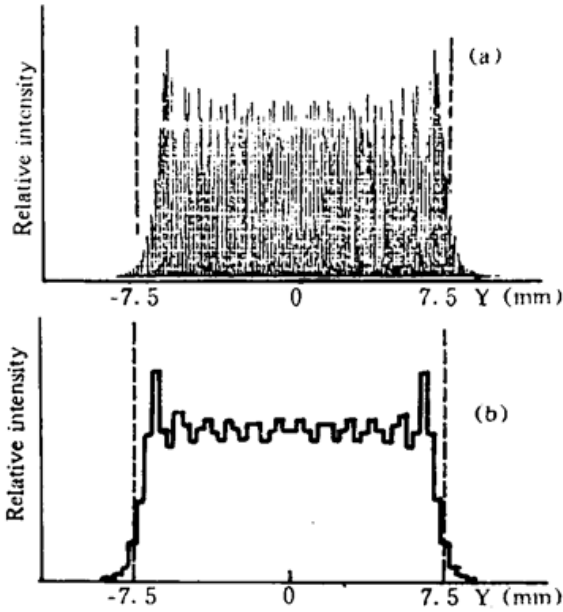


Fig. 2 (a) Calculated intensity distribution along line focus length with no wedge angle deviation. The close, spikes are caused by interference between units of SWA; (b) Calculated intensity distribution after averaging the intensity every 60  $\mu\text{m}$  along line focus length in Fig. 2 (a)

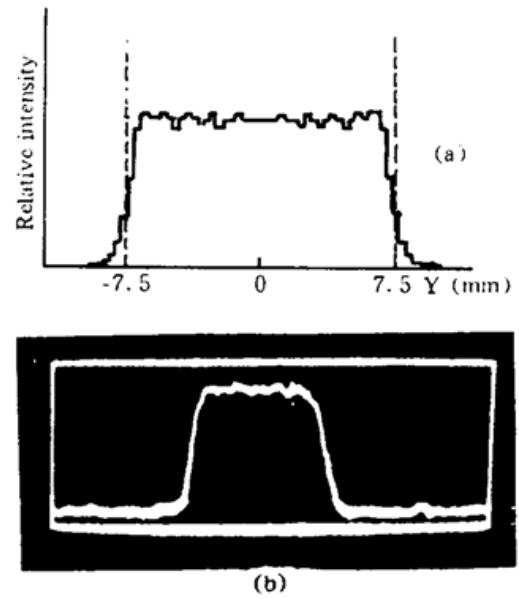


Fig. 3 (a) Calculated average intensity distribution along line focus length with the maximum wedge angle deviation  $\delta_{\text{max}} = 1.5\%$ ; (b) Experimental intensity distribution along line focus length of actual SWA with wedge angle deviation according to theoretical simulation in Fig. 3 (a)

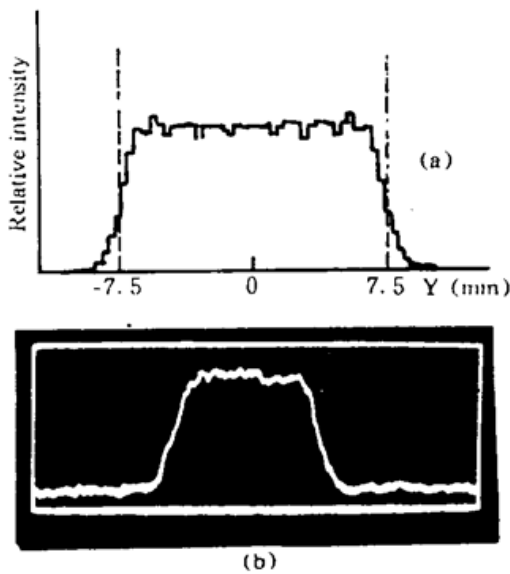


Fig. 4 (a) Calculated average intensity distribution along line focus length with the maximum wedge angle deviation  $\delta_{\text{max}} = 2.4\%$ ; (b) Experimental intensity distribution along line focus length of actual SWA with the maximum wedge angle deviation  $\delta_{\text{max}} \approx 3.0\%$

图 4(a)是最大楔角偏差  $\delta_{\text{max}} = 2.4\%$  时的理论强度分布,可见,这时虽无明显的大尺度衍射起伏,但两端边缘上升更加缓慢,而原来的端头高峰开始低于平均强度,“塌边”现象明显加重,焦线的能量利用率进一步降低,有大约 6.0% 的能量损失。

在此理论计算的指导下,作者研制的七单元光楔列阵,在加工时有意留下了楔角偏差,如表 1 所列。用 CCD 摄像系统探测得光强分布如图 3 (b)所示,可见,两端的大尺度衍射不均匀的确被摸平了,且“塌边”不严重,与 3(a)的理论分析结果相吻合。

另外,用加工时作为备用的几条光楔单元部分地替换了表 1 中的单元,这些备用单元的楔角偏差较大,测得  $\delta_{\text{max}} \sim 3.0\%$ ,如表 2 所列。用它作模拟实验,结果如图 4(b)所示,可见明显的“塌边”现象与 4(a)的理论分析结果相似。

Table 1. Parameters of SWA with  $\delta_{\text{max}} \sim 1.52\%$

wedge arrangement	$a_3$	$a_2$	$a_1$	$a_0$	$a_{-1}$	$a_{-2}$	$a_{-3}$
wedge angle (deg) (theoretical)	9.959	6.649	3.328	0.000	3.328	6.649	9.959
wedge angle (deg) (experimental)	10.110	6.717	3.344	0.003	3.344	6.717	10.110
relative deviation (%)	1.52	1.03	0.49		0.49	1.03	1.52

Table 2. Parameters of SWA with  $\delta_{\max} \sim 3.0\%$ 

wedge arrangement	$a_3$	$a_2$	$a_1$	$a_0$	$a_{-1}$	$a_{-2}$	$a_{-3}$
wedge angle (deg) (theoretical)	9.959	6.649	3.328	0.000	3.328	6.649	9.959
wedge angle (deg) (experimental)	10.258	6.771	3.344	0.003	3.344	6.775	10.253
relative deviation (%)	3.0	1.83	0.49		0.49	1.90	2.95

**结 论** 本文通过理论分析和实验测定,证实了在楔角加工时人为地留下一定程度的加工误差,可有效<sup>[1]</sup>抑制光楔列阵线聚焦系统中由于单元衍射引起的大尺度不均匀性。同时指出,这种方法必然带来“塌边”的副作用,实际工程设计中,应按对均匀性和能量利用率的实际要求,二者兼顾,设计适当的楔角偏差。例如,在本实验系统中,如果要求不均匀性小于 10%,而能量损失率低于 5.0%,则设计如表 1 的楔角偏差最为理想。显然,采用楔角偏差抹平光楔列阵系统焦线大尺度不均匀性的数值计算方法,原则上适用于任何入射激光光源。设计时,只需变更激光波长参数,确定出相应适用系统的最佳楔角偏差值。

### 参 考 文 献

- [1] 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
- [2] D. M. Villeneuve, G. D. Enright, H. A. Baldis. Novel laser line focus geometry applied to X-ray laser. *Opt. Commun.*, 1991,81(1,2): 54~58
- [3] 蔡邦维,吕百达,刘忠永等. 光楔列阵均匀线聚焦系统的研制. 中国激光,1995,22(6): 430~434
- [4] 蔡邦维,刘忠永,吕百达等. 焦线可控的光楔列阵均匀线聚焦系统. 中国激光,1996,23(1): 57~60
- [5] 刘忠永,吕百达,蔡邦维等. 用偏振和有规位相分布抑制线聚焦系统的小尺度不均匀性. 光学学报,1995,15(10): 1626~1632
- [6] 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,1984,12(5): 257~260
- [7] 丘 悦,钱列加,黄宏一等. 用消衍射方法改善透镜列阵的辐照均匀性. 中国激光,1995,22(1): 27~31

## Improvement of Large-Scale Nonuniformity of Line Focus in a Segmented Wedge Array System Using Wedge Angle Deviation

Cai Bangwei Liu Zhongyong Lü Baida Ye Yidong Huang Wenlong  
(Department of Opto-Electronic Science & Technology, Sichuan University, Chengdu 610064)

(Received 26 March 1995; revised 7 August 1995)

**Abstract** The deviations of wedge angles to some extent between the actual value and accurately theoretical value are made purposely during processing the segmented wedge array line focussing system in order to improve the large-scale nonuniformity caused by unit diffraction. In this paper, theoretical calculation and experimental verification are made, and the reasonable deviation data are given in the case of improving the uniformity while ensuring certain utilization ratio of line focus energy. It provides a necessary basis for the optimization design of uniform line focus system.

**Key words** large-scale nonuniformity, angle deviation, line focus, segmented wedge array.