

小焦斑均匀辐照二维正交光楔列阵 光学系统的研制*

郑建洲

(河北师范大学物理系 石家庄 050091)

蔡邦维 吕百达

(四川大学光电系 成都 610064)

提要 欲实现几百微米量级,同时要求具有好的辐照均匀性和高的能量利用率的均匀点聚焦二维正交光楔列阵光学系统,系统参数的优化设计和提高光楔列阵加工测试的精度是实验成败的关键。通过优化系统参数设计、严格控制光楔列阵的加工误差和拼接精度,成功地研制了九单元小焦斑 SWA 系统。给出了 SWA 系统焦斑特性的实验测试结果。

关键词 小焦斑,优化设计,加工精度,正交光楔列阵,楔角偏差

1 引 言

近年来,国内外对激光材料加工, X 光激光实验等问题已经提出了许多技术方案,用以改善靶面均匀辐照^[1-3]。然而,在激光核聚变等物理实验中,例如高压冲击波和状态方程实验却要求焦斑从几毫米到几百微米可变的均匀的二维点聚焦。为此,我们提出了正交光楔列阵光学系统(SWA),以实现焦斑可变的二维均匀点聚焦的新方案^[4],对大焦斑情况我们已经作了报道^[5]。原则上,只要合理选择系统参数,完全可以实现焦斑尺寸从毫米到几百微米范围的均匀辐照。由于激光具有极强的相干性,通过列阵系统后各子束必将产生衍射和干涉效应,列阵系统的参数,诸如列阵元的形状和大小等,对焦斑强度分布影响很大。优化系统的设计成了突出问题。同时,要实现小焦斑均匀辐照其难度比大焦斑困难得多,原因是实现几百微米光斑的压缩,SWA 各单元楔角要求很小。例如对研制的九单元正交 SWA 小焦斑系统,欲实现 $400\ \mu\text{m}$ 的光斑压缩,两组光楔列阵对应的单元楔角相差的最小值为 $2''$,这就对光楔列阵透镜的加工测试精度提出了很高的要求。我们通过多次实验,不断改进工艺,提高加工精度,研制出了两组九单元光楔列阵。通过 CCD 相机及数据处理显示装置和读数显微镜对系统的聚焦特性进行了实验研究,达到了设计要求,实验结果和理论计算符合得很好。通过改变非球面透镜的焦距可以方便地改变方形焦斑的尺寸。同时,它可以很方便地结合其他技术,诸如随机位相板(RPP),感应空间非相干(ISI),光谱色散(SSD)等组合使用,进一步提高焦斑的均匀性。

* 国家高技术惯性约束聚变委员会资助项目。

收稿日期: 1998-06-18; 收到修改稿日期: 1999-03-15

2 二维正交 SWA 系统的设计原理

二维正交 SWA 系统和透镜列阵(LA)比较,都能改善焦斑上的均匀性,获得平顶光强分布,但前者的加工难度和造价都比后者低,LA 方案的主要问题是对于大口径近百个子透镜列阵的同心偏差、扭曲、楔角偏差、列阵总体拼接误差等因素都直接影响焦斑的质量。而光楔是平面加工,较之球面加工更容易,而且由采用两组正交光楔列阵,加工十条光楔即可将入射光束分割一百等份,相当于一百个蝇眼透镜,因此,本系统具有加工容易、拼接和装校方便、造价低等优点。

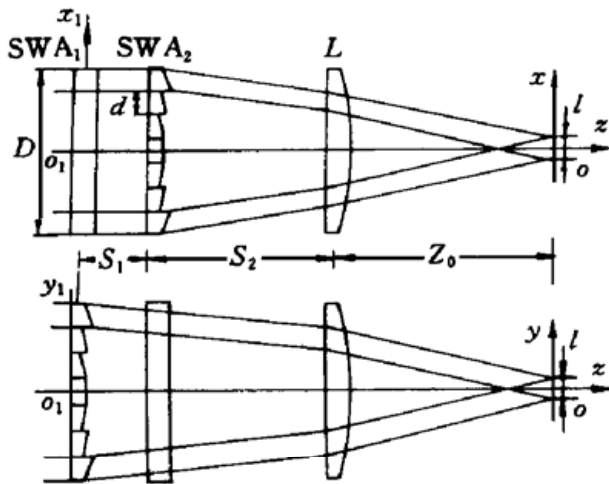


图 1 正交 SWA 光学系统原理图

SWA_i: 光楔列阵($i = 1, 2$); L : 非球面透镜

Fig. 1 Schematic illustration of the cross SWA optical system

SWA_i: segmented wedge array ($i = 1, 2$); L : spherical lens

x, y 两个方向分开考虑。

SWA 系统焦斑的位置,即焦斑到 L 的间距 Z_0 和焦斑宽度 l 由下式给出^[5]

$$Z_0 = \frac{L_1 - S_1 - S_2}{1 + (L_1 - S_1 - S_2)/f} \quad (0 \leq S_1 + S_2 \leq L_1) \quad (3)$$

$$l = \frac{d}{1 + (L_1 - S_1 - S_2)/f} \quad (0 \leq S_1 + S_2 \leq L_1) \quad (4)$$

对 $N = 7$ 的大焦斑情况^[5],当非球面焦距 f 一定时,改变 SWA₂ 和与非球面透镜 L 之间的距离 S_2 时,方形焦斑宽度 l 可在较大范围内连续变化。而对 $N = 9, l = 400 \mu\text{m}$ 的小焦斑情况,由于要实现几百微米焦斑压缩,SWA 各单元楔角则要求很小,则重叠距离 L_1, L_2 远远大于 S_2 , 则 l 随 S_2 的变化不敏感。但当改变 f 时,可以明显改变焦斑尺寸 l 。变化范围为 $d \leq l \leq \frac{d}{1 + L_1/f}$ 。

对大焦斑,采用 F 数大的透镜可以明显减小焦斑尺寸 l ^[5],但 F 数太大必会导致透镜中心厚度太大,焦距太短,既加大制造难度又使透镜离靶太近,易受靶面喷射物质污染。所以实验中不能使用焦距太短的透镜,要实现小焦斑只能减小 SWA 的单元楔角。当 SWA 系统的楔角偏差在设计精度以内时,改变 S_2 或 f 时,焦斑在横向和纵向的光强分布均保持不变。方程(1)~(4)给出了系统几何参数的设计方程。然而,要更详细地了解 SWA 系统,诸如系统焦斑上的光强分

正交光楔列阵原理如图 1 所示,其中 SWA₁, SWA₂ 为相互正交的两组光楔列阵, L 为焦距为 f 的非球面透镜。 S_1, S_2 分别为 SWA₁ 和 SWA₂, SWA₂ 和非球面透镜 L 之间的距离。SWA₁ 和 SWA₂ 具有相同的单元宽度 d 和单元数 N , 但具有不同的楔角 α_{m1}, α_{n2} , SWA₁, SWA₂ 第 m, n 单元的楔角的定义为^[2]

$$\alpha_{m1} = \frac{1}{n-1} \tan^{-1} \left[\frac{x_m}{L_1} \right] \quad (1)$$

$$\alpha_{n2} = \frac{1}{n-1} \tan^{-1} \left[\frac{y_n}{L_2} \right] \quad (2)$$

其中, x_m, y_n 分别表示在 x 和 y 方向第 m, n 单元光楔中心到光轴间的距离。 L_1, L_2 分别为 SWA₁, SWA₂ 的重叠距离, n 为材料的折射率。

由矩阵光学知,两正交光楔列阵各自独立地在 x, y 两个方向对入射光产生作用,因此,可以将

布、激光的相干性和楔角偏差等性质, 要由广义菲涅耳衍射积分方程作数值计算求得^[4]。

3 小焦斑 SWA 系统参数优化设计和加工精度的分析及控制

1) 一般认为, 只要适当选择系统参数, 原则上可以得到任意尺寸的均匀焦斑。而实际上, 由于激光具有很强的相干性, 系统列阵单元数很大, 使得列阵元尺寸较小时, 必然引起单元衍射和多光束干涉产生的大尺度和小尺度不均匀性。而这种衍射调制引起的大尺度辐照不均匀性有可能超过由于入射光束近场畸变所引起的靶面不均匀性。所以, 系统设计时, 要找一个最佳列阵单元数目, 既兼顾系统对入射光近场分布不均匀的补偿能力又要考虑由于系统单元数增加而带来的新的不均匀性对靶面辐照带来的影响。理论和实验表明, 对大焦斑正交 SWA 系统, 当通光口径不变, 单元数 N 增加且 $3 \leq N \leq 7$ 时, SWA 单元宽度 d 变窄, 边缘衍射引起的大尺度增加、多光束干涉条纹的间距变疏、干涉条纹的调制度加深, 但都不很明显。 $N = 7$ 时焦斑的均匀性是最好的; 和大焦斑比较, 小焦斑有相同的变化规律, 但干涉条纹间距明显变疏, 而且干涉条纹变得尖锐, 同时干涉条纹的调制度大大加深。也就是说, 把入射波面分割得很细时, 带来的小尺度不均匀性要比大焦斑明显增加, 这对均匀辐照不利。理论分析和实验表明, 对小焦斑, $N = 9$ 时焦斑的均匀性是最好的, 当 N 超过 9 时焦斑上列阵元的硬边衍射效应所引起的不均匀性将超过入射光束的近场畸变所引起的不均匀性, 均匀性反而不好。在忽略多光束干涉条纹的情况下, 焦斑光强分布的不均匀性主要来自单元衍射效应。但实际中很难探测到焦斑边缘的衍射起伏, 这主要是由于光楔列阵加工时楔角偏差引起的, 这对改善焦斑均匀性是有利的。

2) 实验中用正交光楔列阵光学系统实现小焦斑均匀辐照其难度比大焦斑困难得多, 原因是实现几百微米光斑的压缩, 要求 SWA 各单元楔角很小, 这就对加工测试精度提出了很高的要求。如对取如下参数的大焦斑 SWA 系统, 焦斑宽度 $l = 5 \text{ mm}$, 单元总数 $N = 7$, 单元宽度 $d = 15 \text{ mm}$, 聚焦透镜焦距 $f = 200 \text{ mm}$, SWA 材料为 K₉ 玻璃, 其折射率为 $n = 1.513$, SWA₁ 和 SWA₂ 与聚焦透镜的距离分别为 $S_1 = 50 \text{ mm}$, $S_2 = 120 \text{ mm}$ 。对某一楔角若相对误差为 1.52% 时, 如 $\alpha_{21} = 3.220^{\circ}$ ^[6], 得其绝对误差为 $\Delta\alpha = 2'54''$, 则此时焦斑纵向误差 $\Delta Z = 1 \text{ mm}$, 而焦斑横向绝对误差为 $\Delta l = 0.07 \text{ mm}$, 焦斑横向相对误差为 $\Delta l/l = 1.4\%$ 。此时焦斑正好彼此相互错开微小距离, 从而可平滑掉因单元衍射而引起的大尺度不均匀性, 而这对均匀辐照是有利的。对焦斑尺寸为 $400 \mu\text{m}$ 的九单元 SWA 系统, 若某一单元楔角大于 $2'$, 扭曲偏差大于 $30'$ 时将会产生各子光束在靶面上相互严重错开而不能很好重叠在一起, 达不到光束匀滑的效果。我们在实验中对小焦斑 SWA 系统取如下参数: $l = 400 \mu\text{m}$, $N = 9$, $d = 11.2 \text{ mm}$, $f = 400 \text{ mm}$, $n = 1.516$, $S_1 = 50 \text{ mm}$, $S_2 = 120 \text{ mm}$, SWA₁, SWA₂ 的重叠焦距分别为 $L_1 = 10970 \text{ mm}$ 和 $L_2 = 10920 \text{ mm}$, SWA₁, SWA₂ 各单元楔角设计的理论值分别为表 1 和表 2 所示。

表 1 SWA₁ 各单元楔角设计的理论值

Table 1 Parameters of SWA₁

α_{-14}	α_{-13}	α_{-12}	α_{-11}	α_{00}	α_{11}	α_{12}	α_{13}	α_{14}
27'12"	20'24"	13'36"	6'48"	0.00	6'48"	13'36"	20'24"	27'12"

表 2 SWA₂ 各单元楔角设计的理论值

Table 2 Parameters of SWA₂

α_{-24}	α_{-23}	α_{-22}	α_{-21}	α_{00}	α_{21}	α_{22}	α_{23}	α_{24}
27'20"	20'30"	13'40"	6'50"	0.00	6'50"	13'40"	20'30"	27'20"

可见, 两组 SWA 对应单元楔角相差最小值为 $2''$ 。若要使 SWA 小焦斑点聚焦系统在靶面上的焦斑错开微小的距离, 如焦斑横向相对误差为 $\Delta l/l = 1.52\%$ 时, 则要求其对应楔角的绝

对误差在 0.1'以内,楔角的相对误差为 $\Delta l/l = 1.47\%$ 。显然,加工精度要求提高了 20 倍。

3) 从以上分析可知,小焦斑 SWA 系统和大焦斑比较,原理上相同,但在实验上要实现小焦斑均匀点聚焦,系统参数的优化设计和提高系统的加工精度是实验成败的关键。为了保证各子束在同一平面上完全会聚,实现小焦斑均匀点聚焦,我们在原有工作的基础上^[4,5],优化了系统参数设计,对光楔的加工误差和拼接精度作了严格控制。采取的措施有:SWA 每单元侧面抛光 $N = 0.5$,平行度 $\leq 30''$; 组装时互相紧靠,呈光胶接触状态;选择光学均匀性好的 K₉ 玻璃材料制作 SWA;单元光楔的扭曲偏差 $\leq 10''$;非球面的透镜方程为: $y^2 = ax + bx^2$, $a = -309.05$, $b = 1.2955$,弥散圆 ≤ 0.02 mm,所镀的宽带可见光增透膜的透过率 $T = 97\%$ 。采用非球面透镜 L 主要是为了减少球差,而非球面透镜 L 的主要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。从而保证 SWA 系统各子束在靶面上充分会聚,使焦斑尺寸、光强分布的均匀性和能量利用率同时达到设计要求。

4 实验测量结果及讨论

测定 SWA 系统聚焦特性的实验装置中,单模 He-Ne 激光经扩束器后成为口径为 $D = 100$ mm 的准直平行光,垂直射入被测正交 SWA 点聚焦系统,在靶面上形成一方形光斑。用 JXW-1 型读数显微镜和 MTV-1881EX 1/2" CCD 相机分别记录测量焦斑的几何尺寸及光强分布。

4.1 焦斑尺寸测量

将被测的 SWA 系统置于光路中,通过多维精密调节架(精度为 0.01 mm)同轴准直调整

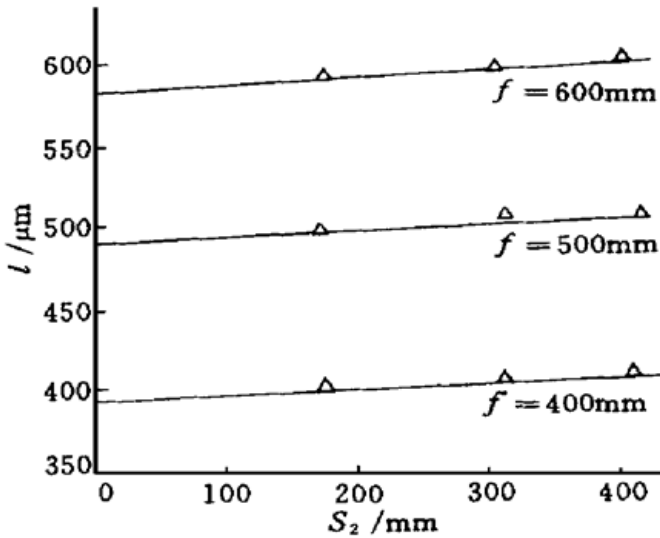


图 2 系统的焦斑尺寸与非球面透镜的焦距及 S_2 的关系
其中实线为几何光学计算值, Δ 为实验值。参数为 $N = 9$,
 $d = 11.2$ mm, $S_1 = 50$ mm, $L_1 = 10970$ mm。其他参数见正文
Fig. 2 The focus width l varies with the distance S_2
and focal length f

—: geometrical calculation results, Δ : experimental results. The parameters are $N = 9$, $d = 11.2$ mm, $S_1 = 50$ mm, $L_1 = 10970$ mm, and others are seen in the text

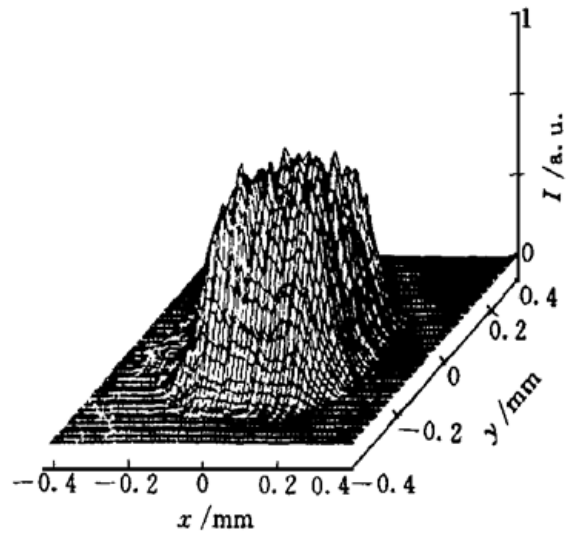


图 3 由 MTV1881EX 1/2" CCD 相机拍摄的焦斑
二维强度分布
参数为 $N = 9$, $d = 11.2$ mm, $S_1 = 50$ mm,
 $L_1 = 10970$ mm, $f = 400$ mm

Fig. 3 The 2D intensity distribution of the focal spot recorded by a MTV1881EX 1/2" CCD camera
The experimental parameters are $N = 9$, $d = 11.2$ mm, $S_1 = 50$ mm, $L_1 = 10970$ mm, $f = 400$ mm

光路。用 JXW-1 型读数显微镜(测量精度为 0.01 mm) 直接标定不同 S_2 时的焦斑尺寸 l , 实验测量值结果如图 2 所示, 图中实线代表几何光学的计算结果, Δ 符号代表实验测量结果。可见, l 随 S_2 的变化不敏感。但当改变 f 时, 可以明显改变焦斑尺寸 l 。对焦距分别为 400 mm, 500 mm, 600 mm 的非球面透镜, 实验值与理论值的平均相对误差分别为 2.96%, 1.04%, 1.76%。这里误差产生的主要原因是由于光楔列阵透镜加工时所留的楔角偏差而产生的。

4.2 焦斑光强分布的测量

用 MTV-1881EX1/2" CCD 相机摄得靶面上光斑的一维和二维光强分布如图 3 和图 4 所示, 可见, 焦斑为正方形, 边缘上升下降比较陡峭, 无旁瓣, 近似于平顶光强分布。 x, y 方向的不均匀性分别为 $\overline{\eta}_x = 5.32\%$, $\overline{\eta}_y = 8.72\%$, 能量利用率分别为 $\overline{E}_x = 90.1\%$, $\overline{E}_y = 81.82\%$ 。

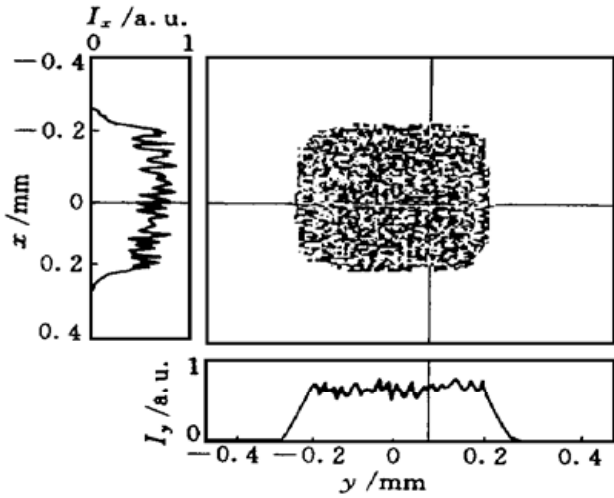


图 4 由 MTV-1881EX 1/2" CCD 相机拍摄的沿 x 和 y 方向的焦斑强度分布
参数见图 3

Fig. 4 The intensity distribution of the focal spot along x and y directions recorded by a MTV-1881EX1/2" CCD camera
The parameters are seen in the Fig. 3

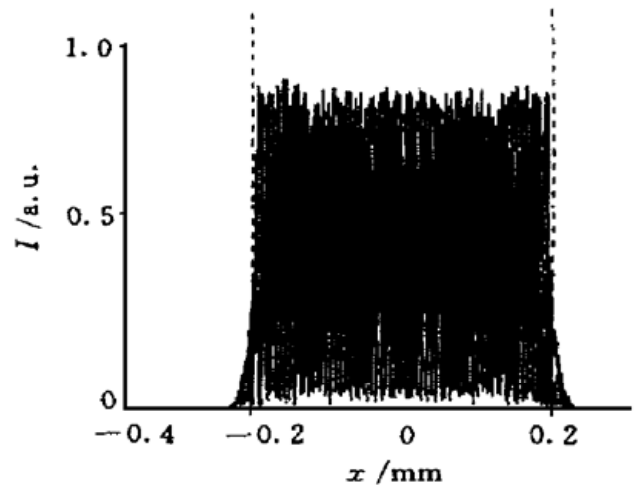


图 5 楔角偏差为 $\delta_{m1} = \Delta\alpha_{m1}/\alpha_{m1} = 2\%$
其他参数同图 3 的沿 x 方向的一维焦斑强度分布
的数值计算结果

Fig. 5 The 1D intensity distribution along the x direction at the focus, the calculation parameters are the same as those in Fig. 3, except that $\delta_{m1} = \Delta\alpha_{m1}/\alpha_{m1} = 2\%$, $f = 400$ mm

4.3 讨论

(1) 对取相同参数的小焦斑 SWA 系统, 当各单元楔角偏差均为 $\Delta\alpha_{im} = 2\%$ 时, 作数值计算, 其光强分布如图 5 所示, 图中两虚线标定的范围是几何光学计算的焦斑尺寸。焦斑边缘的大尺度强度起伏消失了, 不均匀性得到明显改善。同时干涉条纹变密, 使不均匀性降低到约为 4.2%, 能量损失为 3.4%。和实验测量结果符合得很好。

(2) 测量结果中没有出现数值计算中细密的多光束干涉条纹, 是因为现有 CCD 相机的分辨率达不到显示细密干涉条纹的程度。测量结果中方形焦斑边缘没有出现单元衍射调制的大尺度强度起伏, 是因为加工 SWA 时留有微小的楔角偏差, 使各单元焦斑彼此稍微错开微小距离, 从而有效地抑制了大尺度强度起伏, 和有楔角偏差的理论分析结果是一致的。

参 考 文 献

1 Chen Wannian, Wang Shunsen, Chen Bin *et al.*. Cylinder lenses array line focus system for X-ray laser

- experiments. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1991, **11**(9): 829~ 833 (in Chinese)
- 2 D. M. Villeneuve, G. D. Enright, H. A. Baldis. Novel laser line focus geometry applied to X-ray lasers. *Opt. Commun.*, 1991, **81**(1, 2): 54~ 58
 - 3 Deng Ximing, Liang Xiangchun, Chen Zezun *et al.*. Uniform illumination of large targets using a lens array. *Appl. Opt.*, 1986, **25**(3): 377~ 381
 - 4 Lui Zhongyong, Cai bangwei, Lü Baida. Perpendicular segmented wedge arrays used to obtain a uniform square focus spot of continuously variable size. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1996, **A23**(8): 702~ 706 (in Chinese)
 - 5 Zheng Jianzhou, Cai Bangwei, Lü Baida *et al.*. Experimental study of two-dimensional orthogonal segmented wedge array optical system applied to uniform illumination of large focal spot, *Chinese J. Lasers*(中国激光), 1997, **A24**(11): 1008~ 1012 (in Chinese)
 - 6 Cai Bangwei, Lü Baida, Liu Zhongyong *et al.*. Production of a segmented wedge array system for laser line focus. *Chinese J. Lasers*(中国激光), 1995, **A22**(6): 430~ 434 (in Chinese)

Production of Two-dimensional Orthogonal Segmented Wedge Array Optical System Applied to Uniform Irradiation of Small Focal Spot

Zheng Jianzhou

(Department of Physics, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050091)

Cai Bangwei Lü Baida

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

Abstract The key factors for successfully experiment are the optimum design of the system parameter and improved precision of fabrication, when the two-dimensional orthogonal segmented wedge array (SWA) optical system is used to generate a uniform laser focal profiles on the target with focus width of several hundred microns and a high energy utilization factor. A nine-element small-focal-spot crossed SWA system was successfully fabricated with optimum design of the system parameter and strict control precision of fabrication. The focal-spot characteristics are measured.

Key words small-focal-spot, the precision of fabrication, orthogonal segmented wedge array, derivations of wedged angles