

文章编号 : 1003-501X(2006)03-0082-06

# X 射线组合透镜近焦点处的三维聚焦性能研究

乐孜纯<sup>1</sup>, 张 明<sup>1</sup>, 梁静秋<sup>2</sup>, 刘 恺<sup>1</sup>, 董 文<sup>1</sup>, 王 亢<sup>1</sup>

(1. 浙江工业大学 信息工程学院, 浙江 杭州 310032;

2. 中国科学院长春光机物理所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130031)

**摘要 :** X 射线组合透镜是一种利用折射效应对 X 射线聚焦成像的新型元件。本文结合衍射理论和统计学理论, 推导出 X 射线组合透镜近焦点处的三维聚焦强度分布公式, 并以此为基础对 X 射线组合透镜的结构参数进行设计。计算得出了 PMMA、Si、Al 三种材料的 X 射线组合透镜在不同工作波长下的强度增益、焦斑尺寸和焦深等聚焦性能指标。并针对 PMMA 材料 X 射线组合透镜, 分析了近焦点处三维聚焦性能随组合透镜结构参数的变化关系, 给出了一种 PMMA 材料 X 射线组合透镜的设计结果。根据设计的组合透镜结构参数, 计算了当 X 射线工作波长为 0.15nm 时, X 射线辐射经过组合透镜后的近焦点处的强度分布。

**关键词 :** X 射线组合透镜; 三维聚焦; 光强分布; X 射线成像系统

中图分类号 : O434.19

文献标识码 : A

## Study of the 3-D focusing performances near focus for the compound X-ray lens

LE Zi-chun<sup>1</sup>, ZHANG Ming<sup>1</sup>, LIANG Jing-qiu<sup>2</sup>,  
LIU Kai<sup>1</sup>, DONG Wen<sup>1</sup>, WANG Kang<sup>1</sup>

(1. College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310032, China;

2. State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,  
the Chinese Academy of Sciences, Changchun 130031, China)

**Abstract :** The X-ray compound lens is a novel refractive X-ray optical device. The authors report their recent theoretical and numerical study of such a device, including the derivations of the three-dimensional intensity distribution near focus based on the diffraction theory and the probability theory. As an example, the three-dimensional focusing performances such as intensity gain, the size of focus and the depth of focus are predicted for PMMA, Si and Al materials. The relationship between the three-dimensional focusing performances and the structural parameters of the PMMA compound X-ray lens is analyzed. And then a PMMA X-ray compound lens is designed. In addition, the numerical applications of the designed PMMA compound X-ray lens are also shown in the present paper for the working wavelength of 0.15nm.

**Key words :** X-ray compound lens; Three-dimensional focusing; Light intensity distributions; X-ray imaging systems

收稿日期 : 2005-07-09; 收到修改稿日期 : 2005-09-26

基金项目 : 国家自然科学基金(10174079)、浙江省自然科学基金(Y104203)资助项目。

作者简介 : 乐孜纯(1965-), 女(汉族), 浙江杭州人, 博士, 教授, 主要从事 X 射线微结构光学器件与诊断系统方面的研究。

E-mail: lzc@zjut.edu.cn

## 引 言

在过去的三十年里,特别是近十五年来,作为 X 射线传播领域中基本要素的 X 射线光学元件发展迅速,其作用和意义引起了科学界及工业界的广泛关注和兴趣。为了实现 X 射线束的聚焦、成像和色散,人们先后研制了掠入射 X 射线全反射镜<sup>[1]</sup>、透射式 X 射线波带片<sup>[2]</sup>、X 射线多层膜反射镜<sup>[3]</sup>、X 射线晶体聚焦元件<sup>[4]</sup>、多层膜及晶体 X 射线 Bragg-Fresnel 元件<sup>[5, 6]</sup>。然而,这几种 X 射线光学元件都不适合用在高能 X 射线波段(能量高于 5keV)。近年来大辐射流量及高亮度的第三代同步辐射线束的长足进展,以及与之相关的高分辨率诊断技术研究,对高能 X 射线波段的 X 射线光学元件的需求越来越迫切。

X 射线组合透镜是 Snigirev<sup>[7]</sup>在 1996 年提出的一种新型 X 射线光学元件,采用多个单片折射单元组合的方法来缩短焦距,并采用低原子序数材料来减小 X 射线辐射损耗。与其它 X 射线光学元件相比,X 射线组合透镜有许多优点,如不需要折转光路、高温稳定性好且易冷却、结构简单紧凑、对透镜表面粗糙度要求低等,可望在同步辐射线束预聚焦、成像系统、校准装置、低发射同步辐射源的电子束诊断、衍射及荧光分析、高分辨 X 射线微探针技术等方面获得广泛应用。由于 X 射线组合透镜的这些优点和应用前景,它一经提出便获得了广泛的兴趣和关注。对该组合透镜的理论方法、制作技术以及实验系统的研究报道相继出现<sup>[8-13]</sup>。我们也在国家自然科学基金的资助下开展了该组合透镜的设计理论方法和 LIGA 制作技术的研究<sup>[9, 14-16]</sup>。在此基础上,考虑到 X 射线组合透镜在 X 射线成像系统中的应用,本文侧重研究了 X 射线组合透镜在近焦点处的三维聚焦性能。

X 射线组合透镜的一个重要应用领域是高能 X 射线成像系统,若要将 X 射线组合透镜实际应用于成像系统,则应更加深入地了解 X 射线组合透镜的成像特性,特别是焦点附近的三维光强分布,这对于 X 射线成像系统像接收平面的设计十分重要。目前,我们尚未见到其他研究者关于此方面研究工作的报道。本文将给出作者在 X 射线组合透镜三维聚焦性能方面的一些研究结果。

## 1 X 射线组合透镜近焦点处的三维聚焦性能

图 1 为一种由双凹折射单元组成的聚焦 X 射线组合透镜的结构简图。其中,  $R$  为双凹折射单元的凹面半径,  $t$  和  $d$  分别为折射单元边缘和中心的厚度,  $D(r)$  为折射单元的厚度函数<sup>[17]</sup>。当组合透镜的厚度尺寸远小于其焦距时(在绝大多数情况下该近似条件成立),可将 X 射线组合透镜看作一个衍射屏。根据 X 射线波段强吸收的特点,综合考虑 X 射线折射和吸收效应的共同作用,定义由  $N$  个折射单元组成的 X 射线组合透镜的衍射屏函数为  $H_N(r) = [\tau(r) \cdot A(r)]^N$ 。其中,  $\tau(r)$  代表折射效应作用下 X 射线通过折射单元的透射系数;而  $A(r)$  代表在吸收效应作用下 X 射线辐射通过折射单元的衰减系数。 $\tau(r)$  和  $A(r)$  可分别表示为

$$\tau(r) = \exp\left[i\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)(t - \delta d)\right] \exp\left(-i\frac{2\pi\delta r^2}{\lambda R}\right) \quad (1)$$

$$A(r) = \exp\left[-\frac{4\pi\beta D(r)}{\lambda}\right] = \exp\left(-\frac{4\pi\beta d}{\lambda}\right) \exp\left(-\frac{4\pi\beta r^2}{\lambda R}\right) \quad (2)$$

式中  $\delta$  和  $\beta$  分别为 X 射线波段光学常数的折射系数和吸收系数,  $\lambda$  代表波长。将(1)式<sup>[9]</sup>和(2)式<sup>[9]</sup>代入 X 射线组合透镜的衍射屏函数定义式,得到:

$$H_N(r) = C_1 \exp\left(-\frac{4\pi\beta N r^2}{\lambda R}\right) \exp\left(-i\frac{2\pi\delta N r^2}{\lambda R}\right) \quad (3)$$

其中  $C_1 = \exp\left(-\frac{4\pi\beta d N}{\lambda}\right) \exp\left[i\frac{2\pi}{\lambda}(t - \delta d)N\right]$

利用基尔霍夫积分公式,在菲涅耳近似条件下,当一束平面单色辐射射向折射单元时,像空间( $\rho, z$ )点的复振幅可被表示为

$$U(\rho, z) = \iint_{H_N} H_N(r) \exp\left(\frac{ikr^2}{2z}\right) \exp[-ik(p_1 x + q_1 y)] dx dy \quad (4)$$

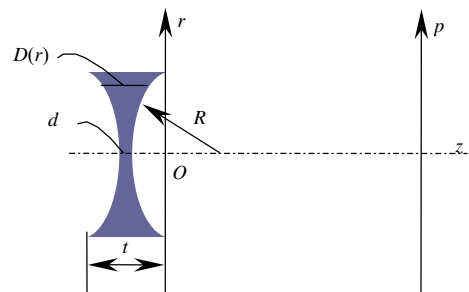


图 1 一种 X 射线组合透镜的结构简图

Fig.1 Scheme of a compound X-ray lens

将直角坐标表达式(4)转换为极坐标表示,代入(3)式,并利用贝赛尔函数的性质:

$$\begin{cases} J_n(\chi) = \frac{i^{-n}}{2\pi} \int_0^{2\pi} \exp(i\chi \cos \alpha) \exp(in\alpha) d\alpha \\ \frac{d}{dx} [\chi^{n+1} J_{n+1}(\chi)] = \chi^{n+1} J_n(\chi) \end{cases} \quad (5)$$

可得:

$$U(\rho, z) = C_1 \int_0^\infty \exp\left(-\frac{4\pi\beta N r^2}{\lambda R}\right) \exp\left[i \frac{\pi r^2}{\lambda} \left(\frac{1}{z} - \frac{2\delta N}{R}\right)\right] J_0\left(\frac{2\pi}{\lambda z} r \rho\right) r dr \quad (6)$$

对于上述结构的 X 射线聚焦组合透镜,其焦距可表示为  $f = R/2N\delta$ ,因此像空间( $\rho, z$ )点的复振幅和光强度分布可分别写成:

$$U(\rho, \Delta z) \cong C_1 \int_0^\infty \exp\left(-\frac{4\pi\beta N r^2}{\lambda R}\right) \exp\left(i \frac{\pi r^2}{\lambda f^2} \Delta z\right) J_0\left(\frac{2\pi\rho}{\lambda f} r\right) r dr \quad (7)$$

$$I(\rho, \Delta z) \cong |C_1|^2 \left| \int_0^\infty \exp\left(-\frac{4\pi\beta N r^2}{\lambda R}\right) \exp\left(i \frac{\pi r^2}{\lambda f^2} \Delta z\right) J_0\left(\frac{2\pi\rho}{\lambda f} r\right) r dr \right|^2 \quad (8)$$

式中  $\Delta z = f - z$ , 表征光轴方向离焦的距离。

由(8)式可知,光强分布的轴向性能和横向性能并非相互独立,而是相互影响、相互制约的。并且与 X 射线组合透镜的工作波长、透镜材料和透镜结构参数有关。由于(8)式的数学推导非常复杂,为了简化计算,同时足够精确地评价 X 射线组合透镜近焦点处的三维聚焦性能,我们对像空间焦点附近横向和轴向光强分布分别计算和分析,并利用统计学理论中的原点矩概念来表征焦点附近横向和轴向光强分布特性。

当仅考虑焦平面的光强分布,即横向光强分布时,亦即当  $\Delta z = f - z = 0$  时,(7)式简化为

$$U(\rho, 0) = C_1 \int_0^\infty \exp\left(-\frac{4\pi\beta N r^2}{\lambda R}\right) J_0\left(\frac{2\pi\rho r}{\lambda f}\right) r dr \quad (9)$$

利用零阶贝塞尔函数定义式  $J_0(z) = \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k \frac{z^{2k}}{2^{2k} (k!)^2}$ , 得到:

$$U(\rho, 0) = \frac{C_1}{2} \int_0^\infty P(t) \left\{ 1 - \frac{\alpha^2 t}{4} + \frac{\alpha^4 t^2}{2^4 \cdot 2^2} \cdots \right\} dt \cong \frac{C_1}{2} (M_0 - \frac{\alpha^2}{4} M_1 + \frac{\alpha^4}{64} M_2) \quad (10)$$

其中

$$\alpha = \frac{2\pi\rho}{\lambda f}, P(t) = \exp\left(-\frac{4\pi\beta N t}{\lambda R}\right), M_n = \int_0^\infty P(t) t^n dt \quad (11)$$

$M_n$  代表 X 射线组合透镜结构函数  $P(t)$  的  $n$  阶原点矩。由此,得到焦平面归一化光强分布近似表达式:

$$I_N(\rho, 0) = 1 - \frac{\alpha^2}{2} \left(\frac{M_1}{M_0}\right) \quad (12)$$

与此相似,当仅考虑光强分布的轴向分量,即当观察点取在光轴上(亦即  $\rho=0$ )时,(7)式简化为

$$U(0, \Delta z) = C_1 \int_0^\infty \exp\left(-\frac{4\pi\beta N r^2}{\lambda R}\right) \exp\left(i \frac{\pi r^2 \Delta z}{\lambda f^2}\right) r dr \quad (13)$$

利用幂函数展开式  $\exp(x) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^n}{n!}$ , 得到:

$$U(0, \Delta z) \cong \frac{C_1}{2} \left[ M_0 + \frac{i\pi\Delta z}{\lambda f^2} M_1 + \frac{1}{2} \left(\frac{i\pi\Delta z}{\lambda f^2}\right)^2 M_2 \right] \quad (14)$$

因此,轴向光强的归一化近似表达式为

$$I_N(0, \Delta z) = 1 - \nu^2 \left[ \frac{M_2}{M_0} - \left(\frac{M_1}{M_0}\right)^2 \right] \quad (15)$$

式中  $\nu = \frac{\pi\Delta z}{\lambda f^2}$ 。对于本文所述的 X 射线组合透镜结构函数,计算其零阶、一阶和二阶原点矩,得到:

$$M_0 = \frac{\lambda R}{4\pi\beta N}, M_1 = \left(\frac{\lambda R}{4\pi\beta N}\right)^2, M_2 = 2\left(\frac{\lambda R}{4\pi\beta N}\right)^3$$

将其代入(12)式和(15)式,最终得到:

$$\begin{cases} I_N(\rho, 0) = 1 - \frac{2\pi\delta^2 N}{\lambda R \beta} \rho^2 + \dots \\ I_N(0, \Delta z) = 1 - \frac{\delta^4 N^2}{R^2 \beta^2} (\Delta z)^2 + \dots \end{cases} \quad (16)$$

(16)式分别给出了像空间焦点附近横向和轴向归一化光强分布的计算式。下面根据该式对 X 射线组合透镜近焦点处的三维聚焦性能作一些定性的分析。由(16)式可知，无论像空间的横向(焦平面)光强分布还是其轴向光强分布，均与 X 射线组合透镜包含的折射单元个数( $N$ )，折射单元凹面半径( $R$ )以及组合透镜材料的光学常数( $\delta, \beta$ )相关。X 射线组合透镜包含的折射单元个数越多，折射单元凹面半径越小，组合透镜材料的光学常数中的折射因子和吸收因子之比越大时，焦平面处聚焦性能越好；而与此同时，组合透镜的焦深变小，亦即像接收平面的位置容许误差减小。因此，在 X 射线组合透镜的设计过程中，应根据 X 射线成像系统的要求，综合考虑焦点附近横向和轴向的光学性能来设计 X 射线组合透镜的材料和结构参数，以期达到最佳设计结果。由此可见，研究 X 组合透镜的三维聚焦性能对于设计 X 射线成像系统，特别是 X 射线共焦成像系统十分有意义。

## 2 X 射线组合透镜近焦点处三维聚焦性能的数值计算

### 2.1 X 射线组合透镜的材料和结构参数确定

当 X 射线辐射能量高于 5keV 时，比较材料光学常数的折射系数和吸收系数，显示低原子序数材料比较适合制作 X 射线组合透镜。制作 X 射线组合透镜较常用的材料主要有铝(Al)、硅(Si)、碳(C)等材料，以及一些 X 射线光学常数适合的有机材料。此外，当 X 射线组合透镜被用于聚焦时，还应该考虑其聚焦效率  $E$  和焦点的强度增益  $G$ 。其中，聚焦效率  $E$  是指从 X 射线组合透镜射出的 X 射线束的有效半径与焦点有效半径的比值。而焦点的强度增益  $G$  则是指使用 X 射线组合透镜与不使用任何聚焦元器件相比较所获得的强度增益。针对本文所述的 X 射线组合透镜结构，光束的有效半径可用下式求出：

$$r_{\text{eff}} = 0.5 \int_{-\infty}^{\infty} [I(r)/I(0)] dr \quad (17)$$

当 X 射线从组合透镜后端面射出时，其强度为  $I(r) = \exp(-8\pi\beta Nd/\lambda) \exp[-8\pi\beta Nr^2/(\lambda R)]$ ，而焦点处的强度则由公式(16)表示，根据聚焦效率的定义和公式(17)得到：

$$E = r_{\text{eff}(s)} / r_{\text{eff}(f)} \cong \delta/2\beta \quad (18)$$

而焦点的强度增益为

$$G = \exp(-8\pi\beta Nd/\lambda) [r_{\text{eff}(s)} / r_{\text{eff}(f)}] \quad (19)$$

由于在我们对 X 射线组合透镜的制作中，主要采用 LIGA 和准 LIGA 三维微制作技术，而不像国外采用精密钻孔技术，因此组合透镜折射单元的中心厚度  $d$  可以制作得趋近于零。在我们的 X 射线组合透镜设计中将折射单元的中心厚度设计为零，即  $d=0$ 。但需要注意的是，由于参数  $d=0$ ，在 X 射线组合透镜的实际制作中，其中心处难免会有过度刻蚀现象发生。本文综合考虑材料特性要求和制作技术的可行性，选择了有机材料 PMMA、硅(Si)和铝(Al)材料来制作 X 射线组合透镜。根据上述理论方法，对不同 X 射线工作波长和不同参数情况下，PMMA 材料、硅(Si)材料和铝(Al)材料 X 射线组合透镜的聚焦效率和强度增益进行了计算，计算结果在表 1 中给出。

从表 1 中列出的计算数据可以看出，在上述三种材料中，PMMA 材料 X 射线组合透镜可以获得更大的焦点强度增益。另外，从上述三种材料的计算结果都可以看出，随着工作波长的减小(亦即 X 射线辐射能量的增高)，焦斑变小，也就是说聚焦性能变好。但同时焦深变短，亦即对 X 射线成像系统像接收平面的位置容差要求更严格。因此，对 X 射线组合透镜的设计应根据系统要求，综合考虑近焦点处三维聚焦性能来设计 X 射线组合透镜的材料和结构参数。

针对 PMMA 材料，根据文中给出的理论方法，对不同结构参数的 X 射线组合透镜近焦点处的三维聚焦性能进行模拟计算。计算结果在 2.2 节中给出。

表 1 PMMA 材料、硅(Si)材料和铝(Al)材料 X 射线组合透镜的聚焦性能计算结果

( 结构参数：双凹折射单元，折射单元半径  $R=400\mu\text{m}$ ，折射单元中心厚度  $d=0$  )  
Table1 Focusing performances of the double-concave compound X-ray lens for PMMA, Si and Al,  
the calculation is made for  $R=400\mu\text{m}$  and  $d=0$

Materials for the compound X-ray lens	Working wavelength /nm	Numbers of the elementary lens	Intensity gain	Focal spot / $\mu\text{m}$	Depth of the focus /mm
PMMA	0.15	20	235	1.03	11
	0.08	40	954	0.49	4.8
	0.04	100	4619	0.19	1.6
Si	0.15	20	22	2.44	62.5
	0.08	40	71	1.34	35.0
	0.04	100	351	0.54	11.3
Al	0.15	20	28	2.08	45.4
	0.08	40	93	1.10	23.8
	0.04	100	326	0.53	11.0

2.2 PMMA 材料 X 射线组合透镜的聚焦性能

图 2 给出了根据上述理论方法得出的、PMMA 材料 X 射线组合透镜焦点附近横向和轴向归一化光强分布图。该组合透镜的主要参数为：工作波长 $\lambda=0.15\text{nm}$ ，折射单元个数  $N=40$ ，折射单元凹面半径  $R=400\mu\text{m}$ ，折射单元中心厚度  $d=0$ 。从图 2 中可以看出，该 PMMA 组合透镜的焦斑尺寸(强度分布两零点之间距离)约为  $0.73\mu\text{m}$ ，焦深约为  $11\text{mm}$ 。

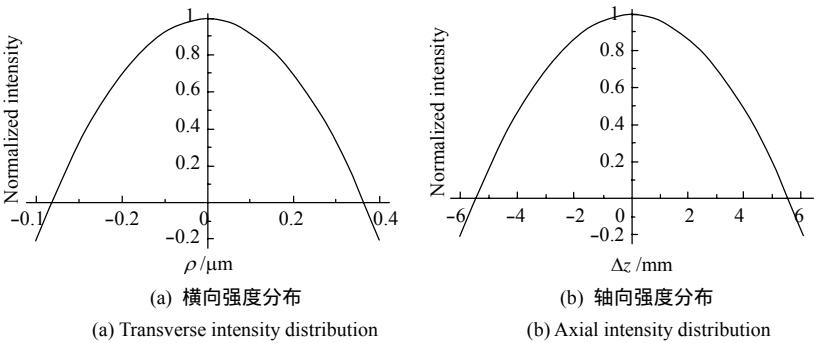


图 2 PMMA 材料 X 射线组合透镜的归一化强度分布

Fig.2 Normalized intensity distribution for PMMA compound X-ray lens

为了更加清晰地了解 X 射线组合透镜焦点附近横向和轴向归一化光强随组合透镜结构参数的变化关系，针对工作波长 $\lambda=0.15\text{nm}$  的 PMMA 材料 X 射线组合透镜，计算了横向归一化光强分布随组合透镜的

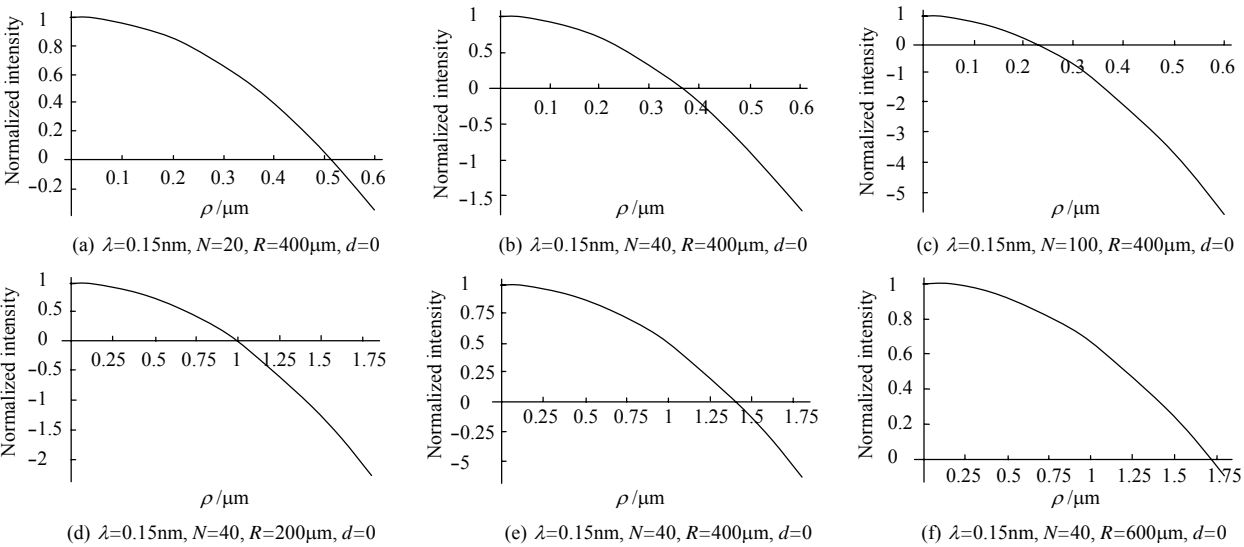


图 3 归一化横向强度分布随 X 射线组合透镜的结构参数变化曲线

( 3(a), 3(b), 3(c)为随  $N$  的变化曲线；3(d), 3(e), 3(f)为随  $R$  的变化曲线 )

Fig.3 Normalized transverse X-ray intensity distribution varies with the structure parameter  $N$  in Fig. 3(a), 3(b), 3(c) and with the structure parameter  $R$  in Fig. 3(d), 3(e), 3(f).

折射单元个数  $N$  以及折射单元凹面半径  $R$  的变化结果,并在图 3 中给出其变化曲线。从图 3 中可以看出,随着折射单元个数  $N$  的增加以及折射单元凹面半径  $R$  的减小,焦斑尺寸减小,因而聚焦性能得到了改善。

### 3 结 论

X 射线组合透镜的一个重要应用领域是高能 X 射线成像系统,若要将 X 射线组合透镜实际应用于成像系统,研究焦点附近的三维光强分布是非常重要的。本文结合衍射理论和统计学理论推导得出 X 射线组合透镜近焦点处的三维聚焦强度分布公式,并以此为基础对 PMMA 材料的 X 射线组合透镜进行了设计。利用本文的理论方法可以分析近焦点处三维聚焦性能随 X 射线组合透镜各个结构参数的变化关系,并可以对不同的透镜材料、在不同工作波长下的强度增益、焦斑尺寸和焦深等聚焦性能指标进行分析计算。以此为基础改善 X 射线组合透镜的设计。本文的研究结果可应用于基于 X 射线组合透镜的 X 射线成像系统。

#### 参考文献：

- [1] S. AOKI, T. OGATA, S. SUDO, et al. Sub-100nm-resolution grazing incidence soft X-ray microscope with a laser-produced plasma source[J]. **Jpn. J. Appl. Phys**, 1992, **31**(10): 3477-3480.
- [2] A. V. BAEZ. Fresnel zone plate for optical image formatting using extreme ultraviolet and soft X radiation [J]. **J. Opt. Soc. Am**, 1961, **51**(3): 405-409.
- [3] E. SPILLER. Low-loss reflection coating using absorbing materials [J]. **Appl. Phys. Lett**, 1972, **20**(9): 365-367.
- [4] W. Z. CHANG, E. FÖRSTER. X-ray diffractive optics of curved crystals: focusing properties on a diffraction-limited basis[J]. **J. Opt. Soc. Am. A**, 1997, **14**(7): 1647-1653.
- [5] Zichun LE, Shoufu PAN. Application of quantum scattering theory to 2-D focusing multilayer reflection circular zone plate[J]. **Opt. Commun**, 1999, **159**(4-6): 285-292.
- [6] A. SNIGIREV. The recent development of Bragg-Fresnel crystal optics: experiments and applications at the ESRF[J]. **Rev. Sci. Instrum**, 1995, **66**(2): 2053-2058.
- [7] A. SNIGIREV, V. KOHN, I. SNIGIREVA, et al. A compound refractive lens for focusing high-energy X-ray [J]. **Nature**, 1996, **384**(6604): 49-51.
- [8] V. V. PROTOPOPOV, K. A. VALIEV, Theory of an ideal compound X-ray lens[J]. **Opt. Commun**, 1998, **151**(4-6): 297-312.
- [9] Zichun LE, Jingqiu LIANG. A formulation of the performance of the compound X-ray refractive lenses[J]. **J Opt. A: Pure and Applied Optics**, 2003, **5**(4): 374-379.
- [10] A. SNIGIREV, V. KOHN, I. SNIGIREVA, et al. Focusing high-energy x rays by compound refractive lenses [J]. **Appl. Opt**, 1998, **37**(4): 653-662.
- [11] J. T. CREMER, M. A. PIESTRUP, H. R. BEGUIRISTAIN, et al. Large aperture compound lenses made of lithium[J]. **Rev. Sci. Instrum**, 2003, **74**(4): 2262-2266.
- [12] C. G. SCHROER, B. BENNER, T. F. GÜNZLER, et al. High resolution imaging and lithography with hard x rays using parabolic compound refractive lenses [J]. **Rev. Sci. Instrum**, 2002, **73**(3): 1640-1642.
- [13] S. BOHIC, A. SIMIONOVICI, A. SNIGIREV et al. Synchrotron hard X-ray microprobe: fluorescence imaging of single cells[J]. **Appl. Phys. Lett**, 2001, **78**(22): 3544-3546.
- [14] Jingqiu LIANG, Zichun LE, Liangqiang PENG, et al. The study on the compound X-ray refractive lens using LIGA technique [J]. **Proc. of SPIE**, 2005, **5641**: 48-55.
- [15] Zichun LE, Kai LIU, Jingqiu LIANG. A method based on diffraction theory for predicting 3-D focusing performance of compound refractive X-ray lenses [J]. **Chinese Optics Letters**, 2005, **3**(3): 184-186.
- [16] 乐孜纯, 梁静秋. 金属高能 X 射线聚焦组合透镜[P]. 中国专利: ZL 02 1 48417.1, 2005.  
LE Zi-chun, LIANG Jing-qiu. The compound X-ray lenses with metallic materials for high energy X-rays[P]. Chinese Patent: ZL 02 1 48417.1, 2005.
- [17] J. W. GOODMAN. **Introduction to Fourier Optics** [M]. New York: McGraw-Hill, 1996.