

平面圆孔微通道板用于X射线聚光的理论预测

赵大春^{1,2} 陈波¹ 刘鹏^{1,2} 张宏吉¹

¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 微通道板(MCP)在X射线的会聚成像方面有视场大、重量轻、对装调精度要求低等优点。基于全反射理论,研究了平面圆孔MCP对X射线的聚光特性,计算了MCP的像面光照度增益和点扩散函数与微通道板结构参数之间的关系。使用TracePro软件对直径为25 μm的圆孔MCP的聚光效果进行了仿真,仿真结果与计算结果基本吻合。结果表明,MCP的相对光照度增益与光源距离 l 近似成正比,而与MCP的最大孔径无关,当光源距离为110 mm时,相对光照度增益大约可达到18倍。进一步研究了MCP离轴、俯仰、倾斜等装调误差对像面光斑的影响,结果表明,MCP的离轴对像面光斑影响很小;而角度偏差将影响光斑的位置和形状。

关键词 X射线光学; 微通道板; 相对光照度增益; TracePro仿真

中图分类号 O435.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0934002

Theoretical Prediction of Flat Circular-Channel MCP Performance for Focusing X-Rays

Zhao Dachun^{1,2} Chen Bo¹ Liu Peng^{1,2} Zhang Hongji¹

¹Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Micro channel plate (MCP) used in X-ray focusing and imaging has such advantages as larger field of view, lower weight, and lower sensitivity to device alignment. Based on the X-ray total reflection theory, the focusing properties of flat circular-channel capillary arrays are discussed, and the theoretical calculation of the relative gain and point spread function (PSF) on focal plane against the parameters of MCP is presented. The calculated results are verified via TracePro software, through which the focusing performance of MCP with 25 μm circular-channel diameter is simulated. Both of the model calculation and the simulation suggest that the relative gain of the MCP is nearly proportional to the source distance l , while independent on the maximum aperture of the MCP. When the source distance is 110 mm, the relative gain can reach about 18. Furthermore, the performance of MCP with misalignment of off-axis and tilt is discussed, which suggests that the off-axis of MCP barely influence the focal spot while the tilts influence the location and shape of the spot.

Key words X-ray optics; micro channel plates; relative gain; TracePro simulation

OCIS codes 340.7480; 080.2740; 080.4298; 230.7380

1 引言

为了满足空间探测计划的要求,在X射线光学系统中需要一类能够收集光辐射并将其准直或聚焦的光学

收稿日期: 2015-02-12; 收到修改稿日期: 2015-05-20

基金项目: 国家自然科学基金(10878004/A03)

作者简介: 赵大春(1990—),女,博士研究生,主要从事短波光学的收集以及成像等方面的研究。

E-mail: zixuan9003@163.com

导师简介: 陈波(1961—),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事软X射线-极紫外波段光学和空间光学等方面的研究。

E-mail: chenb@ciomp.ac.cn(通信联系人)

器件^[1]。由于X射线独特的光学特性,一般的折射光学系统和正入射光学系统很难实现这一功能,因此对X射线进行会聚或成像的器件大多基于衍射理论,如X射线波带片^[2];或全反射理论,如Kirkpatrick-Baez (KB)型光学系统^[3]、Wolter型光学系统^[4]等。X射线波带片在2.2~4.4 nm波段内成像效果良好,但是不适用于波长更短的波段,而且加工工艺难度很高。基于全反射理论的KB型光学系统和Wolter型光学系统,都存在严重的离轴像差,因而视场受到了很大限制,并且系统对装调精度要求很高。除此之外,由于X射线只有在掠入射时反射率才相对较高,因此X射线光学器件的集光面积比反射面的总面积小很多,要增大集光面积就不得不增大器件的尺寸或者组成嵌套结构,随之而来的是重量、成本以及装调难度的增加。

基于全反射理论微通道板(MCP)在用于软X射线和极紫外波段的聚光及成像时,由于其在重量、成本和装调方面的优势,在越来越多的领域中得到了广泛应用和发展^[5]。MCP源于模仿龙虾的视觉系统,由很多微小通道组成阵列,每个通道都垂直于MCP的前后表面^[6-7]。MCP最初作为图像增强器中的放大元件使用^[8-9],首次作为X射线成像器件使用是在1987年,Yamaguchi等^[10]将MCP用于收集等离子体光源发出的X射线并搭建二维成像光谱仪。

MCP结构可以收集X射线辐射并进行会聚或者准直,主要基于光子以小角度掠入射在微通道内壁时产生的全反射原理。对于软X射线,全反射的临界角大约为几十毫弧度,而在硬X射线波段,临界掠入射角大约为几毫弧度。MCP的反射效率主要依赖于通道内壁的表面粗糙度以及掠入射角,对装调精度要求不高,这是由于MCP有很好的结构对称性,在不同方向上的聚焦能力都相同。

本文主要研究平面圆孔MCP,从MCP的聚光原理出发,通过模型计算以及TracePro仿真研究影响MCP聚光能力的几何参数,以及装调误差对像面的影响,为实验研究做铺垫。由于圆孔通道的直径远大于工作波段,因此可以忽略衍射效应,只从几何光学的角度进行研究。

2 圆孔MCP产生会聚光斑的原理

平面MCP的成像特点与平面镜类似,如果忽略各通道之间的间距,微通道阵列会产生与平面反射镜相同的像,只是成像的虚实不同^[11]。会聚光斑位于与光源距MCP的距离相同的位置,即 $l_i = l_s$ 。

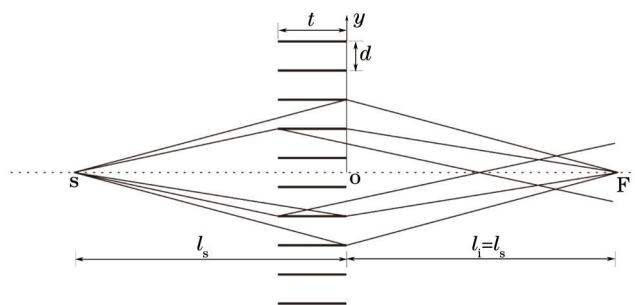


图1 平面MCP的聚光原理示意图

Fig.1 Schematic illustration of ray focusing principle of flat MCP

圆孔MCP的每一个通道内壁只有一部分可以将入射光反射回光轴,当光线入射位置的法线方向在子午面内时,这部分光线将被会聚在光轴上。其他光线经过反射后将偏离光轴而不会被会聚,所有反射光线将在一个

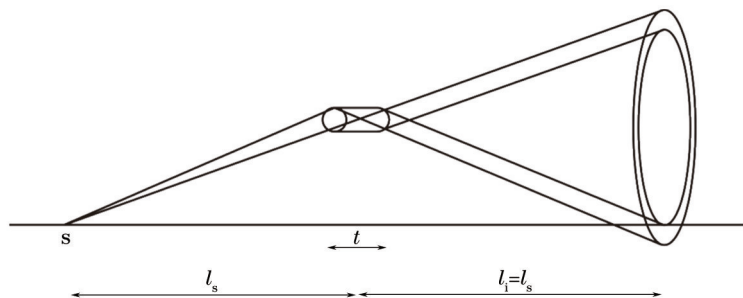


图2 光线在一个通道内的反射示意图

Fig.2 Illustration of reflection in one channel

锥形的环面内传播^[1],如图2所示。

3 圆孔 MCP 聚光能力的计算

MCP的聚光能力与通道的形状、有效反射光线的面积、光线在一个通道内的反射次数以及反射率有关。

3.1 建立计算模型

由于X射线的反射率较低,多次反射之后光线损失更多。为了方便计算,设定通过MCP的每条光线最多只经过一次反射,即最大掠入射角小于MCP的长径比($\gamma_{\max} \leq d/t$)。将MCP内壁的反射率简化,对于铅玻璃材料MCP来说,波长小于0.2 nm时,反射率与掠入射角的关系可以近似为一个阶梯函数:

$$R(\gamma) = \begin{cases} 1 & \gamma \leq \gamma_c \\ 0 & \gamma > \gamma_c \end{cases}, \quad (1)$$

随着波长的增大,材料对光线的吸收作用增强,反射率 R 将随着掠入射角的增大单调递减。当波长大于4 nm时,反射率和掠入射角的关系可以近似为一个线性函数^[5]:

$$R(\gamma) = \begin{cases} 1 - \gamma/\gamma_{\text{cutoff}} & \gamma \leq \gamma_{\text{cutoff}} \\ 0 & \gamma > \gamma_{\text{cutoff}} \end{cases}, \quad (2)$$

式中 γ_{cutoff} 为截止掠入射角,当掠入射角大于该角度时,反射率为0。

对于平面MCP,为了评估MCP对点光源的收集效率,定义光轴为经过点光源并与通道平行的直线,使像面和点光源关于微通道板对称放置,并定义像面的直径为 c 。沿光轴方向的视角如图3所示^[12]。

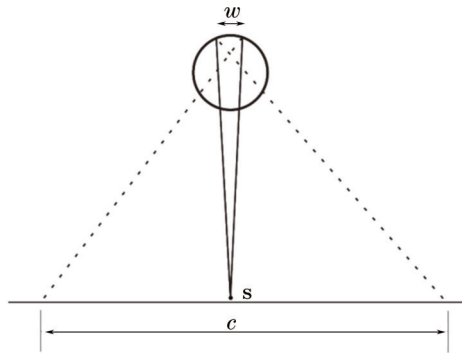


图3 沿光轴方向单个通道的光路示意图

Fig.3 Optical path along one channel of axis direction

为了计算MCP对点光源的会聚效率,定义计算中将要用到的各符号代表的参数含义,如表1所示。

表1 参数含义

Table 1 Structural parameters of MCP

Description	Symbol
Channel diameter	d
Channel thickness	t
Channel spacing	s
Focal plane diameter	c
Distance to MCP from source	l_s
Critical grazing incidence angle	r_c
Maximum semi-aperture of MCP on y scale	r_{\max}

由于MCP的通道之间有一定的厚度,因此引入MCP的开口比,用来定义通道面积与MCP平板面积之比:

$$\eta = \frac{\pi d^2}{4s^2}. \quad (3)$$

MCP接收点光源发出的光子的立体角 $\Omega = \frac{\pi r_{\max}^2}{l_s^2}$,而最大的离轴径向距离 $r_{\max} = l_s \min(\gamma_c, d/t)$,因此,

$$\Omega = \pi \min(\gamma_c, d/t)^2. \quad (4)$$

假如点光源单位时间向 4π 立体角范围内发射 N 个光子, 则经 MCP 反射后像面的光通量为^[12]

$$\phi_{\text{focal}} = \frac{N}{4\pi} \Omega \eta ER, \quad (5)$$

式中 R 为通道的平均反射率, E 为通道的反射效率。

3.2 MCP 的反射效率计算

MCP 每个通道的内壁只有一小部分对焦面的会聚光斑有贡献, 入射在这部分区域之外的光线经过反射后将偏离在直径为 c 的焦面之外。因此需要计算这部分可以有效反射的面积 a 。

考虑 MCP 众多通道中的一个。圆孔的内壁部分只有一小段长度为 w 的圆弧可以将光线反射到焦面上直径为 c 的区域, w 可以通过几何关系求出, 如图 3 所示。

$$w \approx cd/4r, \quad (6)$$

因此可以将光线反射到焦面的通道面积为

$$a = cd^2/4r, \quad (7)$$

这部分面积占整个通道面积的比例为

$$b = \frac{a}{\pi(d/2)^2} = \frac{c}{\pi r}. \quad (8)$$

这部分入射光线仍然不可能全部反射到光轴形成会聚光斑, 如图 4 所示, 存在一部分光线未经反射直接贯穿 MCP 的通道而偏离光轴, 因此有必要计算被反射的光线占入射到面积 a 区域内光线的比例 β 。同样只考虑 MCP 的一个通道, 则 β 可以用两个角度的比值表示^[12], 如图 5 所示。

$$\beta \approx \frac{\theta_2}{\theta_1} = \frac{\frac{r}{l_s - t} - \frac{r}{l_s}}{\frac{r}{l_s - t} - \frac{r - d}{l_s - t}} = \frac{tr}{dl_s}, \quad (9)$$

因此, MCP 的通道反射效率可以通过下式计算:

$$E = b\beta = \frac{c}{\pi r} \frac{tr}{dl_s} = \frac{ct}{\pi dl_s}, \quad (10)$$

由(5)式得到像面上的光通量为

$$\phi_{\text{focal}} = \frac{N}{4\pi} \pi \min(\gamma_c, d/t)^2 \eta \frac{c}{\pi r} \frac{tr}{dl_s} R = \begin{cases} \frac{N\eta\gamma_c^2 ctR}{4\pi dl_s} & \gamma_c \leq d/t \\ \frac{N\eta cdR}{4\pi tl_s} & \gamma_c > d/t \end{cases}. \quad (11)$$

可以看出, 当 $\gamma_c \leq d/t$ 时, ϕ_{focal} 随着 d/t 的增大而减小; 而当 $\gamma_c > d/t$ 时, ϕ_{focal} 随着 d/t 的增大而增大。因此当 $\gamma_c \approx d/t$ 时, 点光源经 MCP 反射后在像面上的光通量最大, 此时

$$\phi_{\text{focal}} = \frac{N\eta\gamma_c cR}{4\pi l_s}. \quad (12)$$

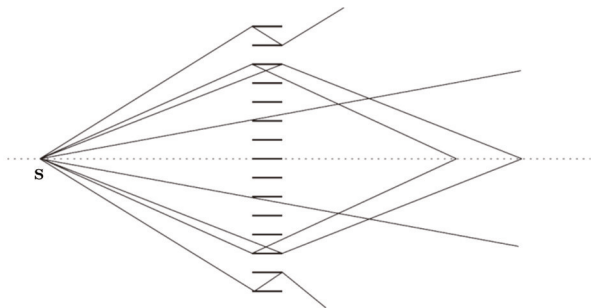


图 4 入射光线经过 MCP 的反射情况

Fig.4 Reflection of incident rays in MCP channels

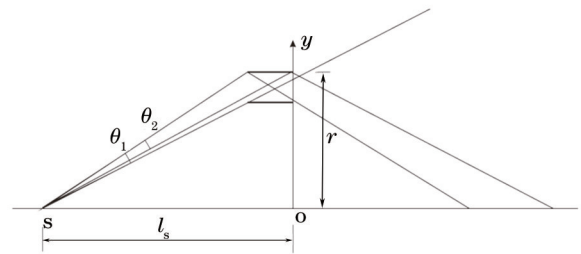


图 5 离轴距离 r 时的反射效率 β 计算示意图

Fig.5 Illustration of reflection efficiency β at a distance r from the axis

3.3 相对光照度增益

通常用相对光照度增益来衡量 MCP 的聚光效果。相对光照度增益定义为点光源通过 MCP 进行聚光后的像面光照度与光源直接照射像面产生的光照度的比值^[13-14]。对平面圆孔 MCP 来说,点光源经 MCP 反射后,在 $l_i=l_s$ 处形成的会聚光斑直径为

$$D = \begin{cases} 4\gamma_c t & \gamma_c \leq d/t \\ 4d & \gamma_c > d/t \end{cases} \quad (13)$$

由此得出,要使点光源经过 MCP 后会聚成较小的点光斑,需要尽量减小圆孔的直径以及厚度。

假如一个点光源单位时间内在 4π 立体角范围内发出 N 个光子, MCP 位于距离点光源 l_s 的位置,则像面应位于距离点光源 $2l_s$ 处,假设 MCP 通道的平均反射率为 R ,则点光源经 MCP 反射后在直径为 c 的像面形成的光照度为

$$I = \frac{\phi_{\text{focal}}}{\pi(c/2)^2} \quad (14)$$

光路中没有 MCP,点光源直接照射像面形成的光照度 I_0 为

$$I_0 = \frac{N}{4\pi} \frac{1}{(l_s + l_i)^2} \quad (15)$$

因此,相对光照度增益为

$$I/I_0 = \begin{cases} \frac{16\eta\gamma_c^2 l_s t R}{\pi c d} & \gamma_c \leq d/t \\ \frac{16\eta l_s d R}{\pi c t} & \gamma_c > d/t \end{cases} \quad (16)$$

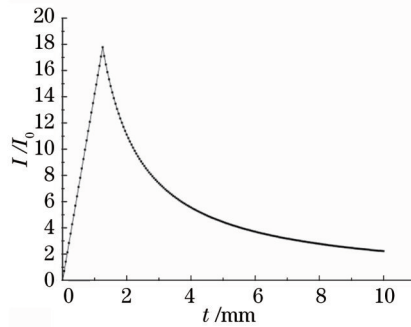


图6 l_s 约为 110 mm 时相对光照度增益随 t 的变化曲线

Fig.6 Relationship between relative gain and t when $l_s=110$ mm

3.4 点扩散函数(PSF)计算

当 $c > 2d, \gamma_c \leq d/t$ 时, MCP 焦面上的光通量为

$$\phi(c) = \frac{N\eta\gamma_c^2 t c R}{4\pi d l_s} \quad (17)$$

由此可以推出 MCP 像面上的 PSF。在像面上离光轴径向距离 r' , 宽度为 δr 的圆环内光通量为

$$\delta\phi(r' = \frac{c}{2}) = \frac{N\eta\gamma_c^2 t R}{2\pi d l_s} \delta r \quad (18)$$

因此, PSF 可以用(18)式除以圆环的面积得到,并除以 I_0 得到 PSF 相对于无 MCP 时的增益。

$$p(r') = \frac{1}{2\pi r' I_0} \frac{\delta\phi(2r')}{dr'} = \frac{4\eta\gamma_c^2 l_s t R}{\pi d r'}, \quad r' > d \quad (19)$$

上文用一种简化的模型计算了平面圆孔 MCP 对点光源的会聚效率以及像面上的相对光照度增益。以上计算只考虑了每条光线经过一次反射的情况,对 MCP 的长径比有一定的限制,在此基础上稍加改进后可以计算出存在多次反射的平面圆孔 MCP 以及曲面 MCP 的聚光效率和点扩散函数。接下来将使用 TracePro 软件对平面圆孔 MCP 的聚光效果进行仿真,以验证上述计算模型的正确性。

4 圆孔 MCP 的仿真分析

为了对上述模型的计算结果进行验证,使用 TracePro 软件对圆孔 MCP 进行仿真^[15-16]。仿真使用的 MCP 厚度为 1.25 mm,圆孔直径为 25 μm ,圆孔间距为 37.5 μm ,点光源距离 MCP 约为 100 mm,光源波长为 1 keV (约 1.2 nm),追迹光线数大于 10^5 。MCP 的建模如图 7 所示。在该波段,铅玻璃 MCP 的临界掠入射角约为 20 mrad,为了与上述计算模型相符,即仿真过程中每条光线最多经 MCP 壁反射一次,设置光源距离以及点光源发散角等参数使得最大掠入射角 $\gamma_{\max} \leq d/t$ 。

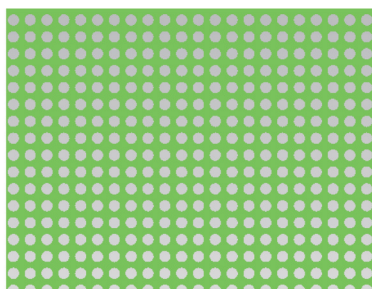


图 7 平面 MCP 局部模型图

Fig.7 Partial model schematic of flat MCP

4.1 相对光照度增益仿真

MCP 的中心位于光轴上,通过模拟点光源经过 MCP 反射后在像面上的光照度,并与点光源直接照射像面产生的光照度相比,可以衡量 MCP 的聚光效果^[17]。上文中的计算表明,相对光照度增益 I/I_0 近似与 MCP 到点光源的距离 l_s 成正比,模拟结果也证实了这一点。计算和仿真结果如图 8 所示。在一定的范围内,相对光照度增益随着 l_s 的增加而增加。这是由于点光源经 MCP 后在像面形成的光照度与 $1/l_s$ 成正比,而点光源直射像面形成的光照度与 $1/l_s^2$ 成正比,因此相对光照度增益近似与 l_s 成正比。

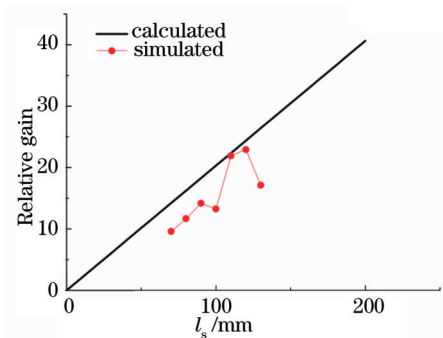


图 8 相对光照度增益随 l_s 的变化

Fig.8 Plot of relative gain against l_s for comparison of calculated and simulated results

4.2 PSF 仿真

点光源经 MCP 反射后在焦面的照度图以及不同离焦位置 l_d 的照度如图 9 所示。

离焦时的照度图呈现规则 and 对称的圆环状。焦面位置的光斑半峰全宽(FWHM)大约是圆孔直径 d 的一半。

根据(19)式计算出 MCP 点扩散函数,与模拟结果的对比如图 10 所示。由图中可以看出,计算结果与仿真结果基本吻合。

以上仿真结果与第 3 节模型计算结果基本吻合,说明该计算模型适用于计算理想的、以一次反射为主 ($\gamma_{\max} \leq d/t$) 的 MCP 聚光效率以及点扩散函数。

4.3 装调误差对聚光效果的影响

通过仿真研究 MCP 的装调误差对聚光效果的影响。使 MCP 的中心分别沿 X 轴和 Y 轴偏离光轴,比较此时的 FWHM,得出结果如图 11 所示。FWHM 的变化范围约为 13 μm ,且水平方向和垂直方向的 FWHM 变化趋势相同,表明 MCP 出现离轴误差时,对像面光斑的 FWHM 影响不大,且光斑的形状可以基本保持不变。

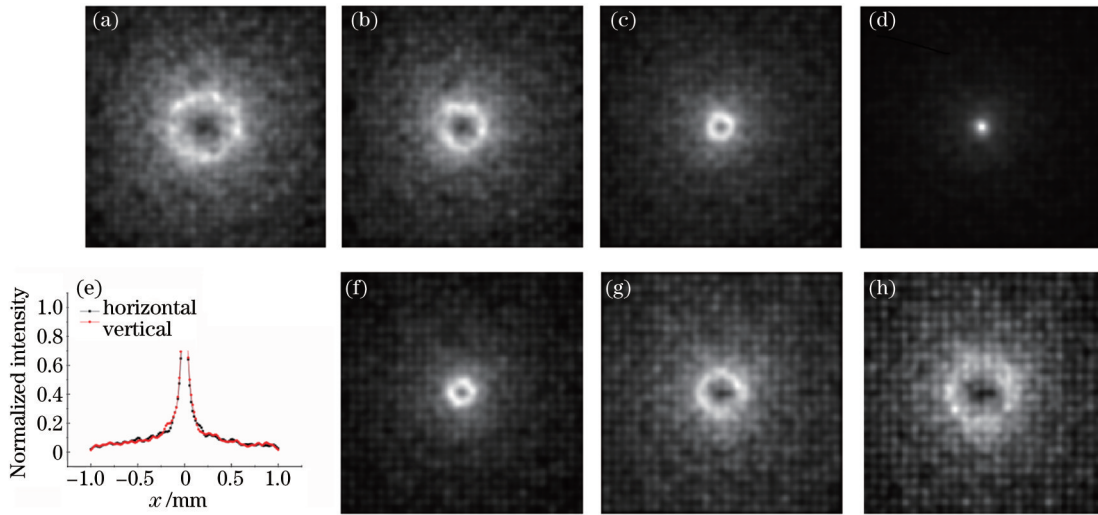


图9 不同离焦位置的像面照度图。

(a) $l_d=70$ mm; (b) $l_d=80$ mm; (c) $l_d=90$ mm; (d) $l_d=100$ mm; (e) $l_d=100$ mm 的 PSF; (f) $l_d=110$ mm; (g) $l_d=120$ mm; (h) $l_d=130$ mm

Fig.9 Simulation of illuminance on image plane at different defocused distances.

(a) $l_d=70$ mm; (b) $l_d=80$ mm; (c) $l_d=90$ mm; (d) $l_d=100$ mm; (e) PSF at $l_d=100$ mm; (f) $l_d=110$ mm; (g) $l_d=120$ mm; (h) $l_d=130$ mm

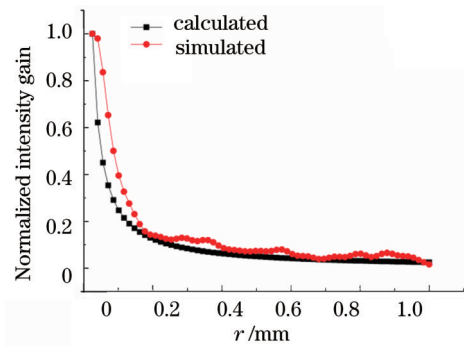


图10 理论计算和仿真的PSF对比

Fig.10 Comparison of calculated and simulated PSF

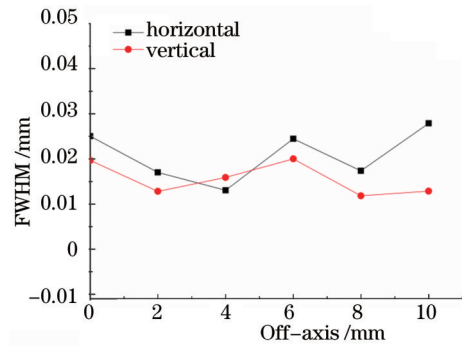


图11 MCP沿Y方向离轴时水平和垂直方向FWHM的变化

Fig.11 Plot of horizontal and vertical FWHM against the off-axis of MCP along Y axis

当MCP沿中心出现俯仰、倾斜的角度偏差时,以MCP沿X轴出现角度偏差为例,由图12可以看出,水平方向的FWHM随着角度偏差增大,近似与偏转角度成正比,而垂直方向的FWHM基本保持不变。相应地,当MCP沿Y轴出现角度偏差时,垂直方向的FWHM会随之增大而水平方向FWHM保持不变。因此,俯仰、倾斜引入的角度偏差会导致像面上的光斑呈现椭圆状,而不是规则的圆环;同时,角度偏差会导致像面上的光斑

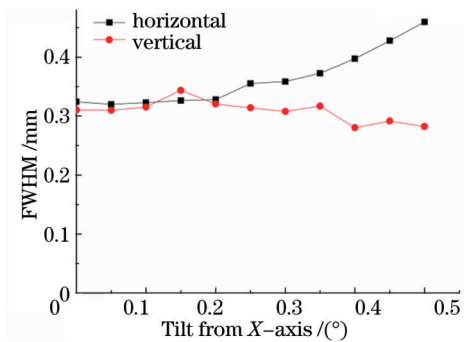


图12 MCP沿X轴偏转时光斑FWHM

Fig.12 Plot of spot FWHM against MCP tilt from X axis

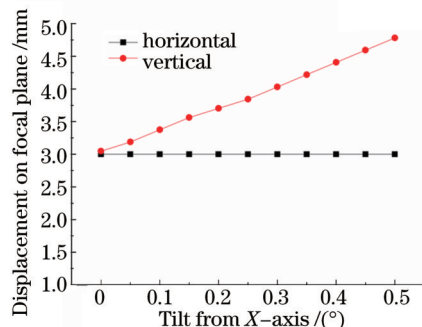


图13 MCP沿X轴偏转时光斑中心位置的偏移

Fig.13 Plot of displacement of spot center against MCP tilt from X axis

位置发生变化,当MCP沿 X 轴偏转时,光斑的中心位置将沿 Y 轴方向线性平移,如图13所示,因此需要将像面适当增大才能观察到这一过程中光斑的移动情况。相应地,当MCP存在 Y 轴偏转时,光斑的中心位置将沿 X 轴方向线性平移。角度偏差 0.5° 将导致水平方向的FWHM增加大约 $140\ \mu\text{m}$ (大约 $5.6d$),同时,光斑将沿垂直方向偏移大约 $1.78\ \text{mm}$ 。

以上结果表明,MCP的离轴位移对像面光斑的位置、FWHM以及形状影响不大;而俯仰、倾斜等角度偏差将导致光斑偏离光轴,同时由于一个方向的FWHM增大而变成椭圆状光斑。

5 结 论

主要研究平面圆孔MCP的聚光效果。首先,建立了简化的MCP模型,对其成像原理、聚光效率、点扩散函数等进行了详细分析。计算结果表明,不同的MCP长径比(d/t)对应不同的光线反射情况,当设定入射光线最多只在MCP内壁反射一次时,像面上的光通量在 $\gamma_c \approx d/t$ 时最大,此时的相对光照度增益最高。同时,圆孔MCP像面上的相对光照度增益近似与点光源距MCP的距离 l 成正比,而与MCP的最大孔径无关。有助于MCP参数的优化设计。

其次,使用TracePro软件对MCP的聚光情况进行了仿真,仿真结果验证了计算结果,证明上述计算模型的可靠性。在此基础上,仿真了MCP的离轴、俯仰以及倾斜误差对像面光斑的影响,研究表明,MCP的离轴位移对光斑影响很小,离轴引起的光斑FWHM变化范围在 $13\ \mu\text{m}$ 以内;而角度偏差将使光斑偏离光轴,同时呈现椭圆形状,椭圆光斑长轴的FWHM近似与角度偏差成正比。

参 考 文 献

- 1 P Gorenstein. Focusing X-ray optics for astronomy[J]. X-Ray Optics and Instrumentation, 2010, 2010: 109740.
- 2 R Hudec, A Inneman, L Pina, *et al.*. Lobster eye X-ray telescope: Recent progress[C]. SPIE, 2003, 4851: 578-586.
- 3 R Hudec. Kirkpatrick-Baez (kb) and Lobster eye (le) optics for astronomical and laboratory applications[J]. X-Ray Optics and Instrumentation, 2010, 2010: 139148.
- 4 M E Bruner, R C Catura, J E Harvey, *et al.*. Design and performance predictions for the goes sxi telescope[C]. SPIE, 1998, 3442: 192-202.
- 5 A Peele, W Zhang. Lobster-eye all-sky monitors: A comparison of one- and two-dimensional designs[J]. Review of Scientific Instruments, 1998, 69(7): 2785-2793.
- 6 J R P Angel. Lobster eyes as X-ray telescope[J]. The Astrophysical Journal, 1979, 233: 364-373.
- 7 Ni Qiliang. Optimization for spatial resolution and count rate of a far ultraviolet photon-counting imaging detector based on induced charge position-sensitive anode[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(8): 0804001.
倪启良. 远紫外光子计数成像探测器分辨率及计数率的优化[J]. 光学学报, 2014, 34(8): 0804001.
- 8 Ni Qiliang. Research on the performance of EUV micro channel plates as photon counting detector[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(11): 1104001.
倪启良. 极紫外微通道板光子计数成像探测器性能研究[J]. 光学学报, 2013, 33(11): 1104001.
- 9 Xiao Tiqiao, Xie Honglan, Deng Biao, *et al.*. Progresses of X-ray imaging methodology and its applications at Shanghai Synchrotron Radiation Facility[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(1): 0100001.
肖体乔, 谢红兰, 邓彪, 等. 上海光源X射线成像及其应用研究进展[J]. 光学学报, 2014, 34(1): 0100001.
- 10 P Von Ballmoos, H Halloin, J Evrard, *et al.*. CLSIRE: First light for a gamma-ray lens[J]. Experimental Astronomy, 2006, 20(1): 253-267.
- 11 A Peele, B E Allman, A Cimmino, *et al.*. Square capillary X-ray optics[C]. SPIE, 1994, 2279: 257-268.
- 12 S W Wilkins, A W Stevenson, K A Nugent, *et al.*. On the concentration, focusing and collimation of X-rays and neutrons using microchannel plates and configurations of holes[J]. Review of Scientific Instruments, 1989, 60(6): 1026-1036.
- 13 H N Chapman, K A Nugent, S W Wilkins. X-ray focusing using square channel capillary arrays[J]. Review of Scientific Instruments, 1991, 62(6): 1542-1561.
- 14 H N Chapman, K A Nugent, S W Wilkins. X-ray focusing using cylindrical-channel capillary arrays[J]. Applied Optics, 1993, 32(31): 6316-6332.

- 15 Liu Xiuping, Li Xiaoping, Sun Haifeng. X-ray pulsar signal de-noising using lifting scheme wavelet[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(3): 0304002.
刘秀平, 李小平, 孙海峰. 提升小波的X射线脉冲星信号降噪[J]. 光学学报, 2013, 33(3): 0304002.
- 16 Sun Tianxi, Liu Hehe, Liu Zhiguo, *et al.*. Application of confocal micro X-ray fluorescence technique based on polycapillary X-ray lens in analyzing medicine with capsule[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(1): 0134001.
孙天希, 刘鹤贺, 刘志国, 等. 毛细管X光透镜共聚焦微束X射线荧光技术在胶囊类药品分析中的应用[J]. 光学学报, 2014, 34(1): 0134001.
- 17 Li Xu. Researches on the Image Properties of Extrem Ultraviolet Optical System Based on Square-Hole MCP[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2011: 14-30.
李 旭. 方孔微通道板极紫外波段成像性能研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2011: 14-30.

栏目编辑: 吴秀娟