

方孔微通道板结构缺陷对成像质量的影响

李 旭^{1,2} 何 飞¹ 李 达^{1,2} 陈 波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 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要 方孔微通道板(MCP)作为一种新型 X 射线波段光学成像系统,因其具有大视场、高分辨率、能够收集大量辐射并将其准直或聚焦等优点,越来越多地受到了人们的关注。但在 MCP 制作和加工过程中,难免会使微通道产生一定的结构缺陷,对其成像质量造成严重的影响。利用 Tracepro 软件建立了标准方孔 MCP 模型和具有不同结构缺陷的 MCP 模型,并基于蒙特卡罗(MTC)光线追迹方法对这些模型进行模拟成像。分别讨论了 Taper 型、Twist 型和 Nonsquare 型结构缺陷对成像质量的影响。然后以溴钨灯作为光源,在可见光波段对实验室现有的 4 块方孔 MCP 进行了成像实验,所得实验结果与模拟结果基本吻合,验证了模拟结果的正确性。模拟和实验结果表明,以上 3 种结构缺陷均会造成十字像中央亮斑面积增大、强度降低等情况,所不同的是 Taper 型结构缺陷会使会聚光线分裂成两条,而这两组平行的会聚线相交形成 4 个焦点,其能量要比单一聚焦能量衰减很多,从而对成像质量影响更大。该研究为今后研究曲面 MCP 和基于 MCP 的 X 射线光学系统奠定了重要基础。

关键词 成像系统; X 射线光学; 微通道板; 光线追迹; 结构缺陷

中图分类号 TH744; O434 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201232.1011001

Influence of Structural Defect of Square-Hole Micro Channel Plate on Imaging Quality

Li Xu^{1,2} He Fei¹ Li Da^{1,2} Chen Bo¹

(¹ Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China
² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract As a new X-ray imaging system, more and more attention has been paid to the square-hole micro channel plate (MCP) which has the properties of large field of view, high resolution, and collection of enormous radiation to be collimated or focused. However, during the fabrication and process of the MCP, it is hard to avoid generating structural defects in the square holes which greatly influence the imaging quality. The standard square-hole MCP model and MCP models with different structural defects are first set up with the software Tracepro, and then the simulated images of these models are simulated by ray trace method of Monte Carlo. Then the influences of structural defects of Taper type, Twist type and Nonsquare type on imaging quality are analyzed. Based on above simulations, the four samples of MCP are imaged in visible bands with a Nickel-Tungsten source. The experimental results are consistent with the simulated images, proving that the simulations are correct. The experimental results show that, all of the three defects can result in area increase and intensity decrease of the central bright spot with expect that the third defect can divide the focused rays into two beams which forms four focus and makes the degradation of energy more serious and thus more seriously influence the imaging quality compared with the other two defects. This paper provides an important basis for the future researches on curved MCP and X-ray optical system based on MCP.

Key words imaging systems; X-ray optics; micro channel plate; ray tracing; structural defect

OCIS codes 110.7440; 340.7480; 040.7480; 230.1150

收稿日期: 2012-04-12; 收到修改稿日期: 2012-05-11

基金项目: 国家自然科学基金(10878004)资助课题。

作者简介: 李 旭(1983—),男,博士研究生,主要从事空间短波段光学成像技术方面的研究。E-mail: lixu_ciomp@163.com

导师简介: 陈 波(1961—),男,博士,研究员,主要从事空间短波段光学技术方面的研究。E-mail: chenb@ciomp.ac.cn

(通信联系人)

1 引 言

目前,X射线天文学已经成为天体物理学中的一个重要分支^[1]。传统X射线光学元件包括基于衍射效应的波带片^[2,3],利用反射原理的Wolter反射镜^[4~8]和X射线毛细管^[9,10]等。虽然它们有着较高的光能传输效率和空间分辨率,但由于其较小的视场以及不菲的造价限制了这两种光学元件在空间探测领域中的应用。因此,在X射线光学系统中需要一种大视场、高分辨率、能够收集大量辐射并将其准直或聚焦的光学器件。由于X射线只在掠入射时反射效率最高,通常X射线光学器件的集光面积比反射面的总面积小很多,要想增大集光面积就不得不增加器件的外形尺寸,尺寸增大,重量和成本也就随之增加了。为了解决上述光学器件的种种缺陷,人们逐渐把目光投向了微通道板(MCP)。1978年Land^[11]从龙虾眼睛的聚光原理中得到启示,提出可以用类似龙虾眼结构的光学元件来聚焦X射线。次年,Angel^[12]用原本作为电子倍增器的MCP进行了X射线聚焦和成像实验,验证了Land的观点,但由于受到当时MCP制备工艺的限制,其实验结果不甚理想。进入20世纪90年代之后,Priedhorsky等^[13]将平面MCP压制成球面(模仿龙虾眼结构),用其会聚X射线获得了成功。自此,MCP作为一种新型X射线光学元件在越来越多的领域中得到了应用和发展^[13~17]。与其他X射线成像系统相比,MCP具有以下几点优势:大视场、高分辨率、结构紧凑、重量轻和成本低等。目前这种成像系统大多采用方孔MCP,其效率可以比传统圆孔

MCP提高一个数量级。方孔MCP的微通道尺寸非常小,通常只有微米量级。因此在方孔MCP制作和加工过程当中,就难免会使微通道产生各种结构缺陷,对成像系统的成像质量造成严重的影响。本文主要研究了方孔MCP微通道内不同结构缺陷对其成像质量的影响,为方孔MCP成像系统的进一步研究提供一定的理论依据。

2 方孔MCP成像原理

方孔MCP根据其外观形状分为平面和球面两种。平面MCP可将一点源成像在MCP的另一侧等距离处;球面MCP可将平行光线聚焦或将一点源发出的光线变成平行光。文中所提到的MCP均为平面方孔MCP。平面方孔MCP是由大量规则正方形空心通道阵列紧密排列而成。X射线入射到MCP孔壁上时,当入射角接近或小于全反射临界角时,光线发生全反射现象。而当入射角大于全反射临界角时,光线被孔壁吸收,不参与成像。为了解释方便,首先引入理想的一维MCP模型来说明平面MCP的聚焦原理。简单的一维方孔MCP模型如下:1)当入射X射线的入射角度达到临界角 γ_c 时,MCP通道壁的反射率为 η ,而当入射角大于临界角时,反射率为0;2)MCP通道开口比例为 ϵ ;3)X射线由点光源发出,且在空间各向同性,至少在MCP有效面积对应的空间范围内各向同性;4)MCP通道是由一族平行直线排列构成,如图1所示;5)在大多数情况下,入射光线在MCP通道内壁只发生一次反射;6)只应用简单几何光学理论。

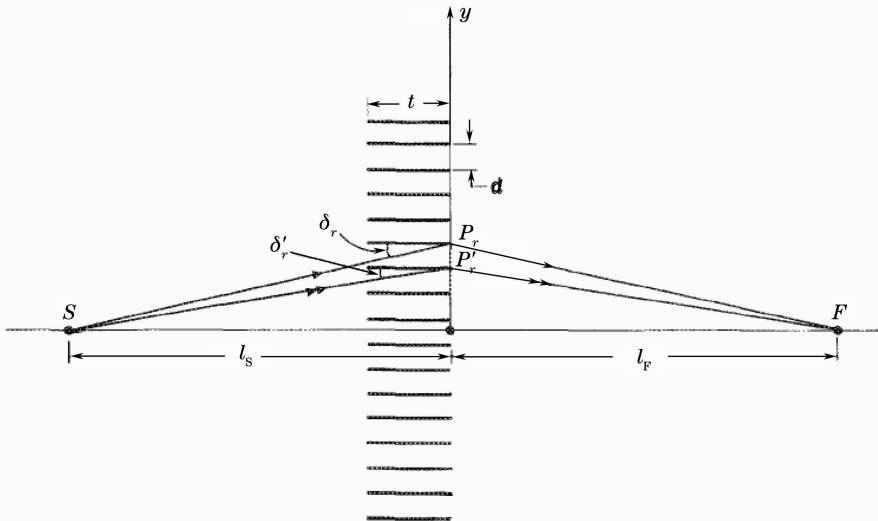


图1 一维平面方孔MCP示意图

Fig.1 Sketch map of one-dimensional square-hole MCP

一般情况下, MCP 厚度相对于 MCP 至光源的距离可以忽略, 由图 1 可知, 当入射光线在孔壁上发生一次反射时, 由反射定律可以得出反射光线将会聚到焦点 F 处, 如果进一步把 MCP 孔壁扩展为平行平面, 则光线将会聚到 F 点垂直于图面的一条直线上。也就是说, 光线发生一次反射时, 会聚点在平行于孔壁的一条直线上。焦距 l_F 近似等于光源至 MCP 的距离 l_S 。这也说明, 平面 MCP 只能进行点对点聚焦。

二维平面 MCP 聚焦原理如图 2 所示。理想情况下, 即 MCP 通光孔是规则的正方形或矩形, 内壁为理想的光滑平面, MCP 对点源所成的像为十字像。

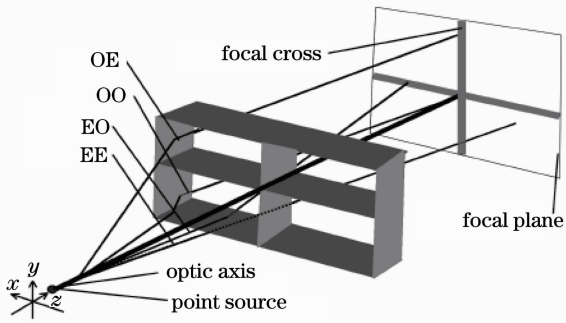


图 2 平面方孔 MCP 二维聚焦原理图

Fig. 2 Schematic diagram for two-dimensional flat square-hole MCP focusing

参与聚焦的光线可以分为以下几类：

1) 不经过 MCP 孔壁反射, 直接入射到像面的光线, 这部分光线将在像面上形成本底噪声, 如图 2 中的 EE 光。

2) 经过 MCP 孔壁水平面反射一次, 或在同一孔壁的两个平行水平面之间反射两次的光线, 这类光线将聚焦在像面上十字线的水平线上, 如图 2 中的 EO 光。

3) 经过 MCP 孔壁垂直面反射一次, 或在同一孔壁的两个垂直水平面之间反射两次的光线, 这类光线将聚焦在像面十字线的垂直线上, 如图 2 中的 OE 光。

4) 经过 MCP 孔壁反射两次的光线, 即分别在水平面和垂直面各反射一次, 这类光线将聚焦在像面上十字线的中心位置, 形成中心亮斑。中心亮斑的强度要远远高于十字线上的强度, 如图 2 中的 OO 光。

2) 和 3) 中光线的会聚原理可以根据一维情况

简单引申得到。下面证明 4) 中光线的会聚特性。如图 2 所示, z 轴为光轴, 平面 MCP 垂直于光轴, 令 MCP 厚度为 d , 方孔边长为 h , 忽略孔壁厚度。光源至 MCP 中心厚度的距离为 l_S , 规定坐标原点为 MCP 厚度中心点。于是光源位置坐标为 $(0, 0, -l_S)$

以图 2 中的 OO 光为例, 假设 OO 光入射到水平孔壁上的坐标为 (x_1, y_1, z_1) , 则入射光线的矢量表达式为

$$\mathbf{r}_i = (x_1, y_1, z_1 + l_S). \quad (1)$$

第一次反射点与垂直孔壁的距离为 Δx 。

根据反射定律可以计算得到第一次反射光线的方向。水平反射面的法线方向为 $(0, 1, 0)$, 计算出反射光线的方向矢量为

$$\mathbf{r}_R = (x_1, -y_1, z_1 + l_S), \quad (2)$$

于是计算出第二反射点的坐标为

$$\left(x_1 + \Delta x, -\frac{y_1}{x_1}\Delta x + y_1, -\frac{z_1 + l_S}{x_1}\Delta x + z_1\right).$$

垂直反射面的法线方向为 $(-1, 0, 0)$, 于是计算出第二次反射光线的方向矢量为

$$\mathbf{r}_{2R} = (x_1 + 2\Delta x, y_1, z_1), \quad (3)$$

最终反射光线的方向矢量为

$$\mathbf{r}_u = \left(-\Delta x, -\frac{y_1}{x_1}\Delta x, -\frac{z_1 + l_S}{x_1}\Delta x\right), \quad (4)$$

联列(3)式和(5)式可以推导出最终反射光线与光轴焦点为 $(0, 0, l_S)$ 。由此证明了在相互垂直的孔壁发生两次反射的光线会聚在十字线的中心。

3 MCP 通道结构缺陷

当 MCP 通道存在结构缺陷时, 则上述四类光线的反射光线不完全聚焦在十字线上, 与理想情况发生偏离, 形成弥散的十字像。为了进一步研究 MCP 通道结构缺陷对其成像质量的影响, 本课题组

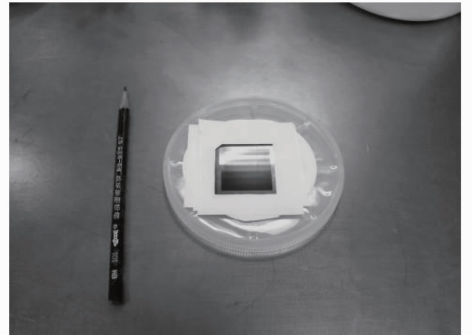


图 3 平面方孔 MCP 实物图

Fig. 3 Picture of flat square-hole MCP

从北京半导体所引进了 4 块平面方孔 MCP, 该 MCP 的内壁表面粗糙度约为 5 nm, 表 1 为方孔

MCP 的各项参数, 图 3 为 MCP 实物图。

表 1 平面方孔 MCP 参数

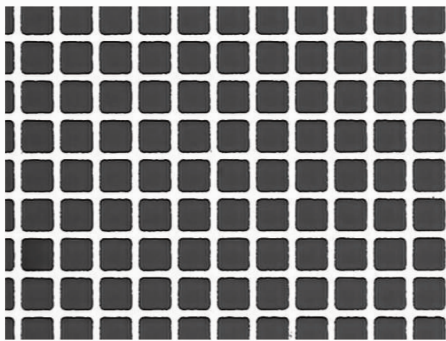
Table 1 Parameters of flat square-hole MCP

	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4
Material	Si	Si	Si	Si
Dimension (mm×mm)	30×30	30×30	30×30	30×30
Hole dimension ($\mu\text{m}\times\mu\text{m}$)	31×31	32×32	32×32	26×26
Wall thickness of hole / μm	9	7	9	7
Length of hole /mm	0.36	0.36	0.36	0.36

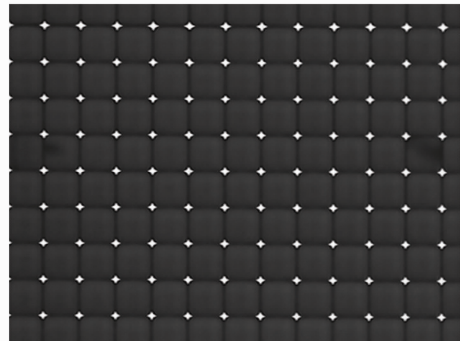
MCP 通道的结构缺陷总体上分为三种类型: Taper 型、Twist 型和 Nonsquare 型。

1) Taper 型

Taper 型结构缺陷是指 MCP 通道内壁厚度不均匀, 从通道入射面到出射面有逐渐变大的趋势, 类似于漏斗型结构, 如图 4 所示。



(a) incident face



(b) exit face

图 4 1 号样品显微图

Fig. 4 Micrograph of sample 1

图 4(a), (b) 分别为 MCP 的入射面和出射面。从图 4 中可以看出, 入射面通道内壁较厚, 而出射面通道内壁由于在加工过程中利用酸性物质刻蚀强度过大, 导致通道内壁相对较薄, 出现各通道之间几乎粘连的情况。

2) Twist 型

Twist 型结构缺陷是指 MCP 微通道相对于通道中心轴产生一定角度的旋转。

3) Nonsquare 型

一个标准的方孔 MCP 其微通道的截面应为正方形, 但在 Nonsquare 型结构当中, 其通道截面出现一定程度的倒角, 为不规则正方形, 如图 5 所示。

从图 5 中可以看出, 4 号 MCP 样品的微通道并不是标准的方形结构, 而是略微趋于圆形, 而且有个别通道在加工过程中刻蚀得不够充分, 导致出现被封堵的现象, 这同样也会给成像质量造成严重的影响。

图 6 为 3 号 MCP 样品显微图, 从图中可以看出, 无论从微通道孔形结构还是从通道内壁的均匀性上来看, 3 号 MCP 都是质量最好的一块, 接近标

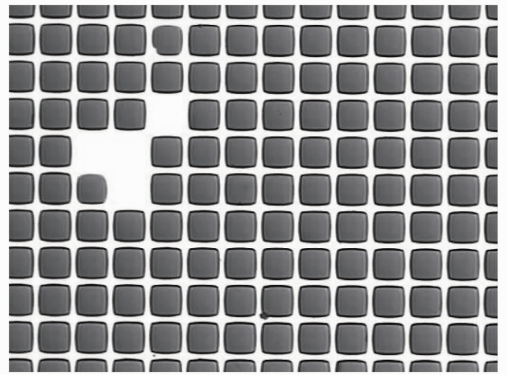


图 5 4 号样品显微图

Fig. 5 Micrograph of sample 4

准方孔 MCP。

4 理论模拟

为了能够更好地研究方孔 MCP 通道内结构缺陷对其成像质量的影响, 利用 Tracepro 软件建立了标准方孔 MCP 模型和具有以上 3 种结构缺陷的 MCP 模型。然后基于蒙特卡罗 (MTC) 光线追迹方法分别对这些模型进行了模拟成像。

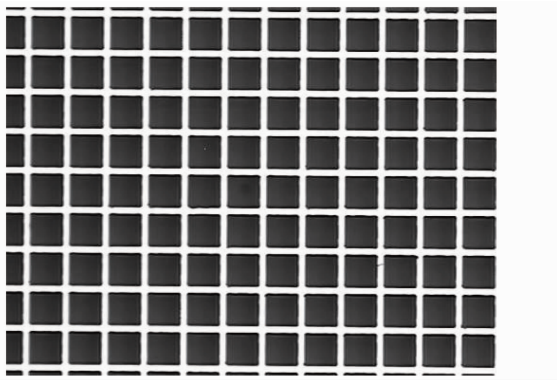


图 6 3号样品显微图

Fig. 6 Micrograph of sample 3

4.1 Tracepro 软件

Tracepro 软件是一种实体模型光学分析软件, 普遍用于照明系统、光学分析、辐射分析以及光度分析当中。具有强大的光学分析功能和数据转换能力。Tracepro 软件可将光线引入模型, 在模型的每个物理表面或交点处, 每条光线都遵从吸收、反射、折射、衍射和散射定律。当光线在实体中沿不同路径传播时, Tracepro 软件能够跟踪每条光线以及计算光线的吸收、镜面反射、折射、衍射和散射能量。因此, 可以通过 Tracepro 软件建立方孔 MCP 物理模型并设置合理的光源参数, 设定相应的系统材料和反射表面性能参数, 用于分析 MCP 的成像结果。

4.2 建立模型

建立平面方孔 MCP 模型, 参数如下: 方孔 MCP 尺寸设定为 $30\text{ mm} \times 30\text{ mm}$; 微通道尺寸为 $30\text{ }\mu\text{m} \times 30\text{ }\mu\text{m}$; 孔壁厚度为 $10\text{ }\mu\text{m}$; MCP 厚度为 0.36 mm 。光源到 MCP 的距离和接收面到 MCP 的距离均为 350 mm , 光源尺寸设定为直径 1 mm 的发散光源, 发散角为 4.9° , 这样可以保证发散光束覆盖整个 MCP。追迹光线设定为 10^5 条。为了减小程序的运算量, 在这里将通道内壁的材料属性设定为反射, 暂不考虑由内壁表面粗糙度所造成的散射影响。模型结构如图 7 所示。

在已建立的标准方孔 MCP 模型结构的基础上, 又分别建立了具有 Taper 型、Twist 型和 Nonsquare 型通道结构的 MCP 模型。

1) Taper 型通道结构

将微通道出射面的尺寸由原来的 $30\text{ }\mu\text{m}$ 增加到 $39\text{ }\mu\text{m}$, 其所处的坐标系不变。这样出射面通道壁的厚度为 $1\text{ }\mu\text{m}$, 接近 1 号 MCP 样品的情况。图 8 为放大后的单个 MCP 微通道。

2) Twist 型通道结构

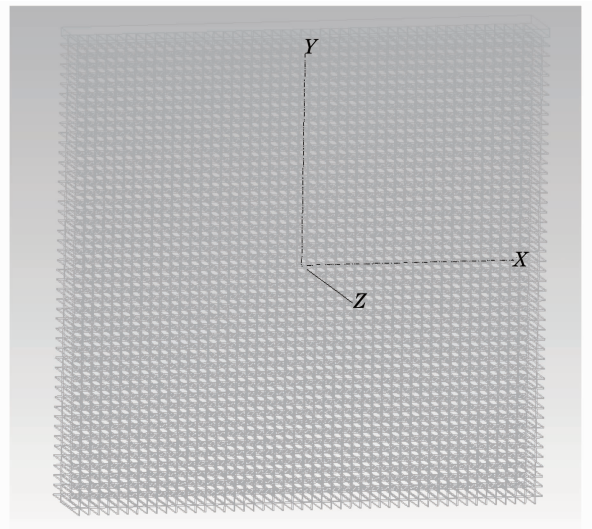


图 7 方孔 MCP 模型示意图

Fig. 7 Model of square-hole MCP

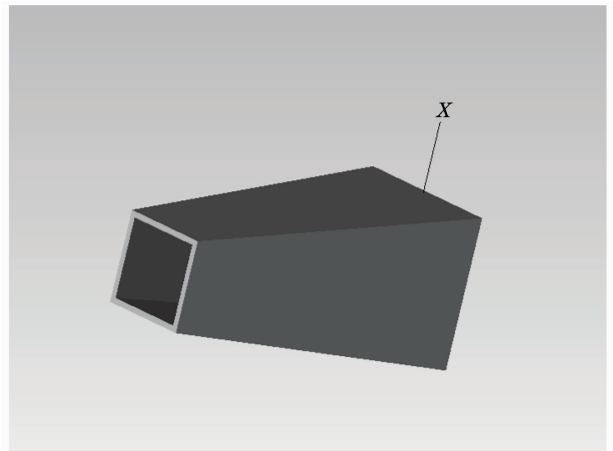


图 8 Taper 型通道模型

Fig. 8 Channel model of Taper-type

Twist 型通道结构是通过改变出射面所在坐标系坐标轴的旋转角度来实现的, 将旋转角度设定为 10° 。这就相当于微通道出射表面相对于入射表面沿中心轴旋转了 10° , 这样便形成了 Twist 型通道结构。

3) Nonsquare 型通道结构

这种结构的建模过程相对复杂, 因为在 Tracepro 软件当中不能直接将直角设定为倒角形式。因此需要分别建立长方体和圆柱体通道结构, 通过布尔运算取二者的公共部分来获得 Nonsquare 型通道结构。圆柱体的直径要大于通道边长同时小于通道对角线长度, 否则将不会产生相交部分。在 Tracepro 软件中, 如果两种结构体没有相交部分, 运用布尔运算将会导致整个结构体被删除。因此, 在这里将圆柱体的直径设定为 $40\text{ }\mu\text{m}$ 。图 9 为放大

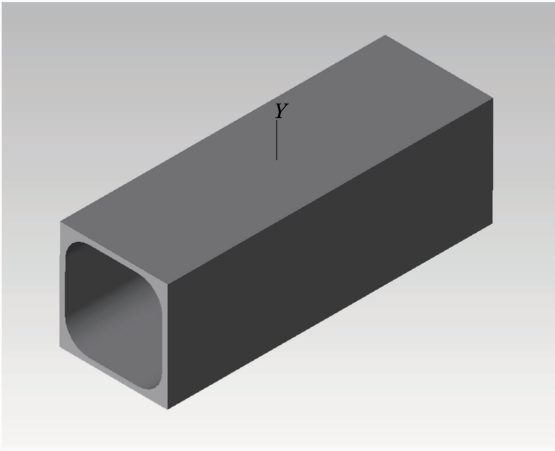


图 9 Nonsquare 型通道模型

Fig. 9 Channel model of Nonsquare-type

后的单个 MCP 微通道。

4.3 光线追迹中的 MTC 算法

MTC 方法是一种以概率统计为理论基础的计算方法。它通常是将所求解的问题转化为一定的概率模型,并利用计算机进行统计模拟或抽样,以此给出所求问题的近似解。所以,MTC 算法又被称为统计模拟方法或统计实验方法。MTC 方法的基本思想是:首先根据实际所要解决的问题建立一个概率模型或随机过程,设定其参数为所求问题的解,然后通过对模型或者是随机过程进行观察或抽样,以此来计算所求参数的统计特征,最后给出所求解的近似值。求解的精确度可以通过估计值的标准误差来表示。

当所求量 x 为随机变量 ζ 的数学期望值 $E(\zeta)$ 时,确定 X 近似值的方法就是对 ζ 进行 N 次抽样实验,由此产生相互独立的 ζ 值序列 $\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_n$,再计算其平均值:

$$\bar{\zeta}_N = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \zeta_n. \quad (7)$$

当 N 充分大时, $\bar{\zeta}_N \approx E(\zeta) = x$, 且其成立的概率 $P(\lim_{N \rightarrow \infty} \bar{\zeta}_N = x) = 1$, 可用 ζ 的平均值作为 x 的近似值。

在方孔 MCP 成像模拟问题当中,利用 MTC 方法的观点是:大量发散的光线组成了进入系统中的光辐射,其中每一条光线的能量和传播路径是确定的(由入射光源的参数确定),光源发射点位置在建立模型时可以设定。某一条光线与方孔 MCP 内壁表面的作用结果(被表面吸收、反射或折射)是随机的,若入射光线在反射表面发生漫反射,其反射方向亦随机。所有这些随机性都是由事先设定好的概率

模型来描述和确定。在光线追迹过程中,跟踪记录每一条光线的传播路径,直到这条光线被反射面吸收或者逸出光学系统。以此类推,通过跟踪大量的入射光线,然后将追迹结果进行平均就可以确定最终像面上的光强分布。

MTC 光线追迹方法不但可以考虑到方孔 MCP 内壁表面的反射特性,如镜面反射、各向异性反射等,而且可以直接识别 MCP 模型内部的几何结构,如重叠、遮挡以及交叉等问题。在定义物理模型中的各个表面时,首先设定材料属性包括折射率、吸收系数、散射因子等。光源属性则是特殊的表面属性,主要用于定义如何发光。MTC 光线追迹方法对大量光线在与通道内壁表面相互作用时所经历的随机路径进行跟踪,是对真实光子相互作用的复现。每条光线的行为依赖于内壁表面的反射、折射、散射和吸收特性,由一组统计学关系来描述。随着被跟踪光线数量的增加,模拟精度也将提高,但对计算机硬件的要求也将提高,计算时间也会增加。

4.4 成像模拟

在已建立模型的基础上,采用 MTC 光线追迹方法分别对标准 MCP、Taper 型、Twist 型和 Nonsquare 型通道结构的 MCP 模型进行了模拟成像,成像结果如图 10~12 所示。

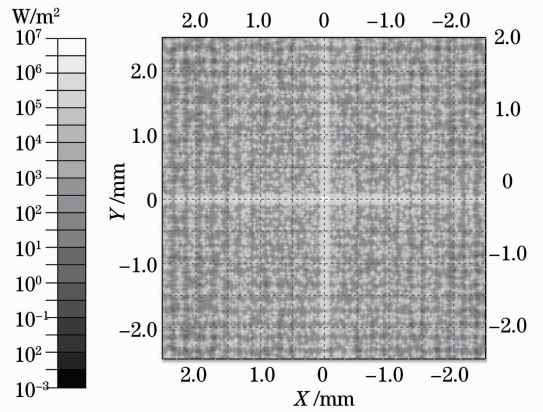


图 10 标准方孔 MCP 模拟结果

Fig. 10 Simulation result of standard square-hole MCP

其中图 10 为标准方孔 MCP 成像模拟结果,为标准十字像。图 11 为 Taper 型通道模拟结果。这种结构的成像结果比较特别,如果 MCP 上大部分微通道从入射面到出射面有逐渐变宽的趋势,那么光线经过系统所形成的会聚线将会分裂成两组,这两组平行的会聚线相交形成 4 个焦点,其能量比单一聚焦中心要衰减很多。这也直接导致了成像系统分辨率的降低。从图 4 可以看出,1 号 MCP 样品就

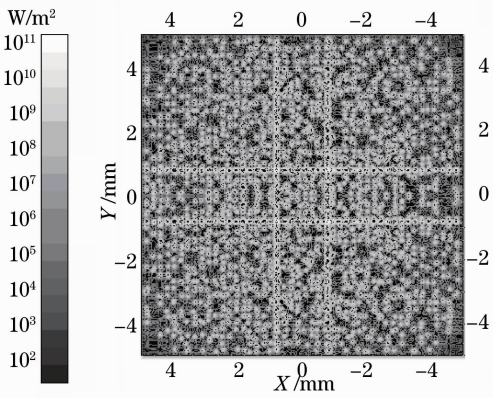


图 11 Taper 型通道模拟结果

Fig. 11 Simulation result of Taper-type channel

属于这种情况。对于 Nonsquare 型和 Twist 型结构缺陷对像质的影响是相同的,即中心聚焦斑扩大,十字臂逐渐扩散,能量降低,图 12 为其成像模拟结果。图 13 为英国 Leicester 大学对以上 4 种通道结构进行理论模拟之后所得到的结果。从图中可以看出,

其模拟结果与本文当中所得到的模拟图像基本吻合,这也验证了本次成像模拟的正确性。需要指出的是以上三种结构缺陷是逐一进行模拟成像的,但在实际情况当中很可能一块 MCP 同时具有以上 3 种结构缺陷,其成像结果将会更加复杂。

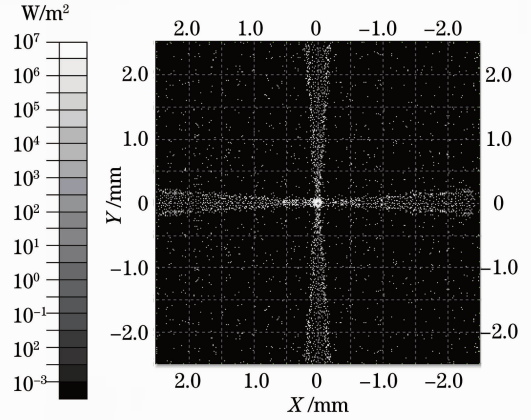


图 12 Nonsquare 型和 Twist 型通道模拟结果

Fig. 12 Simulateion result of Nonsquare-type and Twist-type

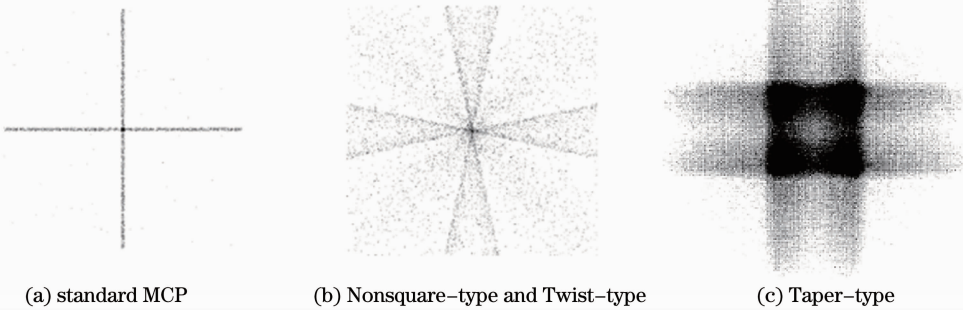


图 13 英国 Leicester 大学模拟成像结果

Fig. 13 Simulation result of Leicester university

5 可见光波段成像实验

为了进一步验证模拟结果的正确性,以溴钨灯配以针孔来模拟点光源,对方孔 MCP 样品进行了可见光波段的成像实验。其中针孔尺寸为 0.7 mm,接收元件为可见光波段 CCD。CCD 接收面积为 36 mm×24 mm,相元尺寸为 8 μm,曝光时间设定为 1/5000 s。针孔到达 MCP 的距离与 CCD 像面到达 MCP 的距离均为 500 mm。对 1~4 号 MCP 样品分别进行了成像实验,图 14(a)~(d)为 1~4 号 MCP 样品的成像结果。

从实验结果可以看出,只有 3 号样品成像质量相对较好,因为其通道形状相对比较标准,这点从 3 号 MCP 样品的显微图中可以看出。在 1 号 MCP

样品的成像结果中,中央焦斑位置出现了四个焦点,与 Taper 型结构缺陷相符合。说明 1 号 MCP 样品存在这种“漏斗型”结构缺陷。2 号和 4 号样品的成像结果与 Nonsquare 型和 Twist 型结构缺陷所产生的影响相吻合,即中心聚焦斑扩大,亮度降低,会聚线逐渐扩散。图 15(a)~(d)分别为以上 4 幅图像的光照度图。

将以上四幅光照度图导入 Matlab 软件,通过拟合计算得到了其光强分布曲线。如图 16(a)~(d)所示,这样便可以根据图像的半峰全宽(FWHM)计算出 MCP 成像系统的分辨率,以此来判断通道结构缺陷对其成像质量的影响。

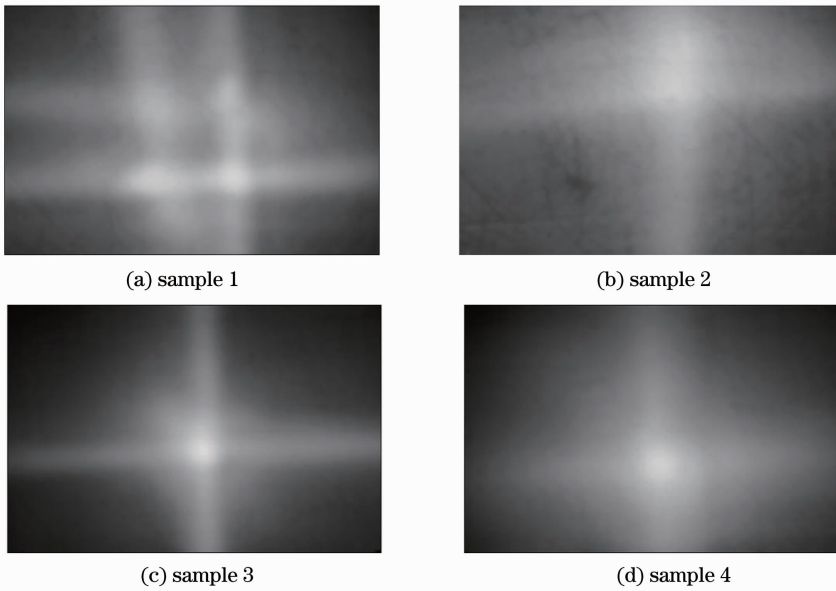


图 14 1, 2, 3, 4 号 MCP 样品成像结果
Fig. 14 Experimental results of MCP sample 1, 2, 3, 4

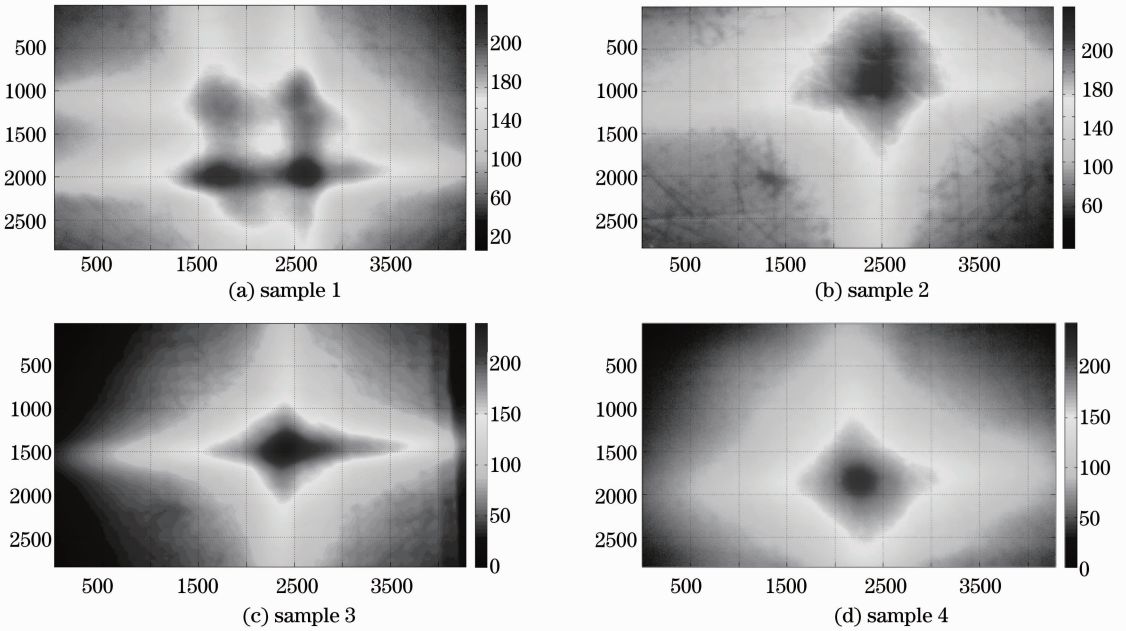


图 15 1, 2, 3, 4 号 MCP 样品成像光照度图
Fig. 15 Illumination pictures of sample 1, 2, 3, 4

从图 16 中可以看出,具有 Taper 型通道结构的 1 号 MCP 样品强度分布曲线为双峰,这会整个光学系统的分辨率造成严重的影响。2 号和 4 号 MCP 样品由于其通道具有另外两种形式的结构缺陷,导致中央亮斑强度下降,信噪比降低。其角分辨率分别为 2.1° 和 1.37° 。相比之下,3 号 MCP 样品的成像质量要稍好一些,其角分辨率约为 0.46° 。

6 结 论

利用 Tracepro 软件建立了标准方孔 MCP 模型和具有不同结构缺陷的 MCP 模型,并基于 MTC 光线追迹方法对这些模型进行了模拟成像。分别讨论了当 MCP 微通道具有 Taper 型、Twist 型和 Nonsquare 型结构缺陷时对成像质量所产生的影响。然后以溴钨灯做为实验光源,在可见光波段对 4 块

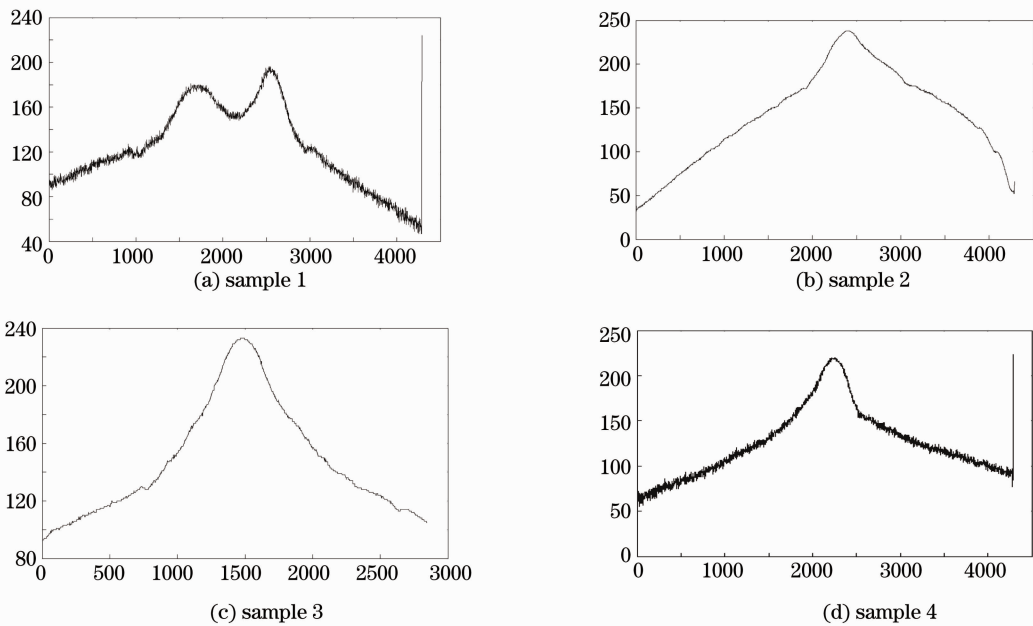


图 16 1, 2, 3, 4 号 MCP 样品强度分布图

Fig. 16 Intensity distributions of sample 1, 2, 3, 4

方孔 MCP 样品进行了成像实验。验证了模拟结果的正确性。从实验所得图像中发现,以上 3 种通道结构缺陷均会造成十字像中央亮斑面积增大,强度降低,这就直接影响了光学系统的成像分辨率。所不同的是对于 Taper 型结构缺陷所造成的影响是使会聚线分裂成两条,而这两组平行的会聚线相交将会形成 4 个焦点,其能量要比单一聚焦能量衰减很多。因此,相对于 Nonsquare 型和 Twist 型结构缺陷而言,Taper 型结构缺陷对方孔 MCP 成像质量的影响更加明显。本文中所得到的结论主要依靠几何光学的相关理论,因此该结论同样适用于 X 射线波段。但在掠入射临界角的确定、通道内壁散射和吸收等方面,可见光与 X 射线有很大的不同。因此,下一步的工作重点是利用合适的光源,在 X 射线波段对方孔 MCP 进行成像实验,进一步对这种光学系统进行研究,为将来的应用打下基础。

参 考 文 献

- 1 Yu Lei, Qu Yi, Lin Guanyu *et al.*. Design and study of an optical system for a far ultraviolet imaging spectrograph in 120~180 nm carried by satellite [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(1): 0112011
于磊, 曲艺, 林冠宇等. 120~180 nm 星载远紫外电离层成像光谱仪光学系统设计与研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(1): 0112011
- 2 Ma Jie, Cao Leifeng, Xie Changchun *et al.*. Fabrication of high aspect-ratio hard X-ray zone plates with supporting structures [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2009, **36**(10): 30~34
马杰, 曹磊峰, 谢常春等. 带支撑结构的大高宽比硬 X 射线

波带片制作 [J]. *光电工程*, 2009, **36**(10): 30~34

- 3 Yi Tao, Dong Jianjun, Zhu Xiaoli *et al.*. Study on the imaging performance of spiral zone plate [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(3): 753~757
易涛, 董建军, 朱效立等. 螺旋波带片成像特性研究 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(3): 753~757
- 4 Li Baoquan, Zhu Guangwu, Lin Huaan *et al.*. The development and status of X-ray imaging telescope [J]. *Chinese J. Space Science*, 2004, **24**(4): 302~311
李保权, 朱光武, 林华安等. 天基 X 射线掠入射式成像望远镜发展现状 [J]. *空间科学学报*, 2004, **24**(4): 302~311
- 5 S. Tsuneta, L. Acton, M. Bruner *et al.*. The soft X-ray telescope for the solar-aission [J]. *Solar Phys.*, 1991, **136**(1): 37~67
- 6 L. Golub. Solar-B X-ray Telescope (XRT) Concept Study Report [R]. NASA/DRD 867MA-001
- 7 D. D. Walker, A. T. H. Beaucamp, R. G. Bingham *et al.*. The precessions process for efficient production of aspheric optics for large telescopes and their instrumentation [C]. *SPIE*, 2003, **4842**: 73~84
- 8 Cui Tiangang, Zhang Hongji, Ma Wensheng *et al.*. Improvements of surface profile measuring device for Wolter type-1 mirror [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(4): 0412007
崔天刚, 张宏吉, 马文生等. Wolter 1 型反射镜面形检测装置的改进 [J]. *光学学报*, 2011, **31**(4): 0412007
- 9 Sun Tianxi, Liu Zhiguo, Li Yude *et al.*. Application of capillary focusing X-ray in obtaining latent fingerprint [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(4): 0434001
孙天希, 刘志国, 李玉德等. 毛细管 X 光会聚透镜在潜指纹提取中的应用 [J]. *光学学报*, 2011, **31**(4): 0434001
- 10 Sun Tianxi, Liu Zhiguo, Li Yude *et al.*. Application of capillary X-ray lens in the identification of plastic evidence [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(5): 0534001
孙天希, 刘志国, 李玉德等. 毛细管 X 光透镜在塑料物证溯源中的应用 [J]. *光学学报*, 2011, **31**(5): 0534001
- 11 M. F. Land. Animal eyes with mirror optics [J]. *Sci. Am.*, 1978, **239**(6): 88~99

- 12 J. R. P. Angel. Lobster eyes as X-ray telescopes [J]. *Astrophys. J.*, 1979, **233**: 364~373
- 13 W. C. Priedhorsky, A. G. Peele, K. A. Nugent. An X-ray all-sky monitor with extraordinary sensitivity [J]. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 1996, **279**(3): 733~750
- 14 V. Grubsky, M. Gertsenshteyn, K. Shoemaker *et al.*. Adaptive lobster-eye hard X-ray telescope with high-angular resolution and wide field of view [C]. *SPIE*, 2007, **6688**: 66880P
- 15 R. Hudec, V. Simon, V. Tichy. Lobster-eye X-ray monitors; astrophysical aspects [J]. *Mem. S. A. It.*, 2012, **83**: 365~369
- 16 R. Hudec, L. Pina, L. Švéda *et al.*. Astronomical X-ray telescopes and monitors of lobster eye type [C]. Proceedings of the Extreme Sky: Sampling the Universe above 10 keV, Otranto (Lecce) Italy, 2009: 13~17
- 17 Vladimir Tichy, Marco Barbera, Alfonso Collura *et al.*. Tests of lobster eye optics for small X-ray telescope [J]. *Baltic Astronomy*, 2009, **18**: 362~368

栏目编辑: 李文喆