

锥形单毛细管高能 X 射线微焦斑透镜模拟表征

李惠泉^{1,2}, 邵尚坤^{1,2}, 孙学鹏^{1,2}, 袁天语^{1,2}, 华陆^{1,2}, 孙天希^{1,2*}¹北京师范大学核科学与技术学院射线束技术教育部重点实验室, 北京 100875;²北京市科学技术研究院辐射技术研究所, 北京 100875

摘要 高能 X 射线微焦斑在微束 X 射线分析技术中具有重要应用。为了获得高能 X 射线微焦斑透镜, 理论设计了基于锥形单毛细管的高能 X 射线微焦斑透镜, 该类锥形毛细管透镜可以把能量为 100 keV 的 X 射线会聚成微焦斑, 焦斑直径和功率密度增益分别在微米和几十量级, 对应的焦距为 5 毫米左右; 并且理论模拟了该类锥形毛细管透镜采用玻璃反射面和金属(纯金)反射面后的特性, 在透镜焦斑处, 采用纯金金属反射面的锥形毛细管透镜的光通量为采用普通硅酸盐玻璃反射面的锥形毛细管透镜的 14.8 倍。模拟结果对锥形单毛细管 X 射线透镜的研制和应用具有指导意义。

关键词 X 射线光学; 锥形单毛细管 X 射线透镜; 高能 X 射线; 微焦斑; 镀膜

中图分类号 O434.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1134019

Simulation and Characterization on Tapered Monocapillary High-Energy X-Ray Lens with Microfocal Spot

Li Huiquan^{1,2}, Shao Shangkun^{1,2}, Sun Xuepeng^{1,2}, Yuan Tianyu^{1,2}, Hua Lu^{1,2}, Sun Tianxi^{1,2*}¹Key Laboratory of Beam Technology, Ministry of Education, College of Nuclear Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;²Institute of Radiation Technology, Beijing Academy of Science and Technology, Beijing 100875, China

Abstract A high-energy X-ray microfocal spot has an important application in high-energy microbeam X-ray analysis. To obtain a high-energy X-ray lens with a microfocal spot, a tapered monocapillary lens was designed in theory. This lens can focus X-ray with an energy of 100 keV onto a micron-scale focal spot with a gain in the focal spot diameter and power density of the order of microns and tens, respectively, and the corresponding focal length is ~5 mm. Furthermore, the characteristics of the lens with a glass and a gold reflecting surface were simulated in theory, respectively. The flux in the focal spot of this X-ray lens with a gold reflecting surface is 14.8 times that with a borosilicate glass surface. The simulation results are helpful in the fabrication and application of such tapered monocapillary X-ray lens.

Key words X-ray optics; tapered monocapillary X-ray lens; X-rays with high energy; microfocal spot; coating

1 引言

高能 X 射线微焦斑在微束 X 射线分析技术中具有重要应用, 因此, 如何利用 X 射线光学器件获得高能 X 射线微焦斑备受大家关注。在众多

的 X 射线光学器件中^[1-11], 基于 X 射线折射效应的 X 射线复合折射透镜能方便得到高能 X 射线微焦斑, 但在研制该类透镜时, 往往需要精密机械加工。本文将采用毛细管 X 射线透镜技术中的单毛细管透镜技术来获得高能 X 射线微焦斑。毛细管 X 射

收稿日期: 2022-03-28; 修回日期: 2022-04-21; 录用日期: 2022-05-06

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFF0701202)、国家自然科学基金(11875087)、北京师范大学博一学科交叉基金(BNWXKJC2121)

通信作者: *stx@bnu.edu.cn

线透镜是基于外全反射原理的光学器件^[12-14]。在毛细管 X 射线透镜应用于微区 X 射线分析中,微区分析的空间分辨取决于焦斑大小,所以透镜焦斑大小成为微区分析的重要参数。如何获得一个高功率密度增益的微焦斑,对毛细管 X 射线透镜的应用至关重要。毛细管 X 射线透镜分为单毛细管透镜和多毛细管整体透镜。传统的多毛细管会聚透镜由几十万根玻璃单毛细管组成^[12],单个毛细管内表面光滑细薄,具有很高的占空比。研究表明,焦斑直径约 30 μm 的多毛细管 X 射线透镜在能量低于 20 keV 时能产生预期的聚焦效果,但是随着 X 射线能量的升高,X 射线在大于全反射临界角的情况下直接穿透薄玻璃壁,出现“halo”效应^[15],这时即使在多毛细管 X 射线透镜的出口端添加 beam stop,也不能消除这些“halo”效应对透镜焦斑尺寸的影响,所以“halo”效应将导致透镜焦斑变大,不利于微焦斑的形成。

为了克服多毛细管透镜在会聚高能 X 射线获得微焦斑时的困难,可以采用单毛细管透镜。以玻璃单毛细管透镜为例,当 X 射线不满足全反射临界角穿过玻璃壁时,能量衰减规律服从指数衰减,经计算可知,100 keV 的 X 射线穿过厚度为 18.5 μm 的硼硅酸盐玻璃体后光强衰减至初始强度的 0.1%,

即大多数 X 射线会被玻璃壁吸收。但是,对于在单毛细管透镜出口端处不满足全反射临界角的 X 射线,由于没有足够厚的玻璃壁作为吸收体,单毛细管透镜出口处不满足全反射临界角的 X 射线会穿过玻璃壁,出现影响焦斑尺寸的“halo”现象。因此在实际实验过程中,可以在单毛细管透镜出口处增加一个 beam stop,即可消除单毛细管透镜出口处不满足全反射临界角的 X 射线对透镜焦斑尺寸的影响。

本文模拟设计了具有小口径的单毛细管高能 X 射线微焦斑会聚透镜,用来聚焦实验室光源,并对所设计透镜的性能进行了理论表征和分析,以期在实验室实现聚焦高能 X 射线。

2 透镜模拟理论基础

X 射线在介质外表面发生全反射时对应的全反射临界角度 θ_c 的表达式为

$$\theta_c = 20.3 \frac{\sqrt{\rho}}{E}, \quad (1)$$

式中: E 为 X 射线能量,单位为 keV; θ_c 的单位为 mrad; ρ 为介质的密度,单位为 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。由于多毛细管透镜产生的“halo”效应(如图 1 所示)不利于微焦斑形成,故采用单毛细管透镜。

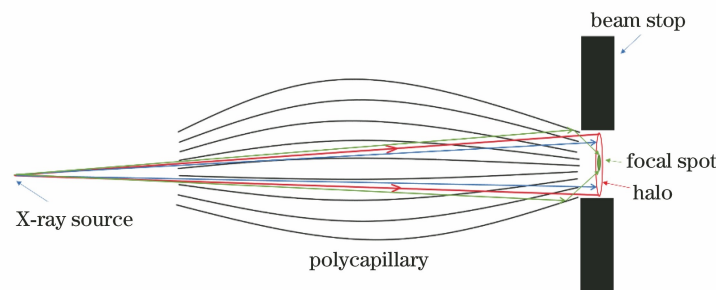


图 1 X 射线穿透多毛细管透镜示意图

Fig. 1 Schematic of X-ray penetrating polycapillary lens

考虑到现有单毛细管 X 射线透镜拉制工艺水平,采用锥形单毛细管实现对高能 X 射线的微焦斑

会聚,如图 2 所示。相比于椭球管和抛物线管,锥形单毛细管的拉制技术要求更低,所以采用锥形单毛

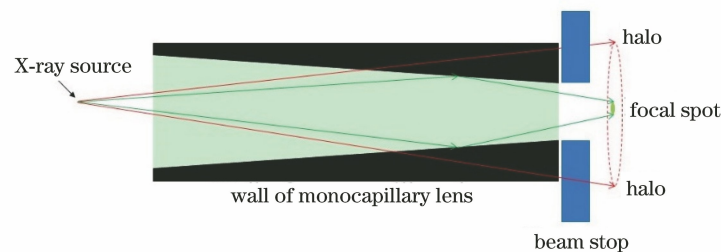


图 2 X 射线穿透单毛细管透镜示意图

Fig. 2 Schematic of X-ray penetrating moncapillary lens

细管透镜。锥形单毛细管透镜广泛应用于聚焦同步辐射和实验室光源,适用于聚焦准平行光、点光源和面光源等发散光源。

X 射线穿透玻璃体和 beam stop 时满足指数衰减公式:

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu x_d}, \quad (2)$$

式中: I_0 为初始射线强度; I 为衰减后的射线强度; μ 为物质衰减系数; x_d 为衰减距离。

在设计透镜口径时,考虑到高能 X 射线的全反射临界角较小,若透镜口径较大,入射角相应较大,难以满足全反射条件实现聚焦,所以设计小口径透

镜。在设计透镜长度时,理论上透镜长度越长,反射光越多,出口光通量越大,但在出入口半径不变的情况下,增加管长会降低锥管的锥角,即降低了锥管的聚焦能力,设计时需要衡量上述的优缺点,找到合适的参数设计锥形单毛细管透镜。

如图 3 所示,锥形单毛细管 X 射线透镜 (MCTXRL) 的内壁方程为

$$x^2 + y^2 = (az + b)^2, \quad (3)$$

式中: $a = \frac{R_{in} - r}{L}$, $b = R_{in}$, R_{in} 为入口内径, r 为出口内径, L 为透镜长度。

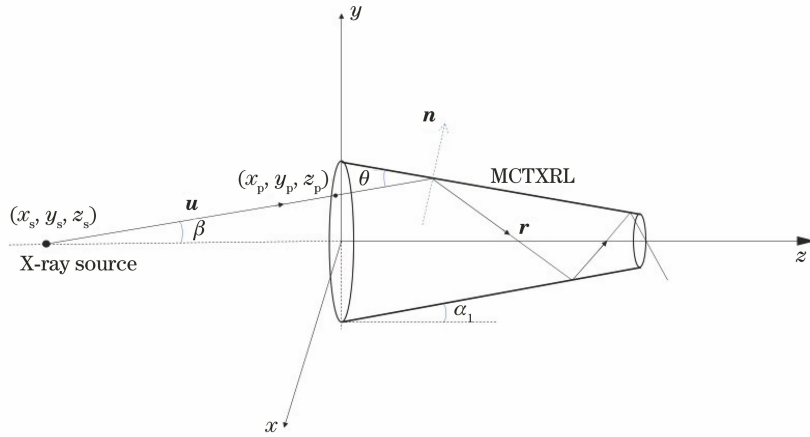


图 3 锥形单毛细管 X 射线透镜建模示意图

Fig. 3 Modeling schematic of tapered monocapillary X-ray lens

模拟过程是基于光线追迹原理的,在光源处随机取一点 (x_s, y_s, z_s) ,在透镜入口截面内随机取一点 (x_p, y_p, z_p) ,则入射光线方向矢量满足:

$$\mathbf{u} = (u_x, u_y, u_z) = \left(\frac{x_p - x_s}{d_0}, \frac{y_p - y_s}{d_0}, \frac{z_p - z_s}{d_0} \right), \quad (4)$$

其中 $d_0 = \sqrt{(x_p - x_s)^2 + (y_p - y_s)^2 + (z_p - z_s)^2}$ 。

又由管壁方程可知外法线矢量为

$$\mathbf{n} = \left(\frac{m_x}{\sqrt{(m_x + m_y + m_z)^2}}, \frac{m_y}{\sqrt{(m_x + m_y + m_z)^2}}, \frac{m_z}{\sqrt{(m_x + m_y + m_z)^2}} \right), \quad (5)$$

式中: $m_x = 2x$, $m_y = 2y$, $m_z = 2(az + b)$ 。由此可知入射光线与管壁夹角为

$$\theta = \arcsin(\mathbf{u} \cdot \mathbf{n}). \quad (6)$$

由此可得反射光的方向矢量为

$$\mathbf{r} = \mathbf{u} + 2\mathbf{n} \sin \theta. \quad (7)$$

在模拟过程中,将反射光方向 \mathbf{r} 设定为新的入射光方向,将交点坐标作为新的入射光起点坐

标,以此循环迭代,在管壁内形成一次或多次全反射的传输情况,实现追踪任意一条光线的传输路径的目的。

为了提高锥管的传输效率,通常在设计锥管参数时考虑 X 射线在管壁发生多次全反射的情况, X 射线在锥管内径发生一次或多次全反射时满足的公式为

$$\beta + (2n_r - 1) \cdot \alpha_1 \leq \theta_c, \quad (8)$$

式中: β 为入射 X 光与水平线夹角; α_1 为锥管的锥度; n_r 为发生的全反射次数。发生全反射次数越多, X 射线从出口出射偏离水平角度越大。传输效率的计算公式为

$$\eta = I_{out} / I_{in}. \quad (9)$$

X 射线的介电常量和折射率满足 $\epsilon = n^2 = 1 - \alpha - i\gamma$, 其中 α 描述介质的极化特性, γ 描述介质的吸收特性,全反射临界角 $\theta_c \approx \sqrt{\alpha}$ 。在该模拟条件下, X 射线有一部分在内壁中发生多次全反射,最终不满足全反射条件而造成损耗;一部分 X 光在反射过程中会发生损耗,用反射率 R 表示,公式为

$$R = \begin{cases} \frac{(a - \sin \theta)^2 + b^2}{(a + \sin \theta)^2 + b^2} e^{-\left(\frac{4\pi n \sin \theta}{\lambda}\right)^2}, & \theta \leq \theta_c \\ 0, & \theta > \theta_c \end{cases}, \quad (10)$$

其中 $a = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\sqrt{(\sin^2 \theta - \alpha)^2 + \gamma^2} + (\sin^2 \theta - \alpha)}$, $b = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\sqrt{(\sin^2 \theta - \alpha)^2 + \gamma^2} - (\sin^2 \theta - \alpha)}$ 。假设将每条光线的光强归一化为 1, 则 I_{out} 满足

$$I_{out} = \sum_1^{10^6} \prod_1^m [1 \times R_m(\theta_m)] + I_2, \quad (11)$$

式中: $R_m(\theta_m)$ 代表第 m 次反射时的反射系数; I_2 表示直通光的光强。

单毛细管 X 射线透镜焦斑处的功率密度增益的表达式为

$$G = I_{with} / I_{without}, \quad (12)$$

式中: I_{with} 为有透镜时, 在焦斑处单位面积上的光强; $I_{without}$ 为没有透镜时, 处于同一位置处单位面积上的光强。

3 锥形单毛细管 X 射线透镜模拟结果与分析

使用 Matlab 软件编程进行计算机模拟, 利用蒙特卡罗方法模拟 X 射线入射到透镜内部的随机过程, 并以光线数量的多少来反映 X 射线的强弱, 并通过编程将 X 射线传输过程可视化, 对透镜性能进行模拟表征。透镜出射的 X 射线包含直通光和锥管内壁的反射光, 由于透镜内径很小, 理论上透镜出口处的直通光少, 大部分为反射光, 为更好地直观体现反射光的传输过程, 模拟过程过滤了直通光, 只保留反射光的数值结果。为获得透镜内全反射传输情况, 设定锥形单毛细管 X 射线透镜入口到光源的距离为 25 cm, 光源为实验室点光源, 光源类型为球面

波, 设定焦斑直径为 $50 \mu\text{m}$, X 射线能量为 100 keV。图 4 为在上述条件下, 10^6 根 X 射线在透镜内壁传输的平面投影图, 对光通量进行归一化处理, 并利用色温将光强可视化, 其中横向为 X 射线传输方向, 纵向为透镜入口内径。透镜参数如表 1 所示。

从图 4 可以看出, X 光在透镜出口处附近会聚成一个焦斑。模拟统计结果显示, 直通光占比 3.4%, 发生一次全反射的 X 光比例为 39.9%, 发生多次全反射的 X 射线占 56.7%。

表 1 锥形单毛细管 X 射线的物理参数

Table 1 Physical parameters of MCTXRL

Parameter	Value
Length / mm	100
Input diameter / μm	30
Output diameter / μm	10
Taper angle / mrad	0.2

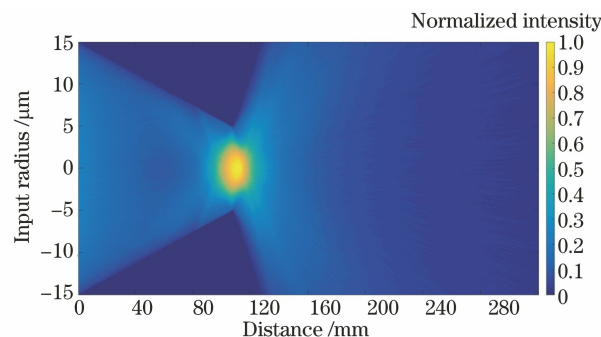


图 4 X 射线在透镜内传输的投影图

Fig. 4 Projection of X-ray transmission in lens

为观测出射 X 射线形成的光斑, 将模拟荧光屏放置在距离透镜出口 3 mm 处, 使光斑可视化。图 5(a) 为距离透镜出口 3 mm 处的束斑光强归一化三维分布图, 从模拟结果可以看出, 束斑呈现出类高斯分布。图 5(b) 为经束斑中心的一条直线 [图 5(a) 虚线处] 上的光强变化曲线, 经过拟合后可以看出束斑

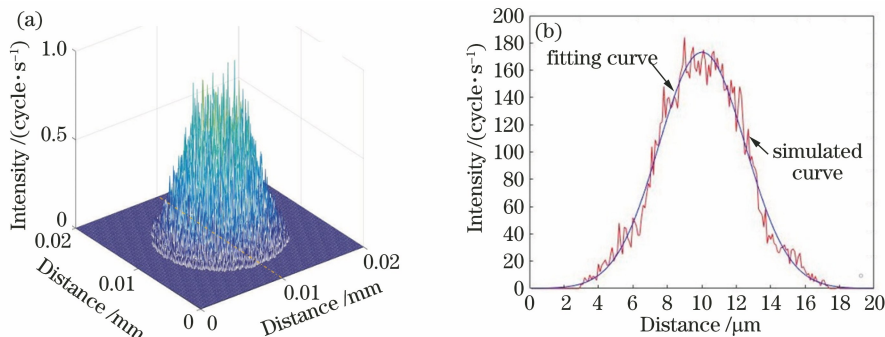


图 5 束斑光强分布。(a) 束斑平面; (b) 束斑中心直线

Fig. 5 Intensity distribution of beam spot. (a) Plane of beam spot; (b) central line of beam spot

呈高斯分布,测量拟合曲线获得的半峰全宽为该位置处的束斑大小。

随着镀膜技术的发展,在透镜内表面镀膜成为提升透镜性能的重要手段,为比较镀膜对锥形单毛细管透镜的影响,分别表征了未镀膜透镜和镀膜透镜的参数。首先对未镀膜透镜进行表征。图 6 中实线为不镀膜透镜在不同出口距离 h 处对应的束斑大小(半峰全宽)。模拟结果显示,透镜焦斑大小为 $6.6 \mu\text{m}$,焦距约为 5.0 mm 。

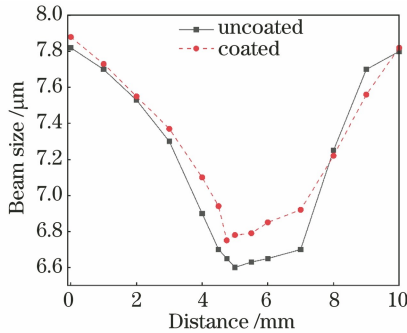


图 6 镀膜透镜和玻璃透镜的光斑大小随出口距离 h 变化而变化的曲线

Fig. 6 Beam size of coated capillary lens and glass capillary lens varying with exit distance h

由式(9)可知,出口光强由入口光强 I_{in} 和传输效率 η 决定。在实际实验过程中,由于普通实验室光源发出的 X 射线是发散的,为了尽可能增大透镜出口光通量,会将透镜入口尽量靠近 X 射线光源,即提高 I_{in} 的数值。但随着透镜靠近光源,由于外全反射条件的限制,传输效率 η 逐渐下降,不利于增大出口光通量。为找出透镜放置在光源前的最佳位置,模拟测定了传输效率随透镜放置在不同源距处的变化关系,变化曲线如图 7 所示。

经式(9)计算可得,透镜最佳放置位置为在光源

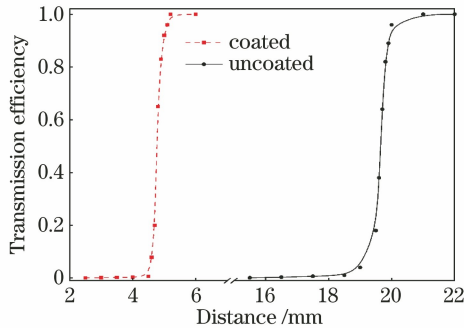


图 7 镀膜透镜和玻璃透镜传输效率随源距变化而变化的曲线

Fig. 7 Transmission efficiency of coated capillary lens and glass capillary lens varying with distance from capillary entrance to X-ray source

前约 20 cm 处。定义该最佳放置位置对应的距离为最佳源距。在最佳源距位置处,透镜的反射面都用上了,且传输效率不再随着源距增加而增大,所以采用 20 cm 作为源距,能充分利用光源,因为光源发出的光是发散的,在向外传播时,遵循距离的平方衰减定律,所以此时采用刚达到最大传输效率时的距离 20 cm ,便于提高照射在镜子入口处的光通量。当该镜子的入口焦距采用 20 cm 时,由式(12)可计算出该镜子焦斑处的功率密度增益为 12。

在实际实验中,若将透镜放置在距离光源约 20 cm 处,光通量会比光源中心处小约两个数量级,低光通量不利于实验进行。由式(1)可知,材料密度越大,全反射临界角越大,更有利于透镜聚焦 X 射线。为提高透镜性能,基于现有的镀膜技术^[16-17],在透镜内壁镀金属膜,金属膜成分为纯金。图 6 虚线为镀膜透镜的束斑尺寸随出口距离变化的模拟结果,可知镀膜透镜的焦距为 4.8 mm ,焦斑大小为 $6.8 \mu\text{m}$ 。镀膜透镜的传输效率随光源到透镜入口的距离变化的结果如图 7 虚线所示,可知此时镀膜透镜的前焦距约 5.2 cm ,此时该透镜的功率密度增益为 48.5。

模拟结果显示,和不镀膜透镜相比,镀膜透镜焦距变小 4% ,焦斑变大 3% ,可知镀膜后对焦距和焦斑参数影响程度较小,而对透镜的源距影响大,未镀膜透镜的入口焦距约为镀膜后的 3.8 倍。为比较镀膜透镜和不镀膜透镜在焦斑处光强的差异,通过数值 n 表示二者光强比值:

$$n = \frac{I_2}{I_1} = \frac{G_2 \cdot D_1^2 \cdot \Phi_2^2}{G_1 \cdot D_2^2 \cdot \Phi_1^2}, \quad (13)$$

式中: G_1 和 G_2 分别为未镀膜和镀膜后,透镜的功率密度增益; D_1 和 D_2 分别为未镀膜和镀膜后,镜子焦斑到光源发光点的距离; Φ_1 和 Φ_2 分别为未镀膜和镀膜后的镜子焦斑直径。经计算可知,在忽略空气吸收的情况下, n 值约为 14.8,即透镜镀膜后焦斑处的光通量为不镀膜的 14.8 倍,这能在一定程度上弥补小口径透镜光通量低的缺点,对小口径透镜的研制和应用具有积极意义。

为研究光源尺寸对透镜参数的影响,模拟了镀膜透镜在不同光源尺寸条件下的参数变化,图 8 为前焦距和焦斑尺寸随光源尺寸变化而变化的曲线。模拟结果表明,前焦距大小与光源尺寸呈线性正比例关系,光源尺寸的改变对焦斑尺寸影响不大。

依据理想光源和理想光滑表面的透镜,模拟大量入射光在透镜内的传输,获得较为理想的透镜参

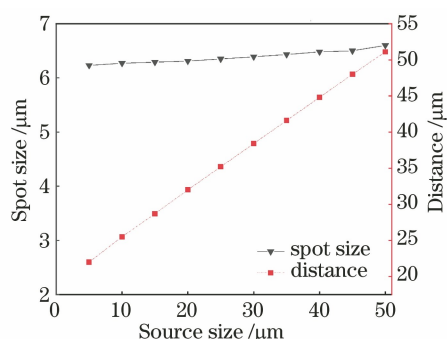


图 8 镀膜透镜的焦斑尺寸和入口焦距大小随光源尺寸变化而变化的曲线

Fig. 8 Focal spot size and input focal length of the coated lens varying with source size

数。而在实际透镜拉制过程中,拉制出的透镜内表面具有一定的粗糙度和面型误差。X 射线能量越高,粗糙度对在内壁发生反射的 X 射线影响越大,进而影响透镜的传输效率和光强增益,所以与拟拉制镜子的实际情况相比,模拟结果中传输效率和光强增益均偏高。若考虑粗糙度影响光通量,假定拉制的透镜粗糙度 σ 为 1 nm,根据式(10)计算模拟,对于普通玻璃透镜,光通量减小约 8.5%;对于镀膜透镜,光通量减小约 20%。最终二者光强比值 $n = 13$,表明考虑粗糙度后,镀膜透镜获得的光通量依然比普通玻璃透镜高 1 个数量级,但实际上镀膜后粗糙度也会发生变化,所以对该结果只作参考。另外,面型误差会改变 X 射线的圆度,圆度的改变会直接影响焦斑的大小和形状,所以考虑到拟拉制镜子的实际控制工艺,本文模拟的不足之处在于缺少对现阶段透镜拉制工艺的考虑。若在模拟过程中加入上述影响因素,会使模拟情况更接近真实值。

4 结 论

为了获得具有小口径的锥形单毛细管透镜,利用实验室光源将透镜应用于高能 X 射线微区分析,设计并模拟能量为 100 keV 的 X 射线在透镜内壁的传输特性。为提升透镜聚焦性能,模拟内表面镀 Au 金属膜的透镜,并用模拟结果表征了镀膜透镜的性能参数。结果表明,设计的锥形单毛细管透镜可以把 100 keV 的 X 射线会聚成微焦斑,焦斑直径和功率密度增益分别在微米和几十量级,对应的焦距在 5 mm 左右。为使透镜焦斑处光强最大化,模拟测量了传输效率随光源到透镜入口距离变化而变化的曲线,并结合实验室发散光源光强与距离呈平方衰减规律,计算出未镀膜透镜放置在光源前的最

佳距离为 20 cm,而镀膜透镜为 5.2 cm,经计算得出镀膜透镜在焦斑处获得的光通量为不镀膜透镜的 14.8 倍,这能一定程度弥补透镜小口径导致光通量低的缺点,说明镀膜对透镜聚焦高能 X 射线有较大的应用价值。通过设计和模拟锥形单毛细管透镜并利用模拟结果表征透镜参数,锥形单毛细管 X 射线透镜应用于高能 X 射线微区分析有潜在价值和应用。

参 考 文 献

- [1] 王占山, 黄秋实, 张众, 等. 极紫外、X 射线和中子薄膜光学元件与系统 [J]. 光学学报, 2021, 41(1): 0131001.
Wang Z S, Huang Q S, Zhang Z, et al. Extreme ultraviolet, X-ray and neutron thin film optical components and systems [J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(1): 0131001.
- [2] Huang Q S, Kozhevnikov I V, Sokolov A, et al. Theoretical analysis and optimization of highly efficient multilayer-coated blazed gratings with high fix-focus constant for the tender X-ray region [J]. Optics Express, 2020, 28(2): 821-845.
- [3] 韩业明, 付跃刚, 欧阳名钊, 等. 子午型龙虾眼透镜 X 射线聚焦特性的研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(6): 0634001.
Han Y M, Fu Y G, Ouyang M Z, et al. X-ray focusing characteristics of meridional lobster-eye lens [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(6): 0634001.
- [4] Kohn V, Snigireva I, Snigirev A. Diffraction theory of imaging with X-ray compound refractive lens [J]. Optics Communications, 2003, 216(4/5/6): 247-260.
- [5] Lengeler B, Schroer C G, Richwin M, et al. A microscope for hard X rays based on parabolic compound refractive lenses [J]. Applied Physics Letters, 1999, 74(26): 3924-3926.
- [6] 骆钧尧, 郭智, 黄浩, 等. 多层膜光栅衍射效率的同步辐射研究 [J]. 光学学报, 2021, 41(14): 1405001.
Luo J Y, Guo Z, Huang H, et al. Synchrotron radiation research on diffraction efficiency of multilayer coated grating [J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(14): 1405001.
- [7] Huang Q S, Medvedev V, van de Kruijs R, et al. Spectral tailoring of nanoscale EUV and soft X-ray multilayer optics [J]. Applied Physics Reviews, 2017, 4(1): 011104.
- [8] 高雅增, 吴鹿杰, 卢维尔, 等. 基于严格耦合波理论的硬 X 射线菲涅耳波带片设计 [J]. 光学学报, 2021,

- 41(11): 1111002.
- Gao Y Z, Wu L J, Lu W E, et al. Design of hard X-ray Fresnel zone plates based on rigorous coupled wave theory[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(11): 1111002.
- [9] Wang Z S, Liao Y Y, Shen Z X, et al. Development of imaging X-ray telescopes at Tongji university[J]. *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems*, 2019, 5(4): 044010.
- [10] Yamauchi K, Mimura H, Kimura T, et al. Single-nanometer focusing of hard X-rays by Kirkpatrick-Baez mirrors [J]. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2011, 23(39): 394206.
- [11] Sun T X, Ding X L. Determination of the properties of a polycapillary X-ray lens [J]. *X-Ray Spectrometry*, 2006, 35(2): 120-124.
- [12] Kumakhov M A, Komarov F F. Multiple reflection from surface X-ray optics [J]. *Physics Reports*, 1990, 191(5): 289-350.
- [13] 孙天希, 刘志国, 丁训良. 毛细管 X 射线光学器件的性能及应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2009: 23-106.
- Sun T X, Liu Z G, Ding X L. Properties of capillary X-ray optics and its applications [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2009: 23-106.
- [14] Sun T X, Ding X L. Confocal X-ray technology based on capillary X-ray optics [J]. *Reviews in Analytical Chemistry*, 2015, 34(1/2): 45-59.
- [15] Sun T X, Ding X L. Measurements of energy dependence of properties of polycapillary X-ray lens by using organic glass as a scatterer [J]. *Journal of Applied Physics*, 2005, 97(12): 124904.
- [16] Wang Y B, Li Y L, Shao S K, et al. Enhancement of properties of high-density material coated glass monicapillary X-ray condenser based on atomic layer deposition[J]. *Optics Communications*, 2020, 464: 125544.
- [17] Nakazawa T, Nakano K, Yoshida M, et al. Enhancement of XRF intensity by using Au-coated glass monicapillary [J]. *Powder Diffraction*, 2011, 26(2): 163-167.