

新型X射线折射透镜

鲁同所¹ 黄国良^{1,2} 任祖洋² 徐源泽³ 张耀武³ 刘 静³ 张伟伟³
黄其煜⁴ 徐 剑⁴ 童 振⁵ 杨 兴¹ 林 鹤²

1(西藏大学理学院 拉萨 850000)

2(中国科学院上海高等研究院 上海 201210)

3(中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

4(上海交通大学 电子信息与电气工程学院 上海 200240)

5(上海交通大学 机械与动力工程学院 上海 200240)

摘要 以低发射度、高亮度和高相干性为特征的第四代同步辐射光源和硬X射线自由电子激光器为X射线光学器件提出了更高的要求,同时也带来了新的发展机遇。本文探讨了基于折射原理的X射线透镜,包括复合折射透镜(Compound Refractive Lenses, CRL)、Kinoform透镜、OVAL透镜及OVAL-Kinoform透镜,回顾了阿尔瓦雷斯变焦X射线透镜(Alvarez varifocal X-Rays Lens, AXL)和锯齿型X射线折射透镜(Saw-tooth X-ray Refractive Lens, SRL)研究的最新进展。重点分析了这些透镜在减少像差和材料吸收方面取得的显著突破,同时介绍了两种不同设计思路的新型相位板,这些相位板可与透镜配合使用,进一步优化了光学性能。最后,本文详细概述了几种先进制造技术,包括基于超精密加工的压印技术、双光子聚合、LIGA(Lithografie, Galvanoformung, Abformung)工艺、半导体蚀刻和飞秒激光加工,重点讨论了这些技术在实现复杂微纳结构及提高X射线折射聚焦透镜制造精度方面的应用。

关键词 X射线, 复合折射透镜, 变焦透镜, 制造工艺

中图分类号 TB853.21, TB133, TH74

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2025.hjs.48.240487

CSTR: 32193.14.hjs.CN31-1342/TL.2025.48.240487

Novel X-ray refractive lenses

LU Tongsuo¹ HUANG Guoliang^{1,2} REN Zuyang² XU Yuanze³ ZHANG Yaowu³ LIU Jing³
ZHANG Weiwei³ HUANG Qiyu⁴ XU Jian⁴ TONG Zhen⁵ YANG Xing¹ LIN He²

1(College of Science, Tibet University, Lhasa 850000, China)

2(Shanghai Advanced Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201210, China)

3(Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

4(School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

5(School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract The fourth-generation synchrotron radiation sources and hard X-ray free-electron lasers, characterized by low emittance, high brightness, and high coherence, have introduced new requirements and opportunities for X-ray

国家重点研发计划(No.2021YFA1601102)、北京市自然科学基金面上项目(No.1232034)资助

第一作者: 鲁同所, 男, 1987年出生, 2016年于中国科学院大学获博士学位, 专业领域为X射线光学透镜

通信作者: 林鹤, E-mail: linh@sari.ac.cn

收稿日期: 2024-11-27, 修回日期: 2025-03-08

Supported by the National Key R&D Program (No.2021YFA1601102), Beijing Natural Science Foundation General Program (No.1232034)

First author: LU Tongsuo, male, born in 1987, graduated from University of Chinese Academy of Sciences with a doctoral degree in 2016, focusing on X-ray optical lenses

Corresponding author: LIN He, E-mail: linh@sari.ac.cn

Received date: 2024-11-27, revised date: 2025-03-08

optics devices. X-ray lenses based on the principle of refraction, which are compact in structure and do not alter the optical path, offer great flexibility in application and have increasingly attracted the attention of scientists at major light sources in recent years. This paper first introduces refractive lenses, including Compound Refractive Lenses (CRLs), Kinoform lenses, Cartesian oval lenses (OVLs), and OVAL-Kinoform lenses, and then reviews recent advances in the research and development of Alvarez varifocal X-ray lenses (AXLs) and saw-tooth X-ray refractive lenses (SRLs). These lenses have achieved significant breakthroughs in reducing aberrations and material absorption, thereby further optimizing optical performance. In addition, two new types of phase plates that can be used in conjunction with these lenses are introduced. Finally, a detailed overview of advanced manufacturing technologies, including ultra-precision machining-based imprinting, two-photon polymerization, LIGA (Lithografie, Galvanoformung, Abformung) processes, semiconductor etching, and femtosecond laser processing, are provided with a focus on their applications in realizing complex micro/nano structures and improving the manufacturing precision of X-ray refractive focusing lenses.

Key words X-ray, Compound refractive lens, Zoom lens, Manufacturing process

近年来,随着X射线光源技术的飞速发展^[1],特别是在同步辐射光源^[2]和自由电子激光^[3](Free Electron Laser, FEL)的推动下,科学家们能够获得具备高亮度^[4]、高相干性^[5]的X射线光束。这些光源的进步不仅使得物质微观结构的研究更加深入,还

使得在极短的时间尺度上观测动态过程成为可能。例如,第三代和第四代同步辐射光源以及自由电子激光系统的高亮度X射线^[6],使得成像和光谱分析的分辨率^[7]达到了纳米级别(图1),为许多学科的研究带来了前所未有的机会。

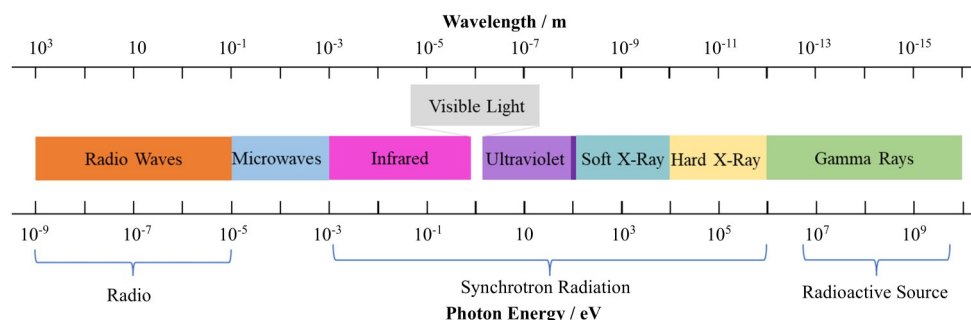


图1 电磁波谱(紫外线与软X射线中间为极紫外)
Fig.1 Electromagnetic spectrum (The region between ultraviolet and soft X-ray is extreme ultraviolet (EUV))

X射线光学器件在同步辐射和自由电子激光线站中扮演着十分关键的角色,窗口、滤光片、单色器、聚焦、准直等光学器件直接影响着最终传输到样品处的光束质量。其中,聚焦X射线的光学器件根据物理原理可大致分为三类:基于反射(如K-B镜^[8]、多层膜^[9]和毛细管^[10]等)、基于衍射(如菲涅尔波带片^[11]、劳厄透镜^[12])和基于折射^[13](如复合折射透镜(Compound Refractive Lenses, CRL))。其中折射透镜不改变光路,占用空间小,设计和使用方式灵活多变,制作工艺多样且造价相对较低,因此备受喜爱,广泛应用于同步辐射X射线实验中^[14]。

1 X射线聚焦透镜

1.1 复合折射透镜(CRLs)

折射透镜中最广为人知的是所谓的复合折射透

镜(CRLs)。自1996年Snigirev^[15]首次通过在铝中钻出圆柱形孔阵列实现X射线聚焦以来,CRLs的设计不断改进。

CRLs通过串联多个具有相同或相似结构的小型透镜元件,形成一个可以聚焦X射线的透镜系统,每个小透镜的形状通常为圆形、抛物面形或椭圆面型。图2是由中国科学院高能物理研究所合作课题组利用LIGA(Lithografie, Galvanoformung, Abformung)工艺^[16]制作的SU8 CRLs透镜的扫描电镜(Scanning Electron Microscopy, SEM)形貌图。

图3是不同几何参数的SU8基折射透镜。SU8是负性光刻胶材料^[17],具有很好的耐辐照性,通常用于高能($E > 30 \text{ keV}$)环境。

对于一个一维抛物线型折射透镜(示意图如图4(b)),假设透镜顶点曲率半径为 R ,厚度为 d ,当X射线穿过透镜后,X射线的波前会发生微小的偏折

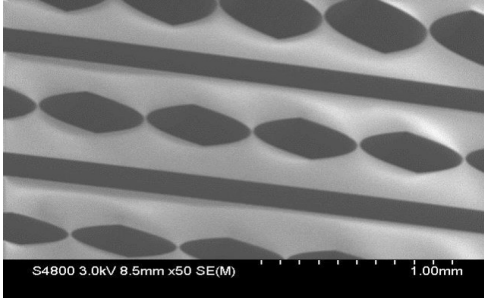


图2 硬X射线SU8基CRLs透镜的扫描电镜图(LIGA工艺)
Fig.2 SEM image of hard X-ray SU8 CRLs (LIGA process)

并最终汇聚于一点。

单个一维抛物线形折射透镜^[18]的焦距 f 可通过式(1)近似:

$$f = \frac{R}{2\delta} \quad (1)$$

式中: δ 为物质的折射衰减率,由于 δ 很小,通常在 $10^{-5} \sim 10^{-7}$ 。因此,单个透镜的焦距非常大,为弥补单

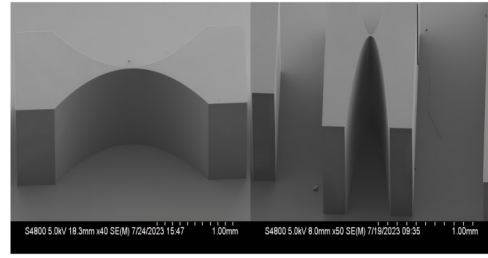


图3 不同几何参数的镜片的扫描电镜图(LIGA工艺)
Fig.3 SEM images of lenses with different geometrical parameters (LIGA process)

个透镜聚焦效果的不足,通常将多个透镜串联在一起,形成复合折射透镜(CRLs),复合折射透镜的焦距表示为式(2):

$$f = \frac{f_i}{N} = \frac{R}{2N\delta} \quad (2)$$

式中: f_i 为复合折射透镜组第 i 个透镜的焦距; N 是透镜的总数,通过增加透镜的数量 N ,可以有效减小整体的焦距,增强透镜的聚焦能力。

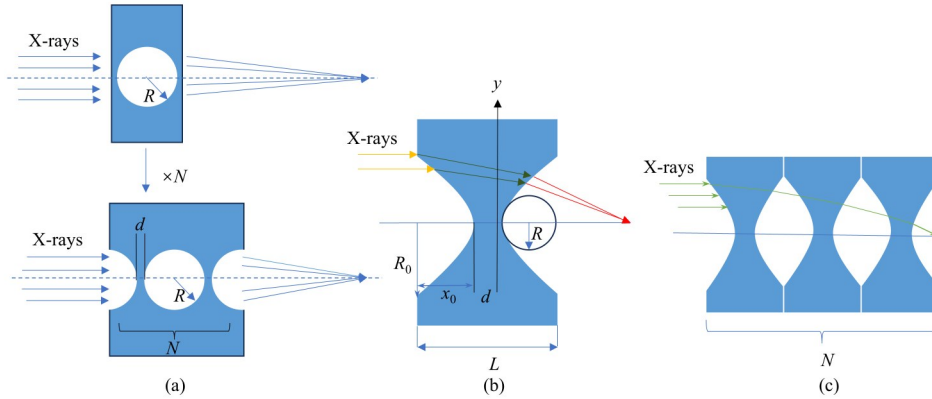


图4 透镜聚焦示意图 (a) 圆形折射透镜, (b) 抛物线型折射透镜, (c) 抛物线型复合折射透镜

Fig.4 Diagram of lens focusing (a) Circular refractive lens, (b) Parabolic refractive lens, (c) Parabolic compound refractive lens

1.2 Kinoform透镜

由于传统的复合折射透镜(CRLs)厚度较大,X射线在聚焦过程中会有较严重的吸收效应,限制了其在高分辨率成像和纳米级分析中的应用。为解决这一问题,Evans-Lutterodt^[19]等在2003年利用单晶硅制作的长型Kinoform透镜成功聚焦X射线,不仅实现了高效的相位调制,还保留了透镜原始的面型,成功克服了传统CRL存在的厚度和吸收问题。图5是由上海交通大学合作课题组利用半导体平面加工工艺^[20]制作的工作能量为50 keV的锗基Kinoform透镜,共有20个台阶,焦距3 m,透镜高度70 μm ,图6是利用飞秒激光双光子聚合工艺^[21]制作,针对软X射线($E=600 \text{ eV}$)的二维SU8 Kinoform透镜,图7是使用飞秒激光刻蚀技术^[22]制作,针对硬X射线($E=12 \text{ keV}$)的二维蓝宝石(Al_2O_3) Kinoform透镜。SU8

基Kinoform透镜物理孔径约90 μm ,焦距2 cm;蓝宝石Kinoform透镜物理孔径约210 μm ,焦距5 m,有10个圆形台阶。

如图8(a)(b)所示,单个凹面折射透镜挖去相位为 2π 整数倍的材料后得到长型Kinoform透镜,从图8中的箭头线可以看出,相较于抛物面折射透镜,X射线在Kinoform透镜中传播路径更短,因此可以有效地减少材料对X射线的吸收。Kinoform透镜的聚焦的原理为:当X射线平面波通过凹形折射透镜时,光线被汇聚于一点,为了使所有光线的焦点达到相同相位,产生结构性干涉,透镜通过在材料内引入精确的相位提前来补偿不同路径光线之间的光程差,这种相位控制确保透镜出射的光波在焦点处相干叠加,从而实现有效聚焦。图8(c)为短型Kinoform透镜示意图,将长型Kinoform透镜的台阶状入射面平

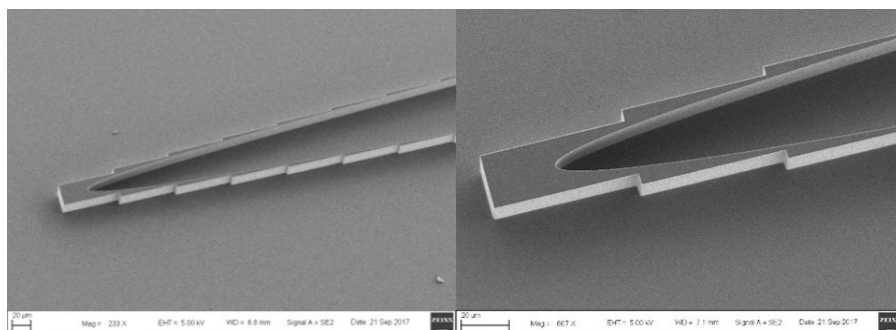


图5 一维锗基 Kinoform 透镜的扫描电镜图(半导体平面加工)
Fig.5 SEM image of 1D Germanium Kinoform lens (semiconductor planar processing)

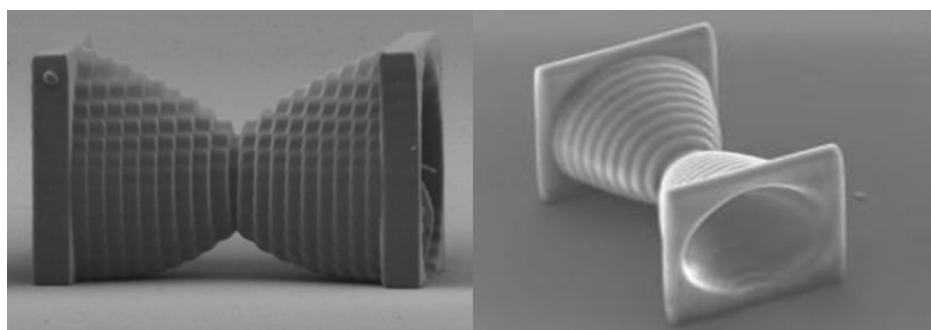


图6 二维SU8 Kinoform 透镜的扫描电镜图(飞秒激光双光子聚合)
Fig.6 SEM image of 2D SU8 Kinoform lens (femtosecond laser two-photon polymerization)

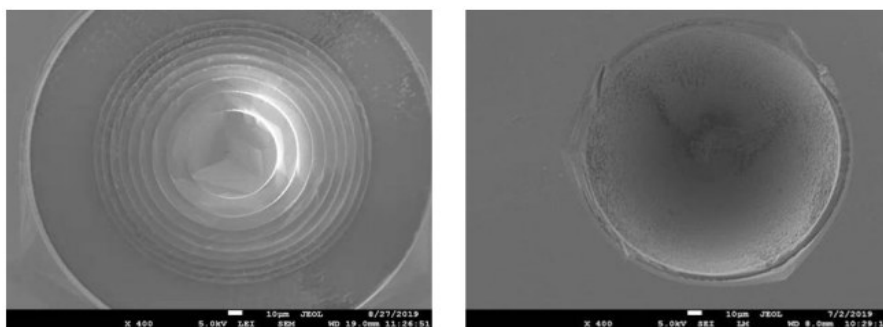


图7 二维蓝宝石(Al_2O_3) Kinoform 透镜的扫描电镜图(飞秒激光刻蚀)
Fig.7 SEM image of 2D Sapphire (Al_2O_3) Kinoform lens (femtosecond laser etching)

移到同一平面可得到短型 Kinoform 透镜，短型 Kinoform 透镜会将 X 射线聚焦于透镜后方多个点^[18]。

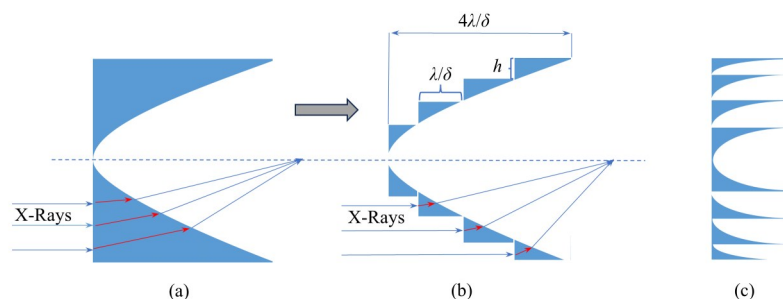


图8 透镜聚焦示意图 (a) 抛物面折射透镜, (b) 长型 Kinoform 透镜, (c) 短型 Kinoform 透镜
Fig.8 Diagram of lens focusing (a) Parabolic refractive lens, (b) Long Kinoform lens, (c) Short Kinoform lens

1.3 理想笛卡尔椭圆透镜(OVAL)

抛物面形的复合折射透镜在X射线的多级折射聚焦中会引入额外的像差,为了解决这一问题,Sutter等^[23]在2017年提出了一种笛卡尔椭圆(Cartesian oval)形式的无像差聚焦曲线,并基于这种曲线提出了一种孔径相同的无像差X射线聚焦透镜。在X射线聚焦条件下的曲线近似表达如式(3)所示:

$$y^3 + (q_1 + q_2)y^2 + (q_1q_2)y + \frac{(q_1 - q_2)}{2\delta}x^2 = 0 \quad (3)$$

式中: q_1 为物距; q_2 为像距(此处 $\delta = \delta_1/\delta_2 - 1$, δ_1 为入射介质的折射率实部; δ_2 为出射介质的折射率实部)。

本课题组与中国科学院高能物理研究所合作,基于无像差笛卡尔椭圆曲线提出了一种孔径渐变的无像差X射线复合折射聚焦透镜(OVAL)^[24]。OVAL透镜的设计思路如图9所示,已收敛在点 f_1 处的入射X射线沿蓝色实线入射OVAL透镜,经过透镜表面Surface 1的折射后,被聚焦到 f_2 点。Surface 2与Surface 3的孔径大小设计为恰好匹配X射线最外层光束的轨迹,孔径的数值由于笛卡尔椭圆曲线的无像差聚焦特性可以精确计算得出。光束经过Surface 2与Surface 3后被聚焦到 f_3 点,后经Surface 4与Surface 5被聚焦到点 f_5 。以此类推最终X射线将被聚焦于最后一个Surface的 q_2 像距点处。

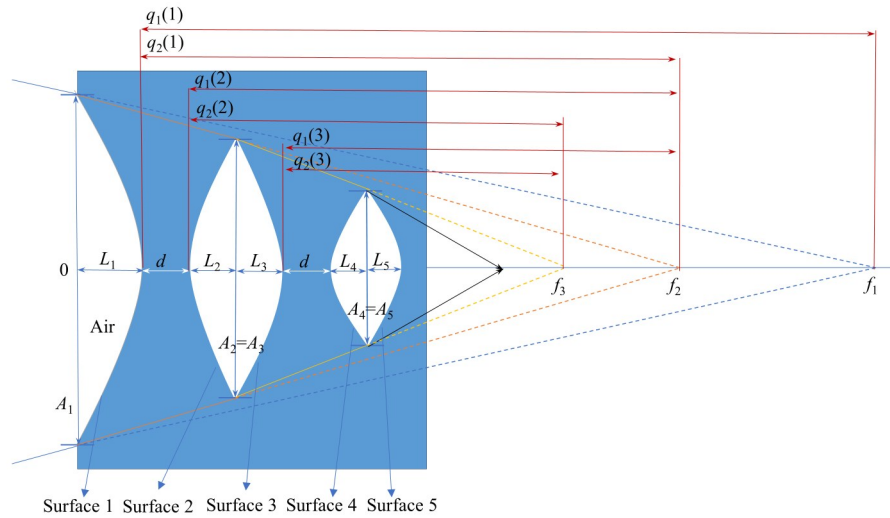


图9 OVAL透镜聚焦原理图
Fig.9 Schematic diagram of OVAL lens focusing

1.4 OVAL_Kinoform透镜

在OVAL透镜中加入Kinoform结构最早是由本课题组与中国科学院高能物理研究所合作提出并制备,它不仅拥有OVAL重聚焦已收敛光束而不产生像差^[11,23-24]的特点,还拥有Kinoform改变相位减少材料对X射线吸收的优势。第一款OVAL_Kinoform透镜是在北京同步辐射^[25]装置(Beijing Synchrotron Radiation Facility, BSRF)利用X射线光刻技术^[26]制备,通过UV和软X射线光刻制备过渡和LIGA掩模,并在3~7 keV X射线下曝光成型,共由111个透镜组成。图10是这款OVAL_Kinoform透镜在电子显微镜下的扫描图。

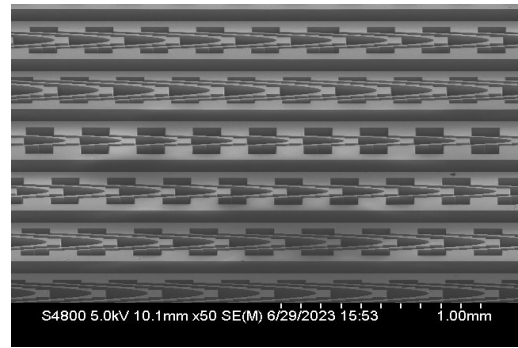


图10 OVAL_Kinoform透镜的扫描电镜图(X射线光刻)
Fig.10 SEM image of OVAL_Kinoform lens (X-ray lithography)

用于可见光领域的非旋转对称光学结构,并将该结构命名为Alvarez varifocal Lens,中文名为阿尔瓦雷斯变焦透镜。随着同步辐射光的快速发展,Dhamgaye等^[28]在2023年首次将这种透镜应用于X射线领域,并命名为AXL(Alvarez varifocal X-rays Lens),该透镜不仅可以在不改变X射线折射透镜曲

2 X射线变焦透镜

2.1 阿尔瓦雷斯变焦透镜(AXL)

1967年Alvarez^[27]在他的专利中提出了一种应

率的情况下改变整个光路的焦距,还可以有效消除X射线折射透镜因不可控因素(例如工艺误差)引起的像差与慧差,它由两个具有立方厚度分布的平面折射元件组成,如图10所示,当A、B这两个折射元件沿Y轴向不同方向移动时,波前的抛物线成分会发生变化,导致焦点在X轴方向移动。

AXL透镜由两个具有立方厚度分布的元件组成,两个元件厚度分别表示为:

$$t_1(y) = A_3(y + \Delta)^3 + A_1(y + \Delta) + A_0 \quad (4)$$

$$t_2(y) = -A_3(y - \Delta)^3 - A_1(y - \Delta) + A_0 \quad (5)$$

式中: A_3 是立方项的系数,即焦距变化的速度,若需要一个较大的焦距调节范围(例如大幅度移动焦点位置),则 A_3 需要设定为较大的值。 A_1 是线性项的系数, A_1 与线性厚度变化有关,主要用于波前调制中线

性部分的校正, A_1 通常用于补偿其他光学元件(如CRLs)中的轻微误差,当需要校正的像差中包含一些线性分量时(例如像散或轻微失焦),可以根据这些误差的大小设置 A_1 。 A_0 为常数项,表示透镜的基本厚度,即($y=0$)处透镜厚度。 Δ 是两个透镜元件的相对位移。

AXL透镜的变焦思路:

如图11所示,在x轴中,当AXL的 Δ 为0时,A、B两个元件互补,AXL对X射线的波前干扰可以忽略不计,X射线聚焦于CRLs的焦点 f 处。在 x_1 轴中,当 $\Delta > 0$ 时,A、B两个元件在相向移动,在可移动范围内, Δ 越大,聚焦效果越强,焦距越小; $\Delta < 0$ 时,A、B两个元件相对靠近,波前的抛物线形状平缓,聚焦效果越弱,焦距越大。

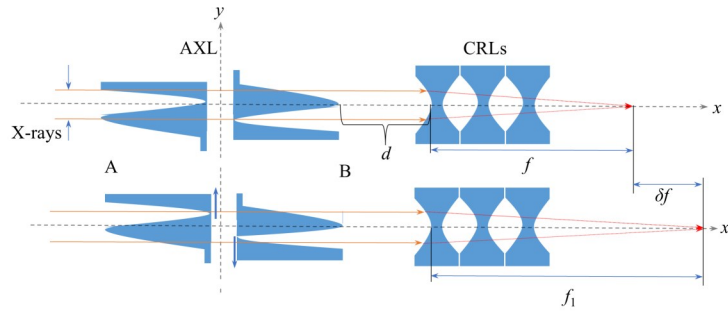


图11 阿尔瓦雷斯X射线变焦透镜示意图

(X轴为原始状态下AXL与CRLs的聚焦结果; x_1 轴为元件A与元件B相向位移后的变焦结果)

Fig.11 Schematic diagram of Alvarez varifocal X-rays lens (X-axis is the focusing result of AXLs and CRLs in the original state; x_1 -axis is the focusing result after the phase displacement of element A and element B)

2.2 锯齿形X射线折射变焦透镜(SRL)

2000年Cederström等^[29]发现可以将长时间播放的胶片切割制成一种能够聚焦X射线的透镜,随后他们仿造唱片的结构,设计出了一款锯齿形X射线折射透镜^[30](Saw-tooth X-ray Refractive Lens, SRL)。这种透镜不仅能够消除球差的影响,还可以通过机械调整透镜的位置和角度,在相同能量下改变透镜焦距,或在不同能量下保持焦距固定。图12是上海交通大学合作课题组成员利用半导体平面加工工艺制作的硅基 saw-tooth 透镜^[31],工作能量 $E=12$ keV,透镜高度120 μm ,焦距8 cm。

SRL透镜由两个相同的锯齿状结构组成,沿光轴排列了 N 个高度为 y 的规则锯齿(见图13)。在透镜的一端,两个锯齿顶点接触,而在另一端,两顶点之间的间隙为 $2y_h$,该间隙决定了透镜的焦距。X射线在离光轴越远的地方会穿过更多的锯齿表面,总偏转角会随离轴距离的增大而增加。在小角度近似条件下,X射线可以被认为沿着与光轴平行的直线穿过锯齿形折射透镜。因此,这种透镜可以等效地

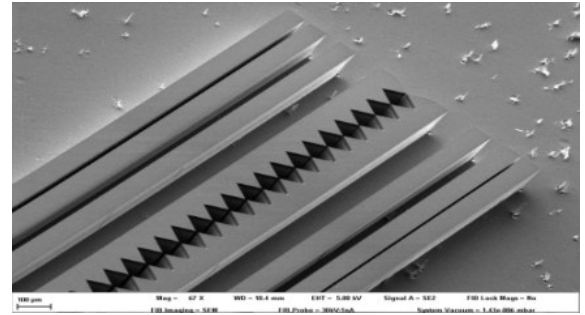


图12 SRL透镜的扫描电镜图(半导体平面加工)

Fig.12 SEM image of SRL lens (semiconductor planar processing)

看作是一个一维的抛物面透镜,光线在不同的高度 y 处穿过的材料厚度不同,将这些厚度叠加起来形成透镜的聚焦效应。上述结论在 $y_h \leq y$ 时成立;当 $y_h > y$ 时,最后一个锯齿的出射面会影响X射线的最终传播方向,因此,最后一个锯齿的顶点高度决定了SRL透镜的有效范围。

光线在不同高度 y 处穿过的透镜厚度可以表示为式(6):

$$x(y) = \frac{4y^2 N}{y_h \tan(\theta)} \quad (6)$$

式(6)表明,X射线穿过透镜的厚度与其离轴距

离 y 的平方成正比,并受到锯齿数量 N 、间隙 y_h 和锯齿倾角 θ 的影响。

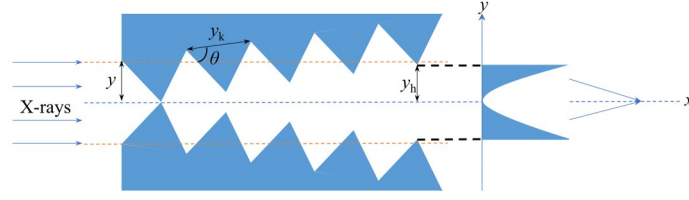


图13 锯齿型X射线折射透镜原理示意图
Fig.13 Schematic diagram of Saw-tooth X-ray refractive lens

2.3 相位板(Phase Plate)

除了在光路中加入变焦透镜来弥补制造工艺带来的误差之外,还可以在光路中添加相板来矫正工艺误差。Seiboth^[32]等在2020年使用飞秒激光刻蚀结合3D打印技术分别制作了Nanoscribe IP-S光刻胶基的增材相板与单晶金刚石基的烧蚀相板,用于校正铍(Be)透镜的波前误差,相板示意图参考图14。

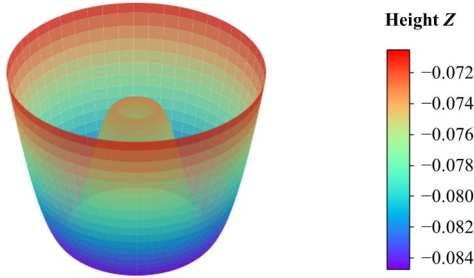


图14 相板示意图(彩图见网络版)
Fig.14 Phase plate schematic diagram (color online)

这款相位板是通过加(3D打印^[33])或减(激光刻蚀^[22])材料,补偿制作过程中引入的误差,调整光束的相位补偿,消除透镜系统中的相位超前或不足,从而实现更理想的聚焦效果。

相位板的设计思路是利用叠层成像技术(Ptychography)捕捉透镜的波前畸变。叠层成像是一种扫描相干衍射成像技术,通过逐点扫描样品并记录衍射图案,分析衍射图案的变化,精确获取透镜表面的波前误差。随后,利用Zernike多项式(7)拟合波前误差数据,根据分析得到的误差数据生成3D模型,通过该3D模型制作出相位板,以补偿波前畸变。这个相位板具有以下优点:(1)节省时间经济成本,无需重新制作透镜;(2)可微调,借助3D打印与激光刻蚀技术实现高精度校正误差,并且可以灵活调整材料厚度与结构。

$$Z_n^m(\rho, \theta) = R_n^m(\rho \cdot \cos(m\theta)) \quad (7)$$

式中: m 为方位频率,控制多项式旋转对称性; n 为径向阶数,表示多项式的阶次; $R_n^m(\rho)$ 表示径向部分; $\cos(m\theta)$ 表示角度部分,推导的核心是将波前的变化表示成径向与角度方向上的变化分量。

2.4 折射矫正片

Laundy等^[34]在2022年利用刀口法分别测量了K-B镜与复合折射透镜的波前误差,刀口法通过扫描刀口穿过光学元件的焦平面,利用探测器在远场测量X射线强度变化,从而直接获取X射线的波前误差。测量过程中发现,与时间相关的热效应会显著影响波前误差。第一种相位板通过提前测量透镜的波前误差并定制相应的相位板,但无法应对因长时间工作引起的材料热效应导致的波前误差变化。对于这种情况,需要一种具有更高自适应性的折射光学元件。

Laundy等提出了一种拥有正弦剖面的矫正片,能够实时在线调整光学系统的波前误差。通过重新对K-B镜和复合折射透镜进行测量与校正,实验结果表明,在这种矫正片的作用下,透镜的波前误差减少了约85.7%,反射镜的波前误差减少了66.7%~71.4%。这种设计显著提高了矫正效果,尤其适合需要动态调整的光学系统。

这款矫正片是由两部分构成,如图15所示,矫正片两部分结构为具有相同厚度的正弦剖面,正弦剖面的计算公式表示为式(8):

$$t(y) = t_0 + t_1 \sin\left(\frac{2\pi(y - y_0)}{\Lambda}\right) \quad (8)$$

式中: $t(y)$ 表示 y 处折射器的厚度; t_0 为厚度的基准值; t_1 为正弦波的振幅; y_0 为偏移量,决定波形在 y 方向上的起始位置; Λ 为正弦波周期。

当 $y_0=0$ 时,路径长度呈现为一个周期为 Λ 、振幅为 $2t_1$ 、相位为零的正弦波。当偏移量 y_0 相同,两片矫正片同步移动会改变正弦波的相位而保持幅度不

变,用于动态调整波前误差的相位。当偏移量 y_0 相同,但方向相反时,则会导致幅度变化而相位保持不变,从而调整波前误差的强度。

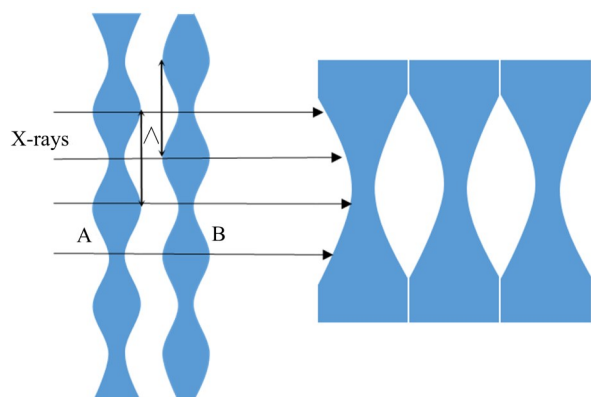


图15 正弦波折射矫正片原理示意图

Fig.15 Schematic diagram of sinusoidal refractive correction plate

3 X射线光学元件制造工艺

在X射线聚焦透镜的制造工艺中,基于超精密机床加工的模具压印方法可以被应用于生产铍(Be)、铝(Al)等材料的透镜。由于铍的吸收系数低,因此铍透镜在X射线能量低于30 keV的环境中具有显著优势。然而,由于高纯度的铍供应紧张,Rxoptics公司已停止提供铍透镜,现仅供应铝和镍材质的透镜。与铍透镜相比,铝透镜和镍透镜在X射线能量高于30 keV的环境中更为适用。2024年,上海交通大学童振团队进一步突破技术瓶颈,将超精密加工与测量一体化技术^[35-36]成功应用于X射线终端束形大曲率铝镜的研制过程中,率先实现了亚微米级精准冲压定位,并搭建了国内首台专业超精密微冲压成型设备。图16展示了童振团队利用超精密微冲压成型设备制作的单片折射透镜,其面型数据通过Nexview™ NX2 3D光学表面轮廓仪测量

得出。透镜曲率半径为52.97 μm ,面型残差为2.355 μm 。

3D打印技术^[37],尤其是在光学元件制造中使用的双光子聚合工艺^[38],通过激光在光敏聚合物中形成精细的三维结构。这种工艺可以在纳米级别实现高精度控制,适合制作复杂的微光学器件和波前校正器。3D打印技术的优势在于高精度、灵活性强,且无需模具,可以直接根据设计打印出复杂的形状。

LIGA工艺是一种基于同步辐射X射线光刻技术的微加工技术^[39],它能够制造出高宽比达到50、厚度大于500 μm 、结构侧壁陡直的三维立体结构,最初由德国研究机构开发,主要包括光刻(Lithography)、电铸(Electroforming)和复制成型(Molding)三个步骤。核心是利用高能X射线光刻,结合后续的电铸和模塑工艺,制作出复杂的三维微结构。2016年由张伟伟与刘静^[40]等设计并制作的口径为1.77 mm、深度约400 μm 、焦距为3 m的镍基Kinoform透镜,在50 keV的X射线能量下获得了7.7 mm的焦宽和14的光子通量增益。由于X射线具有高穿透性,因此LIGA工艺可以在较厚的光刻胶层中形成精确的微细结构,能够实现其他光刻技术难以达到的高深宽比。

半导体刻蚀技术^[41]是现代微纳米制造中不可或缺的技术,尤其在X射线光学元件的制造中至关重要。包括干法刻蚀和湿法刻蚀^[42]两大类。干法刻蚀利用等离子体或离子束在真空中轰击材料表面,实现高精度的刻蚀过程,适合制造高深宽比结构。湿法刻蚀则通过化学溶液腐蚀材料,但精度较低,通常用于较简单的加工需求。徐剑等^[31]在2018年首次将干刻蚀法与电子束光刻(Electron Beam Lithography, EBL)和深反应离子刻蚀(Deep Reactive Ion Etching, DRIE)技术结合,制造第一款垂直锯齿折射透镜(Vertical saw-tooth refractive lens

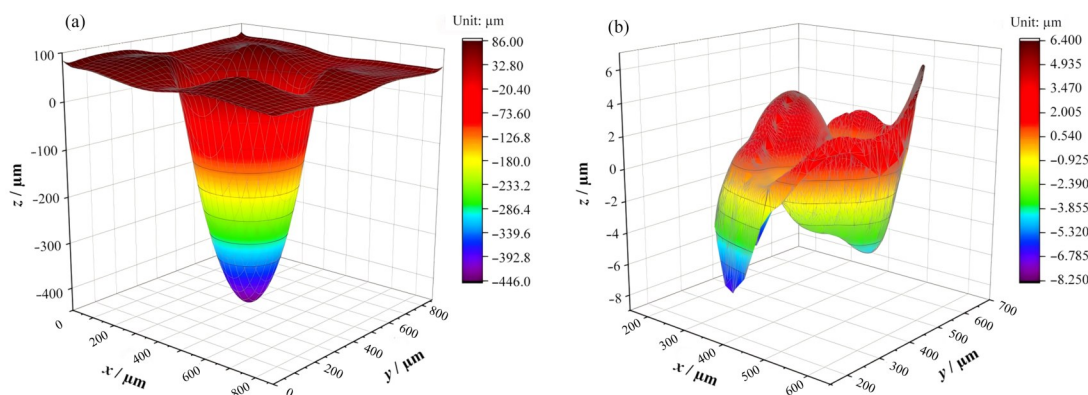


图16 透镜面型测量原图(a),拟合后的残差图(b)(彩图见网络版)

Fig.16 The original measurement image of the lens surface profile (a) and residual map after fitting (b) (color online)

(vSRL))。EBL通过电子束在感光材料上直接刻写高分辨率的微细结构,而DRIE技术则用于深度刻蚀,形成高纵横比的透镜结构。这种工艺能够在硅(Si)或锗(Ge)材料中实现数十微米深的刻蚀,适合制作复杂的微结构,能够根据设计需求灵活调整刻蚀深度和结构形状。

飞秒激光加工技术^[43]是利用飞秒激光的“极短脉冲宽度避免或缓解热效应”“极小焦斑尺寸实现材料微区精准去除”“极高峰值功率密度适用于任意固体材料”等特性,结合激光扫描路径精准规划和激光扫描参数精准调控,对任意固体材料实施微区精准去除的精密制造技术^[44]。中国工程物理研究院流体物理研究所的马云灿团队在单晶金刚石^[45]和碳化硅^[46]的一维复合折射透镜飞秒激光加工方面取得一定的研究进展。该团队近期实现了二维单晶金刚石复合折射透镜的高效(单面透镜加工耗时小于60 s)精密加工,其共聚焦形貌测量结果如图17所示。图17(a)展示了由8组一维金刚石基复合折射透镜组成的系统,每组包含11个透镜,焦距约为1.12 m;

图17(b)展示了25个二维金刚石基单片折射透镜的整体布局;图17(c)中纯黑色区域表示背景,灰白色区域为未聚焦的X射线,中间两个横向光斑分别为上下两组一维X射线折射聚焦透镜在竖直方向上聚焦形成的焦斑,其强度大约是原始X射线强度的15倍。通过对焦斑拟合,得到图17(d)图中的焦斑半高宽(Full Width at Half Maximum, FWHM)为11.6 μm 。从25个单片复合折射透镜中挑选出3个样品,使用激光共聚焦扫描显微镜搭配20倍物镜,选取透镜最高点到最低点进行扫描测量,获取到透镜面型的原始数据后利用VK-X3000_C多文件分析软件进行数据处理,进一步选取透镜表面部分区域测量透镜的面型粗糙度。结果如图17(e)和(f)所示,测量所得透镜的深度为422.5 μm ,粗糙度值(Sa)为0.369 6 μm 。目前,相关工艺条件仍在进一步优化。综上,飞秒激光加工技术展现出在高精度和复杂微纳结构折射透镜制造中的巨大潜力,为未来X射线光学元件的开发提供了重要参考。

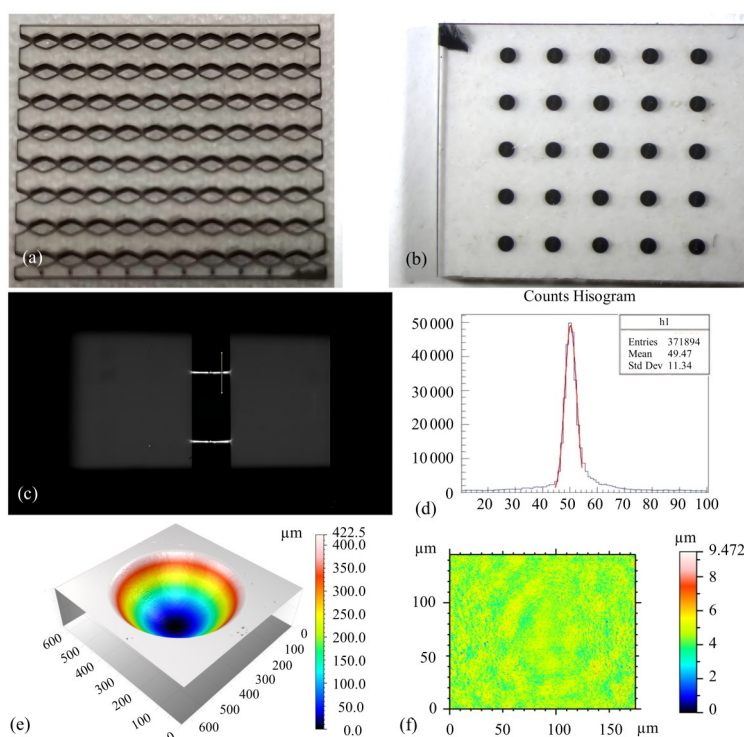


图17 金刚石基折射聚焦透镜(飞秒激光刻蚀)(彩图见网络版)

(a) 一维金刚石基复合折射透镜组, (b) 二维金刚石基单片折射透镜, (c) 一维金刚石基复合折射透镜的焦斑, (d) 拟合后焦斑的半高宽, (e) 二维金刚石基单片折射透镜的深度测量图, (f) 透镜表面部分区域的面型粗糙度测量

Fig.17 Diamond refractive focusing lens (femtosecond laser etching) (color online)

(a) 1D diamond compound refractive lens group, (b) 2D diamond single-element refractive lens, (c) Focal spot of the 1D diamond compound refractive lens, (d) FWHM of the focal spot after fitting, (e) Depth measurement of the 2D diamond single-element refractive lens, (f) Surface roughness measurement of a selected area on the lens surface

4 面型、陡直度和粗糙度

在一维透镜中,侧壁的粗糙度和陡直度是直接影响透镜性能的关键参数。对于二维透镜,面型和粗糙度则更加重要。面型和陡直度直接影响透镜的聚焦性能,理想情况下,这些影响可以通过相位片进行补偿。粗糙度不仅会影响聚焦点的强度增益,还会引入额外的散射信号,因此,粗糙度对系统的影响不容忽视,尤其是在四代光源的相干方法学中。

陡直度通常通过电子显微镜(电镜)测量,而面型则可通过多种方法进行测量,例如X射线在线测量和共聚焦显微镜的离线测量。然而,粗糙度的测量对于高曲率透镜来说并非易事,尽管使用共聚焦显微镜进行测量,但仍可能存在一定的误差。

通常认为,LIGA制造的光刻胶透镜(如SU8)具有较低的粗糙度,能够达到5 nm以下。相比之下,硅刻蚀的Bosch工艺^[47]能够将粗糙度控制在10 nm以下。对于压印制备的多晶铝和铍透镜,粗糙度通常在100 nm左右。金刚石和碳化硅的半导体深度刻蚀工艺目前的研究较少,且尚不如硅工艺成熟。金刚石的超快激光刻蚀工艺通常能够实现约300 nm的粗糙度,部分国际团队已将工艺水平提升至100 nm。

尽管现有技术在粗糙度控制方面已有进展,但高曲率透镜的测量与抛光仍面临诸多挑战,尤其是机械抛光容易破坏高曲率表面。因此,粗糙度对透镜性能的影响不可忽视,未来的研究亟需进一步优化相关工艺,以提高透镜的整体性能。

5 结语

复合折射透镜(CRLs)是利用折射机制聚焦X射线的早期关键技术,适用于低能X射线。然而,透镜数量多导致X射线吸收较为严重,限制了其在高分辨率成像中的应用。理想笛卡尔椭圆透镜(OVAL)基于CRLs优化了表面形状,克服了几何光学缺陷,实现高精度二次聚焦。Kinoform透镜通过去除CRLs中相位为 2π 整数倍的材料,降低了X射线的吸收。OVAL_Kinoform透镜结合了OVAL透镜的无像差聚焦特点和Kinoform结构减少吸收的优势,适用于高精度成像和纳米级分析,具有广泛应用潜力。

由于X射线折射透镜的工艺误差不可避免,因此利用变焦透镜或相位板校正工艺误差可以有效避免重新制作透镜。阿尔瓦雷斯变焦透镜(AXL)与两种相位板无需改变透镜面型,只需根据波前误差进行优化,但也会增加材料对X射线的吸收。锯齿形

X射线折射变焦透镜(SRL)通过机械调整位置和角度来改变焦距,从而使X射线穿过SRL透镜的厚度叠加后,等效为一维抛物面透镜。

因此,选择合适的校正方法以平衡性能与透射率至关重要,同时,材料的折射性能和吸收特性也会对聚焦系统的整体性能产生影响。

此外,为实现复杂光学元件和微结构,现代微制造技术如压印技术、3D打印、LIGA工艺、半导体刻蚀和飞秒激光加工被广泛应用。压印技术通过模具法制造铝质X射线透镜,适用于复杂透镜的高精度制造;3D打印利用双光子聚合直接打印复杂的三维结构,具备高精度和灵活性;LIGA工艺结合X射线光刻、电铸和成型技术,能够制备高深宽比的微结构,且其制得的曲率半径较小;半导体刻蚀技术(如电子束光刻EBL和深反应离子刻蚀DRIE)在硅或锗材料中实现精细微结构,具有高纵横比和精确控制的优势,且同样可以制备小曲率半径结构;飞秒激光加工利用超短脉冲雕刻硬质材料,热影响小,适合微纳结构加工。这些技术各具优势,有力支持X射线透镜的设计与优化,助力高精度、高性能光学系统的实现。

6 展望

随着X射线折射透镜制作技术和设计理念的不断进步,其在同步辐射装置和自由电子激光装置中的应用前景愈加广阔。目前,正在建设的北京高能光源(High Energy Photon Source, HEPS)一期工程中,超过一半的束线将采用X射线折射透镜技术。上海同步辐射光源自投入运行已有15年以上,已建成超过45个线站,其中许多线站能够利用X射线折射透镜进一步拓展其功能并推动方法学的发展。例如,超硬多功能线站^[48](BL12SW)通过利用SU8复合透镜进行聚焦,不仅为工程材料研究提供高能量(60~100 keV)的X射线探针,还能推动高压下原子对分布函数方法的研究^[49]。与此同时,通过使用Kinoform透镜实现一维聚焦光斑,可在表面衍射线站^[50](BL02U2)开展深度分辨的表面和界面结构研究^[51]。此外,CRL凭借其快速简洁的成像原理^[52],已被应用于同步辐射储存环电子束尺寸的测量^[53],这对四代环的调束运行具有重要意义。总的来说,随着光源发射度的不断降低以及X射线折射透镜技术的持续进步,X射线折射透镜将在未来的研究和应用中发挥越来越重要的作用。

致谢 感谢上海同步辐射光源BL09B线站与BL15U线站的科学家在单晶金刚石CRL和硅基

Kinoform 透镜聚焦性能测试方面提供的指导和帮助,同时衷心感谢马云灿老师团队提供的金刚石透镜试样。

作者贡献声明 鲁同所、黄国良负责本文章的整体思路构建、文献的筛选、透镜理论的推导、示意图的制作及论文撰写工作;任祖洋负责提供了模具压印方法的重要技术指导和语言表述修改;徐源泽、张耀武、张伟伟负责 OVAL 透镜与 OVAL_Kinoform 透镜的设计与理论指导;刘静负责 LIGA 的工艺优化与设计;黄其煜、徐剑、童振负责半导体加工工艺的表述与操作思路设计;杨兴负责提供了关键的理论指导与理论模型的建立;林鹤负责了文章的整体修改、研究思路的整合与优化,并对文章的逻辑结构和语言表述全面修改。

参考文献

- Yabashi M, Tanaka H. The next ten years of X-ray science (Short Survey)[J]. *Nature Photonics*, 2017, **11**(1): 12–14. DOI: 10.1038/nphoton.2016.251.
- Conroy G. World's brightest X-rays: China first in Asia to build next-generation synchrotron[J]. *Nature*, 2024, **629** (8013): 740. DOI: 10.1038/d41586-024-01346-4.
- Goldberg K A, Wojdyla A, Bryant D, *et al.* Collaborative development of diffraction-limited beamline optical systems at US DOE light sources[C]. *Advances in Metrology for X-ray and EUV Optics VIII*. August 11-15, 2019. San Diego, USA. SPIE, 2019. DOI: 10.1117/12.2530817.
- Schroer C G, Falkenberg G. Hard X-ray nanofocusing at low-emittance synchrotron radiation sources[J]. *Journal of Synchrotron Radiation*, 2014, **21**(Pt 5): 996 – 1005. DOI: 10.1107/S1600577514016269.
- Chapman H N. Fourth-generation light sources[J]. *IUCrJ*, 2023, **10**(3): 246 – 247. DOI: 10.1107/s2052252523003585.
- Jonnarda P, Benbalagha R, André J M. The X-ray analysis at high spectral resolution[J]. *Microscopy and Microanalysis*, 2005, **11**: 1274 – 1275. DOI: 10.1017/S1431927605510638.
- Lyatun I, Ershov P, Snigireva I, *et al.* Impact of beryllium microstructure on the imaging and optical properties of X-ray refractive lenses[J]. *Journal of Synchrotron Radiation*, 2020, **27**(Pt 1): 44 – 50. DOI: 10.1107/S1600577519015625.
- Huang X J, Wojcik M, Burdet N, *et al.* Quantitative X-ray wavefront measurements of Fresnel zone plate and K-B mirrors using phase retrieval[J]. *Optics Express*, 2012, **20** (21): 24038. DOI: 10.1364/oe.20.024038.
- Lun W H, Chen G D, Wu Z T, *et al.* Conductivity and corrosion resistance of TiSiC/MeN multilayer films[J]. *Ceramics International*, 2024, **50**(22): 48064 – 48073. DOI: 10.1016/j.ceramint.2024.09.154.
- Stüble P, Binder J R, Geßwein H. Tracing structural changes in energy materials: a novel multi sample capillary setup for in house powder X-ray diffraction[J]. *Electrochemical Science Advances*, 2022, **2**(6): e2100143. DOI: 10.1002/elsa.202100143.
- Chen Q C, Mu C Y, Tong X J, *et al.* Simulation study of zone-height limit by electron beam lithography for 30 nm Fresnel zone plates in X ray optics[J]. *Microelectronic Engineering*, 2023, **273**: 111965. DOI: 10.1016/j.mee.2023.111965.
- Chapman H N, Bajt S. A ray-trace analysis of X-ray multilayer Laue lenses for nanometer focusing[J]. *Journal of Optics*, 2020, **22**(11): 115610. DOI: 10.1088/2040-8986/abb9c2.
- Serebrennikov D, Clementyev E, Semenov A, *et al.* Optical performance of materials for X-ray refractive optics in the energy range 8 – 100 keV[J]. *Journal of Synchrotron Radiation*, 2016, **23**(6): 1315 – 1322. DOI: 10.1107/s1600577516014508.
- Breckling S, Kozioziemski B, Dresselhaus-Marais L, *et al.* An automated approach to the alignment of compound refractive lenses[J]. *Journal of Synchrotron Radiation*, 2022, **29**(4): 947 – 956. DOI: 10.1107/s1600577522004039.
- Snigirev A, Kohn V, Snigireva I, *et al.* A compound refractive lens for focusing high-energy X-rays[J]. *Nature*, 1996, **384**(6604): 49 – 51. DOI: 10.1038/384049a0.
- Schneider A, Su B, Button T W, *et al.* Comparison of PMMA and SU-8 resist moulds for embossing of PZT to produce high-aspect-ratio microstructures using LIGA process[J]. *Microsystem Technologies*, 2002, **8**(2): 88 – 92. DOI: 10.1007/s00542-001-0141-y.
- Khan Malek C G. SU8 resist for low-cost X-ray patterning of high-resolution, high-aspect-ratio MEMS[J]. *Microelectronics Journal*, 2002, **33**(1 – 2): 101 – 105. DOI: 10.1016/S0026-2692(01)00109-4.
- 杨兴. X射线Kinoform渐进聚焦折射透镜设计[D]. 拉萨: 西藏大学, 2022.
- YANG Xing. Design of X-ray kinoform progressive focusing refractive lens[D]. Lasa: Xizang University,

- 2022.
- 19 Evans-Lutterodt K, Ablett J, Stein A, *et al.* Single-element elliptical hard X-ray micro-optics[J]. *Opt Express*, 2003, **11**(8): 919 – 926. DOI: 10.1364/oe.11.000919.
- 20 Xu J, Liu G, Huang Q, *et al.* Kinoform and saw-tooth X-ray refractive lenses development at SSRF[J]. *Journal of Instrumentation*, 2018, **13**(7): C07005. DOI: 10.1088/1748-0221/13/07/c07005.
- 21 Li T Y, Li L Q, Jiang L, *et al.* Reconfigurable hologram response to liquid via the femtosecond laser direct writing of 3D micropillars[J]. *Advanced Optical Materials*, 2024, **12**(29): 2400612. DOI: 10.1002/adom.202400612.
- 22 Lin H, Yang S N, Liu X Q. X-ray kinoform lenses made using femtosecond laser technique[C]//*Advances in X-Ray/EUV Optics and Components XV*. August 24-28, 2020. Online Only, USA. SPIE, 2020. DOI: 10.1117/12.2566919.
- 23 Sutter J P, Alianelli L. Aberration-free aspherical lens shape for shortening the focal distance of an already convergent beam[J]. *Journal of Synchrotron Radiation*, 2017, **24**(6): 1120 – 1136. DOI: 10.1107/s1600577517011808.
- 24 Xu Y Z, Yang X, Lu T S, *et al.* Adiabatically focusing X-rays to the nanometer scale by one dimensional long kinoform lenses: comparison between an ideal Cartesian oval refocusing lens and a parabolic lens[J]. *Optics Express*, 2022, **30**(2): 2402. DOI: 10.1364/oe.449201.
- 25 张秉华. 北京同步辐射装置(BSRF)X射线光刻系统的现状和未来[J]. *光电工程*, 1994(5): 44 – 50.
ZHANG Binghua. Current status and future of the X-ray lithography system at the Beijing Synchrotron Radiation Facility (BSRF) [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 1994 (5): 44 – 50.
- 26 Chkhalo N I, Salashchenko N N. Current state and prospects for the development of X-ray lithography[J]. *Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 2023, **17**(1): 307 – 316. DOI: 10.1134/s1027451022060349.
- 27 Alvarez L W. Two-element variable-power spherical lens [P]. US Patent, 3305294, 1967-02-21.
- 28 Dhamgaye V, Laundry D, Khosroabadi H, *et al.* Alvarez varifocal X-ray lens[J]. *Nature Communications*, 2023, **14**: 4582. DOI: 10.1038/s41467-023-40347-1.
- 29 Cederström B, Cahn R N, Danielsson M, *et al.* Focusing hard X-rays with old LPs[J]. *Nature*, 2000, **404**(6781): 951. DOI: 10.1038/35010190.
- 30 Said A H, Shastri S D. Silicon saw-tooth refractive lens for high-energy X-rays made using a diamond saw[J]. *Journal of Synchrotron Radiation*, 2010, **17**(3): 425 – 427. DOI: 10.1107/s0909049510003584.
- 31 Shastri S D, Almer J, Ribbing C, *et al.* High-energy X-ray optics with silicon saw-tooth refractive lenses[J]. *Synchrotron Radiation*, 2007, **14**(Pt 2): 204 – 211. DOI: 10.1107/S0909049507003962.
- 32 Seiboth F, Brückner D, Kahnt M, *et al.* Hard X-ray wavefront correction via refractive phase plates made by additive and subtractive fabrication techniques[J]. *Journal of Synchrotron Radiation*, 2020, **27**(5): 1121 – 1130. DOI: 10.1107/s1600577520007900.
- 33 Dhamgaye V, Laundry D, Baldock S, *et al.* Correction of the X-ray wavefront from compound refractive lenses using 3D printed refractive structures[J]. *Journal of Synchrotron Radiation*, 2020, **27**(6): 1518 – 1527. DOI: 10.1107/s1600577520011765.
- 34 Laundry D, Moxham T, Dhamgaye V, *et al.* Refractive optics for modifying X-ray wavefronts[J]. *Synchrotron Radiation News*, 2021, **34**(6): 27 – 31. DOI: 10.1080/08940886.2021.2022400.
- 35 Tong Z, Zhong W B, Zeng W H, *et al.* Closed-loop form error measurement and compensation for FTS freeform machining[J]. *CIRP Annals*, 2021, **70**(1): 455 – 458. DOI: 10.1016/j.cirp.2021.04.072.
- 36 Tong Z, Zhong W B, To S, *et al.* Fast-tool-servo micro-grooving freeform surfaces with embedded metrology[J]. *CIRP Annals*, 2020, **69**(1): 505 – 508. DOI: 10.1016/j.cirp.2020.04.111.
- 37 Angstenberger S, Ruchka P, Hentschel M, *et al.* Hybrid fiber – solid-state laser with 3D-printed intracavity lenses [J]. *Optics Letters*, 2023, **48**(24): 6549. DOI: 10.1364/ol.504940.
- 38 Wang H, Pan C F, Li C, *et al.* Two-photon polymerization lithography for imaging optics[J]. *International Journal of Extreme Manufacturing*, 2024, **6**(4): 042002. DOI: 10.1088/2631-7990/ad35fe.
- 39 杜立群, 朱神渺, 刘冲. UV-LIGA 工艺中 SU-8 光刻胶的热溶胀性研究[J]. *压电与声光*, 2008, **30**(5): 621 – 623.
DU Liqun, ZHU Shenmiao, LIU Chong. Study on the thermal swelling of SU-8 photoresist in UV-LIGA process [J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2008, **30**(5): 621 – 623.
- 40 Zhang W W, Liu J, Chang G C, *et al.* Large-aperture prism-array lens for high-energy X-ray focusing[J].

- Journal of Synchrotron Radiation, 2016, **23**(5): 1091 - 1096. DOI: 10.1107/s1600577516011152.
- 41 Richter K, Mockler A, Bartha J W. High quality semicontinuous deep reactive ion etching of silicon for the creation of X-ray lenses[J]. Journal of Vacuum Science & Technology B, 2017, **35**(3): 031206. DOI: 10.1116/1.4982712.
 - 42 Shariar K F, Zhang J, Coasey K, *et al.* The effects of ICP dry etching and HF wet etching on the morphology of SiO₂ surface[J]. Materials Research Express, 2018, **5**(9): 095903. DOI: 10.1088/2053-1591/aad591.
 - 43 Kononenko T V, Ralchenko V G, Ashkinazi E E, *et al.* Fabrication of polycrystalline diamond refractive X-ray lens by femtosecond laser processing[J]. Applied Physics A, 2016, **122**(3): 152. DOI: 10.1007/s00339-016-9683-9.
 - 44 Li Z Z, Fan H, Wang L, *et al.* Super-stealth dicing of transparent solids with nanometric precision[J]. Nature Photonics, 2024, **18**(8): 799 - 808. DOI: 10.1038/s41566-024-01437-8.
 - 45 孟立民, 何煦, 马云灿, 等. 金刚石复合折射透镜的设计及加工初探[J]. 应用光学, 2023, **44**(6): 1273 - 1279. DOI: 10.5768/JAO202344.0610015.
MENG Limin, HE Xu, MA Yuncan, *et al.* Preliminary study on design and processing of diamond compound refractive lens[J]. Journal of Applied Optics, 2023, **44**(6): 1273 - 1279. DOI: 10.5768/JAO202344.0610015.
 - 46 何煦, 孟立民, 马云灿, 等. 高重复频率飞秒激光高效加工硬X射线复合折射透镜[J]. 中国激光, 2024, **51**(16): 1602405. DOI: 10.3788/CJL231269.
HE Xu, MENG Limin, MA Yuncan, *et al.* Efficient fabrication of compound refractive lens for hard X-ray using high-repetition-rate femtosecond laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2024, **51**(16): 1602405. DOI: 10.3788/CJL231269.
 - 47 Liu H C, Lin Y H, Hsu W. Sidewall roughness control in advanced silicon etch process[J]. Microsystem Technologies, 2003, **10**(1): 29 - 34. DOI: 10.1007/s00542-003-0309-8.
 - 48 Yang K, Dong Z H, Zhou C Y, *et al.* Ultrahard X-ray multifunctional application beamline at the SSRF[J]. Nuclear Science and Techniques, 2024, **35**(6): 98. DOI: 10.1007/s41365-024-01468-4.
 - 49 Zhou X J, Tao J Z, Guo H, *et al.* Atomic pair distribution function method development at the Shanghai Synchrotron Radiation Facility[J]. Chinese Physics B, 2017, **26**(7): 266 - 273.
 - 50 Gu Y L, Zheng X, Zhang X M, *et al.* Surface diffraction beamline at the SSRF[J]. Nuclear Science and Techniques, 2024, **35**(7): 116. DOI: 10.1007/s41365-024-01490-6.
 - 51 Tiwari M K, Alianelli L, Dolbnya I P, *et al.* Application of kinoform lens for X-ray reflectivity analysis[J]. Journal of Synchrotron Radiation, 2010, **17**(2): 237 - 242. DOI: 10.1107/S0909049509055009.
 - 52 钟长游, 汪启胜, 刘科, 等. BL17U短波长X射线聚焦方案优化[J]. 核技术, 2018, **41**(5): 050102. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2018.hjs.41.050102.
ZHONG Changyou, WANG Qisheng, LIU Ke, *et al.* Optimized focusing plan for short X-ray wavelengths mode at BL17U in SSRF[J]. Nuclear Techniques, 2018, **41**(5): 050102. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2018.hjs.41.050102.
 - 53 Folomeshkin M S, Kohn V G, Seregin A Y, *et al.* A new method for determining the size of a synchrotron radiation beam in the focus of a compound refractive lens [J]. Crystallography Reports, 2023, **68**(1): 1 - 6. DOI: 10.1134/S1063774523010078.