

---

# 复消色差X射线聚焦

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/24275.html>

**本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！**

衍射透镜和折射透镜在X射线分析和高分辨率X射线显微系统中广泛应用。然而这两种透镜的高色散特性导致不同波长的X射线焦点位置不同，从而造成成像时的色差问题，成像质量大打折扣。因此，利用衍射或折射透镜的X射线显微成像系统通常使用高度单色性的光来避免色差现象，其代价则是大量的X射线被浪费。

在可见光领域，消色差透镜的使用已有百年之久，通过两种色散力不同的玻璃并满足相应的曲率条件的双透镜来实现。而在X射线领域，大部分物质对X射线的色散力差异极小，同样的方法并不适用。

21世纪初，研究者提出一种新型的解决方案，将折射透镜和衍射透镜组合在一起，利用两种类型透镜色散力的显著差异达成消色差的条件。然而，囿于制造技术水平的限制，这种解决方案的设计仅限于理论阶段。

近年来，微纳制造技术快速发展，基于双光子聚合的3D打印技术日趋成熟，使适用于该系统的高数值孔径的复合折射透镜的制造成为可能。

近日，瑞士保罗谢尔研究所的Umut T. Sanli、齐鹏，巴塞尔大学的Griffin Rodgers和德国电子同步加速器研究所（DESY）的Jan Garrevoet等研究人员以 Apochromatic X-ray focusing（复消色差X射线聚焦）为题在Light: Science Applications发表研究论文。

消色差(achromatic)透镜由具有不同色散能力的两个透镜组成，可将两个不同波长的光聚焦到同一点，从而在一定波长范围内达到消色差效果。

复消色差(apochromatic)透镜可以认为是消色差透镜的改进版，色偏移曲线是三次方程，可将三个不同波长的光聚焦到一点，使消色差的波长范围提升数倍，见图1。

图1：X射线复消色差聚焦原理：折射透镜和菲涅尔波带片以特定间隔前后放置，色差相互纠正，三种不同的能量/波长的X射线可同时聚焦于点F。

在可见光领域，消色差和复消色差透镜存在已有百年之久。而在X射线领域，直到2022年世界上首个消色差透镜才刚刚问世。本文报道了该研究团队在消色差透镜的工作基础上，使用满足特殊条件的菲涅尔波带片 (FZP) 和复合折射透镜 (CRL)，成功研制的世界上首个X射线复消色差透镜系统。实验显示，该复消色差透镜在7 keV到12 keV的能量范围内表现出良好的消色差效果，相比消色差透镜，消色差范围提高了四倍，可以更广泛地应用于折射和衍射透镜的色差校正。

该研究开发的复消色差X射线透镜系统由两个相互独立的光学元件组成：一个是双光子聚合3D打印技术制造的复合折射透镜，另一个是通过电子束光刻和金电镀制造菲涅尔波带片，见图2。

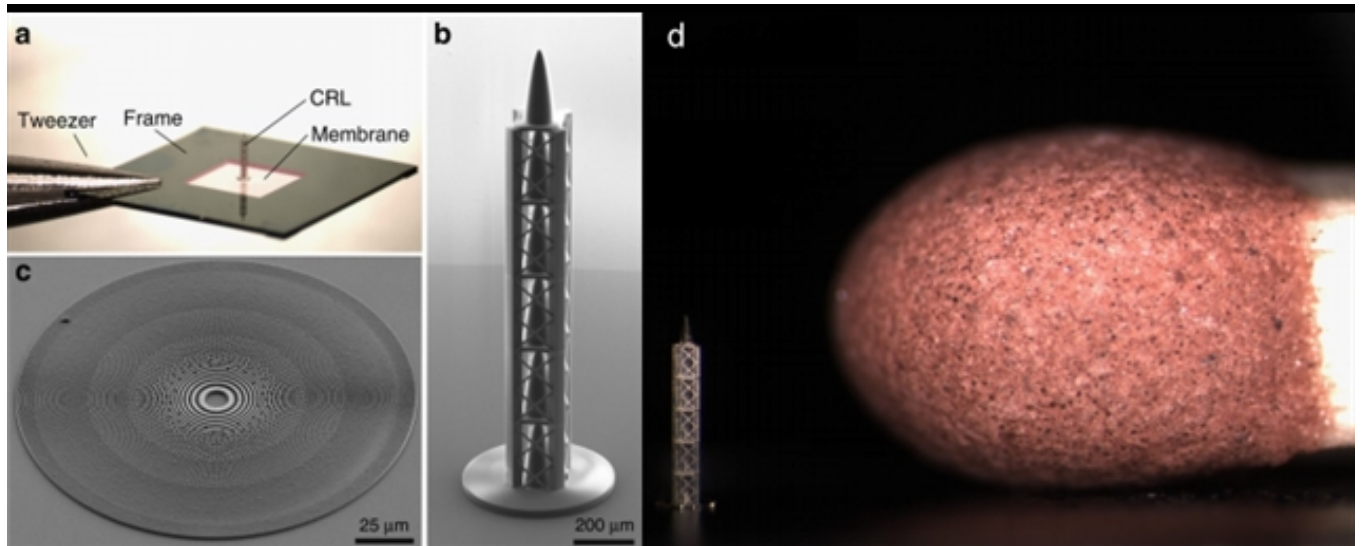


图2. X射线复消色差透镜的组成部分。a) 3D打印的发散型CRL置于250纳米厚的氮化硅膜上的光学显微镜图像；b) 复合折射透镜和c) 45度视角的波带片的扫描电子显微镜图像；d) 复合折射透镜（左下角）与火柴棒的对比。

在德国PETRA III同步辐射P06光束线上进行的X射线扫描透射显微成像和叠层成像测量结果显示，该透镜系统在7至12 keV的X射线能量范围内表现出极佳的消色差性能，见图3。

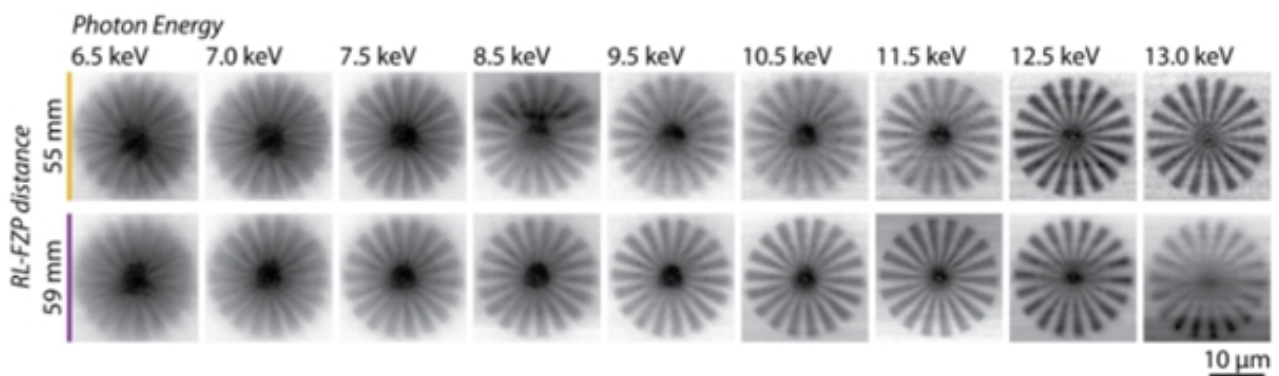


图3：Siemens星测试样品在不同能量X射线束中的扫描透射显微图像（样品在光轴上位置无变化）。图中展示了两个不同的FZP-CRL分离距离d。

相比前述报道的初代X射线消色差透镜，复消色差透镜的有效能量范围提高了四倍。该系统的实

---

现对短曝光时间和高信噪比的时间分辨实验有重要意义。

该系统亚微米尺寸的焦点可分辨480 nm线宽的测试样品。纳米3D打印技术的发展使数值孔径更高的光学元件的制备并不困难，可以进一步提高其空间分辨率。但由于折射透镜对X射线的吸收，实现100纳米以内的高分辨率仍然颇具挑战。在硬X射线波段，相对较低的X射线吸收可以带来更大的改进空间。纳米级3D打印技术的快速发展将是实现所需折射结构制造的关键。

X射线消色差和复消色差透镜的问世，是X射线显微成像领域具有里程碑意义的重大进展，甚至有可能以其经济、紧凑和同轴成像的优势取代现有的反射镜系统，将在基于加速器和实验室X射线源的显微成像系统中扮演越来越重要的角色。（来源：中国光学）

相关论文信息：<https://doi.org/10.1038/s41377-023-01157-8>

作者：齐鹏等 来源：《光：科学与应用》

更多 科学进展 请访问 <https://www.iikx.com/news/progress/>

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，[爱科学iikx.com](https://www.iikx.com)转发