
透镜像差的“变废为宝”，实现曲面微圆环光刻

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/36430.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！

透镜像差的“变废为宝”，实现曲面微圆环光刻。导读

近期，哈尔滨工业大学陆振刚教授团队利用球面凸透镜像差可使光束在轴向分层汇聚的特性，提出一种非显微物镜的光束聚焦光刻方法，可将准直的空心光束调制为宽度更细的圆环形光斑，在曲面基底上直接一次曝光生成完整圆环形超表面微结构图形。基于该方法设计的光刻装置性能优异，不仅曝光获得的圆环微结构线宽和直径调节范围远超同类圆环光刻方法，而且，相比于传统显微物镜激光直写方法，其焦深范围更广、工作距离更长，可有效降低直写设备硬件需求，并为基底的位姿调整提供更大的空间冗余。该方法同时具备低成本、高效率、高性能优势，不仅可用于曲面基底上光刻制造圆环形金属网栅、超表面等微结构单元，还有望为多种激光加工应用提供可行的方案。

该成果以Ultra-Long Focal Depth Annular Lithography for Fabricating Micro Ring-Shaped Metasurface Unit Cells on Highly Curved Substrates为题发表于Light: Advanced Manufacturing。

当前，随着电子信息技术的快速发展和广泛应用，电磁波调控、电磁屏蔽等需求日益凸显，电磁超表面、金属网栅等电磁功能材料的研究和制造受到持续关注。然而，现有的超表面制造技术仍然以平面基底或柔性基底为主，硬质曲面基底上的超表面微结构制造技术则鲜有进展。现实应用中，车辆、船舶、飞行器大量使用曲面轮廓的外壳、蒙皮，以满足耐高压、降低阻力等需求。在很多装备的外壳上，都配备有用于人眼或光电设备观察、探测的光窗。为保持装备的性能，光窗的轮廓也必然要与外壳共形为宜。但如何在这类曲面光窗上加工制造微结构，仍然是一个现实难题。

使用掩模的光刻方法缺乏灵活性，且曲面掩模的加工也存在困难；激光直写等无掩模光刻需要时刻保持曝光光束与待曝光区域的相对位置，对运动台和对准系统的要求极高，位于三维空间中的曲面更加难以达到光刻对准精度需求；柔性材料拉伸、自组装等其他方法不仅存在工艺难点，而且很难精准控制单元结构的位置和形状。

圆环光刻是一种结构简单、加工效率高的圆环图形专用光刻方法，同时也具有一定的灵活性，但其可加工的最小特征尺寸不足以满足多数电磁功能材料应用的需求，且鲜有用于曲面基底结构的制造。基于圆环光刻加工图形的特点，研究团队利用凸透镜的像差产生最小特征尺寸更窄的圆环光束，并具备长焦深、长工作距离等特性，满足曲面微结构加工需求。

研究团队设计的基于像差汇聚的圆环光刻系统（下文简称为ACAL光刻系统）原理图如图1所示，激光器发出的高斯光束经过两个锥透镜后生成准直的空心光束，空心光束进入凸透镜组，在其

像差和缩放的共同作用下形成可供光刻的细圆环光斑。配合调整锥透镜和凸透镜的间距，可改变圆环光斑直径。团队搭建了实验系统，并开展相应的性能测试。

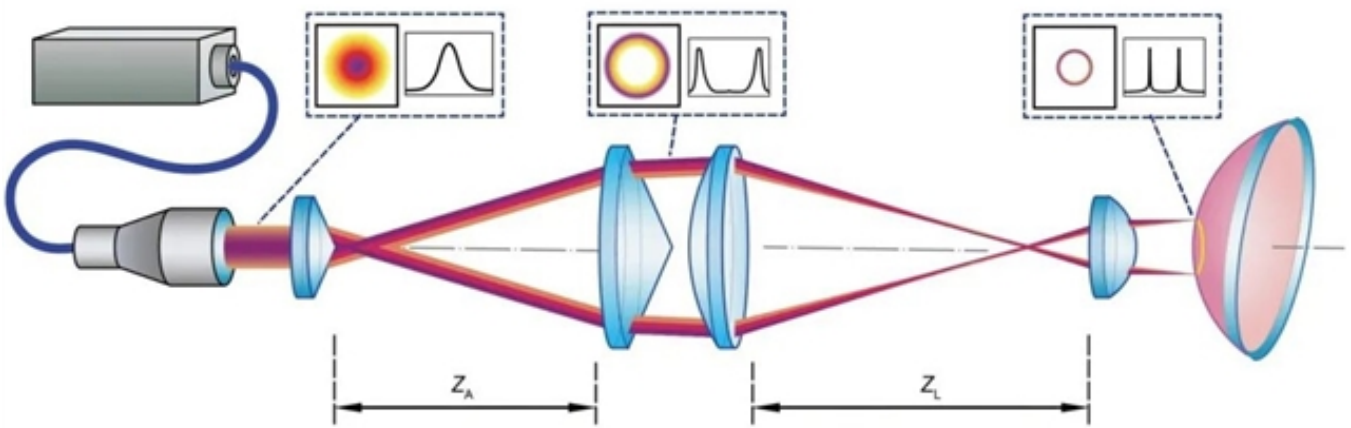


图1：像差汇聚圆环光刻系统的原理示意图

ACAL光刻系统在像面位置的光斑如图2a所示，圆环光斑直径和结构可调整，可适用于多种应用需求。图2b中展示了ACAL光刻系统通过切换凸透镜组，可以改变圆环直径调整范围。该实验结果与近年来的典型圆环光刻实验结果相比，最小圆环结构宽度（特征尺寸）获得超过10倍的提升，可实现最小的圆环结构平均线宽为1.79 μm 。同时，圆环直径变化的可调节范围比例也远超对照成果。

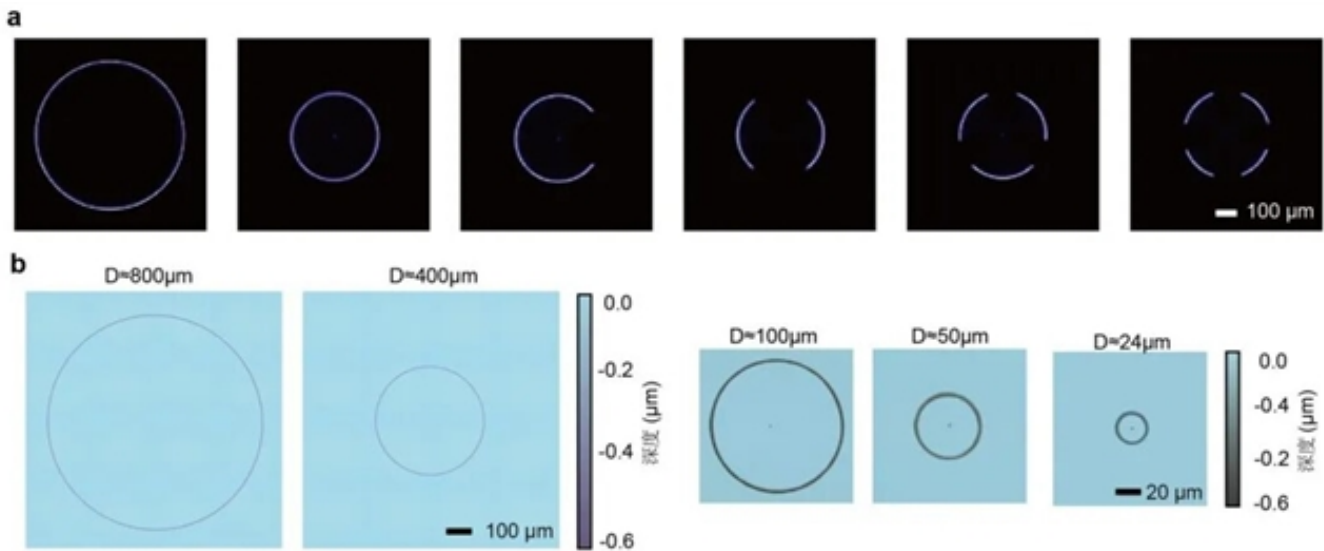


图2：a. 相机在像面位置采集不同尺寸和结构的圆环 b. 不同直径的圆环在光刻胶上的曝光结果

与传统的激光直写光刻方法(DLWL)相比，ACAL具有极强的离焦鲁棒性。图3展示了等效焦深范围测试实验使用的测试方法以及实验结果，表明ACAL方法可在离焦距离达到DLWL方法10倍左右的情况下，依然可以制造线宽和边缘质量相近的微圆环结构。

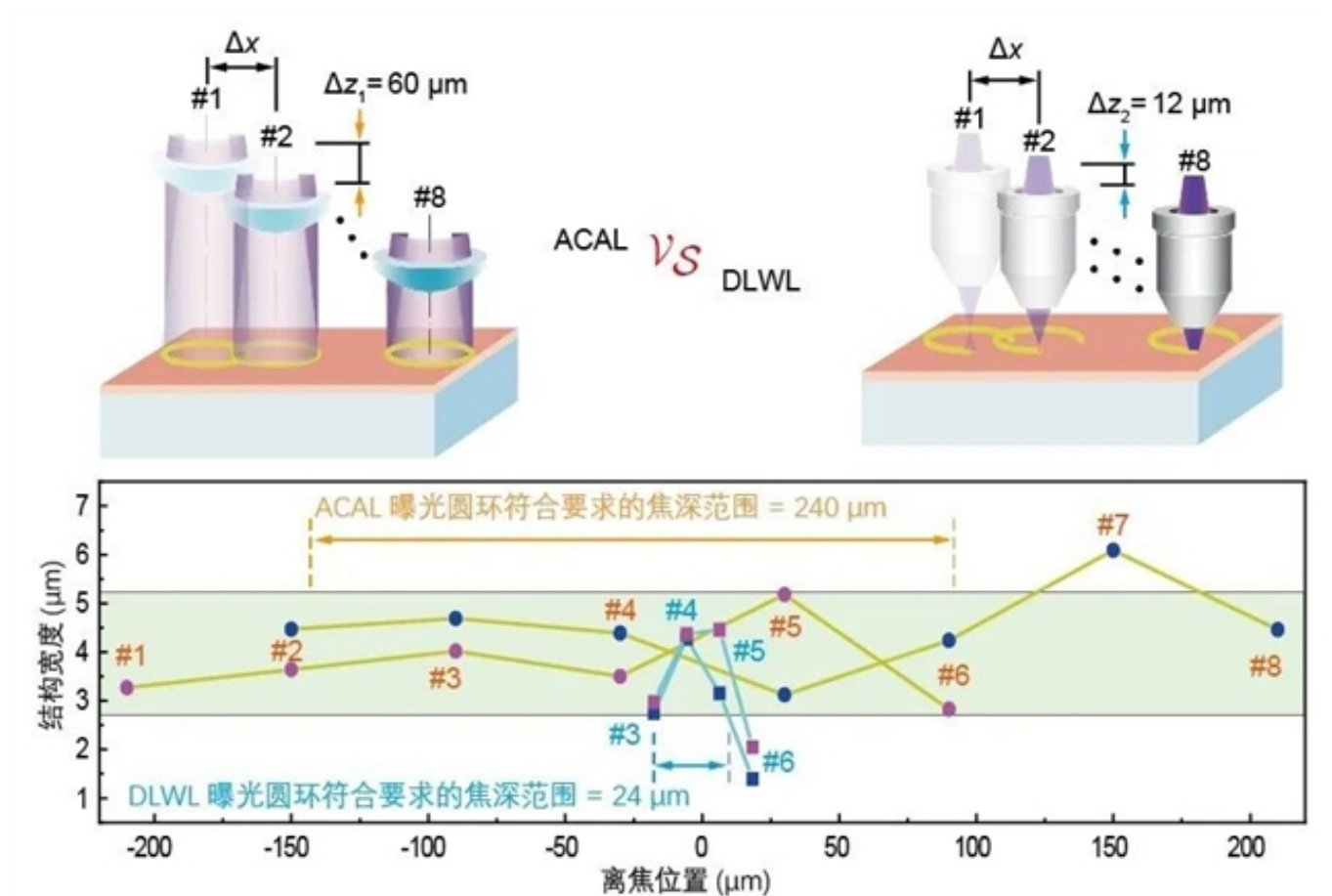


图3：测试对比ACAL与传统的DLWL方法在曝光圆环单元时焦深范围

在涂有光刻胶的球面基底上，ACAL方法也表现优秀。使用图4a中的基底进行验证，在曝光过程中只横向移动球面基底，不调整垂向的ACAL光路。曝光结果如图4b所示，圆环1的倾斜角度较大、离焦也很大，但圆环依然轮廓清晰。图4c所示的圆环3位于球面顶点附近，其曝光质量最好，线宽和边缘质量与平面的曝光结果相近。可见，由于ACAL方法具备长焦深的优势，离焦和位置误差对实际曝光结果影响较小。

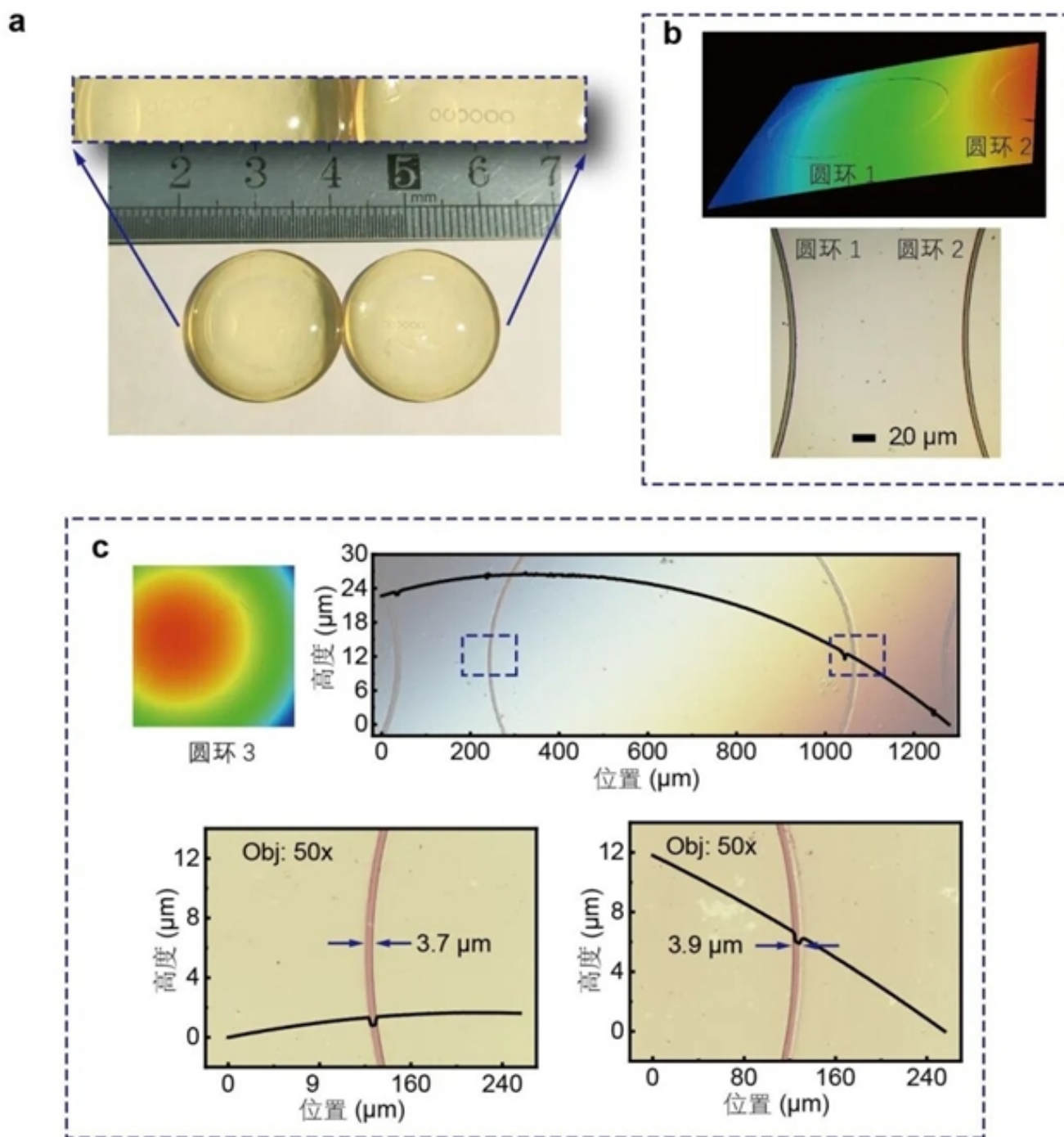


图4：在未经离焦误差调整的球面基底上曝光测试

总结与展望

本研究提出了一种高可行性的曲面微圆环单元光刻制造方法。针对定位调整困难、空间冲突、制造效率低等曲面基底光刻制造的瓶颈问题，像差汇聚环形光刻方法充分利用球面透镜像差特性，产生长焦深、长工作距离、单次曝光生成完整圆环等优势化解难题。该方法的简单、高效使其有利于曲面超表面圆环微结构的光刻制备。与此同时，作为一种圆环光束的汇聚方式，该方法可以

与双光子聚合光刻、增材制造、激光打孔和激光刻蚀等方法结合。相信这种创新性的方法将会具有更加广阔的应用空间。（来源：先进制造微信公众号）

相关论文信息：<https://doi.org/10.37188/lam.2025.056>

特别声明：本文转载仅仅是出于传播信息的需要，并不意味着代表本网站观点或证实其内容的真实性；如其他媒体、网站或个人从本网站转载使用，须保留本网站注明的“来源”，并自负版权等法律责任；作者如果不希望被转载或者联系转载稿费事宜，请与我们联系。

作者：陆振刚等 来源：《光：先进制造》

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