王添翼黄磊等 LAM 全自主原子级X射线聚焦镜突破

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：https://www.iikx.com/news/progress/43150.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！

王添翼黄磊等 LAM 全自主原子级X射线聚焦镜突破。 导读

近期，美国布鲁克海文国家实验室王添翼、黄磊团队在Light: Advanced Manufacturing发表了题为"In-house pipeline from atomic-scale fabrication to at-wavefront validation of synchrotron X-ray nanofocusing mirrors" 的研究论文。

该研究成功打通了全美全链路、闭环的同步辐射硬X射线纳米聚焦镜制造与验证平台。团队利用确定性离子束修形技术，实现了原子级精度的面形控制。研究在原位光束线测试中获得了优异的聚焦性能，成功实现了30纳米量级的超高分辨率显微成像。该集成制造框架的成功运转，真正实现了下一代同步辐射以及自由电子激光所需的原子级光学元件的确定性交付。

光源亮度到波前保持

随着全球第三代、第四代同步辐射光源逐步迈向衍射极限，X射线显微成像的技术瓶颈已经发生了根本性转移。在传统同步辐射光源中，科学家主要受限于光源的初始亮度。而如今，高相干性、高通量的光束源源不断，如何完整地传输并保持光束的波前特征，成为了决定最终成像分辨率的核心难题。

在掠入射聚焦系统中，KB（Kirkpatrick—Baez）反射镜是目前最为主流的调控器件，然而，在这种极端精密的光学系统中，镜面只要产生纳米级别的微小形貌偏差，就会在光束传输中转化为不可逆的相位畸变。这些加工误差不仅会使聚焦光斑散开、降低空间分辨率，还会将光束能量错误地重新分配到反射镜周边的散射光晕中。在实际的显微镜检测中，这种光晕会大幅抬高背景噪声，严重抑制图像的对比度，进而导致微弱特征无法被探测器识别。

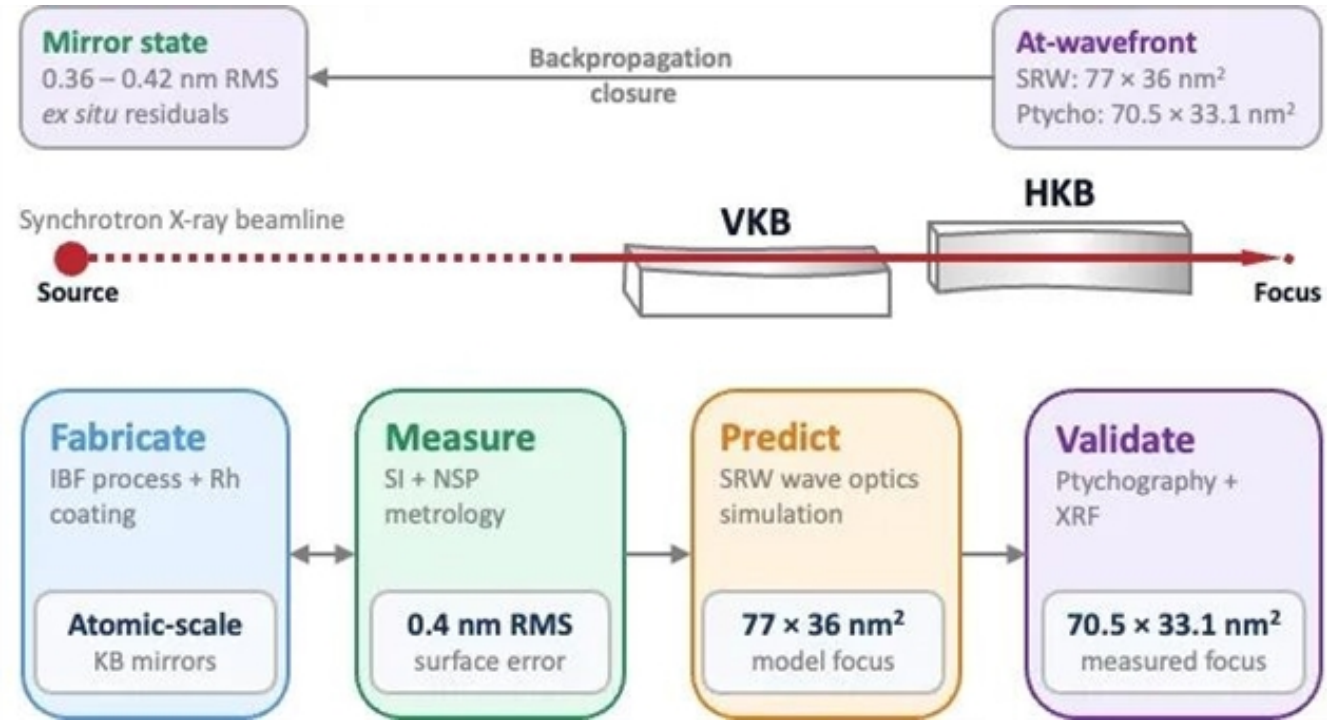


图1：同步辐射硬X射线纳米聚焦全链路闭环流程示意图

为了攻克这一系统性制造瓶颈，美国布鲁克海文国家实验室（BNL）的研发团队在国家同步辐射光源二代（NSLS-II）建立了全链路闭环平台。该平台将原子级制造、高精度离线计量、前向光波学模拟以及原位波前验证紧密串联在一起，实现了光学元件性能的确定性交付。

X射线反射镜的原子级制造

研究团队依托自主研发的确定性离子束修形（IBF）系统，对椭圆柱面KB聚焦镜开展了分时、分级的精确材料去除。基于自主研发的RISE驻留时间算法以及E-
PVT运动规划算法，团队对全束流（Full
Beam）与不同孔径束流的精确控制进行了细致优化，克服了复杂几何表面面形校正的收敛难题。在经历最终修形与金属铑（Rh）涂层镀膜后，干涉拼接计量结果显示，全口径内的残余面形误差被成功控制在0.4 nm RMS（均方根）以内的原子级水平
。这种极致的表面质量，为消除光束相位畸变提供了坚实的物理硬件基础。

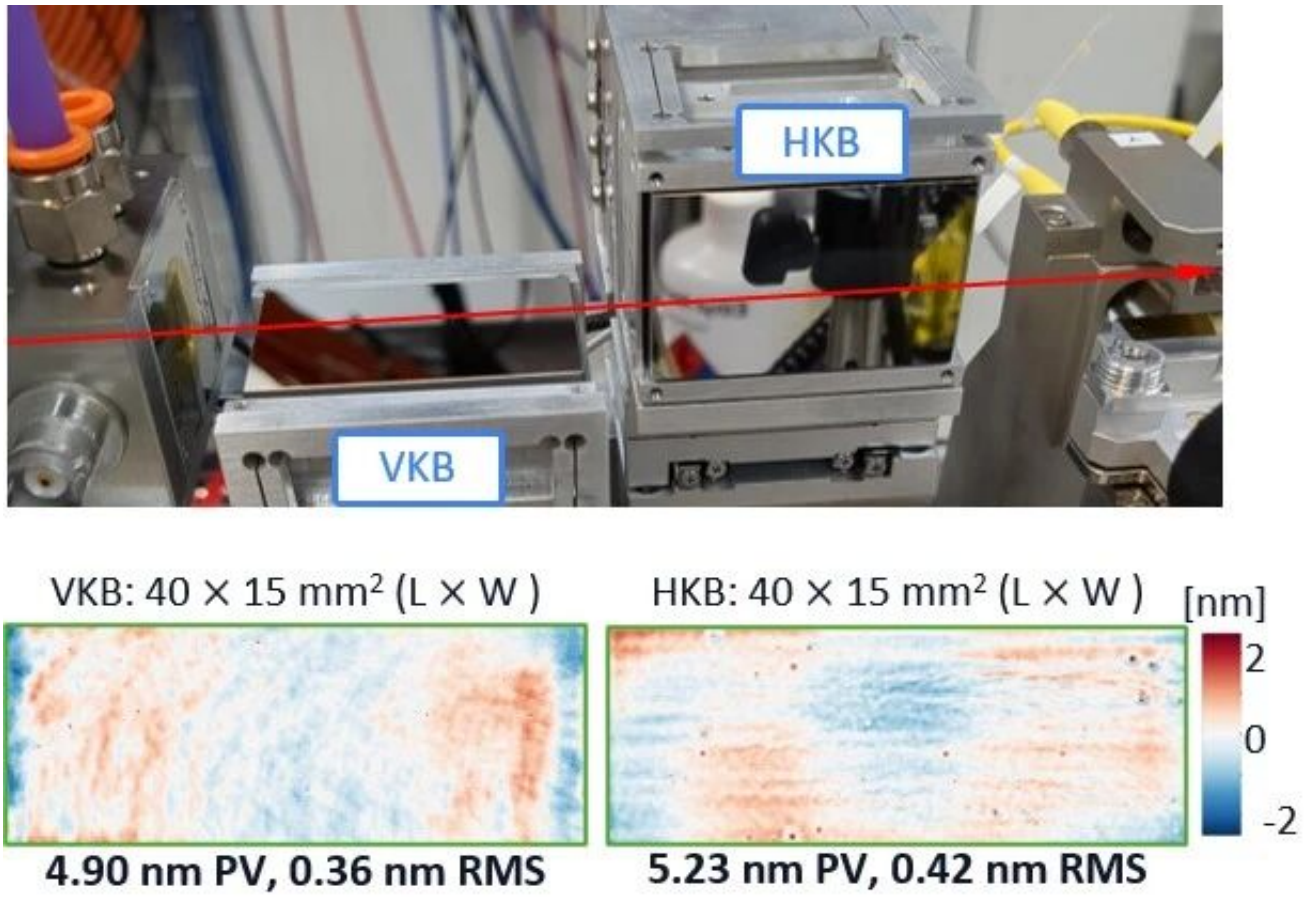


图2：KB柱面聚焦镜经确定性离子束修形后的全口径残余表面高度误差分布图

在位检测验证纳米级聚焦

在12 keV的硬X射线能量下，研究团队在NSLS-II的HXN光束线站对这套KB聚焦系统进行了在位性能测试。团队借助不需要传统光学透镜的叠层衍射成像（Ptychography）技术，成功反演重建出了聚焦处的复探针波前分布。实验测量得到的实际聚焦光斑达到了 70.5 × 33.1 nm2（垂直 × 水平，半极大全宽），这一原位测量结果与基于 SRW软件的部分相干光前向波学仿真结果（77 × 36 nm2）高度吻合，有力证实了系统在实际运行中的卓越调控能力。

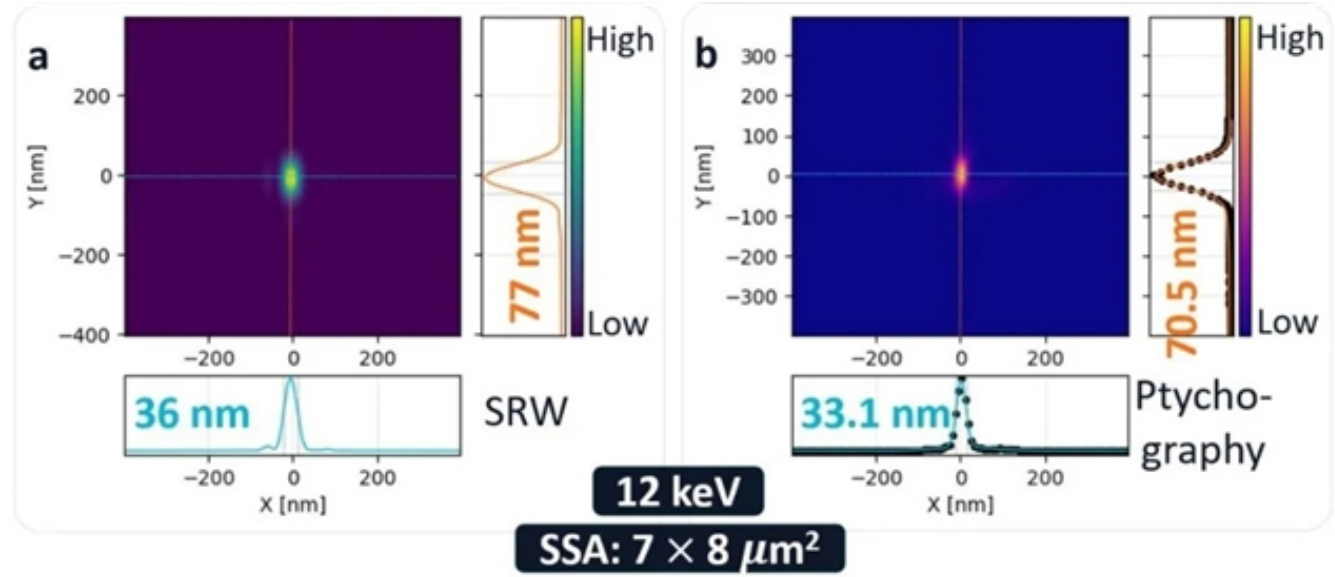


图3：基于SRW部分相干光仿真与原位 Ptychography 实验重建的焦点大小对比图

达到30纳米级真实分辨

为了进一步检验该原子级聚焦镜在真实科学成像中的实际表现，研究人员利用高通量X射线荧光（XRF）技术，对标准的西门子星（Siemens star）微纳测试标靶进行了精细的光栅扫描成像。在 5 nm 步长的精细扫描下，成像结果不依赖于任何复杂的反演模型推导，直接以可视化的形式清晰分辨出了测试标靶最内侧线宽仅为 30 nm 左右的辐条（spokes）特征。这一真实空间成像结果，独立佐证了系统具备30纳米级别的超高显微空间分辨能力。

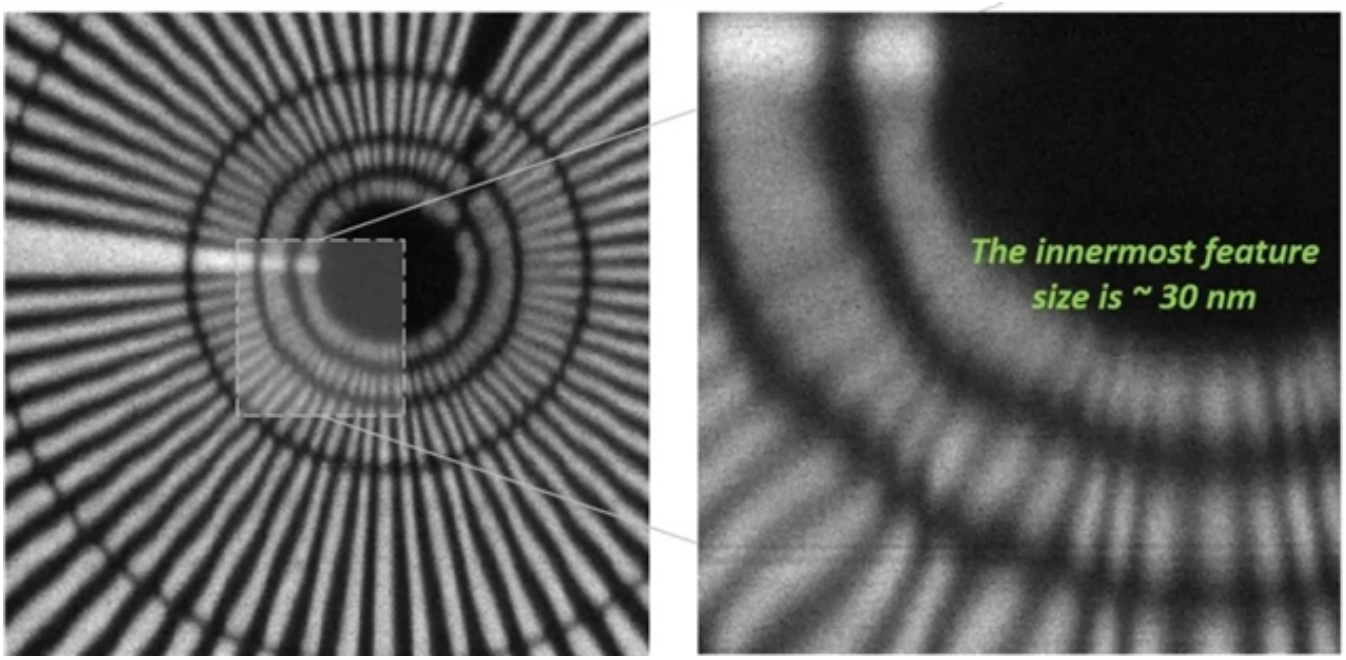


图4：西门子星测试标靶的超高分辨率X射线荧光成像及30 纳米级别空间分辨结果图

从加工到光束线到闭环自洽

该项成果的研究价值在于其实现了制造与应用端波前的闭环全链路验证。研究团队不仅完成了从面形到光斑的前向波学预测，更将原位叠层衍射成像重建出的探针波前，利用波动光学传播模型反向回传到KB镜面所在的瞳孔平面上。反向推导出的等效表面残余误差在结构形态和误差幅值上，均与加工后离线多工具计量的形貌数据展现出了完美的空间对应性与自洽性。这标志着精密制造环路彻底闭合，证明系统在机械安装和高强度辐射下未引入任何额外的低阶错位形变。

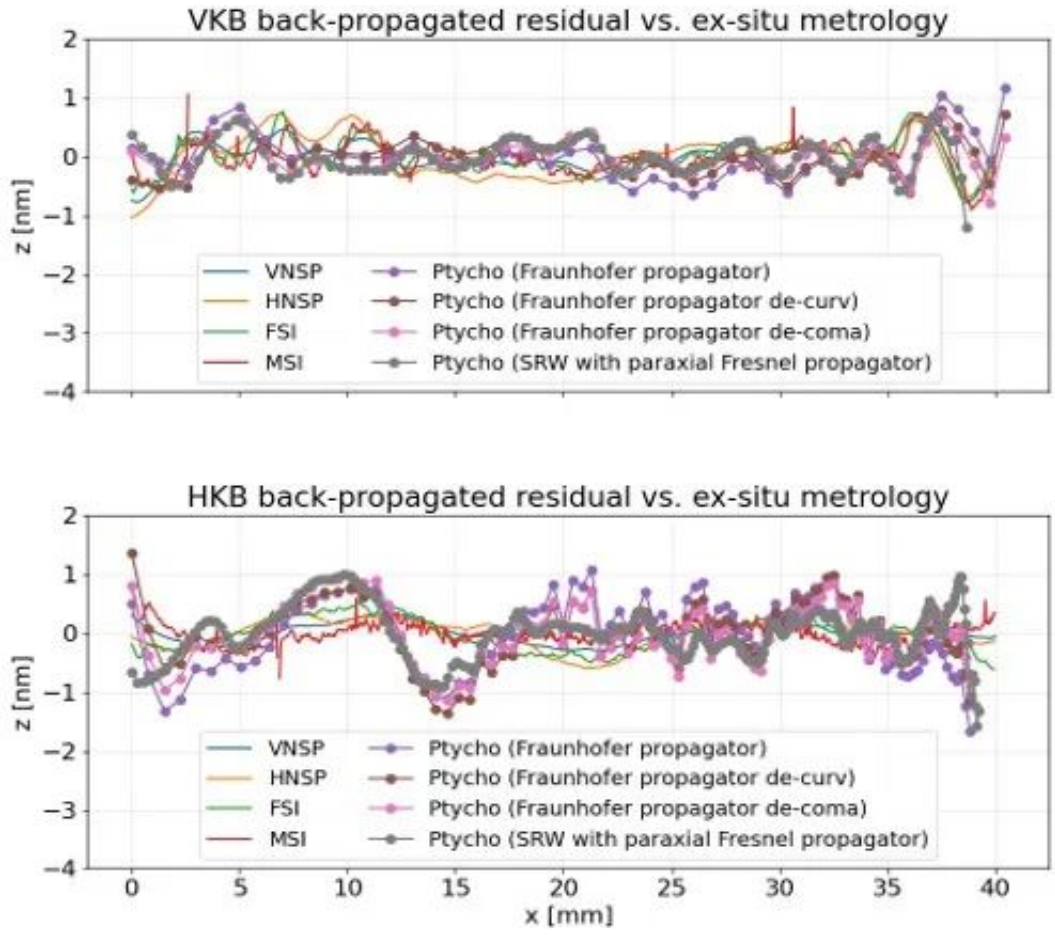


图5：原位波前反向推导残余误差与离线计量结果对比图。

总结与展望

本研究所确立的端到端闭环闭环管线，成功将传统光学制造中单一的标量指标验收，升级为全生命周期的波前预测与追溯体系，这不仅完成了对高性能KB聚焦系统的工程验证，更为更大口径、长达数百毫米的生产级下一代光学元件制造指明了优化路径。随着全球同步辐射光源向衍射极限（DLSR）时代的全面推进，该套完全自主可控、闭环可追踪的原子级制造与验证标准，将直接赋能量产线，为基于下一代光源的前沿科学发现提供核心支撑。（来源：先进制造微信公众号）

相关论文信息：https://doi.org/10.37188/lam.2026.098

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等事宜，请与我们接洽。
作者：王添翼等 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转发