

基于高次谐波生成的水窗光谱区软X射线相干层析成像

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/40978.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！

基于高次谐波生成的水窗光谱区软X射线相干层析成像。 导读

在纳米尺度下实现非破坏性、高分辨率以及高穿透深度的三维成像技术一直是材料科学、半导体技术、生物医学成像等领域的重大挑战。近日，由德国耶拿大学、重离子研究中心等机构组成的研究团队展示了一种基于高次谐波（high-harmonic generation, HHG）光源与软X射线相干层析成像（soft X-ray coherence tomography, SXCT）相结合的新型成像方法，首次在水窗光谱区（284 eV至532 eV）实现了实验室环境下的无损深度剖面成像。在无需标记或破坏样品的情况下，该系统实现了高达12 nm的轴向分辨率，并具备优异的噪声抑制能力，首次验证了HHG光源在水窗范围内进行成像的可行性，为未来的非破坏性三维纳米成像技术的研究开辟了新途径。

该研究成果近日发表于国际顶级学术期刊《Light: Science Applications》，题为 Soft X-ray imaging with coherence tomography in the water window spectral range using high-harmonic generation。Julius Reinhard与Felix Wiesner为论文共同第一作者，Silvio Fuchs为通讯作者。

研究背景

高次谐波光源因其空间相干性高、脉冲持续时间短（飞秒至阿秒级）等优势，已成为极紫外（extreme ultraviolet, EUV）波段纳米成像的重要工具。然而，受限于材料在EUV波段的强吸收（穿透深度通常仅数十纳米），传统高次谐波光源成像难以应用于更深处的结构或更厚的样品。

软X射线水窗波段（介于284 eV与532 eV之间）因对水具有高穿透性（穿透深度可达10 μm ），且能提供优异的元素对比度（尤其适合含碳、氧的生物样品），被视为理想成像波段。然而，高次谐波光源在水窗区的光子通量通常极低，且传统成像方法（如叠层成像）多为单色性设计，无法充分利用高次谐波光源的宽带特性，导致成像效率低下，因此迄今尚未有使用高次谐波光源的软X射线成像技术方案。

创新研究

为应对上述挑战，研究团队自主研发了一台覆盖整个水窗光谱的高通量HHG光源。该系统采用2.1 μm 中红外激光驱动氦气产生高次谐波，在氧K边（532 eV）处光子通量超过 5×10^5 ph/eV/s，为水窗成像提供了充足的信号强度（见图1）。在此基础上，研究团队开发了软X射线相干层析

成像（SXCT）方法。该方法源自光学相干层析成像，通过测量样品反射光谱中的干涉调制信号，利用傅里叶变换与相位恢复算法重构出样品的深度结构。该成像方法的轴向分辨率仅取决于光源带宽与入射角，与聚焦性质无关，在研究团队所做的此次实验中的理论极限可达10.6 nm。

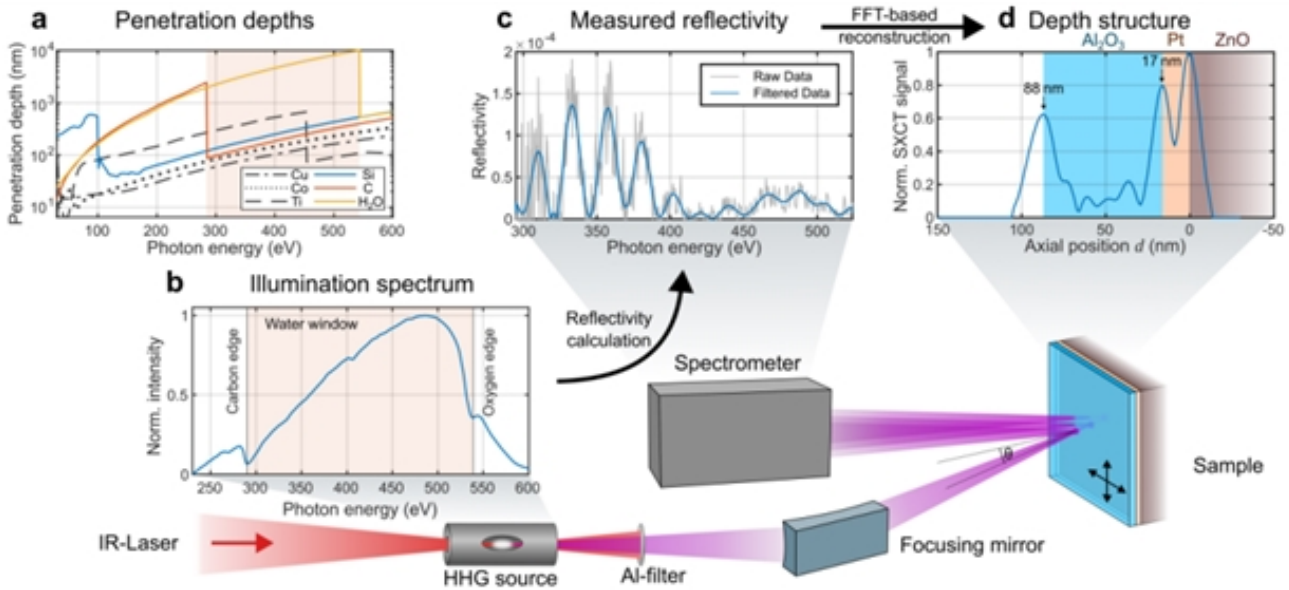


图1：a) 衰减长度，亦称穿透深度，指特定能量的光在强度衰减至初始值的 $1/e \approx 37\%$ 前所能传播的距离。在30 eV至100 eV的极紫外（EUV）波段，除硅（蓝色曲线）外，大多数材料的衰减长度最多仅为数十纳米。水窗由碳（橙色曲线）和氧（参见 H_2O ，黄色曲线）的吸收边界定，该波段内的光在水中穿透深度可达 $10 \mu\text{m}$ 。与EUV波段相比，几乎所有其他材料（如图中所选的几种金属）在软X射线波段也实现了 $>100 \text{ nm}$ 的显著更大穿透深度。b) 照明光谱覆盖整个水窗光谱范围，由少周期2.1 μm 激光驱动的高次谐波产生。铝吸收滤光片（含有氧化物及碳沉积物）对光谱进行整形，形成了界定水窗边界的明显的碳及氧吸收边。c) 软X射线通过环形镜聚焦至样品，并在样品内部不同界面上发生反射。由于干涉效应，反射光谱中出现强度调制。样品的高粗糙度导致反射率显著降低，原始信号噪声很大（灰色曲线）。通过低通傅里叶滤波提取出用于重建的有效信号（蓝色曲线）。d) 样品的深度结构通过基于傅里叶变换的软X射线相干层析（SXCT）算法重建。结果显示三个界面，对应基底上厚度分别为71 nm和17 nm的两个层。额外的横向信息还可以通过对样品进行横向扫描来获得。

研究团队对一套由 Al_2O_3 （约70 nm）与Pt（约20 nm）沉积在ZnO衬底上的层状样品进行了扫描成像。通过五个横向位置的测量，成功重构出各层的深度剖面，并绘制出截面图像，实验结果清晰地显示出Pt层厚度从边缘向内部逐渐增加的趋势，轴向分辨率经高斯拟合确定为12 nm。

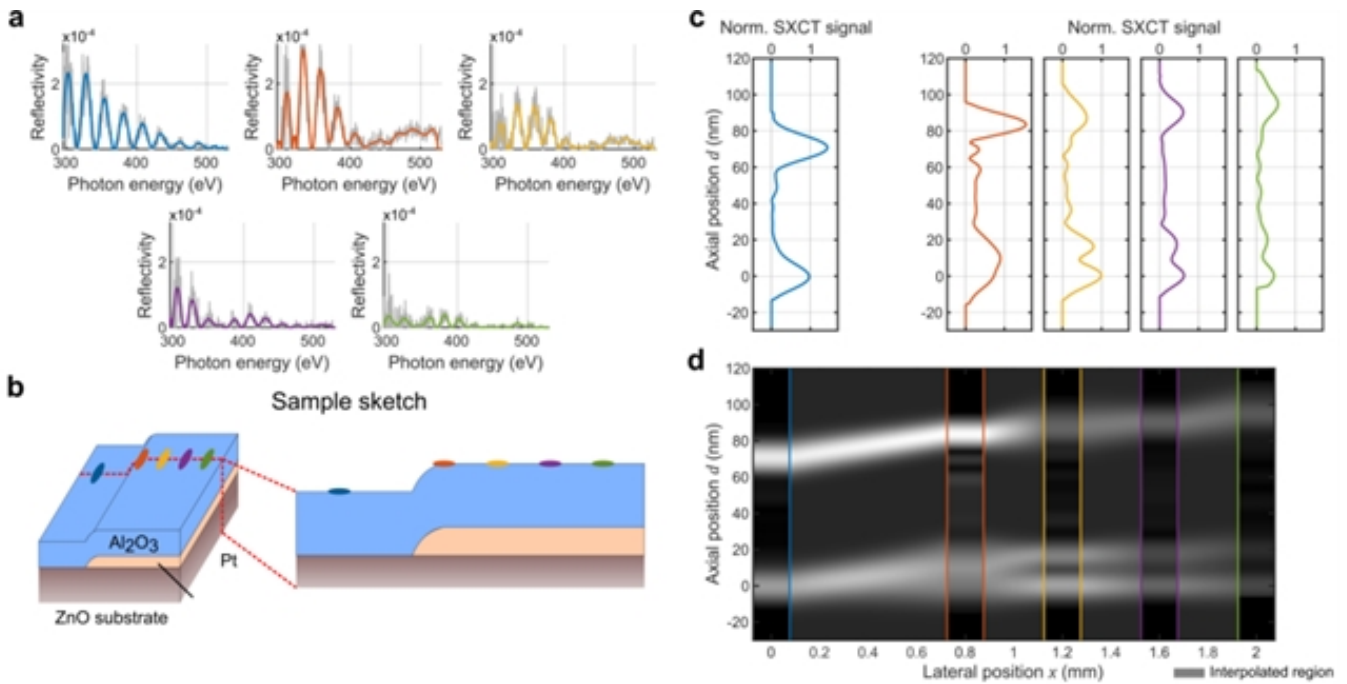


图2：采用软X射线相干层析进行截面成像。a)

我们对被测样品进行了线扫描，测量了五个不同位置的反射率。样品结构示意图如b)所示：在ZnO衬底上覆盖一层薄Al₂O₃层，并在特定区域埋藏有Pt层。五个扫描位置用不同颜色标注。无Pt层区域（蓝色）测得反射率最高达 2×10^{-4} ，且随能量升高急剧下降；含Pt层位置的光谱中则观察到额外的调制频率。此外，随着与Pt层边缘距离增加（黄色到绿色），总信号强度逐渐降低，表明粗糙度不断增大。c) 利用SXCT算法可重建各扫描位置的深度结构：Al₂O₃层在全样品范围内可解析，厚度在71-75 nm间变化；边缘后埋藏的较薄Pt层亦可解析，其厚度从17 nm渐增至20 nm。在第二位置（橙色），较大的软X射线聚焦光斑对变化的Pt层厚度产生平均效应，导致信号展宽。d) 通过对扫描位置间的区域进行插值，基于五个深度剖面合成了截面图像。

为验证SXCT结果的准确性，团队对同一样品进行了聚焦离子束切割，并利用扫描与透射电子显微镜的结果进行对比。结果显示，SXCT测得的Al₂O₃与Pt层厚度（分别为约71 nm与21 nm）与TEM测量结果（ 71.5 ± 1.8 nm与 21.5 ± 1.1 nm）高度一致，证实了该技术的可靠性与精度（见图3）。

。

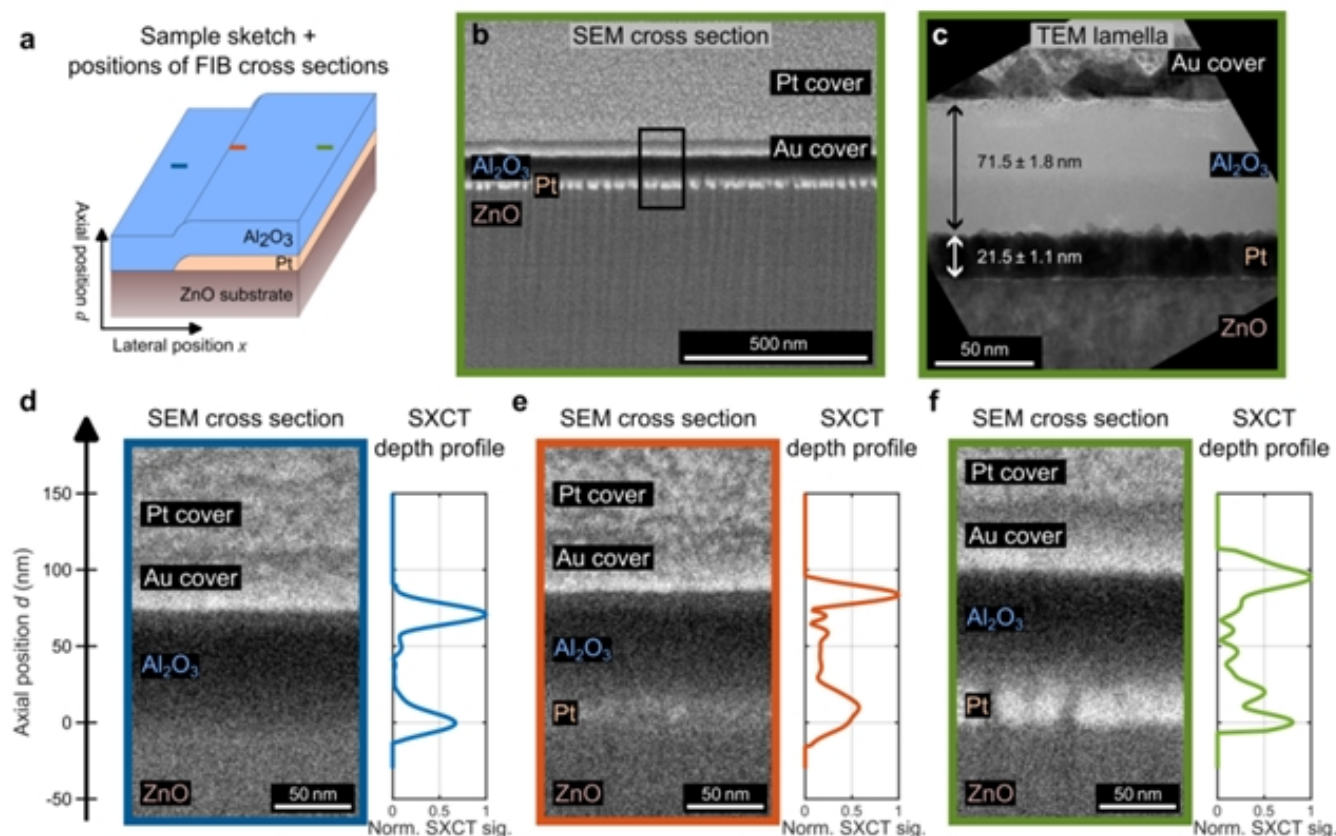


图3：利用电子显微镜验证SXCT结果。a) 样品上区分出三个区域：ZnO衬底上的Al₂O₃层（蓝色框）、ZnO衬底上Pt层顶部的Al₂O₃层（绿色框），以及介于两者之间、Pt层逐渐形成的过渡区域（橙色框）。在每个位置均制备了聚焦离子束（focused ion beam, FIB）截面，并与SXCT深度剖面进行对比。b) 绿色位置FIB截面的SEM图像清晰显示出Al₂O₃层、Pt层、ZnO衬底以及为FIB铣削准备而沉积的金层和铂层。明亮的Pt层易于识别，其高颗粒度与粗糙度得以显现。c) 图b中黑框区域对应的TEM图像显示，不均匀且粗糙的Pt层上方可见Al₂O₃层。通过5 μm全宽度范围平均测量，确认Al₂O₃和Pt层的轴向厚度分别为71.5 nm与21.5 nm。d-f) 不同样品位置的FIB截面与对应SXCT深度剖面对比表明，各界面位置高度一致，证实Pt层厚度呈渐变式增加而非存在陡峭边缘。

总结展望

本研究首次实现了基于高次谐波光源的软X射线水窗相干层析成像，在实验室环境下以12 nm轴向分辨率完成了多层纳米结构的无损深度剖面分析，标志着高次谐波成像技术向更高光子能量、更深穿透深度迈出了关键一步。这项研究为纳米尺寸下的非破坏性、高分辨率三维分析提供了全新的实验室解决方案，有望推动材料科学、半导体技术、生物医学成像等领域的进一步发展。（来源：LightScienceApplications微信公众号）

相关论文信息：<https://doi.org/10.1038/s41377-025-02057-9>

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：Silvio Fuchs 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