
在玻璃上“打印”玻璃：激光诱导前向转移实现高精度微光学制造

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/41394.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！

在玻璃上“打印”玻璃：激光诱导前向转移实现高精度微光学制造。 导读

玻璃材料因其优异的光学透明性、稳定性和机械硬度，在光学、光子学、微流控、生物医疗等领域具有广泛应用。特别是在微纳光学器件中，玻璃常被用于制备透镜、相位板、衍射光学元件等核心结构。然而，玻璃本身具有高硬度、脆性强、对激光吸收弱等特点，使其难以通过常规增材制造方法实现高精度加工。现有玻璃3D打印技术，如选择性激光烧结、熔融沉积成形、直写喷墨等，通常依赖熔融或烧结过程，难以同时兼顾高分辨率、表面质量和光学透明性，因此在微纳光学制造中的应用仍受到限制。

近日，德国哥廷根纳米光子学研究所Nastaran Bakhtiari和Jürgen Ihlemann在Light: Advanced Manufacturing发表了题为High-precision glass-on-glass printing via laser-induced forward transfer of solid state SiO_x: fabrication technique and optical applications的研究论文。研究团队提出了一种基于激光诱导前向转移（Laser-Induced Forward Transfer, LIFT）的高精度玻璃打印新方法，实现了亚氧化硅（SiO_x）薄膜在石英玻璃和BK7玻璃表面的无裂纹、高保真转移，为高分辨玻璃微纳增材制造和功能微光学元件直接制造提供了一条新的技术路线。

小百科1：什么是激光诱导前向转移？

激光诱导前向转移（LIFT）是一种高分辨率、无掩模的激光直写技术，其基本原理是利用脉冲激光透过透明载体照射供体薄膜，使局部材料在热应力、蒸汽压力或冲击作用下从供体表面脱离，并转移到邻近的受体基底上，从而实现微纳尺度的精确图形化沉积。与传统光刻或喷印方法相比，LIFT具有加工灵活、材料适用范围广、无需复杂掩模和洁净室工艺等优势。此外，固态LIFT还能在转移过程中更好地保持材料形貌和结构完整性，因此在高精度微纳制造和光学器件加工中展现出重要潜力。

尽管LIFT技术已广泛应用于金属、聚合物和陶瓷材料加工，但对于玻璃-玻璃体系而言，仍面临附着力不足、碎裂、结构破坏和界面污染等难题，限制了其在高质量光学器件制造中的进一步发展。针对这一挑战，该研究以亚氧化硅（SiO_x）薄膜作为供体材料，采用248 nm紫外准分子激光单脉冲辐照，并构建了一套定制化机械压紧系统，将供体与受体基底之间的间隙压缩至亚微米尺度，从而在透明玻璃基底上实现了高保真图形转移，如图1所示。与传统熔融转移不同，该方法通过控制激光参数和结构间距，实现了SiO_x薄膜的固态转移，从而有效保持材料轮廓和结构完整

性。

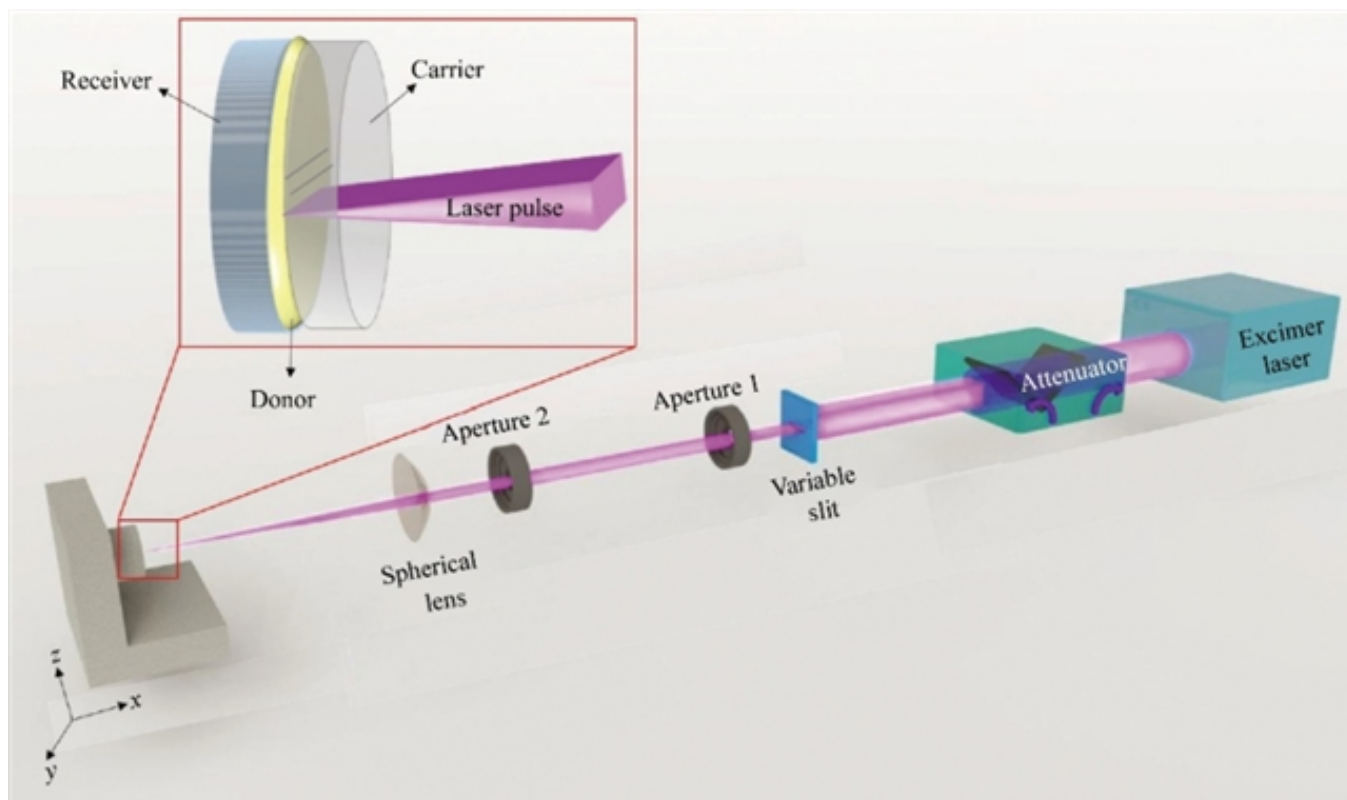


图1：激光诱导前向转移实现高精度玻璃-玻璃打印

为提升转移质量，研究人员专门设计了一套机械压紧系统，如图2所示。通过精确控制供体与受体玻璃基底之间的接触状态，将两者间隙压缩至亚微米尺度，显著改善了材料转移过程中的应力分布、粘附行为和结构完整性。研究表明，在仅简单接触的条件下，供体与受体之间仍存在大于 $8\text{ }\mu\text{m}$ 的空气间隙，转移后的 SiO_x 条带容易发生明显的断裂和碎裂。而在外加压缩后，间隙可降至 $1\text{ }\mu\text{m}$ 以下，从而实现连续、平整、边界清晰的高质量转移。进一步的压力测试显示，压紧系统能够在界面区域提供较为均匀的压力分布。这种近零间隙、均匀受力的接触方式，有效降低了冲击波干扰和能量耗散，提高了薄膜在玻璃表面的附着质量。

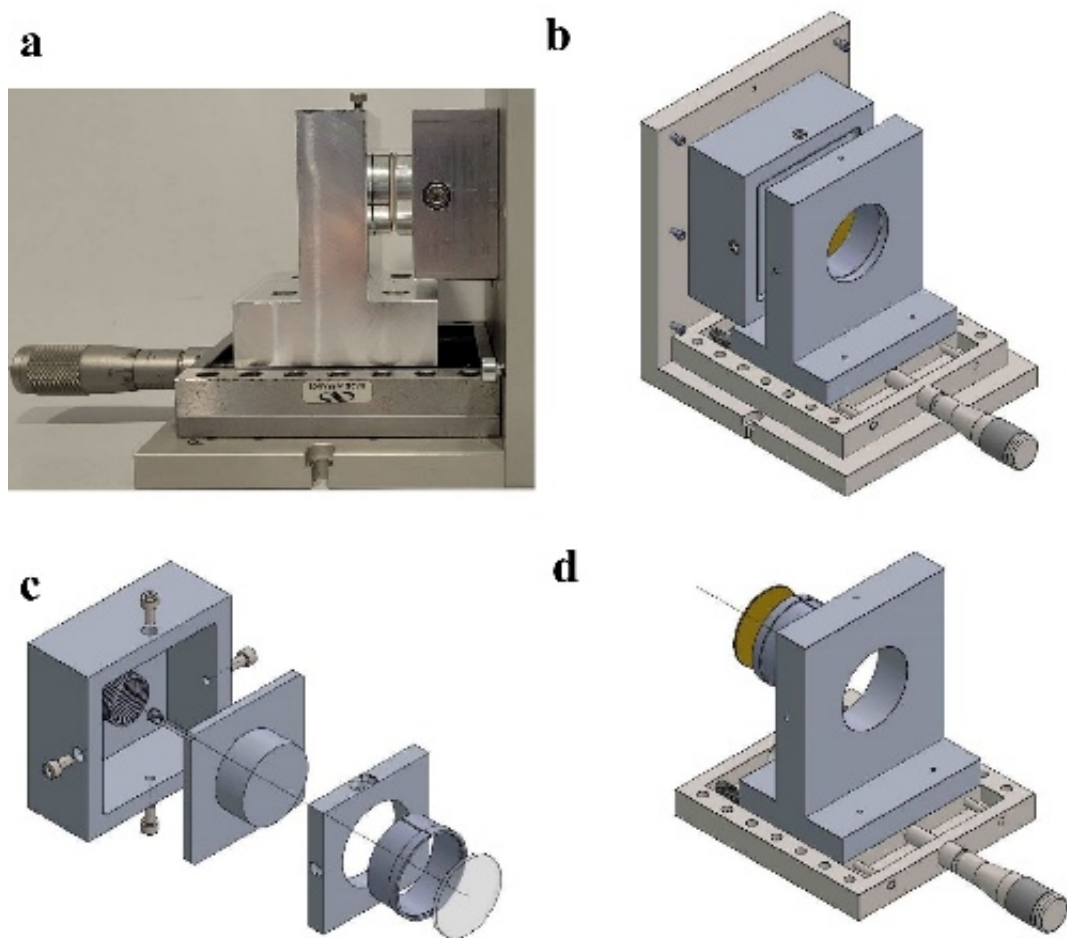


图2：机械压紧系统

进一步地，研究人员系统研究了不同厚度SiO_x薄膜在LIFT过程中的转移行为，发现打印质量与薄膜厚度和激光能量密度密切相关，并系统建立了膜厚—能量密度之间的匹配关系，确定了约200 nm的临界最小厚度以及对应的最佳激光能量窗口。对于厚度在约200 – 1000 nm范围内的SiO_x薄膜，通过精确调控激光参数，可获得边缘清晰、轮廓完整、尺寸保真度高的打印结构，如图3所示。结合热学模拟和截面形貌分析，该研究还揭示了薄膜在激光作用下的边缘优先剥离与定向转移机制，为理解固态玻璃薄膜LIFT过程提供了重要依据。

图3：膜厚与激光能量密度的匹配关系

在器件应用方面，研究团队进一步在熔石英基底上直接制备了二元相位掩模。通过逐线打印SiO_x条纹结构，构建出占空比为0.5、周期为30 μm的相位光栅，如图4所示。实验结果表明，所制备的相位掩模具有良好的形貌均匀性和表面平整性，在632.5 nm HeNe激光照射下表现出清晰的衍射图样。其±1级衍射效率分别达到35.8%和35.9%，接近理想二元相位掩模40.5%的理论上限，表明该方法能够实现高质量的相位调控。更进一步，打印得到的SiO_x结构还可通过1000 °C热氧化处理转化为透明SiO₂，同时保持原有图形周期性和结构完整性。这使得该方法具备面向紫外光学器件制造的应用潜力。

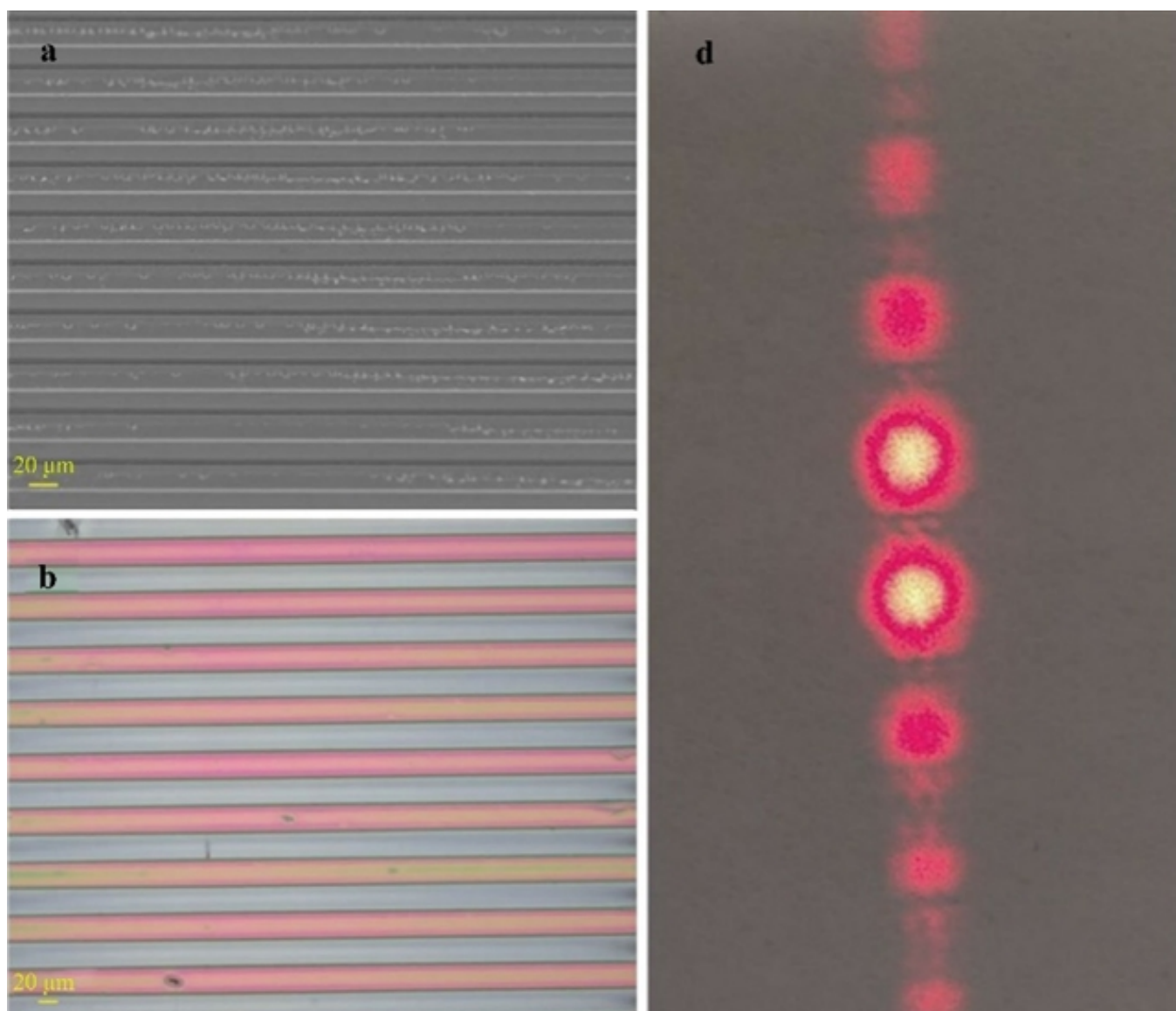


图4：二元相位掩模及其光学功能验证

总结与展望

综上所述，该研究提出了一种无需中间吸收层、无需光刻掩模、无需湿法刻蚀的高精度玻璃-玻璃打印新方法，实现了固态SiO_x薄膜在透明玻璃基底上的高保真转移，并成功用于二元相位掩模等微光学器件制造。相比传统LIFT和光刻工艺，该方法具有工艺简洁、污染少、分辨率高、适用于透明及曲面基底等优势，为玻璃基微纳光学元件的直接增材制造提供了新的技术路径，也为未来衍射光学器件、微透镜阵列、轴锥镜、计算全息器件等高性能玻璃光子器件的快速制造奠定了基础。（来源：先进制造微信公众号）

相关论文信息：<https://doi.org/10.37188/lam.2026.008>

作者：Nastaran Bakhtiari 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