激光打印辅助石英衬底纳米尺度灰度光刻

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：https://www.iikx.com/news/progress/41369.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！

激光打印辅助石英衬底纳米尺度灰度光刻。导读

在光子集成与光计算技术飞速发展的今天，衍射光学元件作为核心组件，其分辨率、稳定性与集成兼容性直接制约着相关系统的性能突破。传统灰度光刻技术虽广泛应用于衍射器件制备，但始终面临分辨率不足、结构稳定性差、复杂图案转移困难等瓶颈，难以满足先进光子系统对高精度、高可靠性器件的需求。

近日，上海理工大学智能科技学院顾敏院士/栾海涛副研究员团队提出了一种激光纳米打印辅助的石英基多级纳米尺度相位编码技术。该技术通过飞秒激光灰度掩模制备与多参数干法刻蚀优化的创新结合，实现了亚波长分辨率（约 81 nm）的精准相位调制，成功制备出透镜、全息图和衍射神经网络（DNN）等多种高性能集成衍射器件。其中，基于该技术的单层石英基 DNN 在手写数字四分类任务的分类准确率达到91.75%，此技术为高性能光子器件的规模化、稳定化制备提供了全新路径。

该成果以 Laser-nanoprinting-enabled multilevel nanoscale phase encoding on quartz for integrated optical diffractive devices为题发表在Light: Advanced Manufacturing，顾敏院士、栾海涛副研究员、董毅博博士为本文通讯作者，硕士研究生邢友涛在本项工作中做出了重要贡献。

光学信息处理凭借其超高速度与能效优势，在光学神经网络、全息显示、信息加密等领域展现出巨大应用潜力，而衍射光学元件是支撑这些技术落地的核心基础。为实现器件的芯片级集成与实际应用部署，开发具备纳米级分辨率的平面衍射光学元件成为研究热点。相较于依赖几何或共振相位调控的超表面，基于像素高度调制的衍射表面具有传输损耗低、制造成本低、工艺简单及光谱兼容性广等显著优势。

灰度光刻技术是制备衍射表面的主流方法之一，通过调控曝光剂量或采用三维打印技术可构建多级结构。然而，传统灰度光刻技术存在诸多关键瓶颈：基于光刻胶的灰度结构稳定性差，易降解老化，难以长期服役，并且横向分辨率通常较大，无法实现接近可见光工作波长的像素尺寸。尽管一些研究通过干法刻蚀可以实现灰度结构从光刻胶向衬底的转移，但是，由于缺乏系统性的工艺设计和参数优化，难以实现高保真度、高精度的灰度结构刻蚀转移。这些问题导致所制备的衍射表面难以满足复杂光学功能的相位编码需求，严重限制了衍射光学元件在先进光子系统中的应用拓展，急需开发一种兼具高精度、高稳定性与高兼容性的新型制备技术。

该工作创新性融合飞秒激光纳米打印与优化干法刻蚀工艺，构建了石英基多级衍射表面制备的完整解决方案。通过飞秒激光双光子聚合技术制备高分辨率灰度光刻胶掩模，结合精准调控的刻蚀

流程，成功在石英衬底上实现 8 个离散相位等级的精准调制，像素尺寸仅为 1 μm ^{2} 。实测结果显示，该技术实现的刻蚀横向分辨率最高可达 81 nm。相位调制阶数的提升能够有效增强衍射表面的衍射效率，以闪耀光栅为例，多阶相位调制相比低阶调制展现出明显性能优势。团队还通过该技术成功制备出仅有数十微米面积的中国龙、花卉
等高精度灰度图案，验证了其在复杂结构制备上的高保真度，为后续功能器件开发奠定了基础。

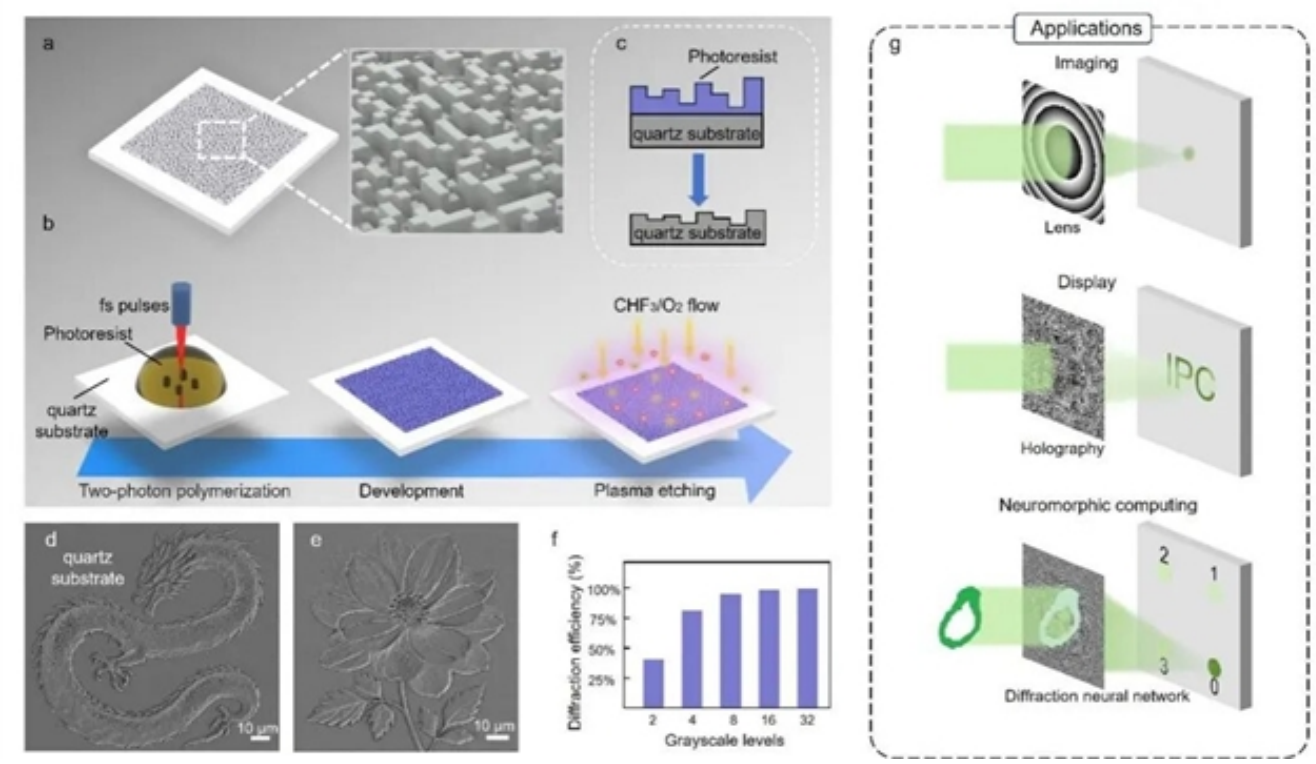


图1：石英基板上灰度图案化技术原理。a，采用该技术制备的衍射表面形态示意图。b，通过单步光刻与干法刻蚀工艺实现的高精度灰度光刻。c，通过优化刻蚀实现光刻胶掩模向基板转移灰度图案的示意图。d, e, 制备于石英基板上的高分辨率灰度图案——中国龙与花卉图案。f, 闪耀光栅的一阶衍射效率随相位调制水平变化的计算曲线，凸显多级相位调制的优势。g, 该技术的应用实例，包括透镜、全息图及深度神经网络

为实现高保真度图案转移，团队对刻蚀工艺的关键参数进行了系统优化。在气体成分方面，对比SF6+O2、CHF3+O2、CF4+O2三种组合后，选择CHF3+O2作为刻蚀气体，其光刻胶蚀刻速率更低（165 nm/min），有效减少了横向蚀刻，提升了图案转移精度。在功率参数上，确定 1200 W ICP 功率与 100 W RF 功率为最优组合，该条件下刻蚀速率与稳定性达到平衡，且表面缺陷最少。腔室压力优化结果显示，20 mTorr
时可实现稳定的刻蚀速率与低缺陷表面。最终，在优化参数（CHF3+O2=40/10 sccm、ICP=1200 W、RF=100 W、压力 = 20 mTorr）下，成功实现 81 nm 的最小横向线宽，且图案转移保真度较未优化参数有显著提升，有效改善了传统刻蚀工艺中横向蚀刻严重、图案变形的问题。

基于优化后的技术，团队成功制备了 8 级相位调制全息图、衍射透镜等功能器件。全息图采用 100×100 像素设计，可清晰重构 IPC 字母图案。环境稳定性测试显示，石英基全息图在 400°C高温退火后仍保持结构完整与光学性能稳定，而传统光刻胶基全息图出现明显降解；同时，石英基结构在酸处理中无损伤，展现出优异的机械与化学稳定性。衍射透镜的实测结果表明，其相位分布与设计目标高度吻合，可精准将入射光聚焦于 500 μm 处，衍射效率达

71%，接近理论值（86.08%），验证了该技术在功能光学器件制备上的可靠性。

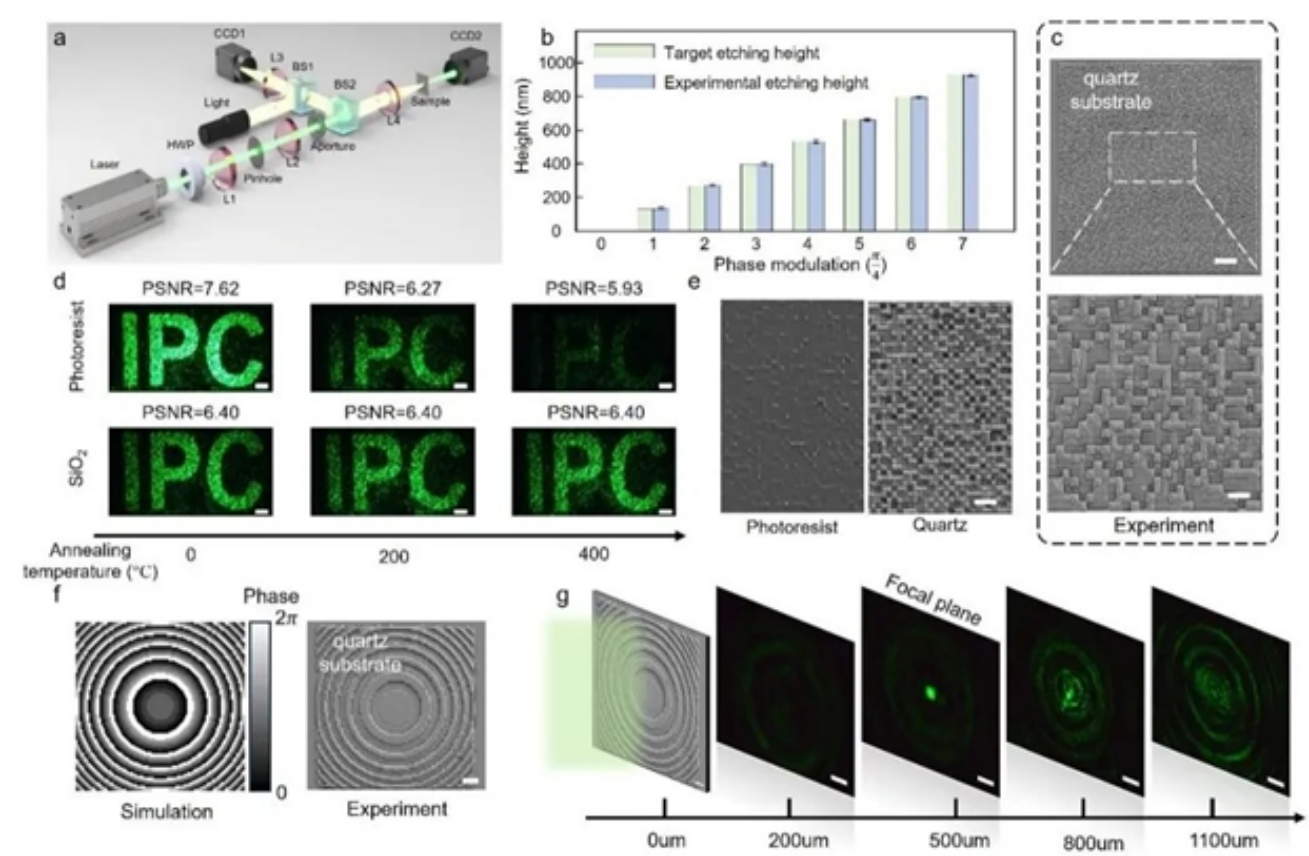


图2：基于石英的高精度衍射表面用于全息成像与透镜。a, 全息图测试光学装置。b, 8级相位调制衍射表面在532 nm激光下的目标灰度蚀刻深度与对应实验结果。c, 不同放大倍率下制备全息图的扫描电子显微镜图像。比例尺：5 μ m（上），2 μ m（下）。d、经不同温度退火处理30分钟后，基于光刻胶（上）与石英（下）的全息图重建图像。比例尺：1 mm。e、经400 ° C退火30分钟处理后两全息图的SEM图像。比例尺：5 μ m。f、用于透镜设计的衍射表面计算相位分布及对应SEM图像。比例尺：10 μ m。g、光场通过衍射透镜后在不同传播距离处捕获的强度分布曲线。比例尺：0.1mm。

同时，团队基于该技术还制备了单层石英基衍射神经网络（DNN），并在 MNIST 数据集上完成训练与测试。该 DNN 通过相位编码神经元调制光场，训练准确率达 96.6%。测试结果显示，在 400 张手写数字测试图像（四分类）中，该 DNN 实现了 91.75% 的高分类准确率。该成果验证了石英基衍射器件在光学神经网络中的应用潜力，解决了传统光刻胶基 DNN 稳定性不足的问题。

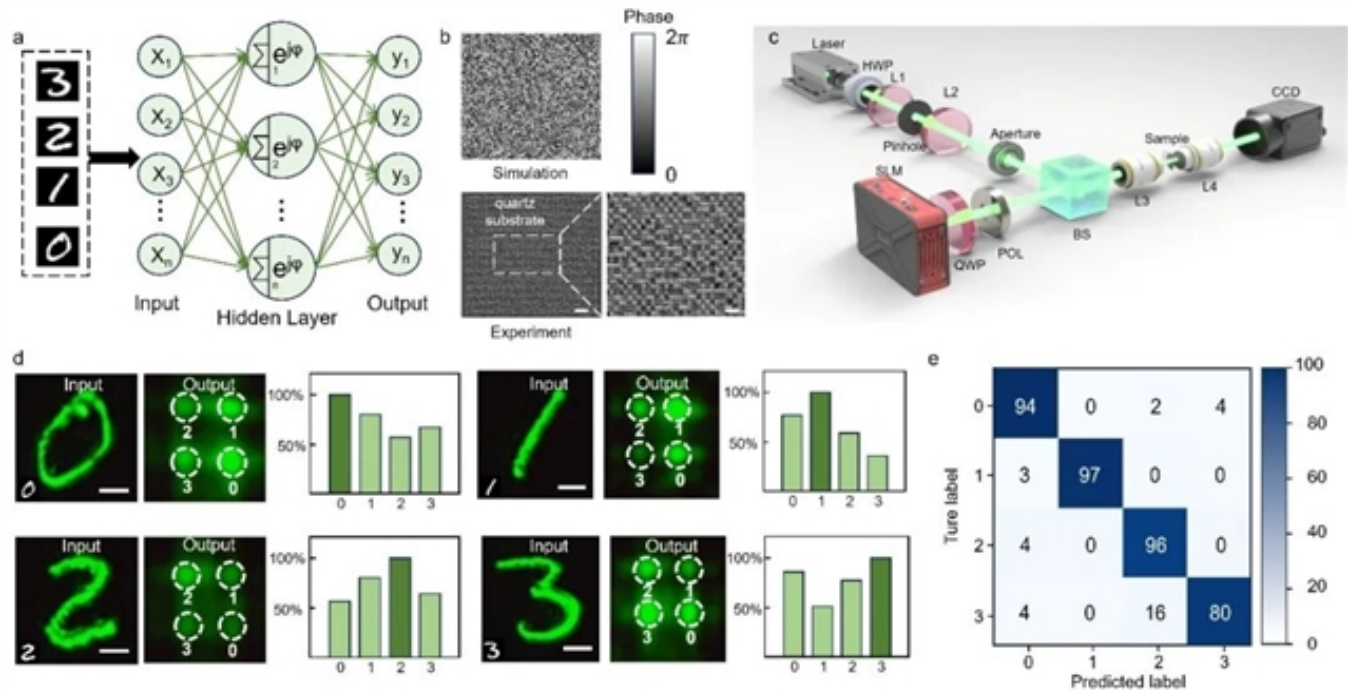


图3：基于石英的高精度衍射表面用于DNN应用。a, 衍射神经网络（DNN）数学运算流程示意图。b，训练后获得的相位分布及对应制备衍射表面的扫描电子显微镜图像（比例尺：10 μm 和 3 μm）。c，用于DNN测试的光学装置。d，输入图像示例、生成的输出光场及各检测区域对应的归一化输出强度；比例尺：0.1 mm。e，DNN对400张测试图像分类结果的混淆矩阵

总结与展望

该研究提出的激光纳米打印辅助相位编码技术，突破了传统灰度光刻技术在分辨率、稳定性与图案转移保真度上的多重限制，为高性能衍射光学器件的制备开辟了新路径。该技术实现的亚波长分辨率、多级相位调制能力与石英衬底带来的卓越稳定性，在集成光子学、光计算、光电系统等领域具有广泛应用前景。未来，通过采用双光束超分辨激光直写技术进一步提升灰度图案化分辨率，有望实现更复杂、更高性能的衍射器件；同时，其具有支持与其他光子器件（如半导体激光器等）集成制备的潜力，将为开发紧凑型主动调制光子器件提供支撑。此外，本技术支持与硅基平台的集成加工和制备，有望进一步拓展在光计算、通讯等领域的应用。（来源：先进制造微信公众号）

相关论文信息：https://doi.org/10.37188/lam.2026.031

作者：顾敏等 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