

---

# 基于热致激光直写的高良率微纳图案化

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/37436.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！**

基于热致激光直写的高良率微纳图案化。 导读

近年来，热致光刻（photothermal lithography）作为微纳制造领域备受关注的新兴工艺，正逐步挑战传统光化学激光直写技术的地位。传统光化学工艺通常借助紫外或深紫外激光，在光活性聚合物表面进行聚焦扫描，诱导其在显影剂中发生溶解度变化，从而形成图案并转移至基片。与之不同，热致光刻通过激光作用于热模式光刻层，触发材料发生相变或组分永久性改变，使薄膜在特定溶剂或干法蚀刻条件下表现出显著不同的刻蚀选择性，随后通过显影工艺将写入图案转移至基片。尽管目前该方法的分辨率仍停留在数百纳米量级，远未达到高数值孔径极紫外光刻工具的先进水平，但在半导体封装、MEMS制造及汽车电子等不追求突破10纳米节点的应用场景中，热致光刻展现出重要的技术价值与发展潜力。

近日，美国戴顿大学Imad Agha教授团队在Light: Advanced Manufacturing发表了题为Direct laser writing lithography of photo-insensitive durable GST thin films with near 100% yield的研究论文。研究团队提出了一种低成本的热致激光直写光刻技术，利用光不敏感的相变材料成功制备精度为200 nm的高分辨率图案，同时达到小于10 nm的侧壁粗糙度和几乎100%良率，展示了该技术克服衍射与热扩散限制、具备大规模微纳制造的潜力。

研究团队自主搭建了一套激光直写系统（图1），该系统以波长532 nm、最大输出功率500 mW的激光器作为核心光源，用于实现对GST薄膜的精准局域加热与晶化调控。激光束首先经过偏振滤波，随后通过声光调制器，并配合自主开发的脉冲延迟发生器进行控制，可产生脉冲宽度低至200 ns、输出功率最高达400 mW的激光脉冲，在有效驱动材料发生非晶态—晶态相变的同时，显著抑制横向热扩散。光束经扩束后入射至100倍、NA 1.3的油浸物镜，以减小衍射效应并提升加工分辨率。进入物镜前，激光的偏振态通过消色差四分之一波片进行精确调控。样品搭载于闭环压电位移台，辅以微调倾斜平台，实现纳米级精确定位。为实时监测加工过程，系统集成侧向白光成像光路，采用卤钨灯作为照明源，光线经准直与分光后由共聚焦物镜接收，最终通过CMOS图像传感器实时捕捉加工区域的动态变化。

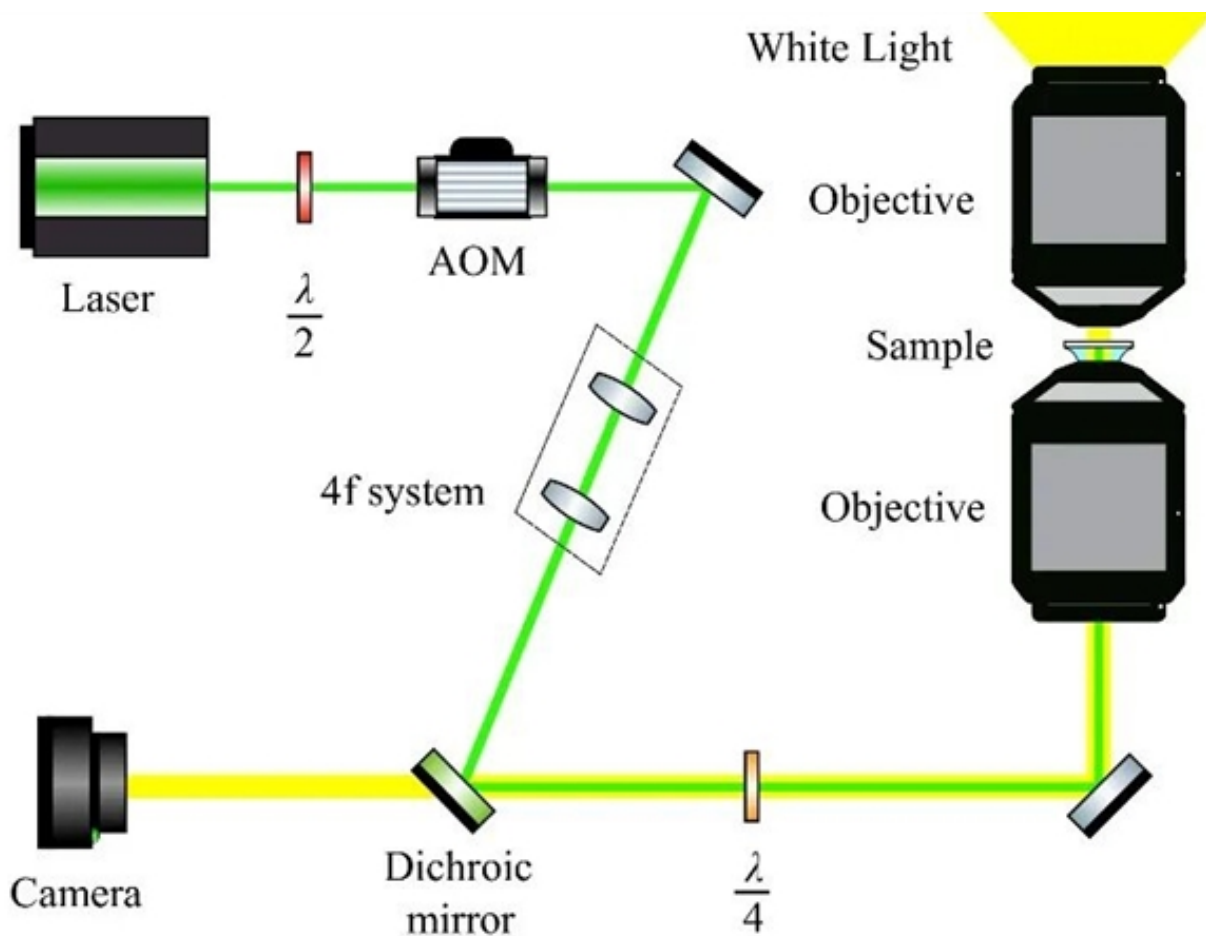


图1：激光直写光刻系统

在光刻材料体系方面，热致光刻可分为有机与无机两大类。有机材料涵盖calixarene衍生物、金属hydrazone配合物及多种高分子材料，虽应用广泛，却普遍存在分子量高、有机链结构复杂、热转变范围宽、易发生热交联等问题，常导致图案边缘轮廓不规则、曝光区与未曝光区边界模糊。相比之下，无机光刻材料（如金属玻璃、金属氧化物薄膜与相变材料）得益于其低分子量和较窄的热转变区间，在成型后往往能形成边缘清晰、轮廓分明的图案。在众多无机材料中，以铋-碲（SbTe）系相变材料为代表的热致成型光刻层表现尤为突出，因其具备宽光谱响应、明确的热阈值特性、制备工艺简便以及低线边粗糙度等优势，被视为极具发展前景的技术路线之一。

研究团队选用锗碲铋（ $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ , GST）作为相变功能层，其结晶温度阈值为 $175^\circ\text{C}$ 。理论分析表明，相变结晶过程主要依赖光场强度驱动，而非依赖持续激光脉冲作用；材料本身需具备足够的光吸收能力，通过温升建立光强与结晶响应之间的非线性关系。为明确热动力学边界并量化工艺极限，团队采用有限元方法对激光加工过程进行模拟（图2）。模拟结果显示，532 nm激光可在100 nm厚GST薄膜中诱导形成宽度约270 nm的晶化区域（图中红色部分），结晶深度可达约80 nm。进一步模拟湿法刻蚀行为发现，若采用各向同性刻蚀工艺去除非晶区域，将在写入结构两侧分别形成约60 nm的侧向刻蚀量（图2b绿色区域）。图2b中蓝色部分代表未被刻蚀的非晶区，该结构表明，通过协同调控激光脉冲参数与刻蚀时间，可在特定膜厚条件下实现高分辨率自支撑结构的可靠成形。

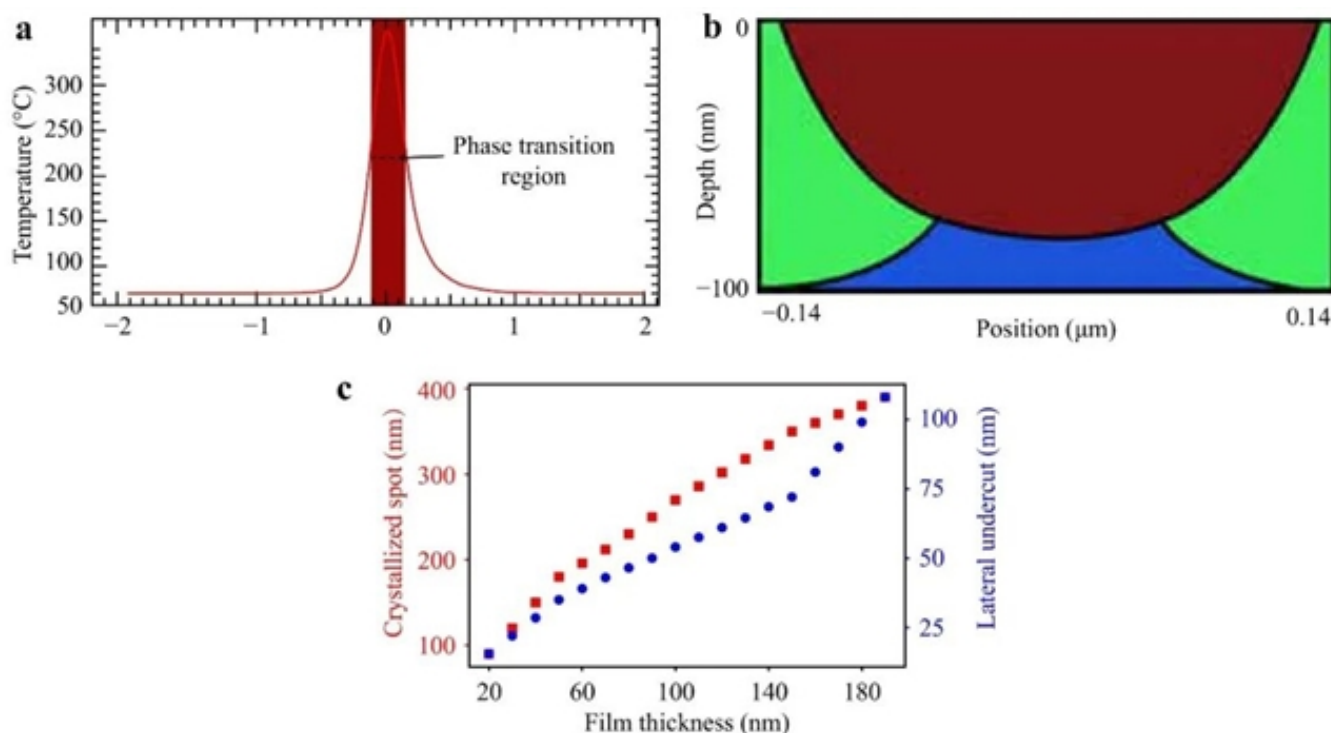


图2：激光直写光刻系统

实验结果表明，该激光直写系统在加工GST相变薄膜过程中展现出三项核心优势：分别为高分辨率、良好的大面积均匀性与工艺重复性，以及通过光斑与步长协同调控实现的低粗糙度结构。在分辨率方面，系统在约100 nm厚GST薄膜上实现了约300 nm线宽的加工能力。其理论光斑尺寸约为270 nm，当薄膜厚度降低至50 nm时，结晶区域线宽可进一步缩减至约200 nm，展现出接近衍射极限的加工潜力。在均匀性与稳定性方面，系统在大面积加工中表现优异。如图3a所示，在20 μm范围内制备的21线光栅结构中，线宽平均值为302.6 nm，标准差仅为16.1 nm，显示出优异的工艺一致性与可控性。此外，通过精确控制扫描步长与光斑尺寸，该系统成功将拼接引起的线边粗糙度控制在10 nm以下。更值得关注的是，该技术对复杂图形也具备良好的适应性，如图3b所示，戴顿大学Flyers标志被清晰转写并经由四甲基氢氧化铵（TMAH）溶液刻蚀成形，线条流畅、结构完整。上述结果充分证明了GST薄膜作为一种高分辨率、强抗干扰特性的热致成型光刻胶，在激光直写光刻领域具有重要的工程应用价值与产业化前景。

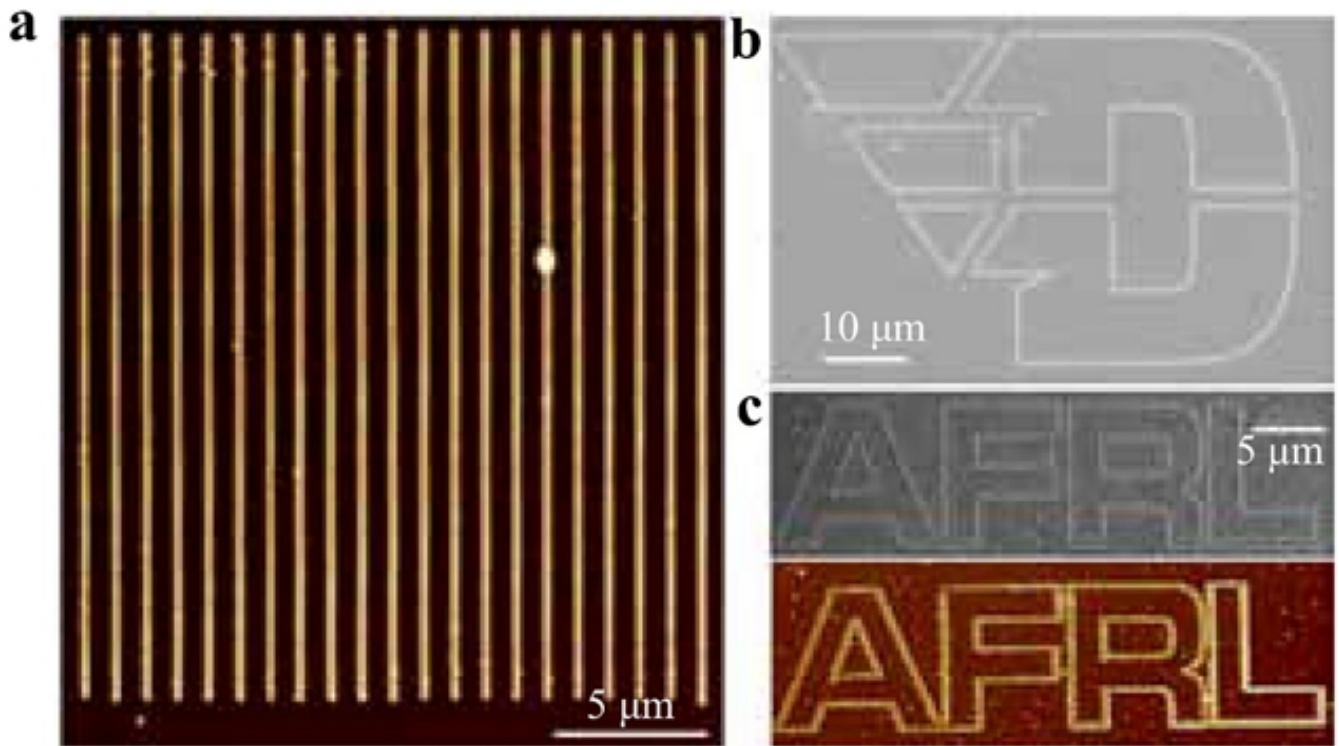


图3：大面积光栅扫描及复杂图案的刻蚀效果展示

### 总结与展望

综上所述，该研究提出并系统验证了一套基于相变材料的低成本热致光刻技术方案。该技术采用耐光性强、性能稳定的相变薄膜作为功能层，在图形转移过程中实现了接近100%的工艺良率。通过系统的理论建模、数值模拟与实验验证，研究团队全面展示了该技术在图形精度、侧壁质量、材料稳定性及环境适应性等方面的综合优势。尽管受限于当前位移平台的移动范围，所加工的特征尺寸仍存在进一步提升的空间，但研究指出，通过升级扫描系统或引入图形拼接策略，可有效将加工范围扩展至大面积晶圆级尺度。在后续发展中，该技术可通过以下路径持续优化：采用更短波长的激光光源以突破分辨率限制、改进刻蚀化学体系以增强纵向形貌控制、拓宽适配基底类型以提升工艺通用性，并结合波前工程实现均匀周期图形、高深宽比微孔及多维结构的高质量加工。该项研究不仅为微纳制造提供了一种具有成本效益的技术路径，更有望推动电子器件、生物医疗、国防精密元件等领域的纳米图案化工艺迈向更高效、更广泛的应用阶段。（来源：先进制造微信公众号）

相关论文信息：<https://doi.org/10.37188/lam.2025.075>

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：Imad Agha 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](http://www.iikx.com)转发