
实时光学监测实现稳定纳米结构加工

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/33433.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！

实时光学监测实现稳定纳米结构加工。导读

飞秒激光脉冲可用于通过烧蚀方式直接在固体表面（包括金刚石和蓝宝石等硬质材料）形成周期性纳米结构。因此，这种技术在工业纳米制造应用中具有广阔前景。然而，由于纳米结构对加工条件变化（如材料表面粗糙度和激光功率）的高度敏感性，稳定形成均匀纳米结构仍面临挑战。

小于光波长的结构因其调控光学特性的能力，有望在光学器件中获得各种应用。通过超短激光脉冲实现的材料去除或键合结构改变，可以在固体表面或内部轻松制造纳米结构。由日本东京农工大学Godai Miyaji博士和日本产业技术综合研究所Aiko Narazaki博士领导的合作研究团队开发并报告了一种用于在玻璃表面制造高质量纳米结构的实时监测和控制方法。该方法可实时光学监测超短激光脉冲形成的纳米结构，并通过主动控制激光参数使纳米结构缺陷率降低约10倍，实现高质量纳米结构的稳定制造。

该成果以Stable fabrication of femtosecond-laser-induced periodic nanostructures on glass using real-time monitoring and active feedback control为题发表在Light: Advanced Manufacturing。

光学反馈系统：精准把握纳米加工的关键参数

研究团队采用创新的光学监测系统实时跟踪纳米结构形成过程。他们使用波长1030 nm、脉宽300 fs、重复频率20 kHz的掺镱光纤激光系统产生飞秒激光脉冲，处理合成二氧化硅玻璃板表面，同时通过声光调制器精确控制激光功率。系统巧妙地利用两种不同波长的LED光源（660 nm和850 nm）照射加工区域，实时收集反射光和透射光信号作为反馈。

研究人员发现，高质量纳米结构的形成与特定的光学响应密切相关。对比扫描电子显微镜图像与光学监测数据，他们确认均匀、高线性度的纳米结构会导致反射率降低而透射率提高。通过系统调整激光功率和扫描速度，研究团队确立了表征优质纳米结构（周期约200 nm，深度约1 μm ）的光学指标——反射率 0.6 ± 0.1 ，透射率 1.4 ± 0.1 。

此外，实验表明，将照明光的偏振方向与激光脉冲偏振方向平行（同时垂直于扫描方向）能显著提高监测系统区分不同表面结构的能力。这一关键发现为实时质量控制提供了可靠依据。

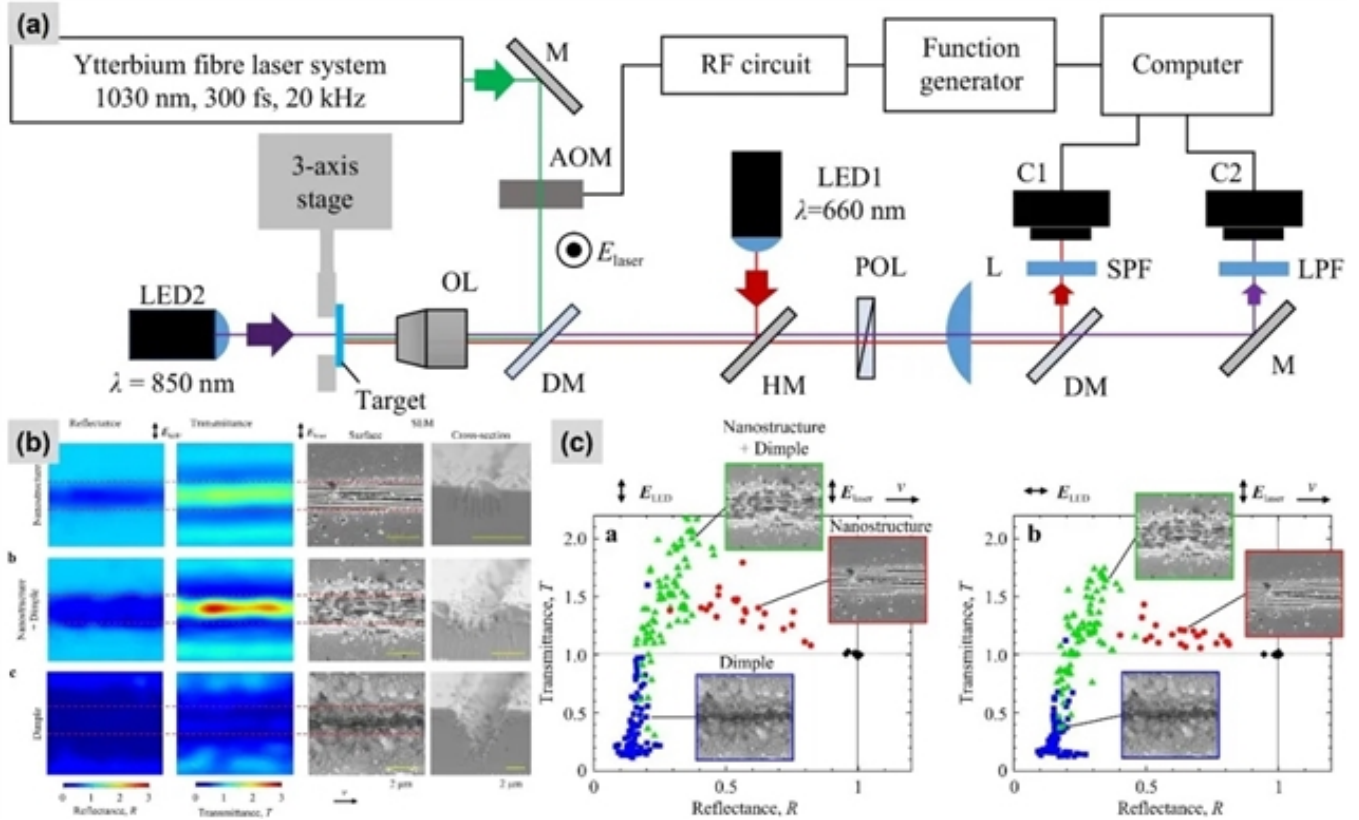


图1：负反馈调控加工实验装置与不同加工参数的对应关系

智能反馈系统：实时优化提升纳米加工精度

研究团队设计了智能反馈系统，将理论发现转化为实际应用。他们采用比例-积分-微分（PID）控制算法实时调节激光功率，根据光学信号的变化自动优化加工参数。整个监测-反馈循环仅需100毫秒，实现了对纳米结构形成过程的精准把控。

实验记录揭示了系统的智能调节能力。如图2所示，在加工过程监测期间（32-42秒区间），系统展现出自动调节能力，特别是在39秒附近的关键阶段：首先是纳米结构逐渐停止形成（反射率和透射率均趋近于1.0）；随后系统自动提高激光功率至约6.7 mW，但略微过高引发非均匀结构缺陷；最终系统精确调低功率至约6.6 mW，成功实现高质量纳米结构的稳定形成。

对比实验结果令人印象深刻：采用PID反馈控制后，纳米结构缺陷率从24.4%大幅降至仅2.4%，效率提升近10倍。这一突破使高质量纳米结构的稳定制造成为现实，为光学器件无人监管的高良率加工铺平了道路。

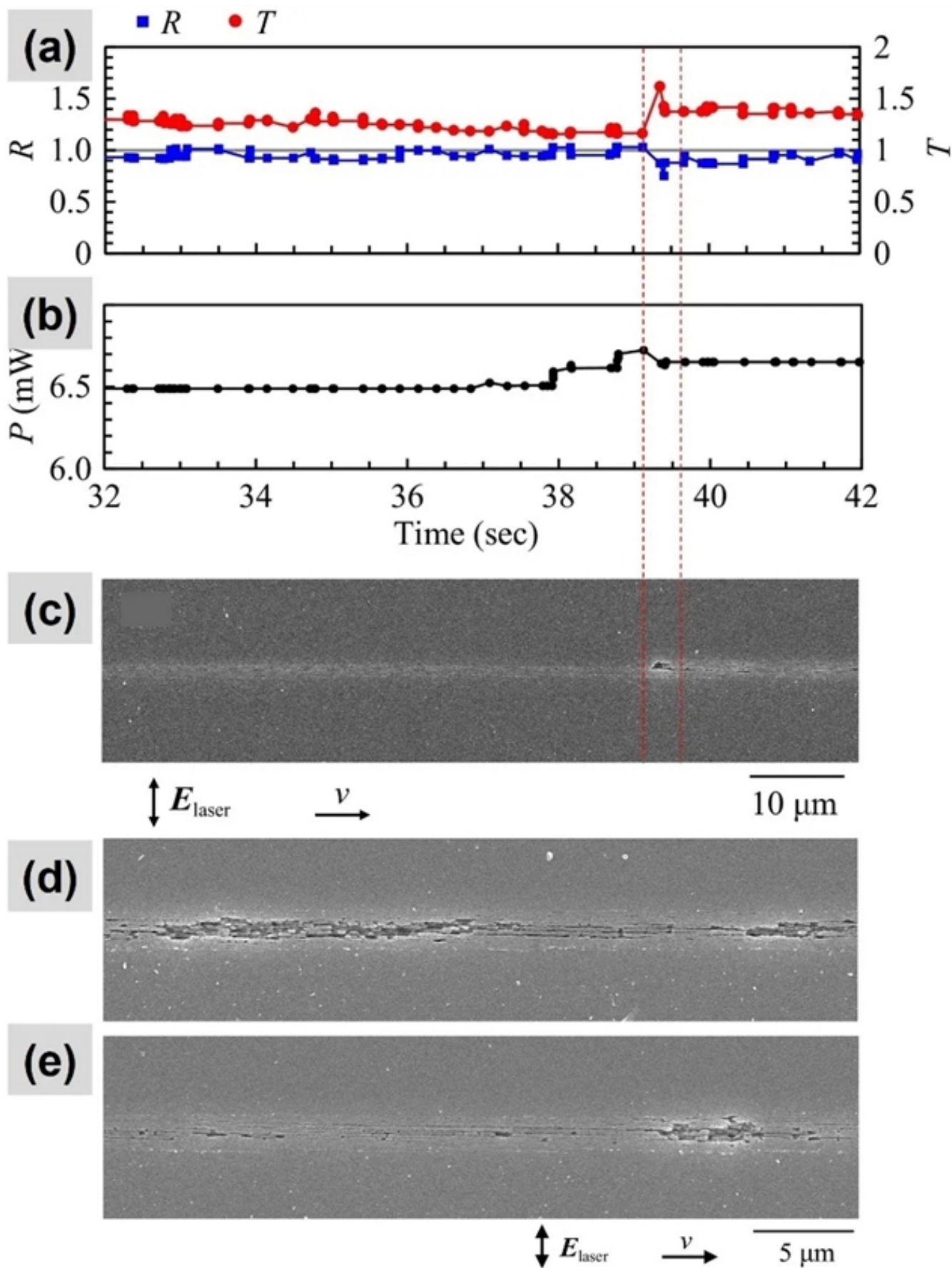


图2：玻璃RT值对应表面质量关系与PID调控加工效果

纳米结构光学特性的物理机制：从实验到理论

实验观察到一个关键现象：飞秒激光在玻璃表面构建纳米结构时，材料的光学特性发生显著变化——反射率降低而透射率提高。研究团队运用理论物理学方法揭示了这一现象的内在机制。

他们首先应用Bruggeman有效介质近似模型，将纳米结构表面视为具有特定折射率的介质层。模型计算结果与实验测得的反射率数据高度吻合，证实了理论分析的有效性。

对于透射率增加的现象，研究人员采用有限差分时域法（FDTD）进行了深入分析。通过模拟电磁场在纳米结构区域的传播特性，他们发现透射光波前发生特定扭曲，产生了类似于光学干涉的效应。这种扭曲波前在成像平面中心区域形成对比度增强，解释了为什么配备纳米结构的表面会表现出更高的透射率。这一理论分析为利用纳米结构调控材料光学性能提供了科学依据。

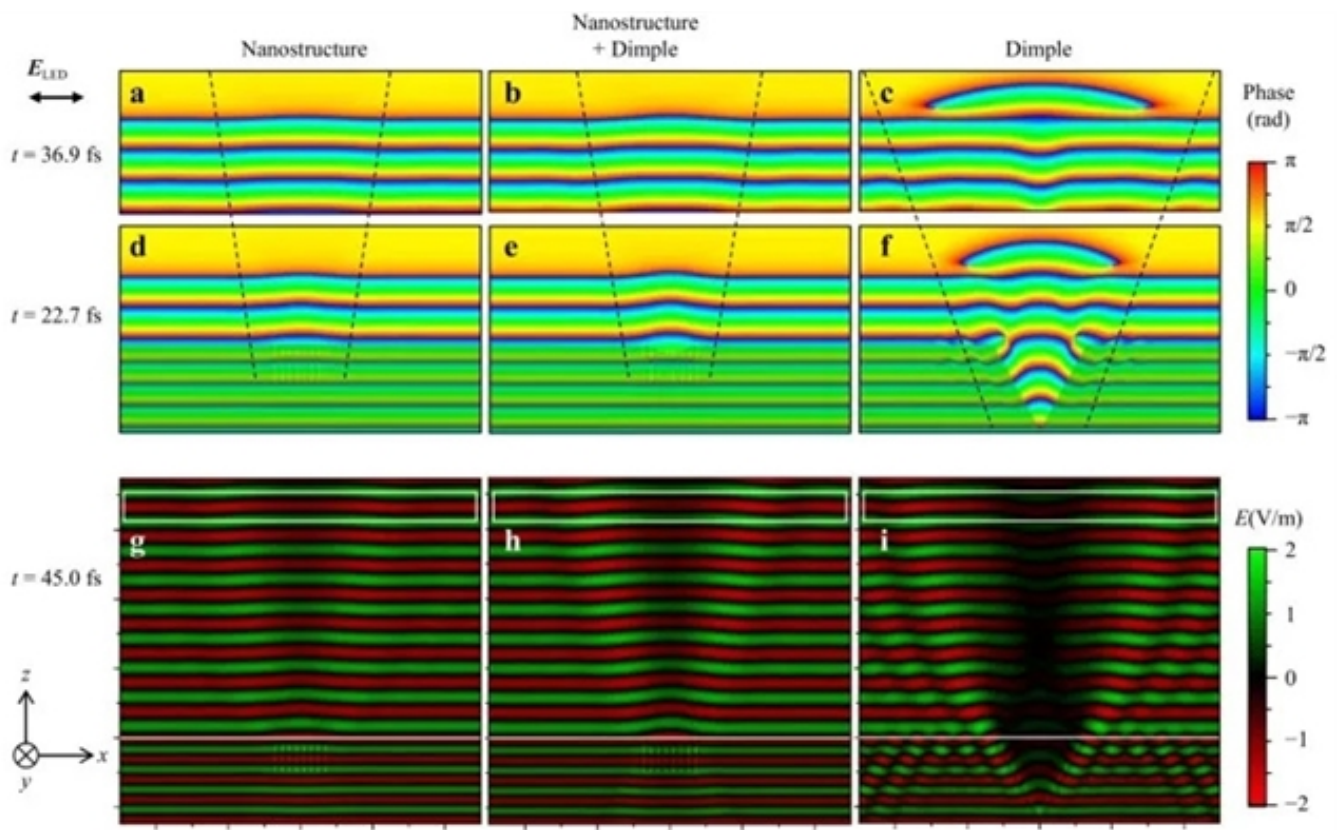


图3：FDTD计算玻璃加工区域电场分布

总结与展望

本研究通过创新性地结合实时光学监测与精确PID控制技术，为纳米结构制造领域带来了重大突破。该方法成功将玻璃表面纳米结构的缺陷率降低至原来的十分之一，实现了高质量周期性纳米结构的稳定可靠制造。

展望未来，随着高速光电探测器和现场可编程门阵列(FPGA)等先进技术的整合应用，这一反馈控制系统有望实现微秒级的响应速度和更高的精度控制。这不仅将显著提升加工效率，还将扩展该技术在各类透明材料纳米加工中的应用潜力。

这一研究成果为功能性光学器件、高效率发光设备和高灵敏度光电探测器等领域的工业化生产铺平了道路，有望推动量子光子学、结构色彩材料和抗反射表面等前沿技术的快速发展。（来源：先进制造微信公众号）

相关论文信息：<https://doi.org/10.37188/lam.2025.003>

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：Godai Miyaji 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