飞秒激光制备超高深径比纳米孔波导

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：https://www.iikx.com/news/progress/41400.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！

飞秒激光制备超高深径比纳米孔波导。 导读

近期，浙江大学邱建荣教授团队与宁波大学钟理京副研究员团队在 Light: Advanced Manufacturing 发表了题为 Deep-nanohole-clad waveguides with depth-to-diameter ratio up to 50 000 in single crystals via femtosecond laser writing 的研究论文。

近日，研究团队通过融合湿法辅助单脉冲激光纳米刻蚀与动态焦场拼接技术，成功制备出深径比大于 50
000：1的单晶深纳米孔包层光波导。研究人员以单晶蓝宝石为基底，加工获得深径比突破 50
000:1 的纳米孔，实现大面积、高均匀性、高一致性纳米孔阵列。以此为核心结构，团队构建出高性能功能性纳米孔包层光波导，展示了其在高灵敏度荧光传感检测领域的广阔前景。该成果显著性突破传统飞秒激光深孔加工深度瓶颈，同时为微型多功能光子集成器件、超高灵敏生化传感芯片的设计研发与实际应用开辟了全新技术路线。

亚波长孔隙的周期性排列构成了人工全介质纳米光子结构的基础，能够实现对光场的卓越控制与操纵，在光通信、超灵敏传感、高级成像和量子技术等领域展现出巨大的应用潜力 。器件的核心性能（特别是宽带、消色差和大面积功能）在很大程度上依赖于具有极高深径比（通常大于 1 000:1）的组成单元 。

然而，在实现大面积的同时保持纳米级孔径的一致性、侧壁平滑连续以及超高深径比，对现有的微纳加工技术提出了极其严苛的挑战 。传统的光刻与刻蚀技术（如电子束光刻 EBL）或贝塞尔光束等加工方法往往在加工深度、材料适用性或结构可控性上存在局限，深径比很难超过 200:1 。

研究团队在飞秒激光纳米加工领域已积累了丰富的前期经验。此前，团队上发表了相关工作（Nat Commun 16, 7434 (2025).），通过湿法辅助单脉冲激光纳米刻蚀技术成功实现了 25 nm
特征尺寸及 10 4深径比的大面积制备 。在此基础上，为了进一步突破极高深径比的加工瓶颈，并满足新兴多孔纳米光子器件对高密度集成和大面积特征的迫切需求，研究团队开展了本项深入研究 。

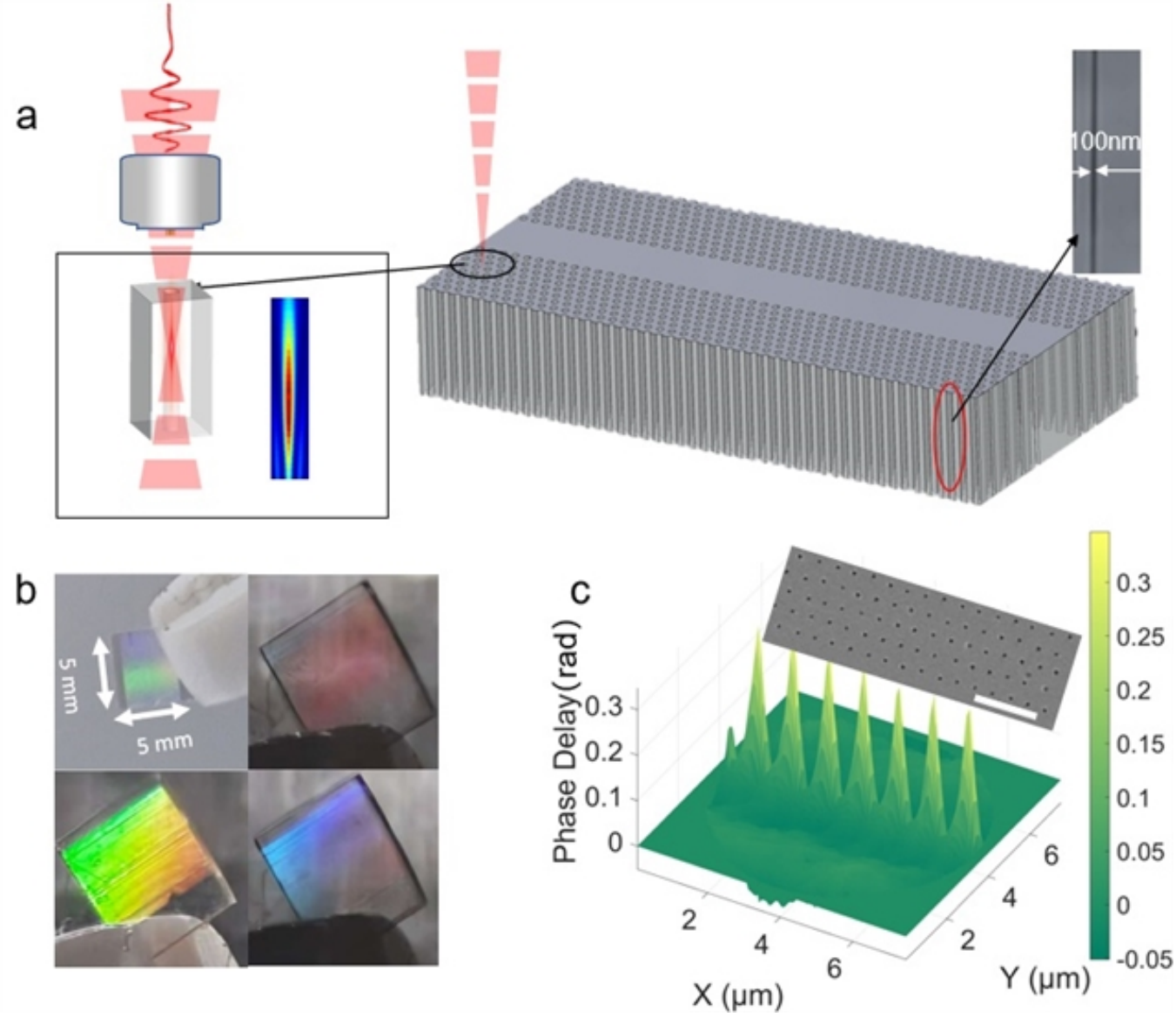


图1：超高深径比纳米孔包层波导的设计与制备。 (a) 结合球差增强飞秒激光改性与选择性湿法刻蚀的加工过程示意图，插图为拉长焦场的仿真光强分布 ；(b)
具有结构色彩的大面积样本实物照片 ；(c) 纳米孔阵列的相位延迟图，显示出极高的结构均匀性

研究团队提出了一种湿法刻蚀辅助的单脉冲纳米光刻（WESPN）技术
。通过引入介质折射率失配产生的球差增强，激光焦场在光轴方向被大幅拉长
，并结合动态轴向焦场拼接策略，实现了创纪录的超过50 000:1 的极高深径比（孔径为 30 nm，深度达到 1500 μ m）。此外，通过调节单脉冲能量等参数，纳米孔的直径可以在 30 nm 到 500 nm 之间实现连续的调控。

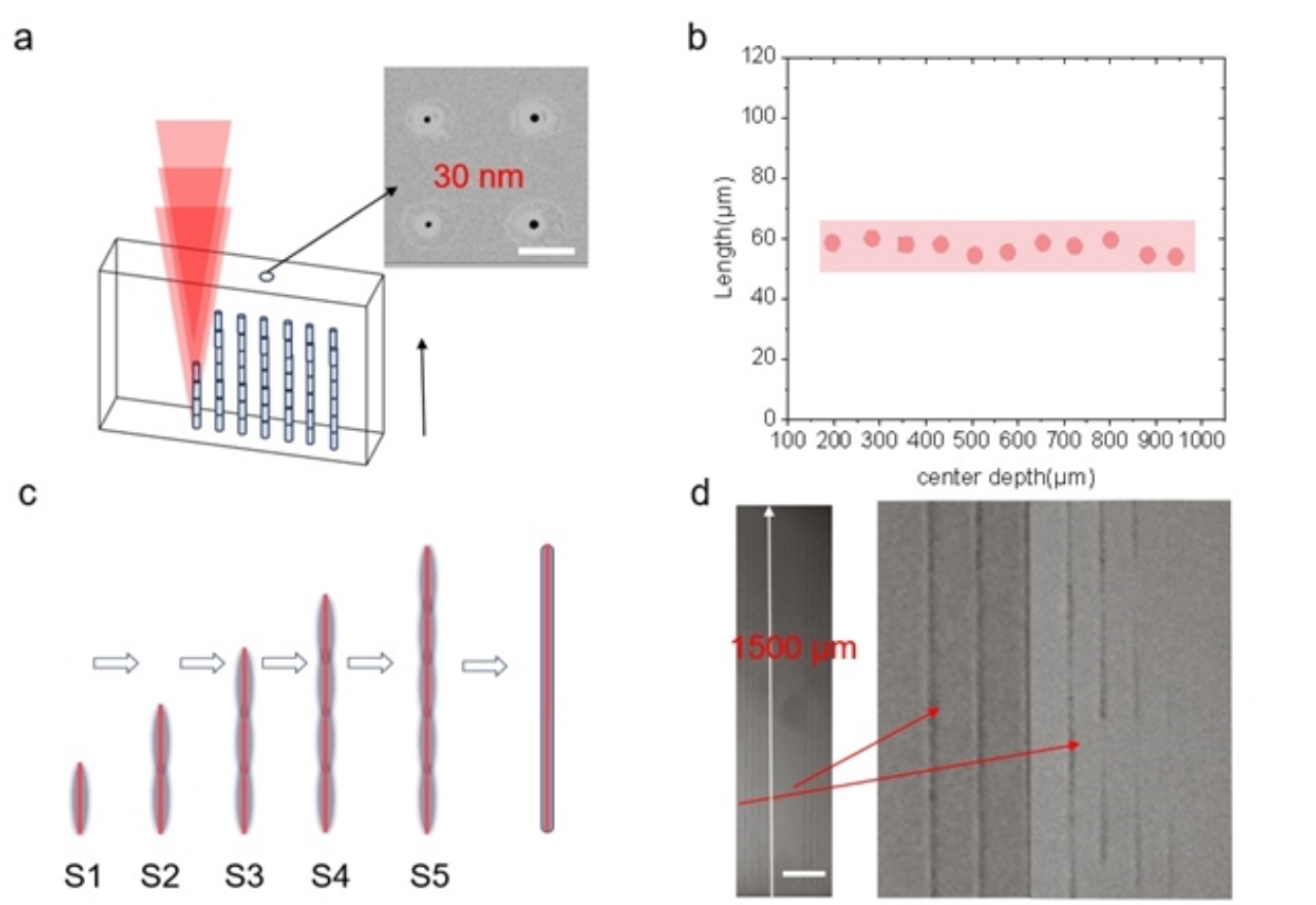


图2：动态轴向焦场拼接策略与微观表征。 (a) 焦场拼接原理示意图及孔径仅为 30 nm 的高分辨率 SEM 图像 ；(b) 不同深度下的纳米孔长度分布，证明了加工的深度不敏感性 ；(c) 焦场拼接实现连续高深径比纳米孔的工作原理 ；(d) 能量阈值过渡区的截面图，展示了平滑的拼接界面

区别于传统加工方式，该方法基于高度局域化的高密度电子触发非晶化，热损伤极小。后续的高选择性湿法刻蚀不仅赋予了纳米孔超平滑的内部侧壁，更保证了结构的高度一致性。在制备的厘米级周期性孔阵列中，实测的相位延迟偏差仅为 3.9%。

团队利用该高密度、高深径比的纳米孔阵列作为低折射率的光子包层，未被激光改性的蓝宝石区域构成光波导的芯层。该波导实现了通信波段（1550 nm）和可见光波段（532 nm）的高效光束引导，模式纯度达 10.9 dB。进一步的微区拉曼光谱测试表明，当罗丹明 6G 作为荧光探针进入纳米孔道后，凭借波导对激发光的有效约束以及孔隙的纳米限域效应，实现了对乙醇分子的高灵敏度荧光传感，验证了其在微量分析中的巨大潜力。

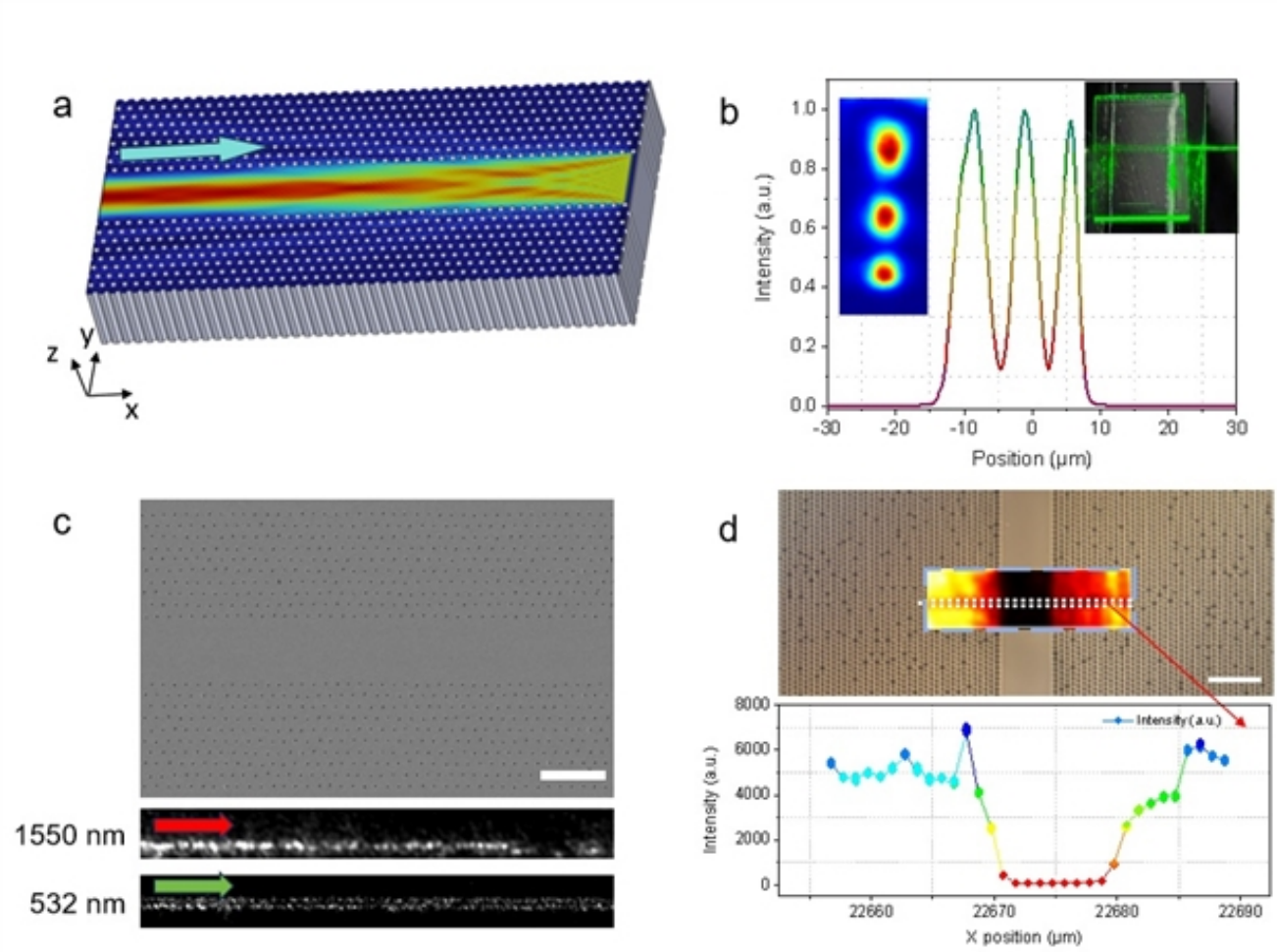


图3：纳米孔包层波导的光学特性与传感性能表征。 (a) 波导光场分布的电磁仿真结果 ；(b) 532 nm 绿光激发下的模场强度分布及传输图像 ；(c) 1550 nm 近红外光与 532 nm 可见光下的波导限域传光效果对比 ；(d) 浸入罗丹明 6G 后的微区拉曼映射图，验证了该平台对乙醇分子的高灵敏度传感能力

总结

本研究从光场调控与材料改性机制出发，开发了一种结合球差增强焦场拉伸与动态轴向拼接的飞秒激光加工新策略，实现了超高深径比纳米孔包层波导，展示了其在高灵敏度荧光传感检测领域的广阔前景。这种具备高度可扩展性的全 3D 纳米加工平台，不仅将为高密度光子回路的设计提供强有力的支持，有望在集成领域、实时环境监测以及高灵敏度生化诊断等前沿领域中发挥关键作用 。（来源：先进制造微信公众号）

相关论文信息：https://doi.org/10.37188/lam.2026.040

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等事宜，请与我们接洽。
作者：邱建荣等 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