
YAG体内超小尺寸高圆度纳米结构加工

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/41395.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！

YAG体内超小尺寸高圆度纳米结构加工。 导读

近期，四川大学周寿桓院士团队邓国亮副教授在Light: Advanced Manufacturing发表了题为Ultrafine three-dimensional nanostructuring in YAG via seed-enabled femtosecond-laser near-field enhancement and wet etching的研究论文。

该研究提出了一种基于飞秒激光近场增强效应与湿法刻蚀的超精细纳米结构加工方法，利用缺陷种子的近场增强效应，有效降低了YAG晶体的改性阈值，在体内成功实现了尺寸可控、最小截面约 $25 \times 23 \text{ nm}^2$ 、近圆形的纳米孔结构。研究揭示了亚阈值功率下结构形貌的演变规律，并在此基础上构建了纳米级光子晶体波导，为飞秒激光三维纳米加工向数十纳米尺度拓展提供了新路径。

亚波长结构因其能显著调控材料光学性质而成为光子学研究的前沿热点，尤其是具有高折射率对比度的亚波长结构，展现出对光场的强大调控能力。然而，如何在材料内部于纳米尺度上实现这种结构的构筑，仍是当前面临的关键挑战。

在众多体内微纳结构加工技术中，飞秒激光加工凭借其材料适应性广、真三维加工能力以及超衍射极限加工精度等优点，成为一种重要手段。结合飞秒激光改性与湿法刻蚀，研究人员在材料内成功制备出了高折射率对比度三维结构，为微纳尺度光子器件的构建提供了有力支撑。

当前，利用飞秒激光增强湿法刻蚀的方法，人们重点聚焦于如何高效地在材料体内制备出高质量、小尺寸、高圆度孔的结构。已有研究表明，降低加工功率有助于减小结构特征尺寸并改善孔截面圆度，但当功率低于材料改性阈值时，则无法实现有效改性。这种尺寸缩小和圆度改善与阈值限制之间的矛盾，成为制约体内纳米加工能力进一步提升的核心瓶颈。

研究团队基于YAG晶体内部初始改性种子的近场增强效应，成功实现了材料体内加工阈值的有效降低。首先，利用阈值以上功率的飞秒激光在材料体内诱导折射率改性缺陷种子；随后，在低于正常加工阈值的激光功率下，以较低扫描速度对材料进行改性。实验表明，在50倍物镜（NA=0.42）条件下，该策略可将材料改性阈值降低至无种子对照组的约80%，且阈值降低效果受初始种子形状和大小的扰动较小。

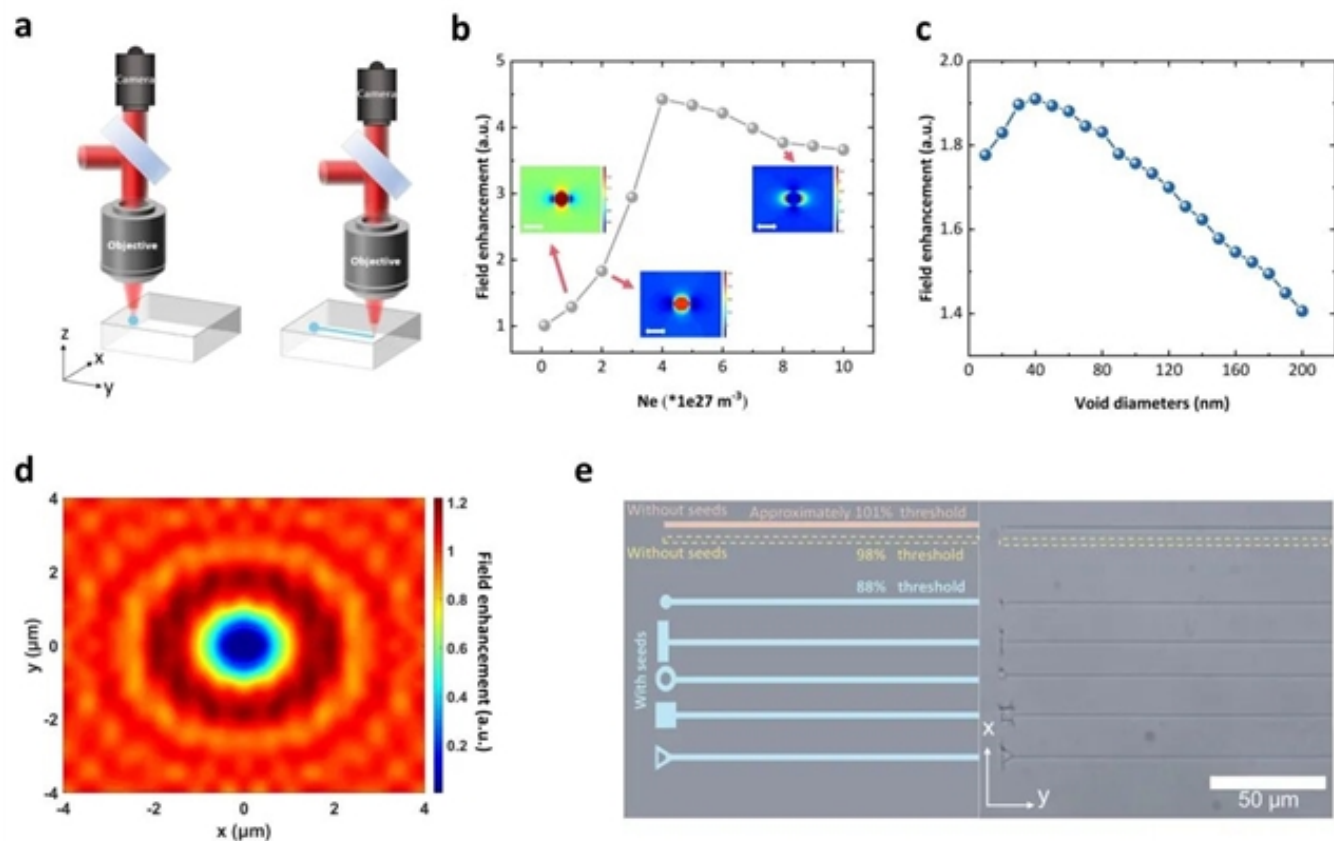


图1：基于体内种子飞秒激光加工的实现方案及其理论分析

为进一步提升加工精度，团队使用100倍油镜（NA=1.3）开展了亚阈值加工研究。结果表明，随着飞秒激光功率的降低，亚阈值条件下加工结构的截面形貌呈现出三个不同的阶段：第 阶段为单个椭圆形结构，纵横比较大，与常规飞秒激光直接结构形貌类似；第 阶段为多孔结构，随着功率的降低，孔的数量减少，纵横比也同步下降；第 阶段为单个近圆形孔结构，其纵横比在25 nm-约200 nm范围内都接近1（如图2所示）。这一发现揭示了功率调控对结构形貌的精细调制机制，为实现高圆度、尺寸可控的纳米孔制备提供了实验依据。

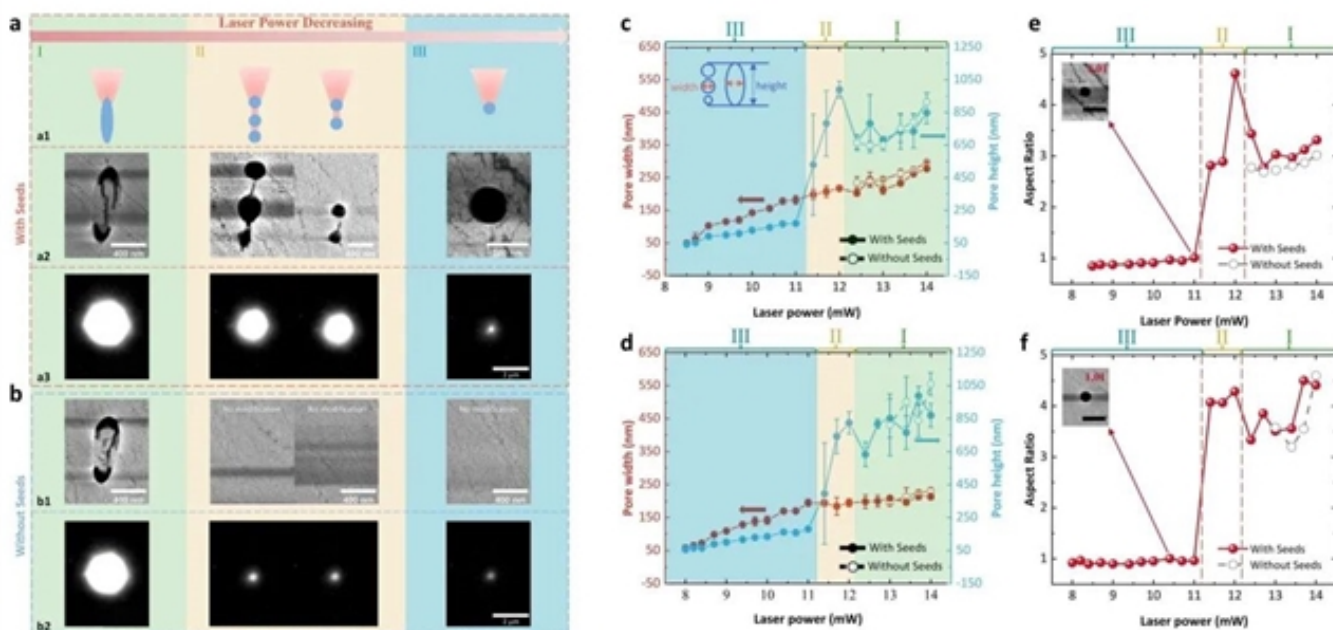


图2：亚阈值加工三个阶段的形貌、尺寸及纵横比变化

在此基础上，研究团队成功制备出了尺寸可控的近圆形纳米孔结构，并进一步构建了由纳米级圆孔组成的光子晶体波导结构，以及不同孔径尺寸组合（中心孔径较小、外围孔径较大）的光子晶体结构（如图3所示）。上述成果充分验证了该方法在三维纳米光子学器件制造中的灵活性与应用潜力，为体内复杂光子结构的精确构筑开辟了新路径。

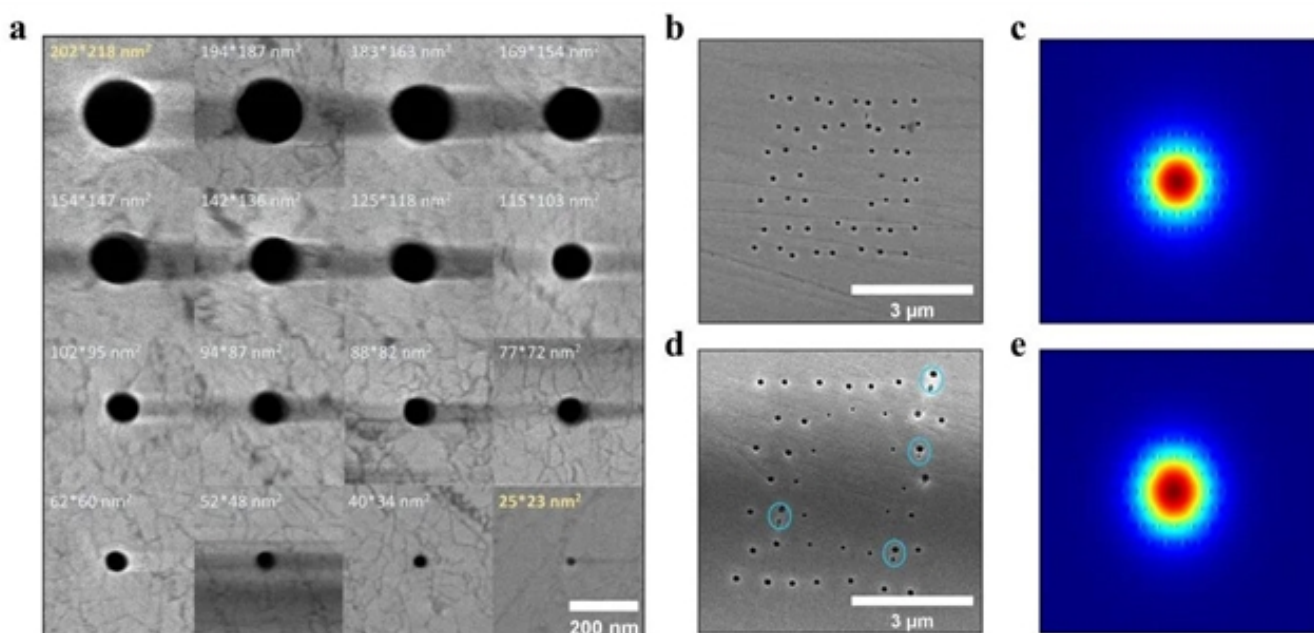


图3：不同尺寸圆孔以及光子晶体波导结构制作

总结与展望

本研究提出了一种基于体内缺陷种子的飞秒激光改性增强湿法刻蚀加工方法，利用缺陷种子的近场增强效应，有效降低了YAG晶体内部的改性阈值，成功实现了尺寸可调的近圆形截面纳米孔制备，最小截面尺寸可达 $25 \times 23 \text{ nm}^2$ 。基于该方法，在YAG体内构建了纳米孔组成的光子晶体波导，充分验证了该方法在体内复杂纳米图案加工及纳米级光子器件集成方面的可行性。这一进展标志着飞秒激光三维纳米加工能力迈出了重要一步，为高折射率对比度三维光子器件的设计与制造开辟了新路径。未来，该方法有望拓展至其他透明硬脆材料，并在量子光学、集成光子学等领域发挥重要作用。（来源：先进制造微信公众号）

相关论文信息：<https://doi.org/10.37188/lam.2026.038>

作者：周寿桓等 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](https://www.iikx.com)转发