新型可调控三维纳米光子平台

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：https://www.iikx.com/news/progress/41251.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！

新型可调控三维纳米光子平台。 导读

在纳米尺度上调控光与物质的相互作用，是推动光子学前沿研究、量子信息技术以及先进成像技术发展的核心课题。然而，目前用于构筑三维纳米光子结构的加工手段往往受限于材料单一、分辨率不足及结构自由度受限等问题，难以实现对材料折射率、增益/损耗等光学性质的连续可调与三维空间分布的精准设计。

近日，来自麻省理工学院、斯坦福大学、中佛罗里达大学和加泰罗尼亚理工大学等研究机构的科研团队提出了一种高度创新的三维纳米制造平台——Implosion Fabrication（ImpFab）。该方法通过在水凝胶支架中实现染料光刻、纳米颗粒装配与胶体体积收缩过程的集成，实现了前所未有的三维纳米光学结构的构筑能力。研究团队利用该技术制备了二维与三维光子晶体、莫尔超晶格以及准晶结构，并演示了在三维空间中对材料光学性质的精准调控，为未来非厄米光子学、多维光场调控与三维纳米器件设计开辟了新方向。该研究成果近日发表于国际顶尖学术期刊《Light: Science Applications》，题为Three-Dimensional Nanophotonics with Spatially Modulated Optical Properties，麻省理工学院的Yannick Salamin和Gaojie Yang为论文共同第一作者，Marin Solja?i?为论文的通讯作者。

研究背景

纳米光子学旨在利用人工结构实现对光场行为的高度调制，例如增强光-物质相互作用、实现光子能带结构工程、构筑拓扑光子态以及在结构中引入强局域化效应等等。然而，现有的微纳加工手段在三维结构的构建上仍存在明显的局限性。以双光子聚合（two-photon polymerization）为代表的自上而下制造技术具有设计灵活的优势，但常受到材料折射率对比度低、结构尺寸难以真正缩小到纳米级别等因素的限制；而依靠胶体自组装的自下而上方法虽然材料丰富，但在几何结构控制方面明显不足，无法满足复杂光子结构的精细调制需求。此外，在三维空间内实现对光学性质（如折射率分布、增益或损耗强度）的连续且可控的调节则更加具有挑战性，而这正是研究非厄米光子学现象、构筑莫尔超晶格和准晶结构以及开展三维拓扑光子学研究不可或缺的基础。

基于上述原因，开发一种能够兼具三维空间高分辨率、材料功能多样性以及光学性质可调控的新型纳米制造技术已成为纳米光子学发展的迫切需求。

创新研究

为应对上述迫切需求，本研究创新性地提出了ImpFab技术。该技术的核心思想是利用水凝胶作

为三维支架，并将光刻功能化、纳米颗粒沉积以及整体收缩机制结合起来，实现结构几何与材料光学性质的双重调控。

在具体工艺上，研究人员首先制备可大幅膨胀的水凝胶，再通过双光子光刻在凝胶内部空间选择性激活荧光染料，使其与凝胶骨架发生化学键合，从而形成高精度的三维功能化图案。随后，利用一系列生化连接反应，将金纳米颗粒与银纳米材料沉积到已激活的区域，实现材料性质的定点构筑。随着水凝胶在盐溶液中发生均匀收缩，整个图案被等比例缩小到纳米尺度，从而获得具有复杂几何形状与功能性材料性质的三维纳米结构。

在上述技术框架的基础上，研究团队成功验证了ImpFab 对材料光学性质的精细调控能力。通过改变激光曝光功率与扫描速度，最终沉积的银纳米颗粒密度可以在空间中形成明显差异，以实现可控的折射率和反射率特性的变化，甚至可通过理论模型精确拟合出材料的复杂折射率，这意味着折射率梯度以及潜在增益/损耗分布都能在三维结构中进行连续构建。利用这一能力，研究人员构建了多种二维与三维光子晶体，包括方形晶格、六角晶格与立方晶格，并首次在三维平台上实现了具有12 重衍射对称性的旋转双层莫尔结构。更引人注目的是，团队还构筑了二维 Penrose 准晶以及三维正二十面体准晶，并清晰观察到了典型的五重和二重衍射对称性，展示了ImpFab 技术在处理非周期性光子结构方面的巨大潜力。

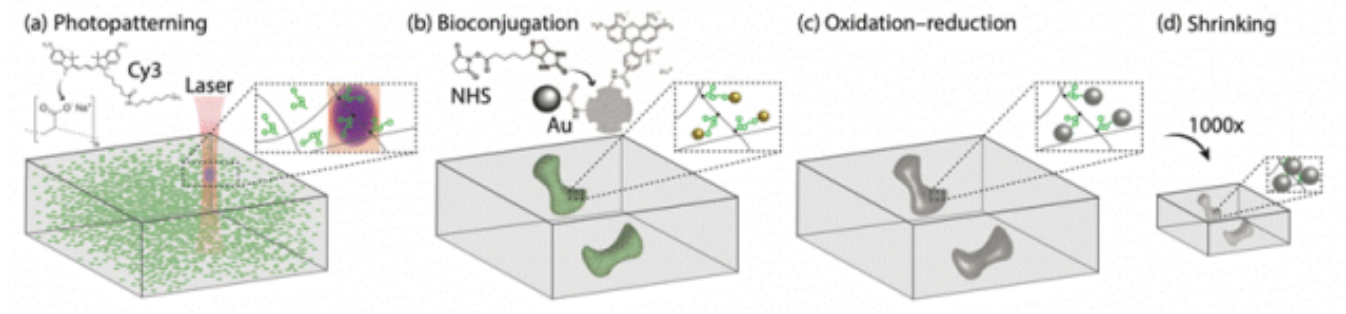


图1:ImpFab方法示意图。(a) 将水凝胶前驱体浇铸成所需的组成。渗入的染料分子通过双光子激发（紫色体素）与聚合物基体发生共价结合。Cy3：Sulfo-Cyanine3胺基染料。(b) 纳米颗粒与图案化荧光骨架上的功能基团发生结合。NSH：Biotin-NHS；Au：链霉亲合素荧光纳米金。(c) 通过氧化还原过程，使银在金纳米颗粒作为成核点处生长，从而增强图案的显影。(d) 水凝胶基体以及其内部图案化的三维结构发生各向同性收缩。

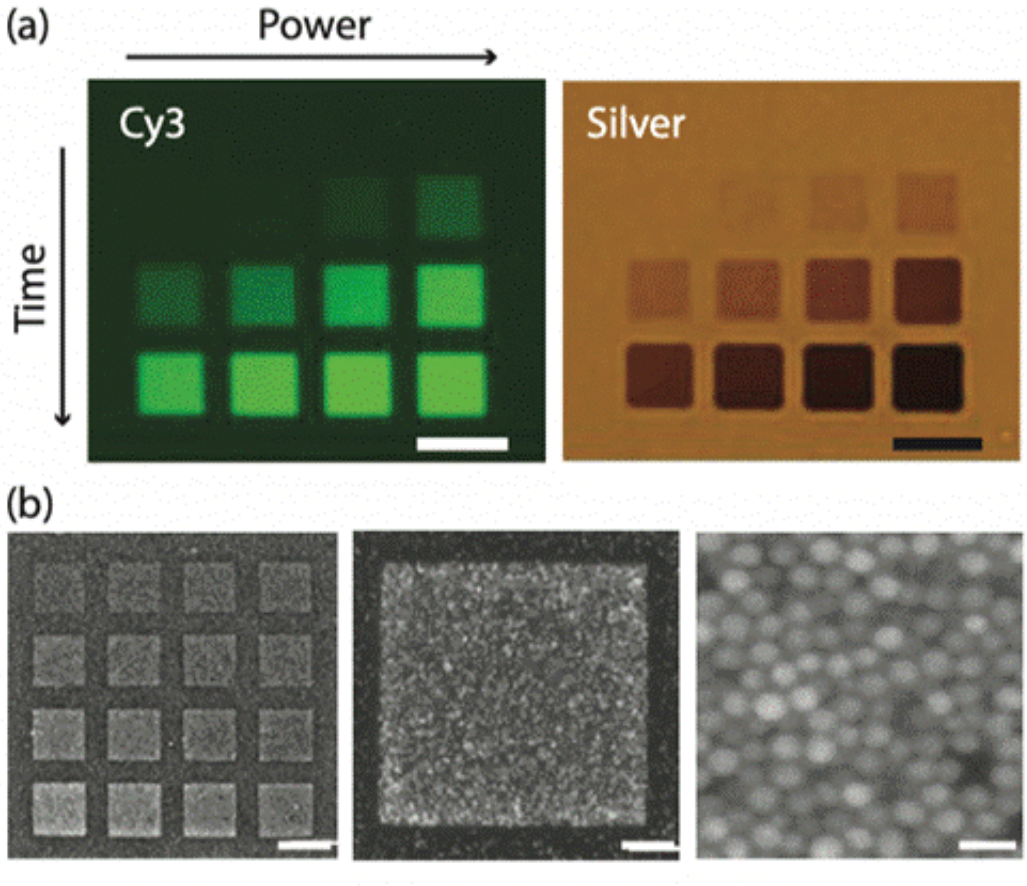


图2：打印样品的分子密度梯度。(a) 通过不同的激光功率与停留时间在样品上制备方形图案。左图为打印后方形图案的荧光成像；右图为银显影后的同一区域明场图像。比例尺均为 10 μm。(b)
扫描电子显微镜（SEM）图像展示了具有致密且均匀金纳米颗粒的图案化区域。（右侧）高倍 SEM 图像揭示了图案区域内相互连接的纳米颗粒结构，证明了高效的发色团激活和材料沉积。比例尺：左 = 10 μm，中 = 1 μm，右 = 50 nm。

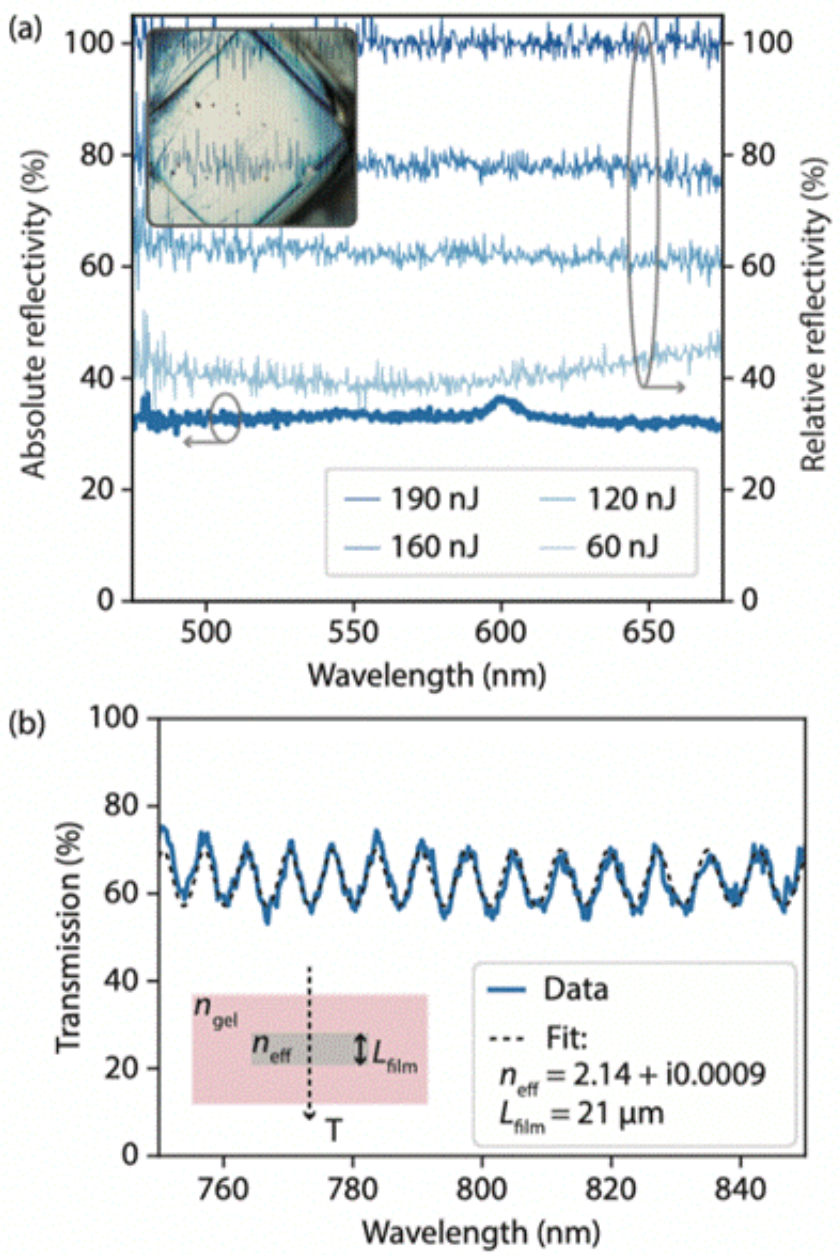


图3:对打印得到的材料光学性质的调控。(a) 不同写入参数下的相对反射率。(b) 透射光谱及其法布里-珀罗拟合结果。

总结与展望

这项研究所展示的ImpFab 技术为制造具有高度结构自由度和材料光学性质可调的三维纳米光子器件提供了前所未有的技术基础。通过将光刻与纳米颗粒沉积融为一体，并利用水凝胶的体积收缩能力，ImpFab不仅实现了结构特征尺寸向纳米级的突破，还能够在三维空间中连续调控材料密度和折射率分布。这使得构筑光子晶体、莫尔结构、准晶结构以及潜在的非厄米光子系统成为可能。

未来，该技术有望进一步引入具有真实增益功能的染料，实现具备PT 对称或含异常点特性的三维光子晶体；也可能通过更高折射率对比度的材料组合实现更强光场局域化效果，从而推动高Q

值纳米腔、单光子源以及增强非线性效应研究的发展。随着ImpFab 平台的不断完善，它将成为探索高维光子学、非厄米光子学以及制造量子光学器件的强大工具，为光通信、先进成像以及量子信息处理等领域带来全新的突破。（来源：LightScienceApplications微信公众号）

相关论文信息：https://doi.org/10.1038/s41377-025-02166-5

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：Marin Solja?i? 来源：《光：科学与应用》

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