
基于全空间优化超构光学的腔内复杂光场整形

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/41550.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！

基于全空间优化超构光学的腔内复杂光场整形。 导读

实现腔内和腔外光场的精准整形与调控是光学与光子学领域的核心目标之一。从日常的相机镜头、显微镜，到前沿的超分辨成像、激光器芯片，现代光电器件的性能突破都离不开对光场的多维精准整形。如今，科研人员已经能通过超构表面，在开放的自由空间中按需调控光场的振幅、相位、偏振等多维参量，实现消色差超透镜、三维全息成像等复杂功能。然而，如何利用超构表面实现封闭光学腔内的三维光场精准整形，仍面临一系列技术挑战。

光学腔是由反射边界组成的微型光学结构，是激光器、量子光源、超分辨成像等重要应用的基础。与开放自由空间边界的二维整形问题不同（图1a），封闭光学腔体内的入射光会在边界间来回反射，产生多重散射与干涉效应，且内腔光场的矢量特征非常明显，导致其变成一个复杂的三维整形问题（图2b）。这就像在四面都是镜子的房间里，想要精准控制每一束光线的方向和位置，难度呈指数级上升。在超构光学领域，当前主流的逆向设计方法大多只适用于半开放的自由空间，难以实现腔内复杂三维矢量光场的按需整形，成为限制超构光电子学器件性能提升的关键瓶颈。

近日，中国科学院光电技术研究所罗先刚院士、蒲明博研究员团队，联合国防科技大学，提出了基于全空间伴随的超构光学拓扑优化设计框架，首次实现了光学腔内复杂矢量光场的按需精准整形，为解决光学内腔整形挑战提供了新思路。该成果以Full-space inverse-designed meta-optics for complex vector field shaping of intracavity landscapes为题，发表在国际顶级光学期刊《Light: Science Applications》上。

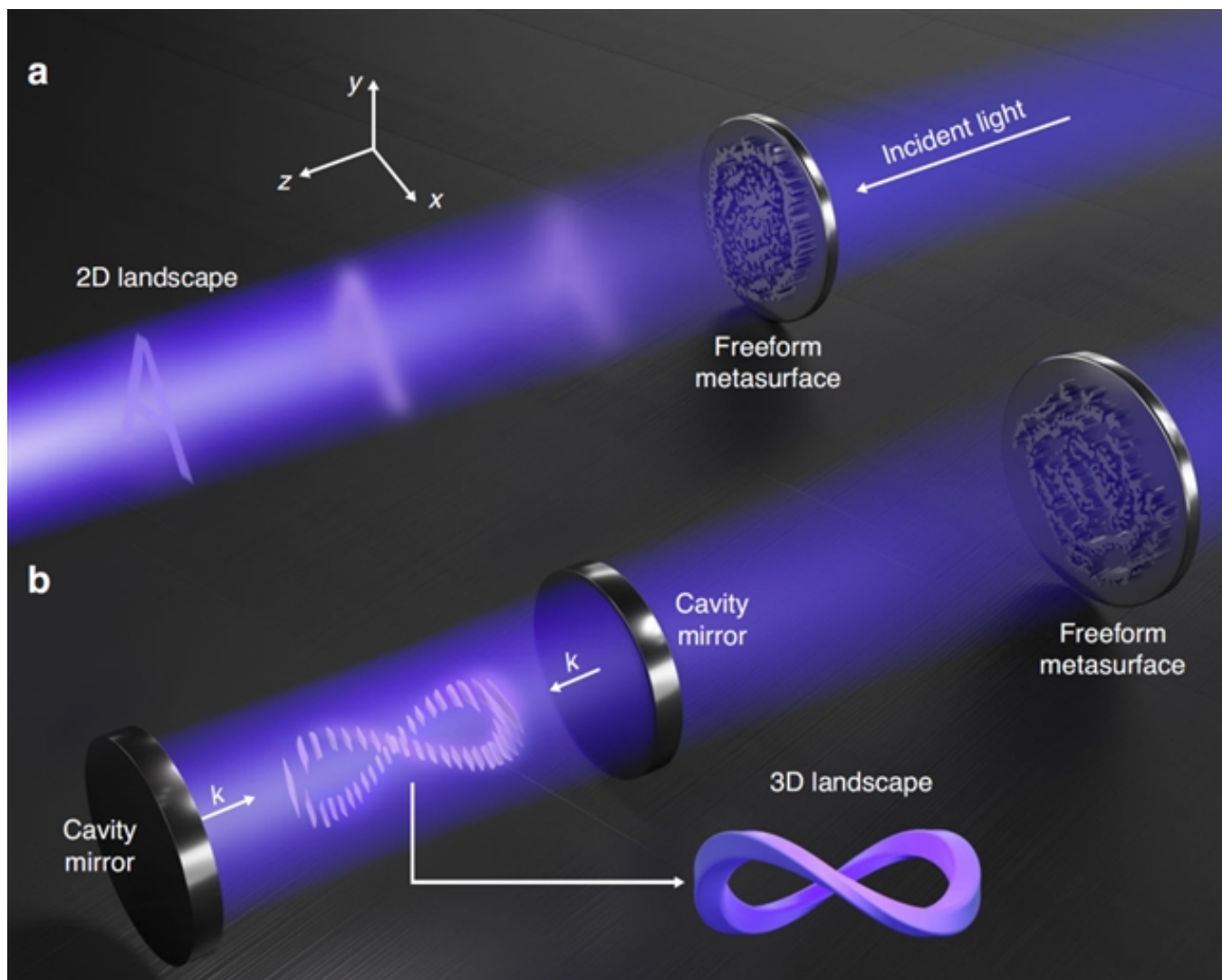


图 1：腔外与腔内超构光学整形原理对比示意图。

研究内容

前期，团队已提出了场相似性拓扑优化[Laser Photonics Reviews 2022, 16: 2200265]、无序拓扑优化[Advanced Materials 2022, 34: 2108709]、时间反演拓扑优化[Laser Photonics Reviews 2025, 19: 2401819]系列方法，解决了高NA超构透镜、无序超构表面、色散超构表面等优化设计问题。在该工作中，团队进一步发现在外腔情况下，传统拓扑优化方法仅考虑了伴随源的半空间传输特性，通常忽略了其作为虚拟偶极子源的全向辐射特征（图2a）。团队跳出了传统半空间伴随优化的固有思路，针对封闭腔体的边界特性提出了全空间伴随的拓扑优化策略。新方法同时覆盖了腔内前向、后向传播的所有光场分量（图2b），能在亚波长尺度下对光场的全矢量分量进行全波优化，可以解决封闭腔体内多重散射、干涉带来的调控难题。

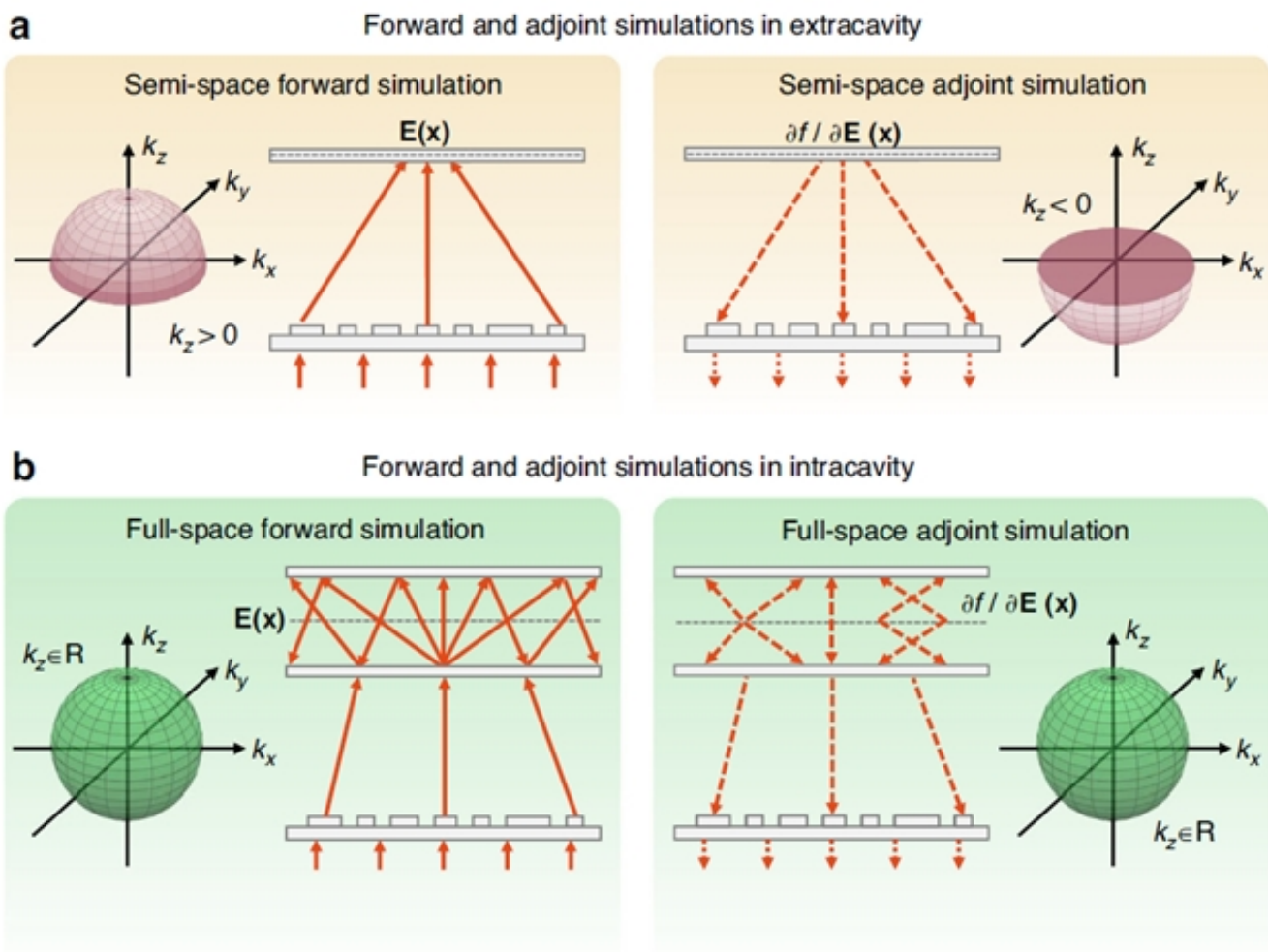


图2：（a）传统拓扑优化过程；（b）全空间伴随仿真的拓扑优化方法。

为了验证全空间伴随拓扑优化性能，团队在等离子体腔超分辨成像系统中开展了实验。该系统是一个典型的光学内腔，需要将携带精细结构信息的倏逝波传递到成像面，还原出突破衍射极限的微观结构。由于腔内光场的畸变会导致成像图案严重失真，如何同时兼顾超高分辨率和高成像保真度，一直是该领域的痛点。团队通过全空间伴随拓扑优化，设计了自由形状的超构表面掩模，对腔内的全矢量倏逝波进行了精准的局域优化调控。实验结果表明（图3），优化后的成像系统在保持 $\lambda/5$ （约 70nm）光学超分辨能力的同时，将成像保真度提升了5倍，且可以大幅降低图案的边缘误差。即便是 Maxwell's Equations 这类复杂的大面积图案，也能实现高保真还原，原本缺失的图案细节被完美恢复。

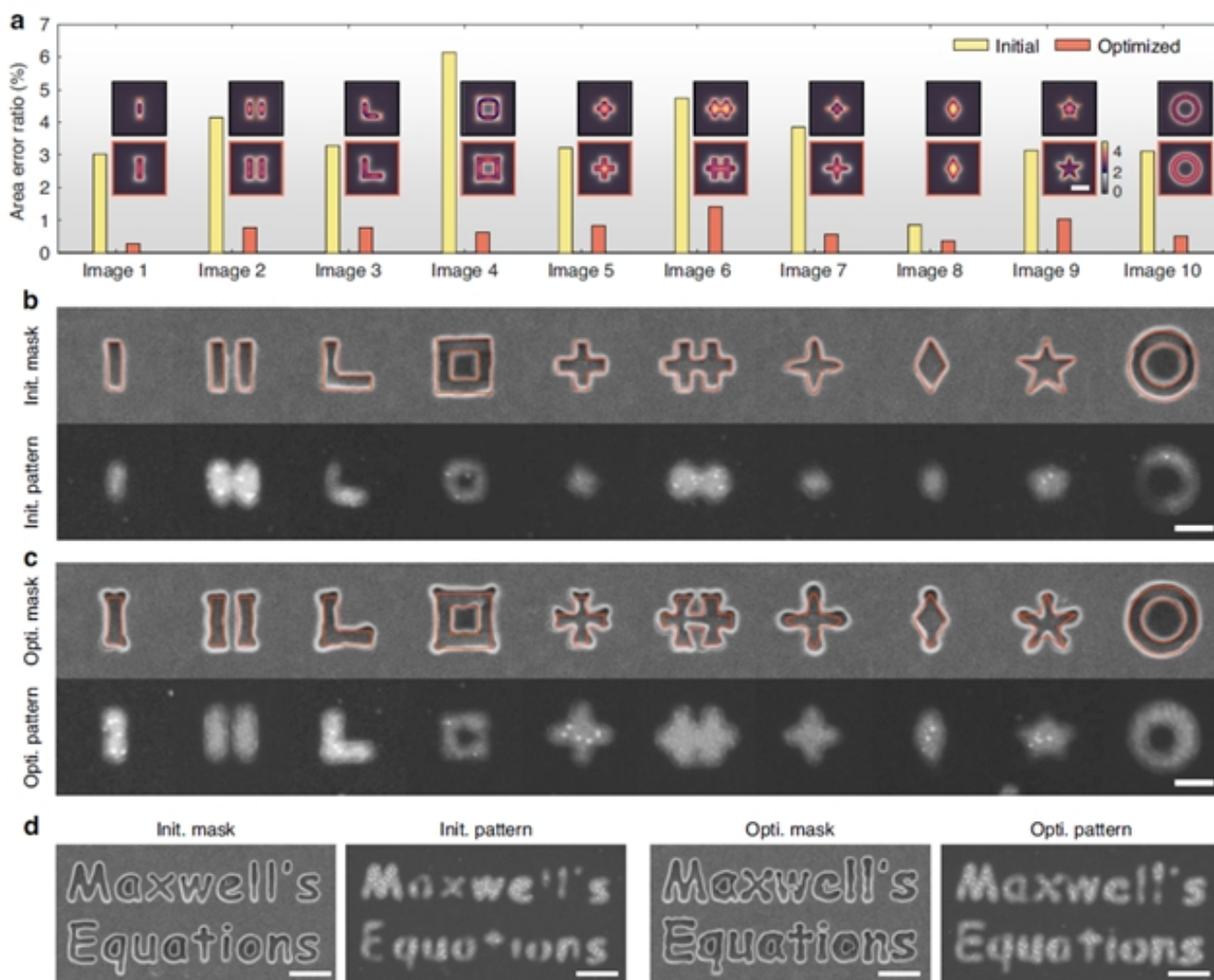


图 3：Maxwell ' s Equations 图案超分辨成像优化前后成像对比。

总结与展望

该工作建立了一套适用于封闭光学腔体的超构光学逆向设计通用框架，有望打破传统自由空间设计范式的应用局限。除了在超分辨成像、近场成像等领域的直接应用，该方法还能广泛拓展到其他前沿光子学领域。比如在量子光学中，利用该方法调控腔内光场增强光与量子发射器的相互作用，有望提升单光子源的效率；在纳米激光领域，该方法可以精准控制纳米激光器的发射模式。值得一提的是，该方法的核心原理具有普适性，不仅适用于光波，还能推广到声波、电子波等其他波动体系，为各类封闭系统内的波场调控提供了全新的思路。（来源：LightScienceApplications 微信公众号）

相关论文信息：<https://doi.org/10.1038/s41377-026-02258-w>

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：罗先刚等 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](https://www.iikx.com)转发