

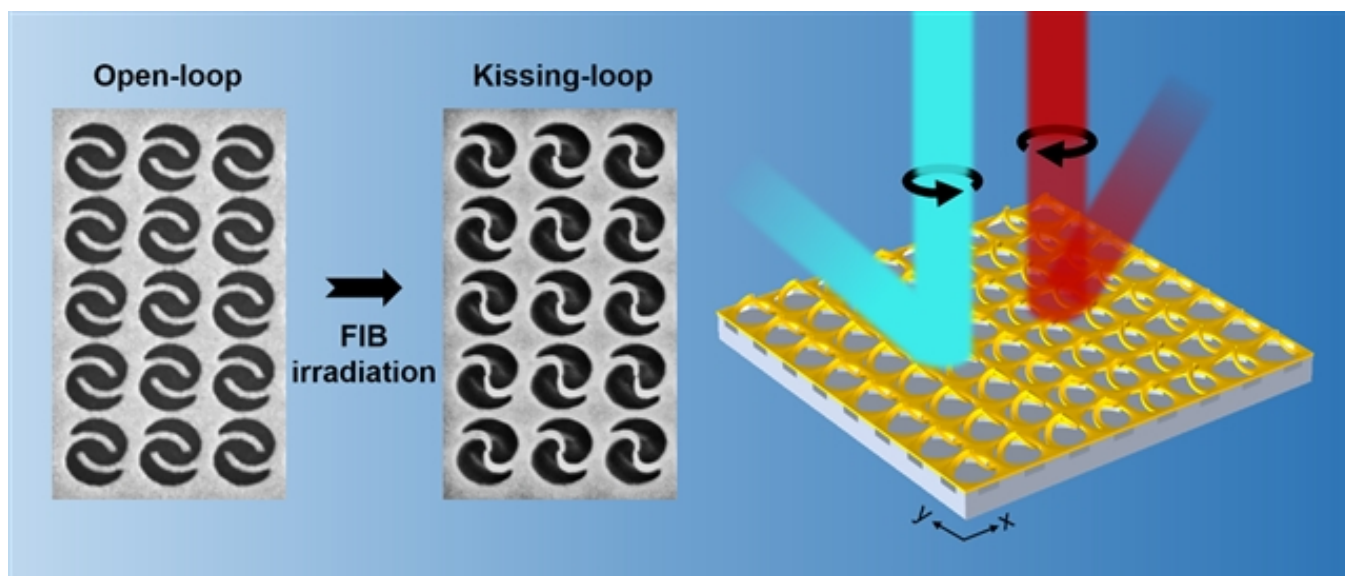
“吻环”型纳米剪纸结构实现异常光学反射

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/30962.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！

“吻环”型纳米剪纸结构实现异常光学反射。



剪纸（Kirigami）作为一种对纸张进行剪裁和折叠的传统艺术形式，为先进纳米制造提供了新颖的设计思路。与传统增材制造和减材制造技术相比，剪纸技术利用少量的材料损失和丰富的结构变换即可将平面二维图案形变成多功能的三维结构。

近年来，随着先进微纳制造技术的快速发展，剪纸形变概念已被拓展到现代科学技术领域。值得关注的是，北京理工大学李家方教授及合作团队在2018年发明了一种纳米剪纸三维微纳制造技术[Sci. Adv. 4, eaat4436 (2018)]，实现了多种新颖的三维及准三维纳米结构[Light-Sci. Appl. 9, 75 (2020)]。

经过长期的理论和实验探索，研究团队在2021年进一步提出了一种基于静电力驱动的纳米剪纸可逆形变调控机制[Nat. Commun. 12, 1299 (2021)]，并于2024年实现了纳米剪纸转子的原位高效释放和光电协同多模态自由操控[Sci. Adv. 10, eadn7582 (2024)]。在此趋势下，具有可重构拓扑形貌的多功能纳米剪纸技术已经成为一个新兴

的研究方向，并在光学手性、光场调控、微纳机器人等领域产生重要应用。

从结构拓扑形貌角度,可以将现有的纳米剪纸分成树型(tree-type)[也称为开环(open-loop)]和闭环(close-loop)型。然而，开环型和闭环型结构都存在一定局限性：

开环型结构的子结构相对独立，形变简单、能够直观预测；

闭环型结构中各部位互相关联、嵌套，形变互相影响，能够构造丰富的三维结构，但其形变高度仍受到连接部位的限制。

因此，设计出高形变、复杂且多样化的纳米剪纸方案成为一项重要挑战，一旦解决将可能挖掘更多形貌独特、功能新颖和应用广泛的纳米结构及器件。

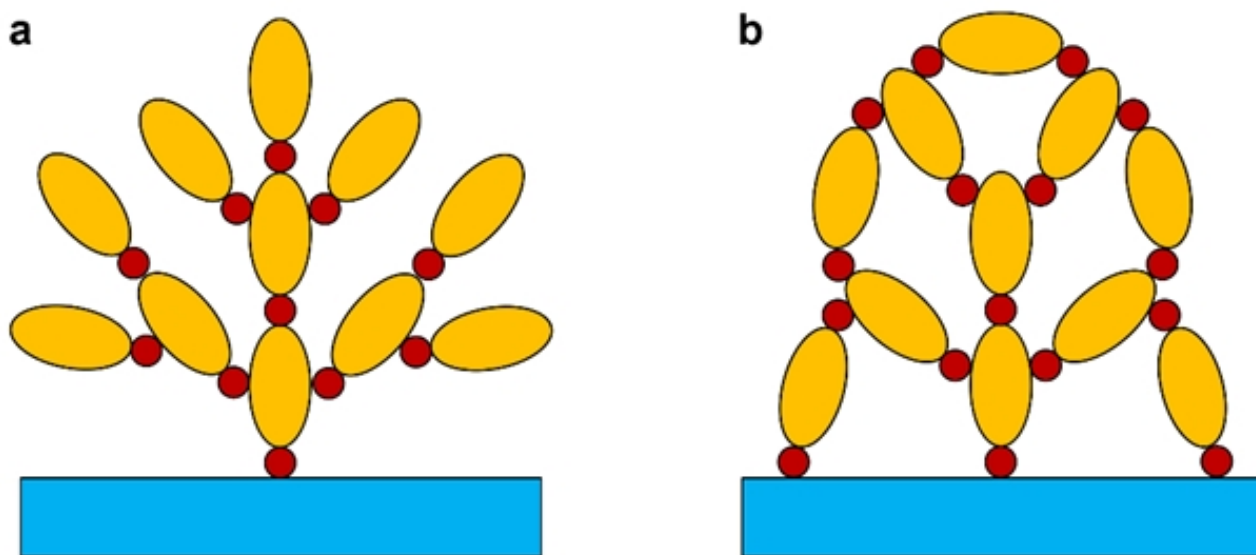


图1：树型型(开环型)和闭环型结构示意图

为了解决这一问题，北京理工大学李家方教授团队提出了一种基于聚焦离子束(FIB)的吻环型 (kissing-loop) 纳米剪纸方案，该方案可以将纳米结构从二维开环形态通过形变实现结构闭合，转变为三维kissing-loop形态，并实现了对入射光偏振态和相位的调制。该成果以Kissing-loop nano-kirigami structures with asymmetric transmission and anomalous reflection为题发表在Light: Advanced Manufacturing。

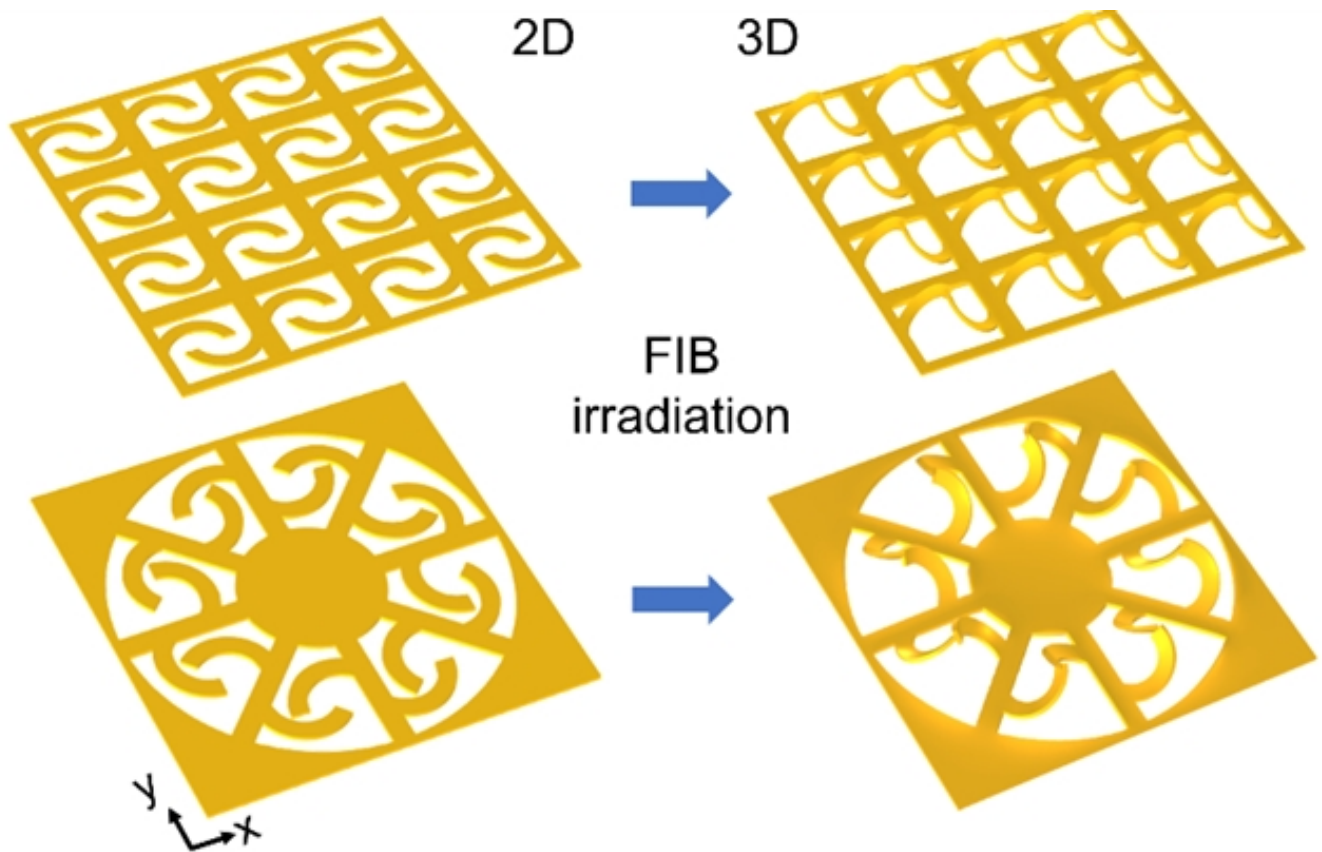


图2：Kissing-loop纳米剪纸结构周期性排列和花窗结构设计

Kissing-loop纳米剪纸结构采用悬臂和支撑框架相结合的设计，如图2所示。通过合理调整臂长、臂宽、位置等参数，二维结构单元中的两个悬臂在FIB辐照下逐步向上形变直至实现精准吻合对接，形成kissing-loop立体结构。

Kissing-loop纳米剪纸结构具有形变高度大、形貌多样化的优点，能够进一步拓展到多种类材料并制备出丰富的三维微纳结构，例如花窗结构等。这种形变方案实现了更多新奇的三维拓扑形貌变换，极大地丰富了微纳结构的复杂性和多样性，为微纳结构的探索和应用提供了新的平台。

为了制备kissing-loop纳米剪纸结构，研究团队采用如下步骤：

SiO₂衬底上沉积60nm厚的金薄膜，

通过高剂量FIB刻蚀、

进行湿法腐蚀、

进行低剂量FIB辐照

通过上述步骤，成功制备出周期为1 μm 的kissing-loop纳米剪纸结构和圆形的花窗结构，如图3所示。

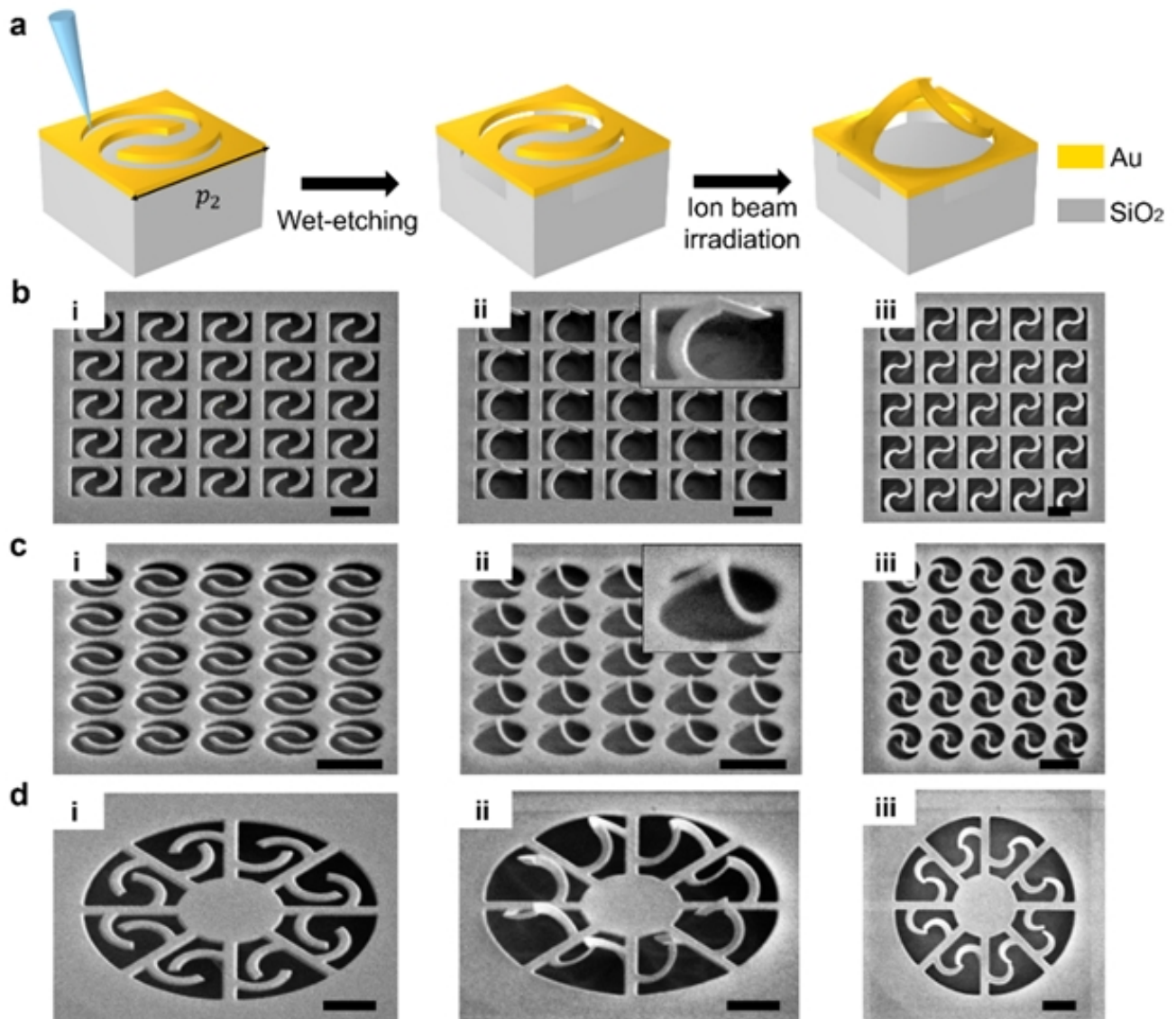


图3：Kissing-loop纳米剪纸结构制备示意图和SEM图片

更令人惊叹的是，这类新型kissing-loop纳米剪纸结构在非对称传输和异常反射方面表现出了新奇的现象。首先，由于二维到三维的形变，原二维结构在其自身平面内的镜像对称性被破坏，三维kissing-loop纳米剪纸结构仅关于z轴具有双重旋转对称性，满足线偏振光非对称传输的条件。研究人员由此在 $20 \times 20 \mu\text{m}^2$ 的结构阵列中观测到了非对称传输现象，如图4所示。

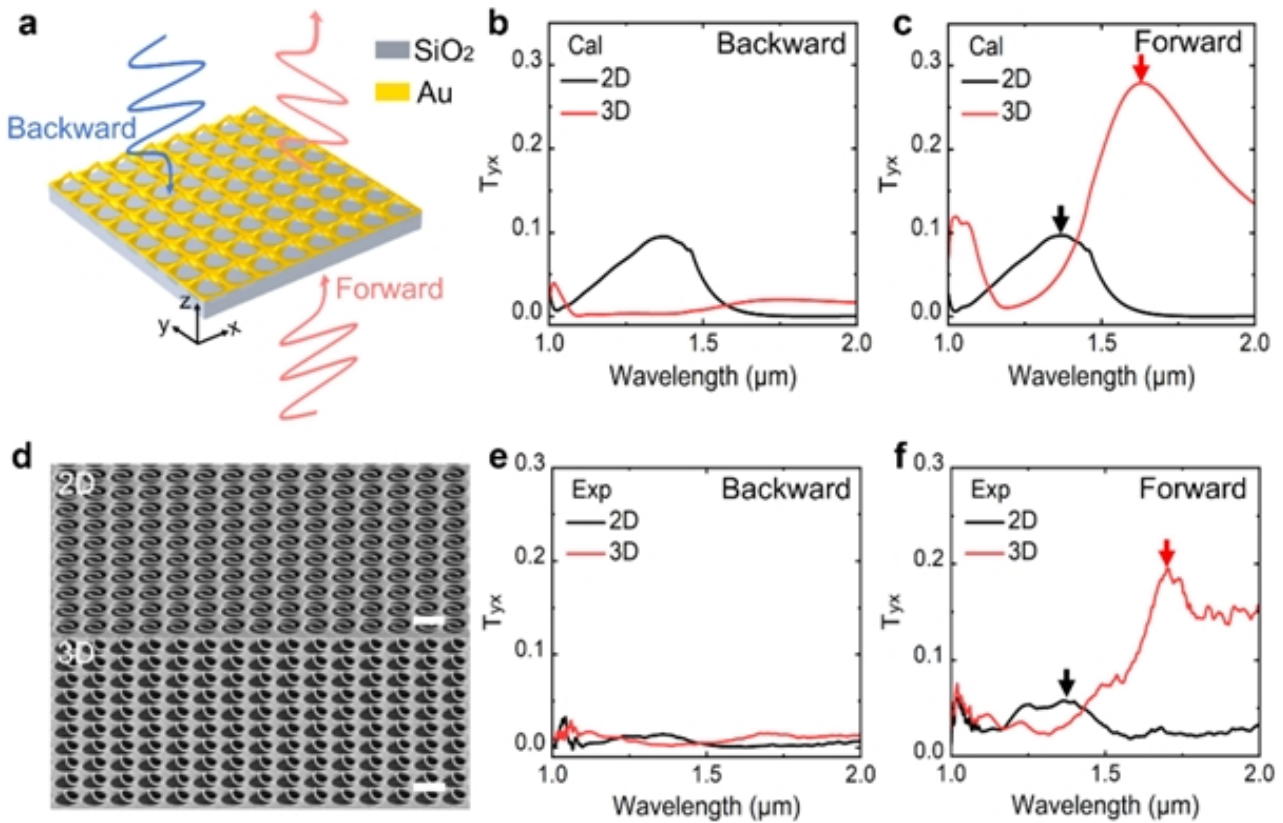


图4：Kissing-loop纳米剪纸结构的非对称传输示意图和实验验证

此外，基于几何相位原理，研究团队将8个结构单元依次排列，并使相邻单元之间的转角增量为 $\Delta\phi = 22.5^\circ$ ，发现当左旋偏振光和右旋偏振光分别入射时，在-x和+x方向上分别出现了宽带异常反射现象，并利用角分辨微光谱仪（ARMS）成功验证了这一结果，如图5所示。

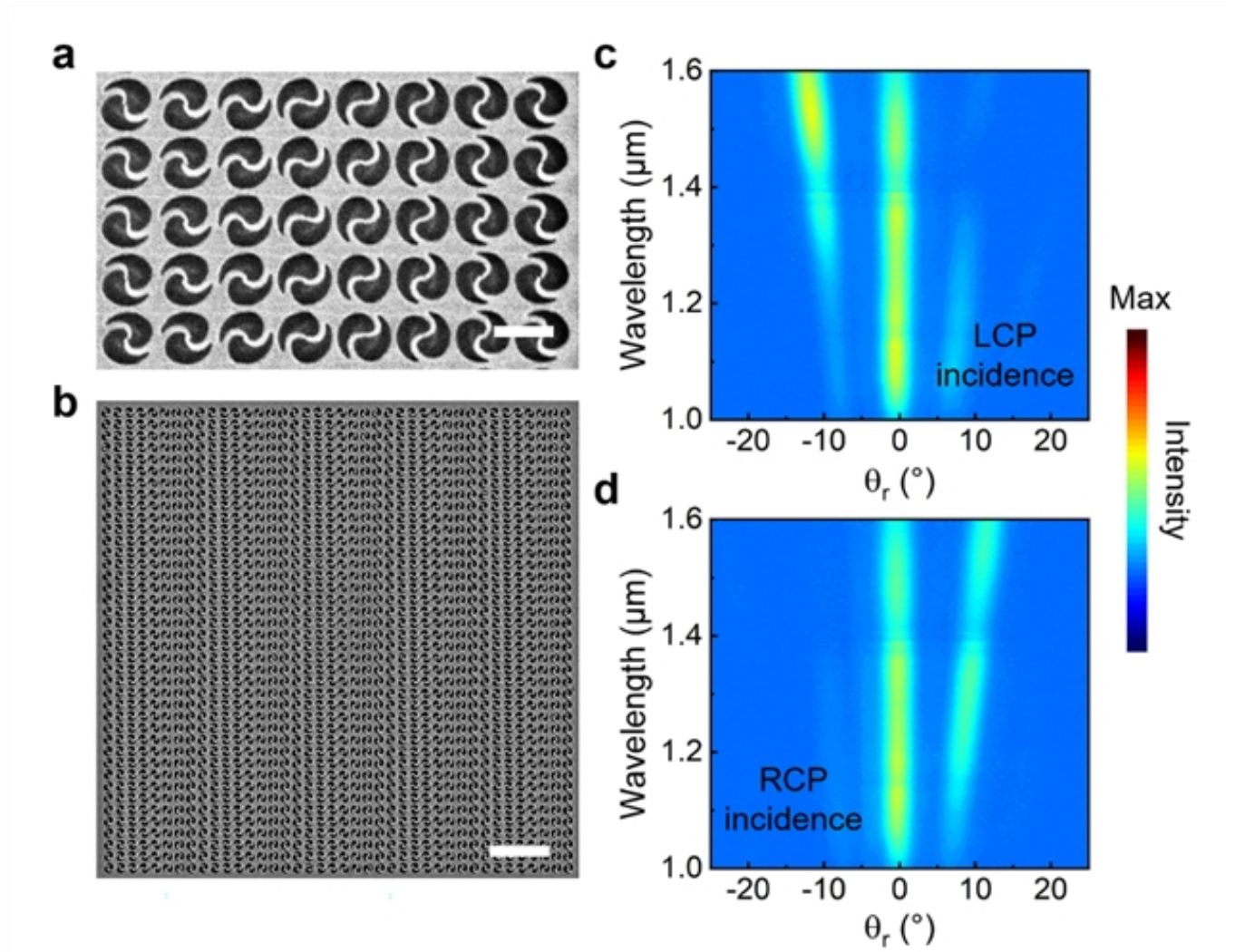


图5：Kissing-loop纳米剪纸结构的异常反射表征结果

总结与展望

本研究提出了一种新型kissing-loop纳米剪纸结构，并发现其在非对称传输和异常反射方面具有重要的应用前景。

与传统的二维和三维超表面相比，该结构引入了新的拓扑类型，可直接将纳米结构从二维开环形态转变为三维kissing-loop形态。

得益于结构的单向变形，该结构表现出明显的非对称传输。

这是纳米剪纸结构首次在实验上实现几何相位调制功能，并在近红外波段观测到宽带异常反射现象。

该方案实现了微纳结构小尺寸、大形变和复杂三维形貌的多重优异特征，有望在以下领域发挥重要作用：

空间光调制

光学传感

光学重构

微纳光电器件

微纳机器人（来源：先进制造微信公众号）

相关论文信息：<https://doi.org/10.37188/lam.2024.042>

作者：李家方等 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