quasi-BIC莫比乌斯关系实现可设计拓扑荷矢量激光

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：https://www.iikx.com/news/progress/41370.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！

quasi-BIC莫比乌斯关系实现可设计拓扑荷矢量激光。 导读

现代光学研究中，发展直接输出具有非平庸拓扑结构光场的微型激光器，对推动显微测量、精密检测、光学操控及光学通信等领域的发展具有重要意义。然而，要在单一、紧凑的光子器件中实现这类携带拓扑结构的激光，并对其拓扑属性进行按需设计，仍面临显著挑战。近日，复旦大学资剑教授、石磊教授和王佳俊助理教授研究团队提出了一种全新的拓扑光学微腔设计方法：基于光子晶体在对称性破缺调控下出现的 quasi-BIC莫比乌斯对应关系，将其作为复合光子晶体拓扑微腔构建的设计指南，创新性地在微腔结构与输出拓扑荷之间建立了一一对应的映射关系，实现拓扑荷可按需设计的微型矢量激光产生。相关研究成果以Vectorial Lasing with Designable Topological Charges based on M ö bius-like Correspondence in Quasi-BICs，为题发表于《Light: Science Applications》。

研究背景

光子器件的微型化与功能集成化是现代光子学研究的重要方向。作为集成光源的一类代表，微型拓扑荷激光近年来备受关注：若能由单一紧凑光子结构直接输出携带拓扑荷的激光，将有望显著拓展其在传感检测、光学通信等场景中的应用前景与工程可用性。然而，这一目标通常需要同时满足高品质因子腔模与非平庸辐射拓扑构型两项要求，因而实现难度较高。现有研究虽已初步实现在微纳结构中产生拓扑荷激光，但能产生的拓扑荷主要是低阶荷，并且可产生的拓扑荷与微腔结构之间往往缺乏清晰、可预测的对应关系，拓扑荷可设计性较弱。

对于光子晶体平板等周期性光子体系而言，其光子能带所对应的动量空间中可以内禀形成偏振涡旋，连续谱中束缚态（BIC）是涡旋中心的奇点，具有超高的品质因子，携带了整数阶的拓扑荷。在微型拓扑荷激光的实现机制探索中，BIC因兼具超高品质因子与动量空间偏振拓扑构型被发现在实现拓扑荷微型激光有独特的优势。通过BIC可以直接产生激光，激光可以携带对应BIC的拓扑荷结构。然而，BIC 的非平庸拓扑构型通常由实空间结构对称性所保护，这种保护在带来稳定性的同时也施加了根本约束——在给定对称性下仅允许特定的涡旋构型与拓扑荷取值，从而限制了 BIC 激光在拓扑荷上的可设计性。要实现对偏振拓扑构型的灵活调控，往往需要通过破坏结构对称性来放宽这些限制；但如何从对称性破缺后的 BIC 体系出发，进一步构造拓扑荷可预测、可按需设计拓扑荷的激光模式，目前仍缺乏清晰的实现机制。

研究亮点

针对上述挑战，研究团队创新性地提出了一种实现拓扑荷按需设计的微型拓扑激光产生机制。其

核心思路是利用光子晶体平板在对称性轻微破缺后形成的准连续谱中束缚态（quasi-BIC）：研究发现，该体系quasi-BIC的本征偏振模式可通过调节原胞内部的几何参数实现连续演化（图1b），并能够在对称性破缺参数连续变化过程中覆盖全部线偏振态。由此，光子晶体的实空间结构对称性破缺参数与动量空间的本征线偏振态之间表现出类 莫比乌斯拓扑特征，可用参数空间中的莫比乌斯带结构来刻画（图1c）：当实空间结构参数完成一次闭合演化时，quasi-BIC 的本征线偏振态会经历一次加倍的绕转。quasi-BIC 在轻微对称性破缺条件下仍保持较高的品质因子，使其具备直接用于主动光子体系（激光）的可行性。

基于光子晶体结构与quasi-BIC辐射偏振态之间的莫比乌斯对应关系，研究团队提出可以从目标矢量激光的拓扑荷出发，有目的地选择并排列支撑不同 quasi-BIC 偏振态的光子晶体平板，拼接构成复合拓扑微腔；由此得到的腔模的远场辐射分布可以呈现预期的偏振构型与拓扑荷，从而实现拓扑荷矢量激光（图1a）。因此，在该设计框架中，拓扑荷不再是结构确定后通过仿真反推的结果，而是可以作为设计输入，依据莫比乌斯对应关系进行正向构建并实现的设计目标。

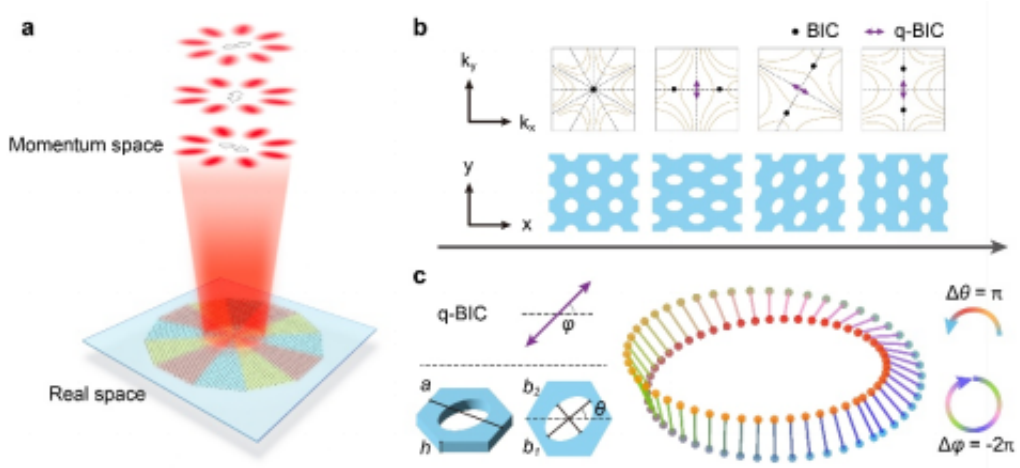


图1：(a) 基于复合拓扑微腔实现矢量激光的示意图；(b) 对称性破缺调控下的quasi-BIC本征偏振演化；(c) quasi-BIC的莫比乌斯对应关系示意图

研究团队给出了一套通用组装法则，使得不同拓扑荷的矢量激光模式都可以沿用一条普适的设计路径构造得到。对任意目标远场偏振涡旋构型，首先可沿角向将其分解为若干个重复的基本扇区：每个扇区贡献固定的偏振绕转（对应单位拓扑荷贡献），从而把想要的拓扑荷转化为需要重复几次的结构问题（图2a）。
随后，借助莫比乌斯对应关系，研究者将每个扇区内的目标偏振态序列逐一映射为实空间中的 quasi-BIC 光子晶体单元参数；在文中给出的最简示例中，仅需少量（至少三种）光子晶体单元即可实现所需的偏振演化，由此确定一个可复用的结构基本单元。
一旦基本单元确定，激光拓扑荷的设计就变得直观而可预测：将该单元沿角向重复 n 次即可得到对应拓扑荷的复合微腔；同时，通过改变组装方向即可切换拓扑荷符号——顺时针对应正拓扑荷，逆时针对应负拓扑荷。

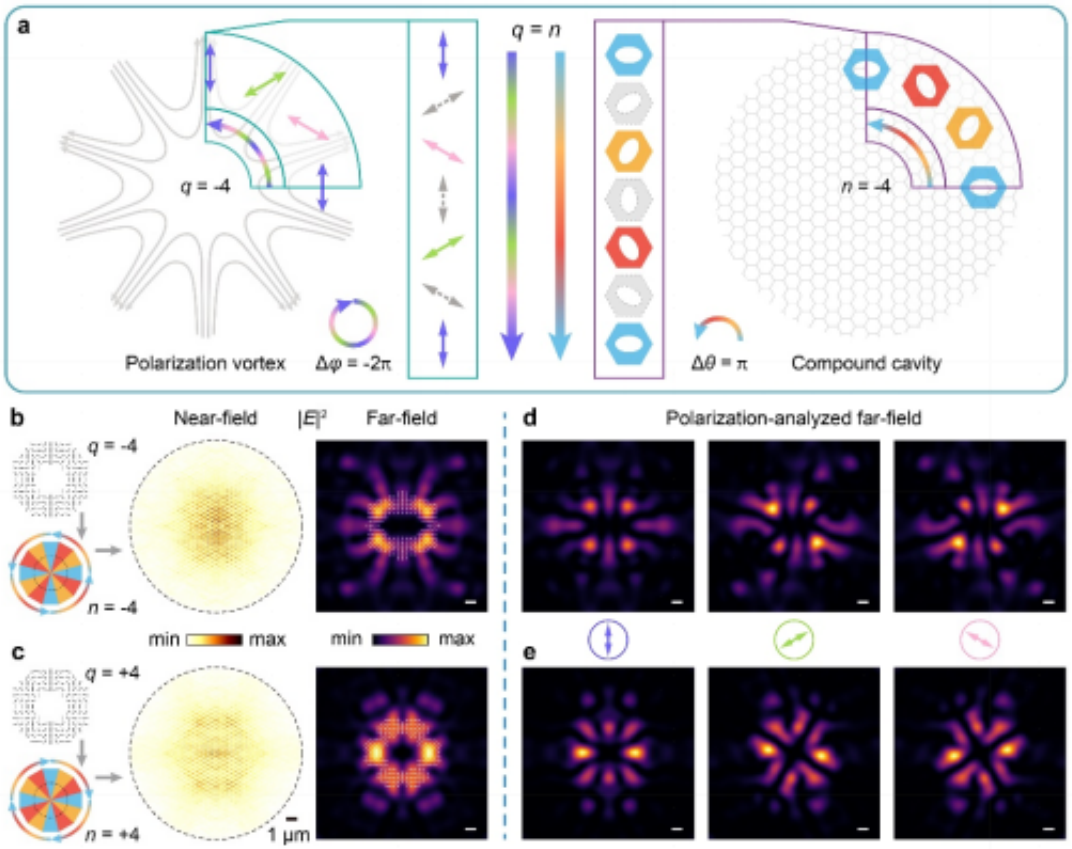


图2：(a) 基于quasi-BIC莫比乌斯对应关系的复合光子微腔构造方法；(b-e)
用于-4荷(b)与+4荷(c)的复合光子微腔构造，对应的矢量激光模式的近场和远场分布如右图所示

为验证这一设计框架，研究团队首先以 −4 与 +4 阶的拓扑荷为例（图2b-e），按照上述法则组装相应的 quasi-BIC 光子晶体构成复合微腔，并通过仿真模拟表征其腔模远场偏振分布，结果与预期的偏振涡旋构型一致；进一步在实验上制备对应结构并实现了携带相应拓扑荷的矢量激光输出（图3）。
基于同一组装法则，研究团队仅通过调整基本单元在角向的重复次数，即实现了从 −5 到 +5 阶的一系列拓扑荷矢量激光输出，验证了该方法在拓扑荷按需可编程方面的系统性能力（图4）。
需要强调的是，该拓扑荷激光并不是简单地由不同分块的光子晶体独立发射激光的组合，当不同的光子晶体分块按照特定组合拼在一起形成复合微腔之后，将会形成一个整体的微腔光学模式，使腔模的本征辐射场具有了设计的拓扑荷偏振构型。

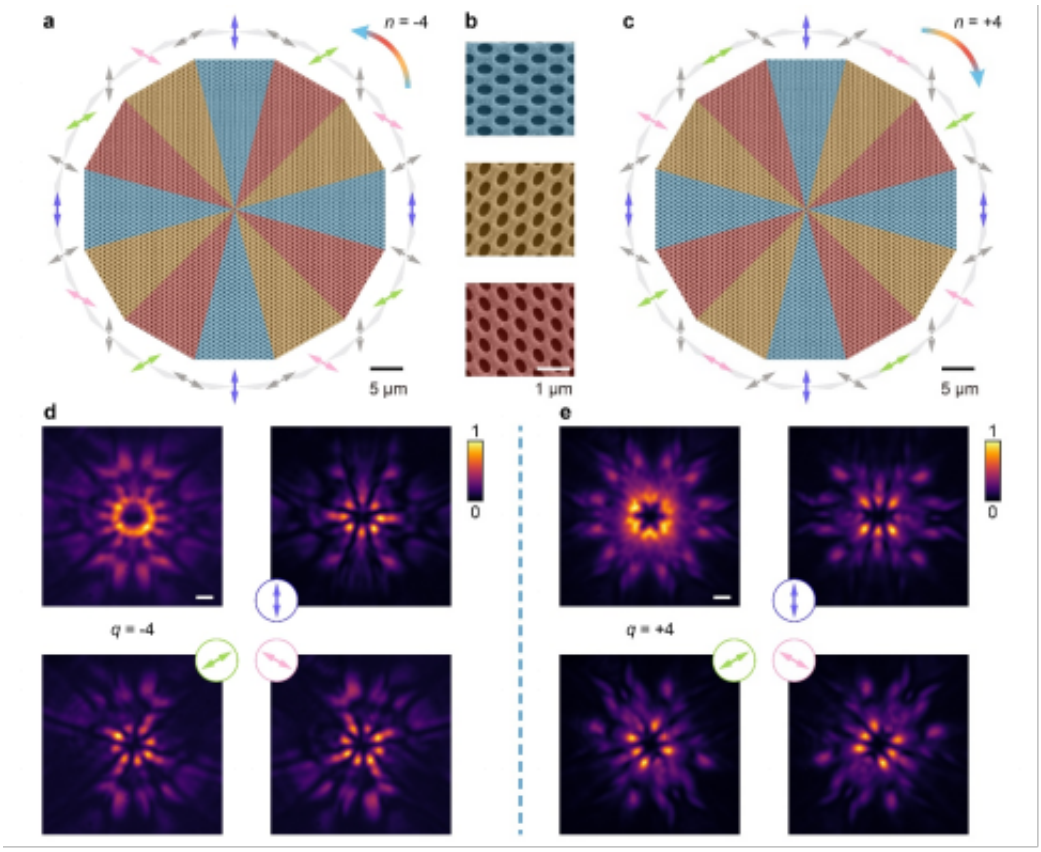


图3：(a-c) 用于产生-4荷(a)与+4荷(c)的复合光子微腔电镜图；（d-e）对应复合光子微腔产生的-4荷和+4荷的矢量激光结果

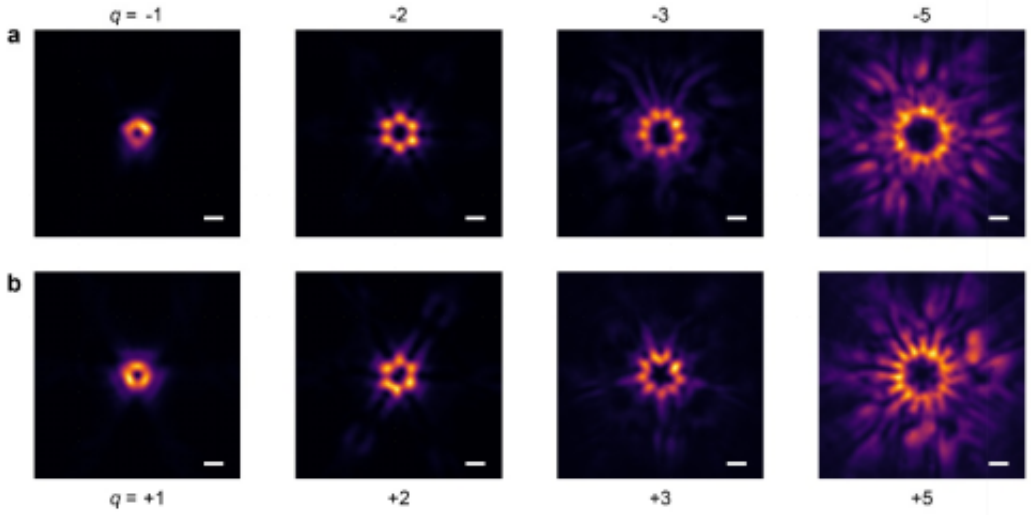


图4：基于目标拓扑荷设计复合光子微腔实现-5到+5阶拓扑荷的矢量激光

总结与展望

该研究聚焦微型激光拓扑荷范围受限这一瓶颈，提出并验证了一条可按需设计拓扑荷的路径：基于 quasi-BIC 的莫比乌斯对应关系，建立实空间结构参数与动量空间本征偏振态之间连续、可追踪的映射，并进一步提出了通用的复合微腔设计方法，使拓扑荷从仿真后验结果转变为设计前置

目标。在此框架下，研究团队实现了拓扑荷覆盖 −5 到 +5
的微型矢量激光输出，展示了同一设计范式对不同拓扑荷的通用设计能力。

未来该工作仍有若干值得进一步推进的方向。首先，将当前光学泵浦的验证推进到电泵浦注入模式，将是器件走向片上集成与实际应用的关键一步。其次，该方法所提供的偏振态可控性并不局限于偏振涡旋与拓扑荷输出，后续有望拓展到更丰富的拓扑结构光与更高维度的偏振拓扑纹理，进一步拓宽结构光的设计空间。同时，拓扑荷可按需设计的微型矢量激光为光源即功能的集成化方向提供了新的路线：一方面可与片上光子电路耦合，形成小型化、多功能的结构光源模块；另一方面在信息传输与传感探测等场景中，拓扑荷与偏振结构可作为额外的信息自由度，继续探索其在多维编码与高灵敏度探测等方面的特性，推动扩展拓扑结构光的应用。（来源：LightScience Applications微信公众号）

相关论文信息：https://doi.org/10.1038/s41377-026-02269-7

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：资剑等 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转发