

---

# 光操控的突破：揭示有限势垒束缚态的新研究

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/28319.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！*

**光操控的突破：揭示有限势垒束缚态的新研究。研究背景**

在光学和声学领域，探索波在不同介质中传播和局域一直是一个核心问题。特别是在光子学和声学领域，科学家们长期致力于理解和操控光与声波在周期性介质结构中的行为。光子晶体以其独特的带隙特性，为研究波的传播和局域提供了一个良好的平台。这些带隙是由晶体的周期性结构引起的，能够调控波的传播，甚至可以完全禁止特定频率范围内的波在晶体中传播。

在传统理解中，光子晶体中的边界模式被认为受到晶体尺寸（晶格数目）的强烈影响。一般认为，这些模式在大尺寸系统（晶格数目很多）中更容易被束缚住，因为隧穿几率随系统尺寸的增加而显著降低。这种现象的影响在设计和实现高性能的光子器件，尤其是追求高度集成和设备小型化中需要尤为注意。

与此同时，连续谱中的束缚态（BICs）是光子晶体研究中一个引人注目的概念，它揭示了即使在连续频谱中，某些特殊的模式也能被局限在特定区域内。这一现象为理解和操控光波的局域性提供了一个新的视角，并在实际应用中，如提高光学器件的性能和效率方面展示了巨大的潜力。

**研究创新**

该研究创新性地提出并证实了有限势垒的束缚态的存在。系统谱线通常由连续谱和离散谱组成（图1左侧）。传统观点认为，束缚态的特征值谱是离散的，而非束缚态形成连续谱。例如，在电子系统中，如果粒子能量低于无限远处的势能，该状态为束缚态，其能量谱是离散谱；而能量高于势能的粒子则被散射，形成连续谱。对于光和声波，由于障碍物施加的边界条件（如存在带隙），可形成离散态。这些离散态在理想情况下（即障碍物宽度无限大，图1-II）可以被完全局域。但当障碍物宽度有限时，存在一定几率使得态穿透障碍物成为共振态（图1-III）。如前所述，连续谱中的束缚态（BICs）是一种位于连续谱的能量/频率范围内但空间上完全局域的态（图1-I）。本研究提出了一个与BICs平行的反直觉概念：在非常薄的带隙材料中，某些态可以被完全束缚，从而无法穿透带隙材料。（图1-IV和图1-V）。

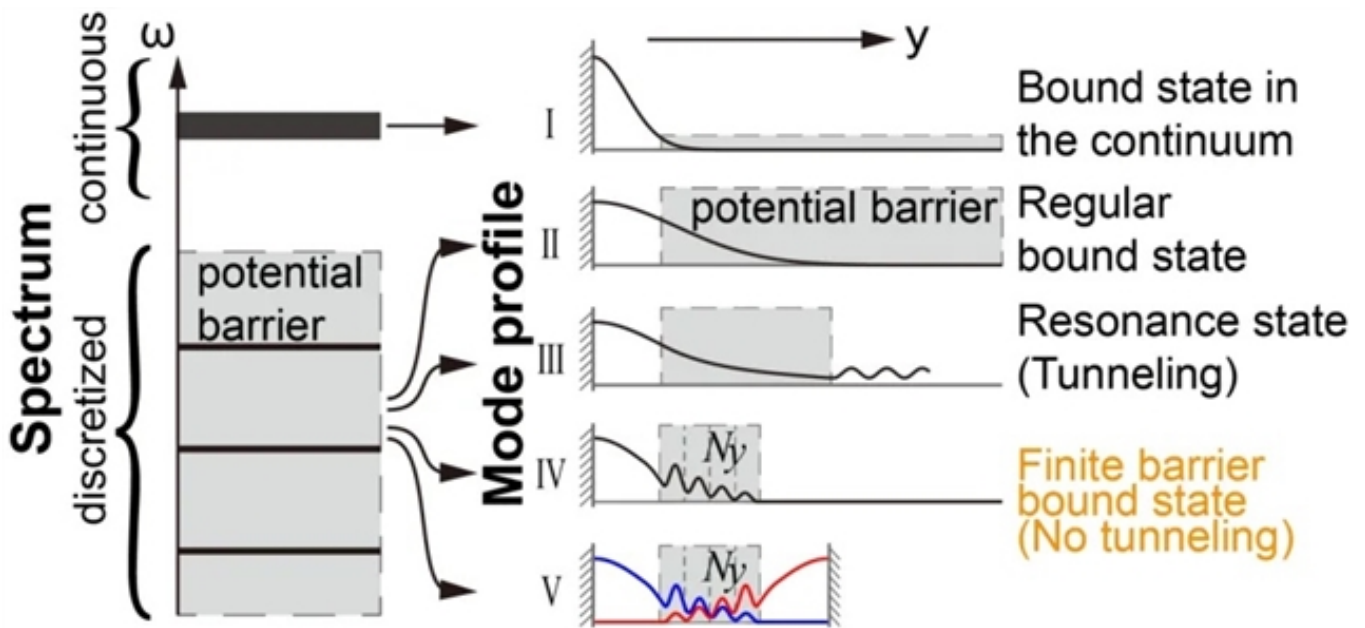


图1连续谱中的束缚态、常规的束缚态、共振态和有限势垒束缚态图示。反直觉地，如图IV和V所示，一种态完全被厚度有限（乃至非常小）的带隙材料所捕获。

该研究首先展示了一种特殊的镜面对称的光子晶体条带结构，其中边界模式的跃迁可以被精细调控。这一构型用两侧被理想电导体（PECs）截断的正方晶格光子晶体实现，并在微波频率下进行了实验验证。当光子晶体的宽度（ $y$ 方向的晶格数 $Ny$ ）较小时，位于两侧的边界模式会相互作用并劈裂成奇偶模式（图2）。在特定波矢（节点，这里两条边界能带相交）处，边界模式的耦合强度为零，即使光子晶体的宽度（ $Ny$ ）很小，边界模式也无法从光子晶体的一侧跳跃到另一侧（图3）。一般认为需要很多个晶格才能抑制边界模式的耦合，而该研究结果不仅挑战了传统观点，而且为微观尺度上光子行为的操纵开辟了新的思路。

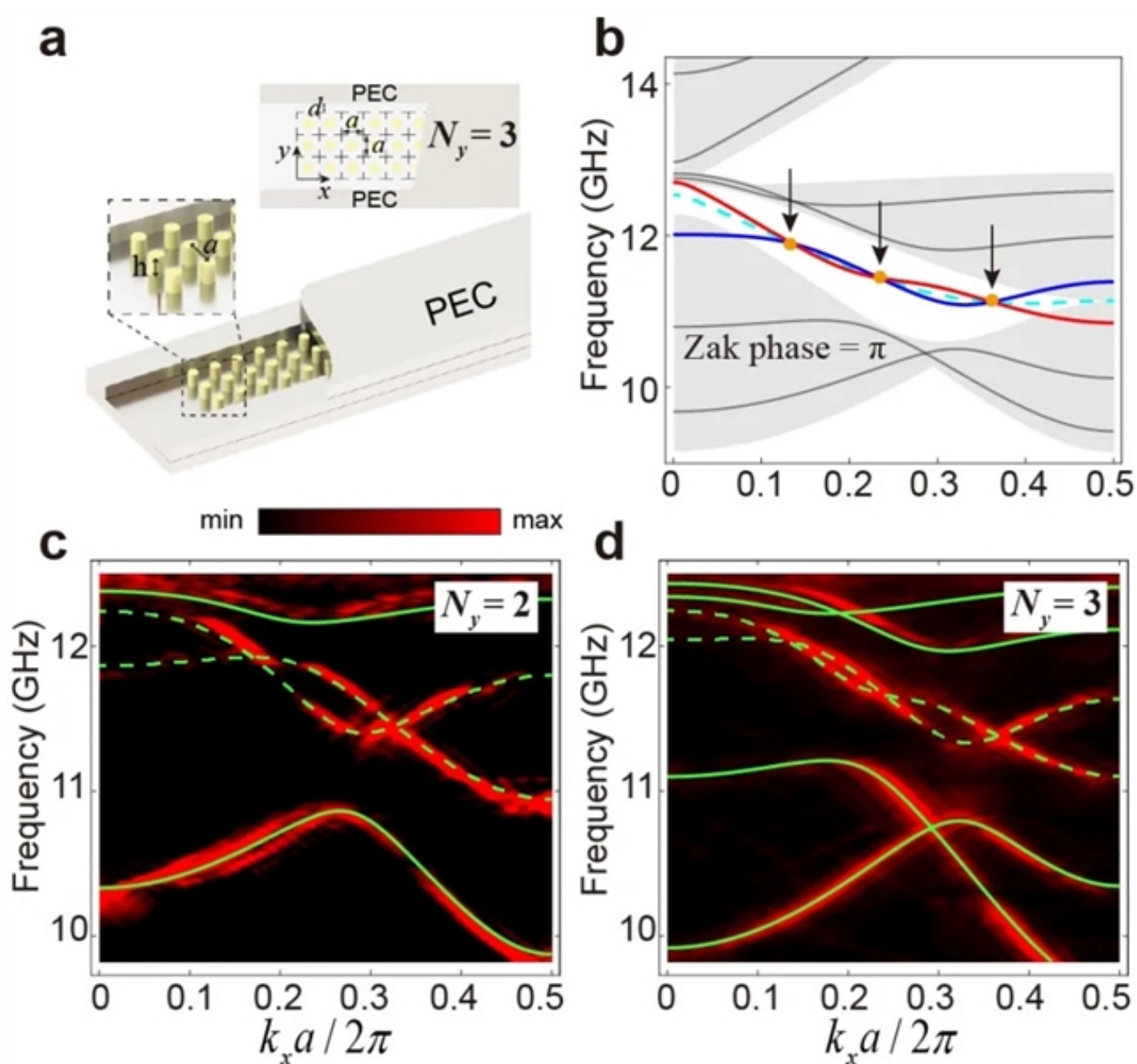


图2 第一种构型，光子晶体的条形几何结构，两侧被PEC截断。a,  $N_y=3$ 情况下的实验装置示意图。b,  $N_y=3$ 的能带结构（灰色背景是投影能带）。c-d,  $N_y=2,3$ 的测量(色码)和模拟

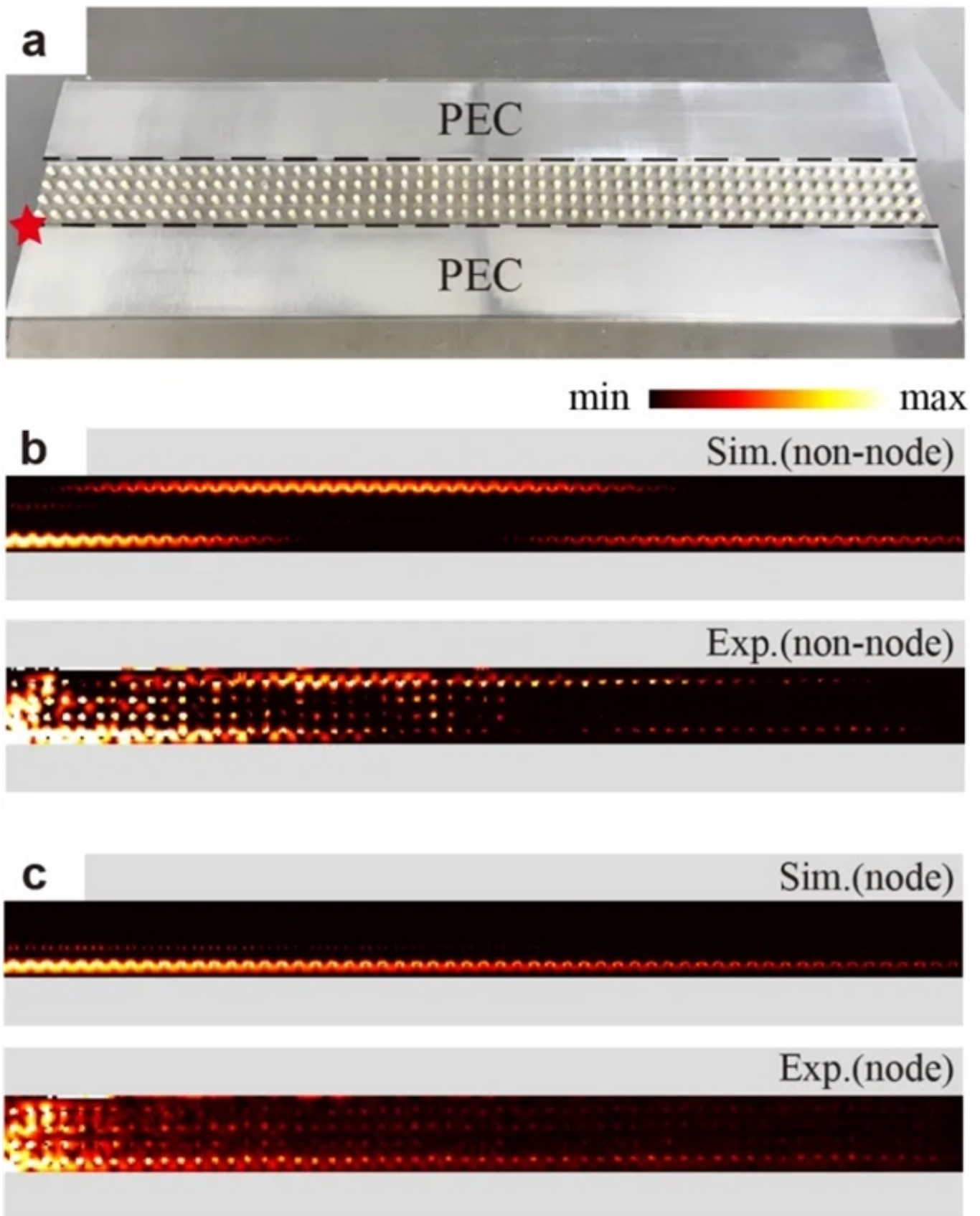


图3 第一种构型中 $N_y=4$ 时边界模式间的耦合。a, 实验样品的照片。b-c,  $N_y=4$ 在非节点频率和节点频率下的模拟电场分布和实验电场分布。

继而，通过移除光子晶体一侧的PEC边界，研究展示了另外一种新的构型。该研究发现，剩余的边界模式在特定节点波矢处被完全束缚，形成了有限势垒的连续谱中束缚态（FBICs）。这些FBICs的不辐射特性源于两个边界模式的零耦合特性。由于节点处边界态的耦合强度为零，在一侧PEC被移除后，在相应节点波矢处存在一个辐射系数为零的态，且频率与两侧PEC情况下的节点相同，即FBIC。此外，通过将圆形介质改为椭圆形以打破原有的镜面对称，并引入新的几何参数  $\eta$ ，定义了  $k_x$ - $k_y$  参数空间下的绕数，进一步揭示了FBICs的拓扑特征，证实了这些模式在特定波矢下的确是BICs（图4）。考虑到微波频率下不可避免的介质损耗，该研究通过测量边界模式的衰减对FBICs进行了实验验证（图5）。这一研究结果用极少数晶格（ $N_y=2, 3$ 等）实现了边界模式的完全局域，提供了一种实现BIC的新方式。

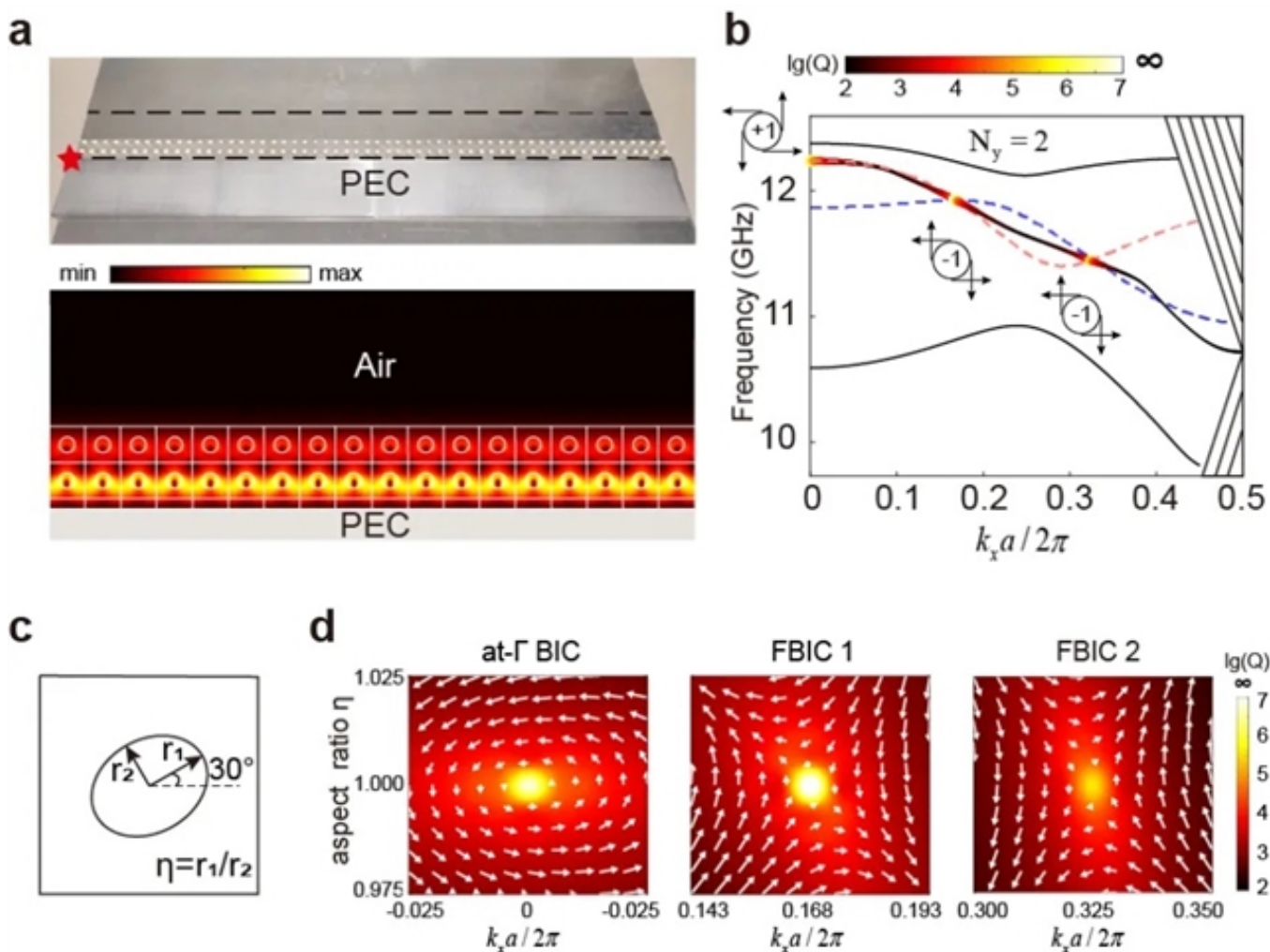


图4 第二种构型，其中一个PEC边界被空气取代。a,  $N_y=2$ 时样品照片和节点波矢处的本征场振幅分布。b,  $N_y=2$ 时的能带结构和相应边界模式的Q因子。c, 倾斜椭圆几何参数  $\eta$  的定义。d, At- $\Gamma$  BIC和FBICs的拓扑特征。

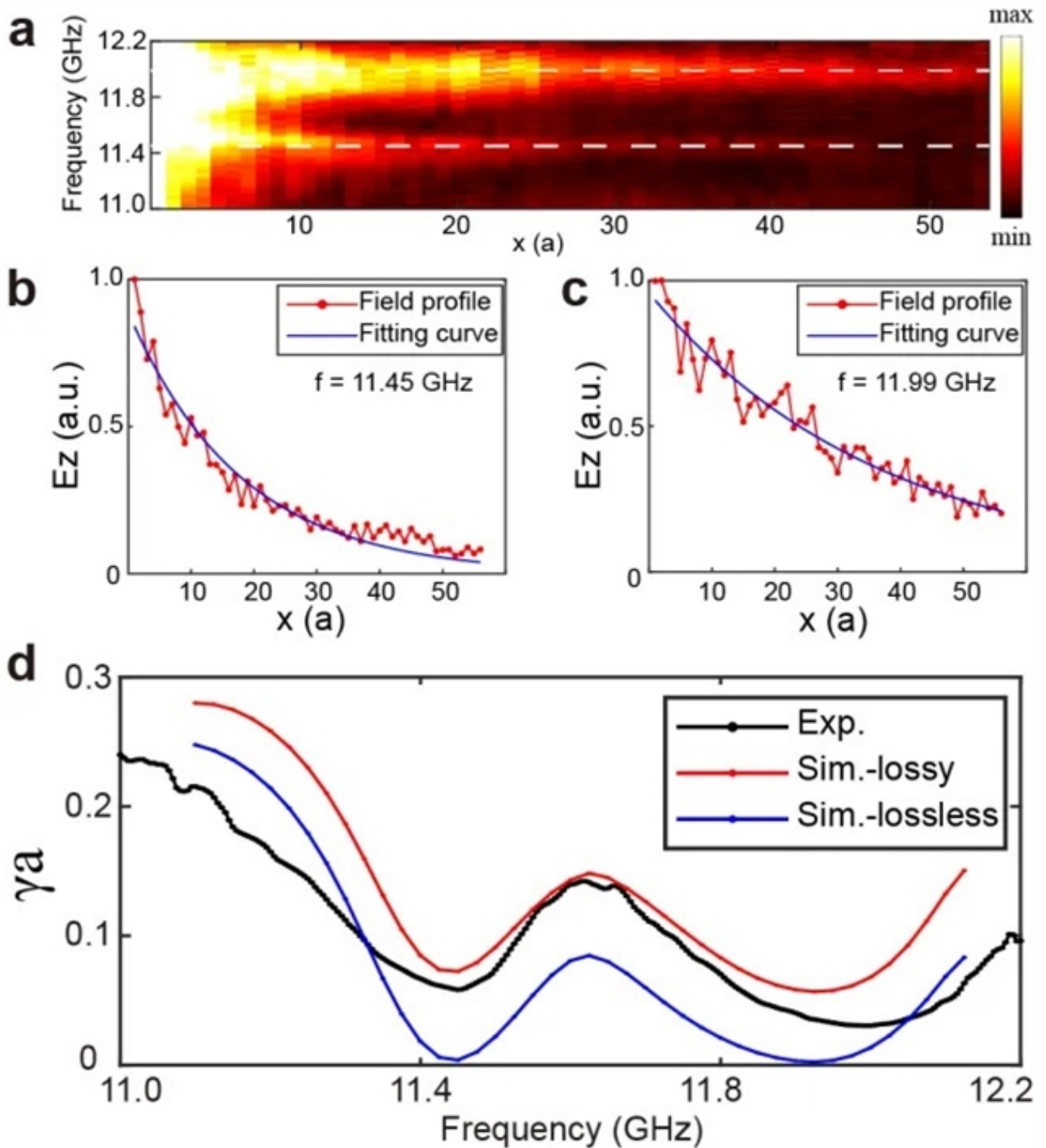


图5 第二种构型下边界模式的衰减特征。

### 总结与展望

这项开创性的研究探索了光子晶体中边界模式的新奇物理现象，并实现了边界模式的精细调控。这项工作不仅在理论上提供了对光子晶体边界模式隧穿和束缚的新理解，而且在微波实验上证实了特定波矢处边界模式的完全束缚，为光子学领域带来了新的视角。该研究揭示了操控光子行为的新方法，这对于开发高度集成的光子器件具有重要意义。该研究还为利用光子晶体增强光与物

---

质相互作用提供了新的策略，这可能会非线性光学以及光与二维材料相互作用等领域带来突破。此外，这些成果还可能启发未来的研究，比如将该原理应用于如声子晶体等的其他波动系统。

该研究成果以Finite barrier bound state为题在线发表在Light: Science Applications。该研究得到了国家自然科学基金委员会、香港研究资助局、裘槎基金会以及武汉市曙光计划、武汉大学小米青年学者项目的支持。

#### 扩展阅读

课题组也长期关注连续谱束缚态（BICs）的研究进展和实际应用，于2021年提出一种实现非点合并BIC的新机制<sup>1</sup>，在2022年继续在该方向深入，操纵高阶拓扑荷实现合并BIC，进一步提高了连续谱束缚态的鲁棒性<sup>2</sup>。这些工作在实现超高Q的光学腔以及增强非线性效应等方面具有极好的应用前景。课题组与香港科技大学陈子亭教授课题组于2023年合作撰写综述文章Applications of bound states in the continuum in photonics，总结探讨了BIC在激光、非线性光学、波导、传感和波前控制等领域的各种应用，并对BIC在宇称时间对称系统，高阶拓扑，激子-光子耦合和摩尔超晶格等几个新兴研究领域的影响提供了新颖的见解<sup>3</sup>。

1. Kang, M., Zhang, S., Xiao, M., Xu, H. Merging bound states in the continuum at off-high symmetry points. Phys. Rev. Lett. 126, 117402 (2021).

2. Kang, M., Mao, L., Zhang, S., Xiao, M., Xu, H., Chan, C.T. Merging bound states in the continuum by harnessing higher-order topological charges. Light Sci. Appl. 11, 228 (2022).

3. Kang, M., Liu, T., Chan, C., Xiao, M. Applications of bound states in the continuum in photonics. Nat. Rev. Phys. 5, 659-678 (2023). (来源：LightScienceApplications微信公众号)

相关论文信息：<https://doi.org/10.1038/s41377-024-01417-1>

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：肖孟等 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