
突破传统，实现精准可调的远距离光腔耦合

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/37339.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！

突破传统，实现精准可调的远距离光腔耦合。 导读

近日，哈尔滨工业大学宋清海和黄灿教授团队报道最新成果，利用光学BIC超表面实现了可控的长程光学微腔耦合。研究人员利用该结构实现了二维空间内任意排布的谐振腔之间的辐射耦合，突破了传统方法在耦合距离和可重构调节等方面的限制，有望为非厄密光子学、光子计算、量子多体网络等领域的研究带来新的实现途径。

该成果以 Dynamically Tunable Long-range Coupling Enabled by Bound State in the Continuum为题发表在光学顶级期刊《Light: Science Applications》上。哈尔滨工业大学（深圳）唐海军博士后和黄灿教授为本文的共同第一作者，宋清海和黄灿教授为本文的通讯作者。

图1. 基于连续域束缚态的可控长程耦合。

光学微腔各自为战的局限

将光子有效局域在光学微腔中是很多光学前沿技术的基础，如微型激光器、超灵敏传感器、新型非线性光学器件乃至未来光计算等前沿领域。过去数十年来，单个微型光学谐振腔的研究发展迅速，在经典与量子领域均已深入探索。人们实现了诸多高品质因数、小模式体积的光学微腔，并实现微腔光场和其内物质之间强的光-物质相互作用。与此同时，在实际应用中，人们往往不希望这些被囚禁在光学微腔中的光子仅仅各自为战，而是希望它们能够按照相互沟通、协同工作，从而构建出更复杂、更强大的光学系统。然而要让光学谐振腔之间产生相互作用，尤其是实现远距离、可精确调控的对话，一直是个棘手的难题。

亚波长耦合的天然限制

光子在高品质谐振腔内的强局域性虽能提升单个纳米光子器件的性能，却也将其耦合范围严格限制在亚波长尺度内。因此要实现不同光学谐振腔之间的耦合，往往只能通过将光学微腔靠近，通过泄露出来的倏逝波实现微腔耦合。或者设计微腔-波导等复合结构，利用波导等传输介质实现不同谐振腔之间的相互作用。然而波导等一维结构在平面拓扑结构设计上受到限制，并且微腔-波导的结构参数需要精确设计，严重限制了可重构与可扩展网络的实现，难以满足未来集成光子器件对复杂光场调控的需求。

BIC超表面开启长程耦合

来自哈尔滨工业大学（深圳）的研究团队通过设计特殊的光学微纳结构，利用结构中的一种特殊谐振状态，即连续域束缚态（BIC）实现了可控的长程耦合。研究人员利用该结构实现了二维空间内任意排布的谐振腔之间的耦合，突破了传统方法在耦合距离和可重构调节等方面的限制。所谓的连续域束缚态(BIC)是指在光学微纳结构中的一种特殊谐振模态，这种特殊态虽处于辐射连续谱中，却能保持局域特性。本研究中，研究人员发现，BIC超表面受到有限尺寸激光束激发时，理想BIC会退化为准BIC状态。处于谐振波长的电磁波在泵浦区域被放大并可产生激光辐射。与传统光子体系不同，准BIC微激光器的谐振腔由外部激发定义，可在超表面任意位置生成——这种特性既赋予系统灵活的可重构性，又因其工作波长仅由晶格尺寸决定而天然保持相同。同时BIC结构中光学模式群速度接近于0，使得这类驻波模式理论上传播至无限远。也就是说，BIC超表面被外界泵浦的区域可形成局部的高品质光学谐振腔，同时未泵浦区域又可作为特殊的光场传播媒介实现光场的远距离传输，从而打破了传统光学微腔之间的耦合范围与强度之间的制约，使得二维BIC超表面能构建复杂光学网络。

百倍波长耦合与时空调节

在本次研究中，研究团队在设计和制备BIC微纳结构时，使用了区别于传统的光子晶体加工工艺。他们使用了一种无刻蚀工艺流程，即底部的有源材料无需经历传统的刻蚀过程，使得材料的光学性能未经历损伤，光学微纳结构由薄膜表面的光刻胶曝光显影后形成。通过这种复合设计使得光学模场在结构中传播时的散射损耗大幅降低，实验中研究团队中观察到准BIC谐振腔之间的耦合距离从传统的亚波长范围扩展到了百倍波长距离，大幅突破了光腔之间的耦合距离。如图2所示，他们发现两个准BIC谐振腔在距离60倍波长情况下，耦合的双腔系统仍可展现出传统耦合光学腔中的PT对称现象。

图2. BIC超表面中的长程耦合PT对称现象。

同时利用BIC超表面的平面扩展性，研究人员展示了多光束泵浦情况下的二维平面多腔耦合。作者还通过调节泵浦光束之间的时间延迟，在时间维度上对光腔耦合进行控制。在此基础上，作者演示了基于多体耦合微腔场景中的非厄密零能模式激光产生。

总结与展望

该研究表明，BIC超表面中的长程辐射耦合显著提高了光子网络的连接能力，为未来的光子计算和量子信息处理提供了重要技术支持。团队计划在未来工作中结合拓扑光子学和其他前沿技术，进一步拓展BIC超表面的应用范围，为更复杂的光子网络和量子系统提供助力。

项目支持

本研究获得了国家科技部重点研发计划、国家自然科学基金、广东省基础与应用基础研究基金、深圳市基础研究项目、广东省量子科学战略专项、深圳市科技计划项目、以及中央高校基本科研业务费专项资金项目的资助。（来源：LightScienceApplications微信公众号）

相关论文信息：<https://doi.org/10.1038/s41377-025-01975-y>

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：宋清海等 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