
双层非局域平面光学

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/41366.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！

导读

传统光学元件依赖透镜、棱镜和反射镜等体材料结构来操控光的传播方向、相位和偏振。近年来，平面光学通过亚波长厚度的纳米结构大幅压缩了光学元件的体积，为片上光学、增强现实、光通信和量子光源等应用提供了新的技术路线。然而，单层平面光学器件的功能通常由预先设计好的面内几何结构决定，一旦加工完成，其光学响应往往难以继续调控。

近日，麻省理工学院唐皓凝教授、斯坦福大学范汕洄院士、加州大学伯克利分校姚杰教授、法国里昂中央理工学院Hai Son Nguyen教授、哈佛大学Eric Mazur院士及加州大学伯克利分校曹原教授等，在eLight（影响因子31.4，入选两期卓越计划）发表题为Bilayer Nonlocal Flat Optics的综述论文。

该综述系统梳理了双层及多层非局域平面光学的最新进展，指出通过引入层间距离、横向平移、扭转角和晶格失配等层间自由度，可以在不显著增加器件厚度的前提下，实现对光学共振、辐射通道、拓扑奇点、手性响应、涡旋光束和非线性发光的多维调控。该方向有望为可重构平面光学、片上光束控制、手性光学、非线性光源和量子光子器件提供通用设计框架。

平面光学的核心目标是利用超薄纳米结构替代传统体光学元件，实现对光的紧凑操控。其中，非局域平面光学是一类重要平台，包括光子晶体薄膜、导模共振介质超表面和等离激元晶格等。这类结构不同于由孤立超构原子组成的局域超表面，其光学响应来自跨越多个周期的集体布洛赫模式，因此能够产生尖锐的光谱选择性、强色散调控和复杂的辐射控制。

然而，单层非局域平面光学仍然面临自由度不足的问题。在单层结构中，主要设计参数通常局限于单元几何、晶格对称性和薄膜厚度。许多关键性能，例如高品质因子共振、可编程辐射方向、偏振选择性、手性响应和动态可调性，往往受到同一组对称性选择定则和辐射通道的共同限制，难以同时优化。

双层非局域平面光学为突破这一瓶颈提供了新的思路。通过将两层平面光学结构耦合到同一个电磁环境中，研究人员可以引入独立于单层面内图案的新自由度，包括层间距离、横向平移、整体扭转、局域扭转以及晶格失配等。这些自由度能够重新组织近场模式杂化、远场辐射干涉和动量选择规则，从而产生单层结构难以实现的新功能。

本文首先提出了一个统一的物理图像：双层和多层非局域平面光学功能可以归结为三类核心机制，即近场模式杂化、远场辐射干涉以及动量选择与混合。近场杂化决定双层共振模式的频率分

裂和能带重整化；远场辐射干涉控制共振线宽、辐射方向以及连续谱束缚态；动量选择与混合则决定不同层中的模式如何通过晶格失配或扭转角发生耦合。这一框架将看似分散的双层光子晶体、导模共振超表面、等离激元晶格和非线性多层结构统一到同一个设计逻辑中。

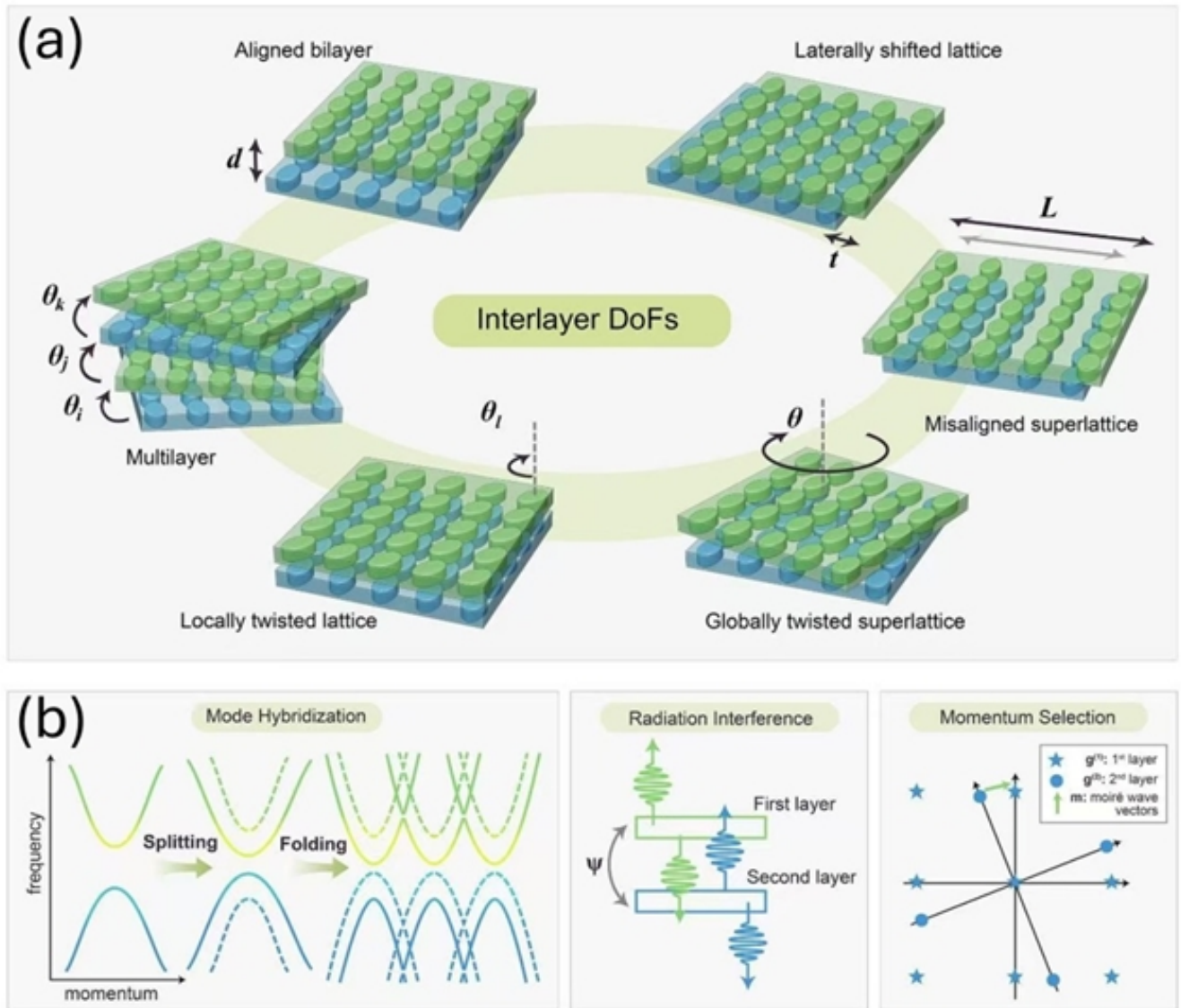


图1：双层及多层非局域平面光学中的层间自由度和三类核心物理机制。层间距离、横向平移、晶格失配、整体扭转、局域扭转和多层堆叠共同构成可重构平面光学的新设计空间；近场模式杂化、远场辐射干涉以及动量选择与混合则分别对应模式、辐射和动量通道的调控机制

在对齐双层结构中，层间距离是最基本的调控旋钮。两层相同的光子晶体薄膜相互耦合后，会形成对称和反对称超模。层间距离一方面控制近场耦合强度，从而改变模式分裂和能带位置；另一方面引入辐射相位延迟，使两层向同一辐射连续谱发出的光发生相长或相消干涉。这使双层结构能够在不改变面内图案的情况下实现高品质因子共振、Fano 滤波、空间光调制和增强光与物质相互作用等功能。特别地，综述区分了两类高品质因子路线：一种是由对称性保护的连续谱束缚态，另一种是由层间辐射干涉产生的 Fabry – P é rot 型连续谱束缚态。前者对层间距离相对鲁棒，后者则对层间相位高度敏感，因此既可以用于稳定的高 Q

共振，也可以用于高灵敏调制和传感。

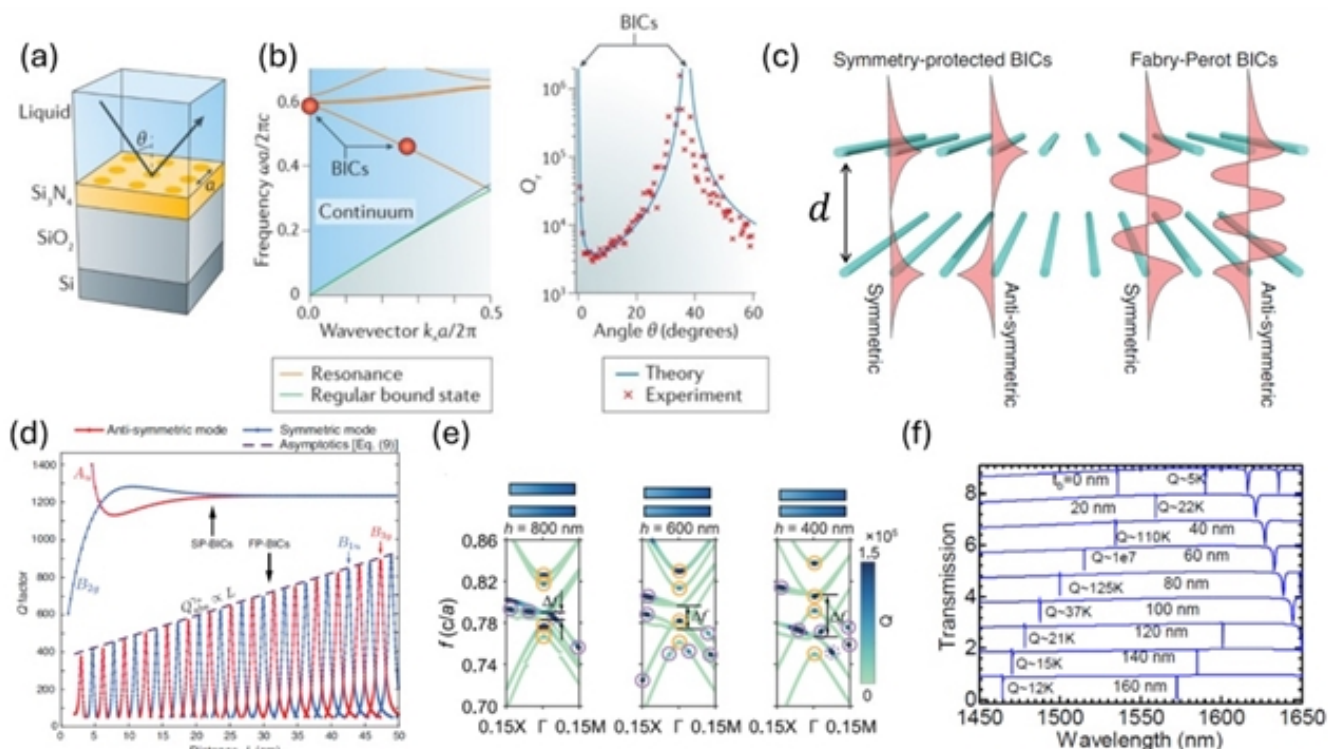


图2：对齐双层平面光学中的导模共振、连续谱束缚态和高 Q 模式。层间距离同时调控近场杂化和远场辐射干涉，使双层结构能够在不改变面内几何图案的情况下调节共振频率、模式线宽和辐射泄漏

进一步地，当两层结构发生横向平移时，系统在保持周期性的同时打破部分镜面对称性，从而打开新的辐射通道。横向平移可以将原本位于 Γ 点的对称性保护连续谱束缚态转化为可调准连续谱束缚态，并驱动偏振奇点在动量空间中移动。当上下辐射通道不再等价时，结构还可以产生单向导模共振，使光优先向一个半空间辐射。这种滑移自由度可以被视为一个合成维度，将连续谱束缚态、单向辐射和时空光学涡旋统一到非厄米能带拓扑的框架中，为 MEMS 可重构平面光学提供了直接的器件基础。

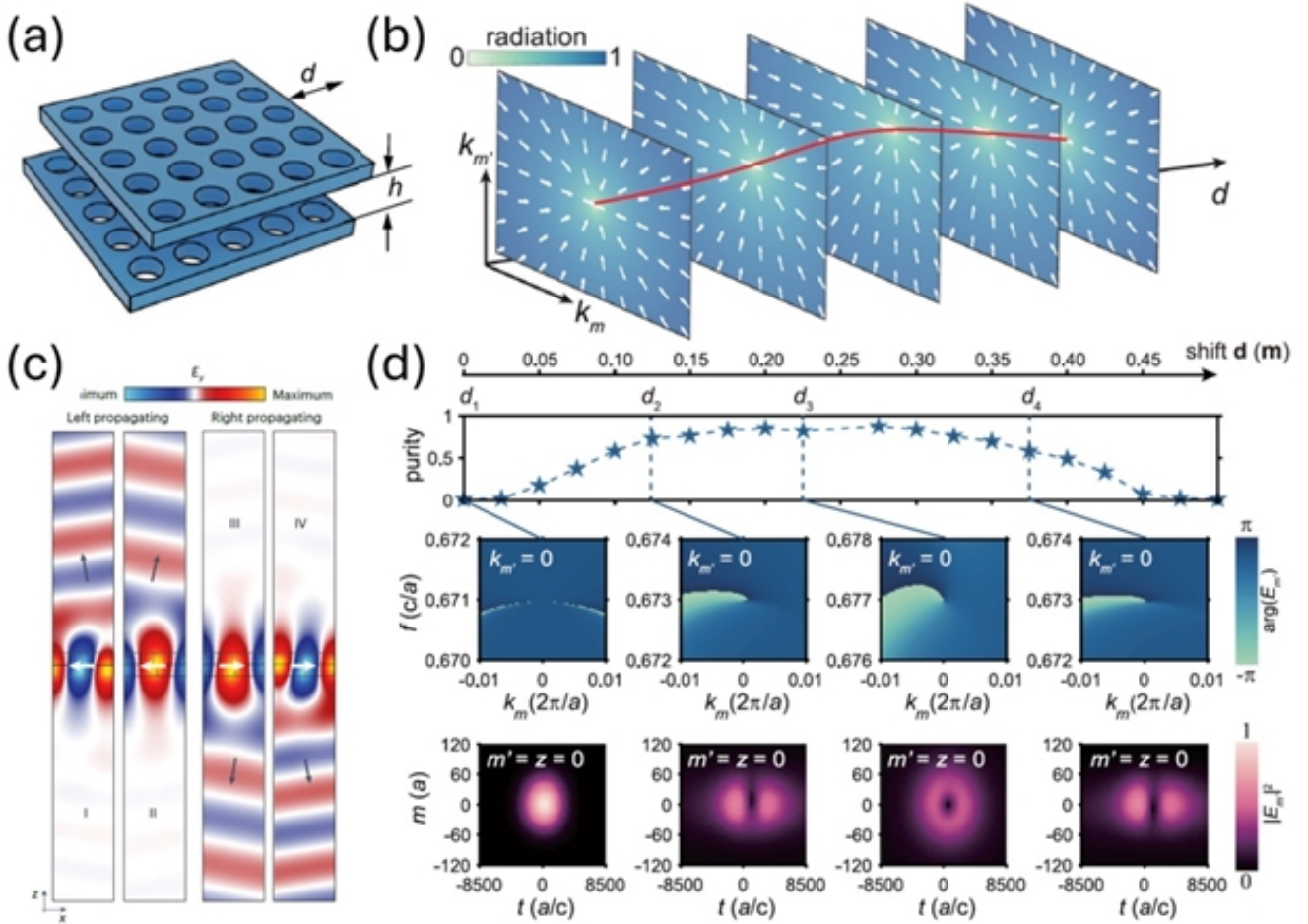


图3：横向平移双层光子晶体中的辐射拓扑调控。平移自由度可连续调节偏振奇点、准连续谱束缚态、单向辐射和时空光学涡旋，说明双层结构不仅能够调控共振频率，也能够调控光向哪个方向辐射以及以何种相位结构辐射

晶格失配和整体扭转则进一步引入 moiré

超晶格。晶格失配使两层之间的耦合强度在一个长周期超胞内缓慢变化，形成 moiré 迷你能带和局域化光学模式。其结果不仅是能带折叠，更重要的是出现空间调制的层间杂化景观，使光场可以在 moiré 周期尺度上被局域，同时通过辐射干涉保持较低的垂直泄漏。这种机制为无缺陷光学腔、高态密度平台、慢光增强和非线性增强提供了新的实现途径。

整体扭转则更加深刻地改变了动量空间结构。扭转角旋转两层的倒格矢，使原本简单的单晶格散射问题转化为多通道 moiré 散射问题。改变扭转角不仅可以移动共振频率，还可以重新定义可用的动量转移通道，从而同时调控共振位置、辐射泄漏和远场相位结构。基于这一机制，双层扭转平面光学可以实现扭转可调共振、moiré

准连续谱束缚态、光学涡旋、光束偏转、手性发光以及自旋—轨道角动量转换等功能。

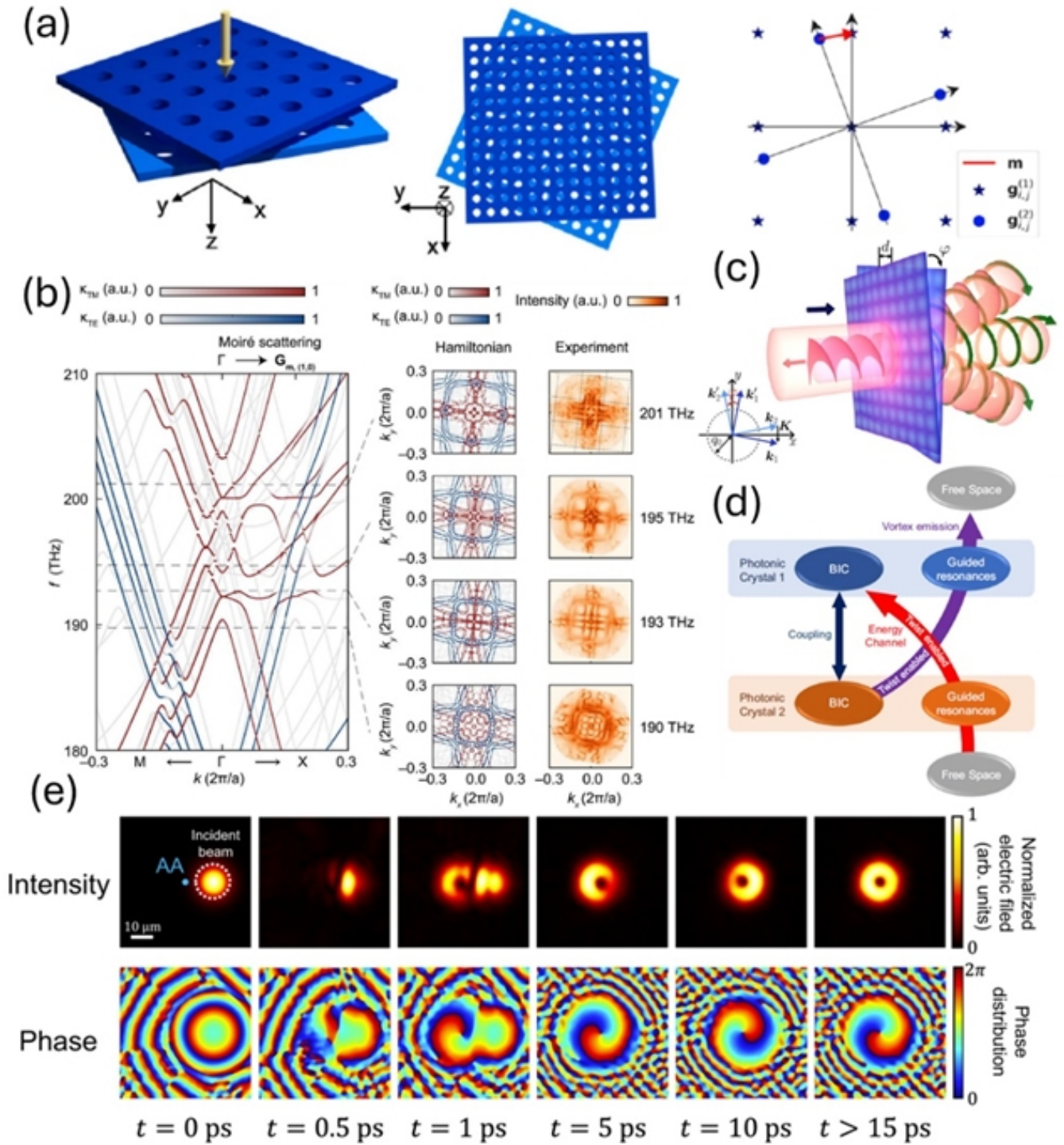


图4：扭转双层平面光学中的 moiré 散射、辐射通道调控和光束整形。扭转角改变两层之间的倒空间动量匹配关系，使器件能够在不重新设计单层图案的情况下调节共振、泄漏、手性和出射方向。这里建议选择论文中最有视觉冲击力的 moiré /twist 代表图，例如包含扭转可调共振、光学涡旋或 beam steering 的图，而不是只放纯能带图

除整体扭转外，局域扭转也是实现紧凑手性光学的重要路径。在局域扭转结构中，周期性晶格本身可以保持不变，但单元内部的上下层谐振子发生相对旋转，从而形成真正三维的手性单元。该结构能够在不依赖大尺寸 moiré 超胞的情况下实现强光学活性、圆二色性和偏振选择性。当局

域扭转与连续谱束缚态或准连续谱束缚态结合时，还可以同时获得高品质因子和强手性响应，并实现覆盖庞加莱球的任意偏振态设计。

该综述还将讨论扩展到多层平面光学。相比双层结构，多层堆叠不再只是两个模式之间的耦合问题，而是一个垂直耦合谐振网络。每增加一层，系统就增加新的超模、辐射路径和相位延迟。因此，多层结构能够实现更宽的光谱响应、级联手性、非线性相位匹配、可编程非线性极化张量以及更复杂的 moiré 平带耦合。特别是在非线性光学中，每一层都可以作为一个相干非线性光源，层间距离和扭转角可以逐层调控相位、偏振和方向性，从而实现可编程的非线性发光。

总结与展望

本综述系统总结了双层和多层非局域平面光学的基本物理、代表性结构和未来应用方向。通过引入层间距离、横向平移、扭转角和晶格失配等自由度，双层及多层平面光学能够将单层器件中受限的面内设计扩展为高维层间设计空间。其核心意义在于，双层结构并不是单层超表面的简单叠加，而是一个由干涉、对称性、杂化和动量选择共同决定的耦合层网络。

展望未来，双层和多层非局域平面光学的发展将依赖于高精度纳米加工、异质集成、层间对准和动态调控技术的进步。MEMS/NEMS 等可重构技术有望实现对层间间距、扭转角和平移量的原位控制，使平面光学器件从加工后固定走向实时可编程。与此同时，高品质因子共振和 moiré 平带等效应对层间间距不均匀、倾斜、扭转误差和材料损耗非常敏感，因此未来仍需要发展更可靠的制备、反馈控制和标准化表征方法。

总体而言，双层和多层非局域平面光学为可重构光学、片上光束偏转、手性传感、增强非线性、量子发光和智能光子系统提供了一个新的通用平台。它将平面光学从二维图案设计推进到三维层间耦合设计，有望成为下一代可编程光学器件的重要基础。（来源：中国光学微信公众号）

相关论文信息：<https://doi.org/10.1186/s43593-026-00135-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：唐皓凝等 来源：eLight

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