

二维钙钛矿微腔中的非对称拓扑光子态研究

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/36300.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！

二维钙钛矿微腔中的非对称拓扑光子态研究。 导读

近日，来自西湖大学的Pavlos G. Savvidis团队及合作者首次在室温下实现了各向异性二维钙钛矿微腔中的非对称拓扑光子态，通过自组装晶体与分布式布拉格反射镜（DBR）微腔的集成，观测到由Rashba-Dresselhaus（RD）自旋轨道耦合诱导的非零Berry曲率和非平庸拓扑点（如锥形奇点）。研究量化了Rabi分裂（64–97 meV）、Berry曲率发散值（ $\pm \infty$ ）等关键参数，为室温拓扑光子器件提供了新平台。

该研究成果以Unveiling Asymmetric Topological Photonic States in Anisotropic 2D Perovskite Microcavities为题发表在国际顶尖学术期刊《Light: Science Applications》上。论文通讯作者为Pavlos G. Savvidis，论文第一作者为Emmanouil G. Mavrotsoukakis。

研究背景

拓扑光子学需在室温下实现非平庸拓扑态（如非零Berry曲率），但传统材料（如GaAs）受限于低激子结合能（ <50 meV）和弱光学各向异性（ $\Delta n < 0.1$ ），难以同时满足强光-物质耦合与自旋轨道调控。二维钙钛矿材料（如 $(\text{BA})_2(\text{MA})_2\text{Pb}_3\text{I}_{10}$ ）因其高激子结合能（ >200 meV）和强双折射（ $\Delta n \approx 0.5$ ）成为理想载体，可在室温下维持强耦合（Rabi分裂 >60 meV）。

RD自旋轨道耦合是一种在凝聚态物理和光子学中描述动量依赖的自旋-轨道相互作用的机制。其核心由两种效应构成：1、Rashba效应源于结构反演对称性破缺（如异质结界面电场），导致电子自旋与动量方向垂直耦合，形成螺旋自旋纹理。2、Dresselhaus效应由晶体自身反演不对称性（如闪锌矿结构）引起，使自旋与动量的耦合方向取决于晶格取向。

在光子系统中（如钙钛矿微腔），RD耦合通过光学各向异性模拟：微腔中TE-TM模式分裂（偏振依赖的边界条件）和晶体双折射（ $\Delta n \approx 0.5$ ）共同作用，生成类似RD的哈密顿量。这导致光子赝自旋（偏振态）与动量耦合，诱导非平庸拓扑特性。通过自组装工艺将各向异性晶体嵌入DBR微腔，晶体三维取向（ θ, φ, ψ ）可调控RD自旋轨道耦合，诱导光子模式反交叉、非零Berry曲率及锥形奇点（Diabolical Points），为拓扑光子器件提供无需外场调控的新平台。

研究内容和结果

图1展示了微腔的制备流程及钙钛矿晶体的核心特性。图1a描述了微腔的制备方法：将过饱和钙钛矿前驱体溶液（成分为(BA)₂(MA)₂Pb₃I₁₀）滴注于加热至80 °C的分布式布拉格反射镜（DBR）之间，通过磁压成型形成厚度为4–6 μm的腔体。冷却后，钙钛矿晶体在腔内自发生长并随机取向（图1b），其三维方向由欧拉角（ θ, φ, ψ ）定义。晶体的层状结构（图1b插图中x_p-y_p平面折射率 $n_o \approx 2.4$ ，堆叠方向折射率 $n_e \approx 2.9$ ）赋予其强双折射特性（ $\Delta n \approx 0.5$ ）。图1c的扫描电镜图像显示晶体横向尺寸为4–100 μm。图1d通过光致发光（PL）光谱证明：随着无机层数 n 增加（1至6层），激子发射峰从2.36 eV红移至1.69 eV。图1e聚焦 $n=3$ 化合物，其PL发射峰位于2.0 eV，半高宽90 meV，为强光-物质耦合提供基础。

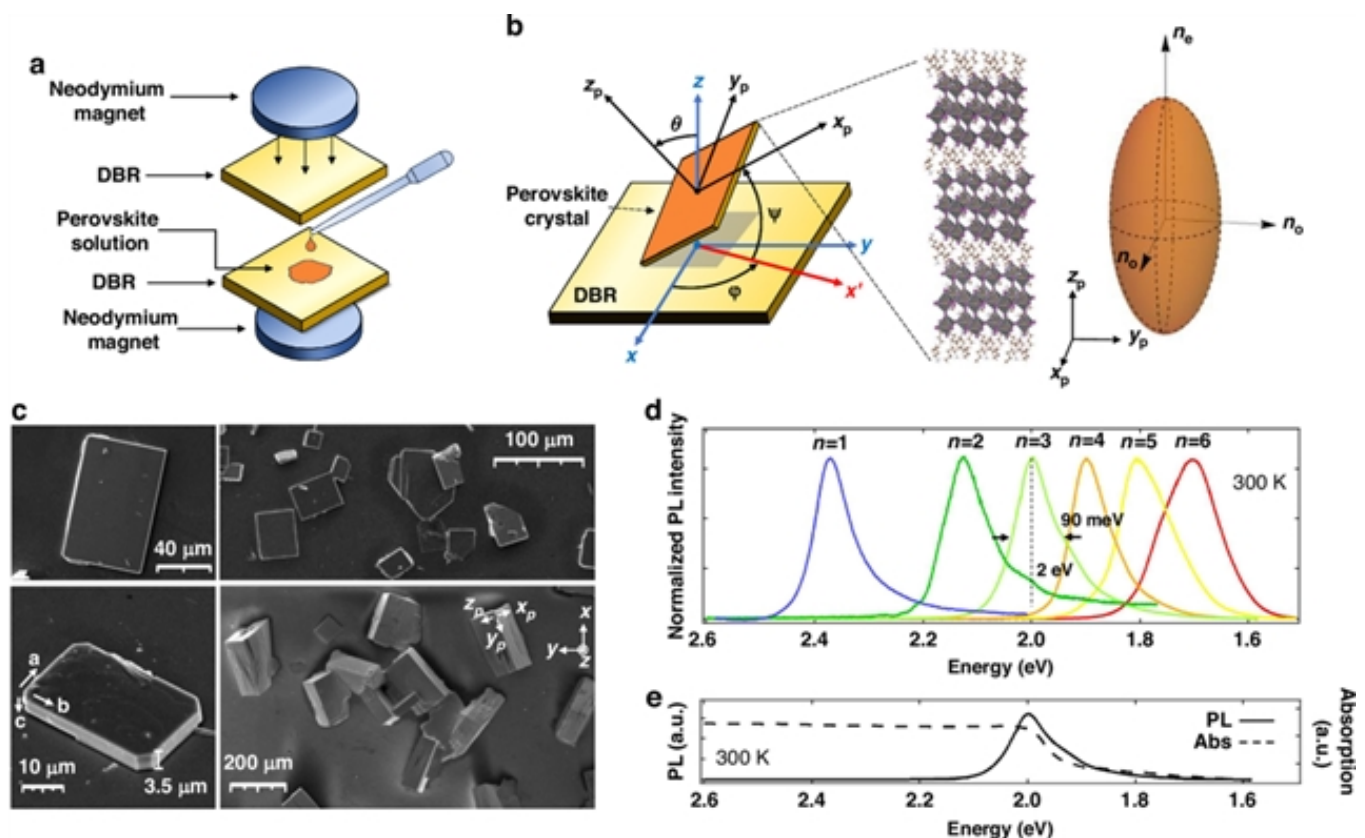


图1. 微腔结构与钙钛矿晶体特性

图2揭示了微腔中光子模式的相互作用机制。图2a示意了微腔支持的光子模式。图2b显示，因晶体各向异性，TE-TM分裂（偏振依赖边界条件）和XY分裂（双折射导致）共同作用，使不同偏振模式能级分离（量子数 $q=1-5$ ）。图2c的理论模拟表明：沿 k_y 轴（ $k_x=0$ ）时模式无耦合；沿 k_x 轴（ $k_y=0$ ）时则出现显著反交叉（能隙 ≈ 20 meV），这是RD自旋轨道耦合的典型表现。实验验证见图2d：室温角分辨PL光谱观测到多个反交叉点。通过有效哈密顿量拟合（图2e）和传输矩阵模拟（图2f），确定该点晶体取向为 $\theta = 15^\circ$ 、 $\varphi = 27^\circ$ 、 $\psi = 5^\circ$ ，参数 $a_x = -4.006$ meV · μm、 $a_y = 2.039$ meV · μm，证明RD耦合强度可调。

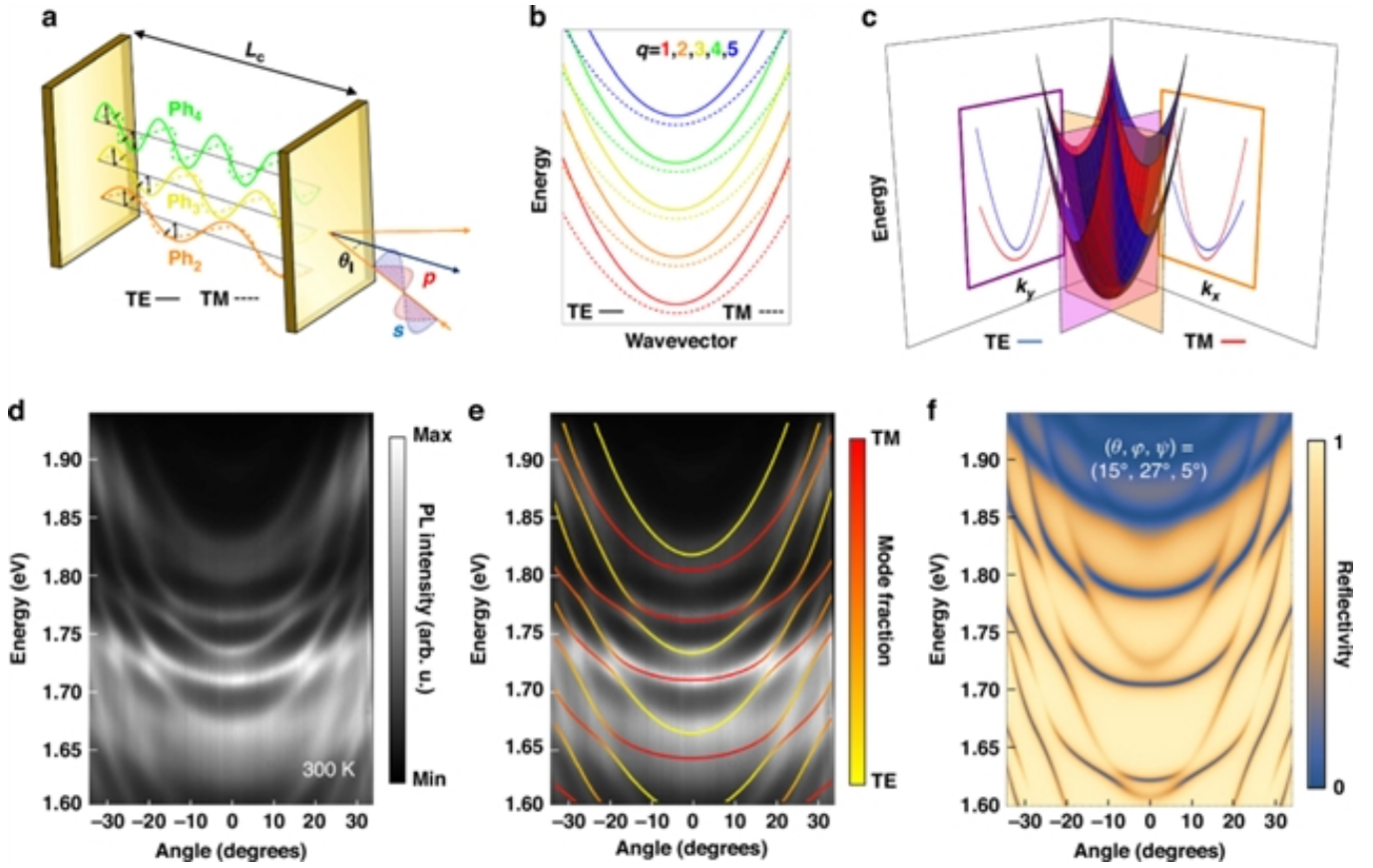


图2. 光子模式耦合与RD效应

图3研究了激子-光子强耦合与RD效应的共存关系。图3a-c展示三个不同取向晶体的角分辨PL光谱：水平晶体（ $\theta=0^\circ$ ）：仅观测到强耦合导致的激子-光子反交叉，Rabi分裂达97 meV（图3d）；倾斜晶体（ $\theta=22^\circ$ ）：RD耦合与强耦合叠加，反交叉能隙扩大，Rabi分裂降至64 meV（图3e）；高倾角晶体（ $\theta=34^\circ$ ）：RD效应主导，模式分裂更显著，Rabi分裂为60 meV（图3f）。图3g-i通过传输矩阵模拟重现上述现象，并量化晶体取向对耦合强度的影响：晶体倾角越大，RD效应越强，但强耦合强度减弱。这一结果证明：通过调控晶体空间取向，可灵活平衡两种物理效应。

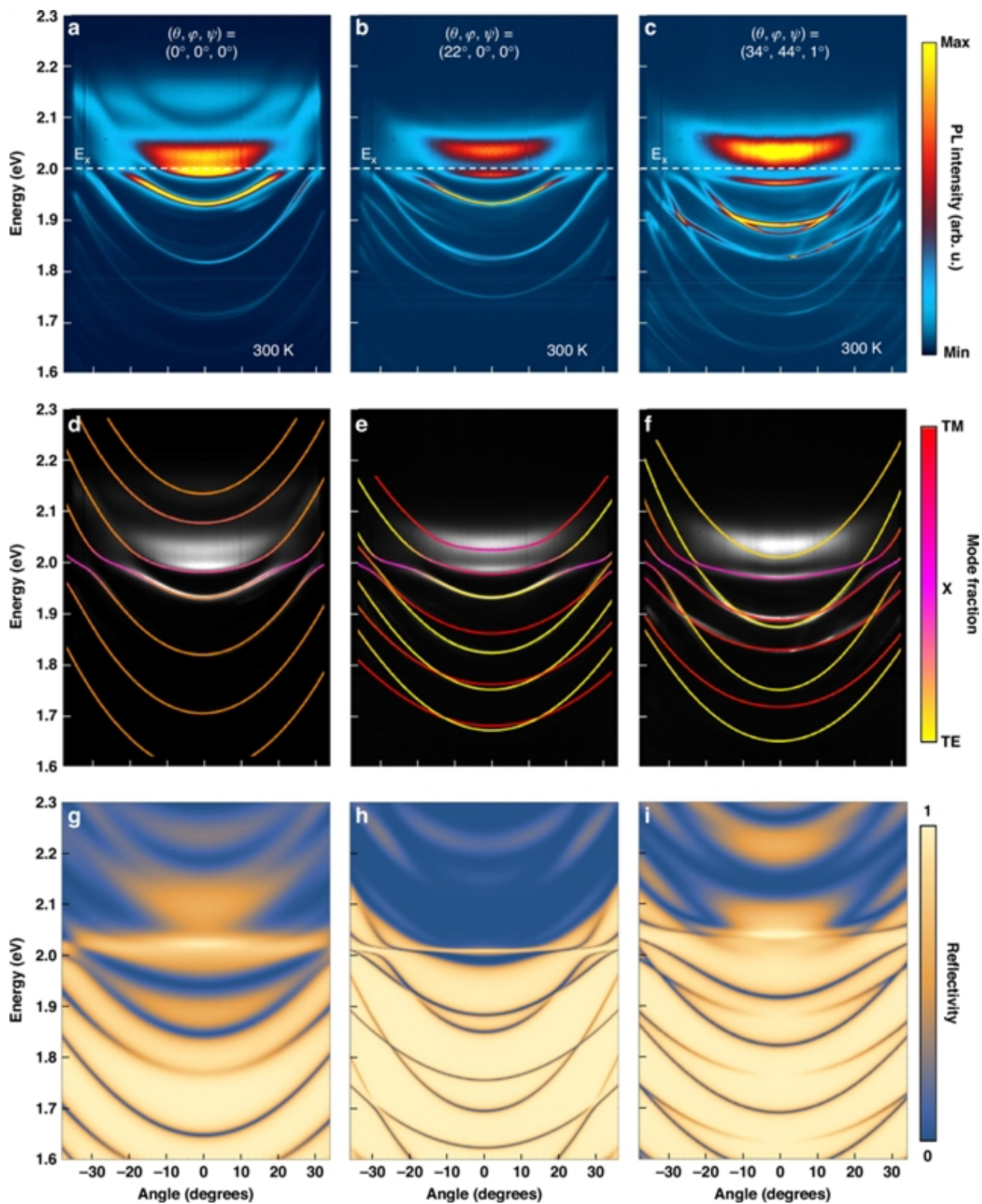


图3. 强耦合与RD效应的协同调控

图4阐明了微腔中衍生的非平庸拓扑态。图4a计算了总有效磁场 B_{eff} （由TE-

TM/XY场与RD场叠加而成），其零点对应锥形奇点（DP），位置为 $(k_x, k_y) = (\pm 2.02, \pm 3.97) \mu\text{m}^{-1}$ （图4a箭头）。图4b的色散截面显示：沿DP连线（图4c虚线），模式无耦合（能级交叉）；而沿垂直方向（图4d虚线），模式反交叉（能隙 $2B_z \approx 20\text{ meV}$ ）。图4e-g的Berry曲率计算表明：DP处曲率发散（ $\Omega \rightarrow \pm \infty$ ），且符号由动量方向决定（ $k_x > 0$ 时 $\Omega \rightarrow +\infty$ ， $k_x < 0$ 时 $\Omega \rightarrow -\infty$ ）。这些结果首次在光子系统中实现：

- 1、倾斜DP（斜率 $k_y/k_x \approx 1.97$ ），突破传统对称性限制；
- 2、室温稳定的非零Berry曲率，为拓扑保护光传输奠定基础。

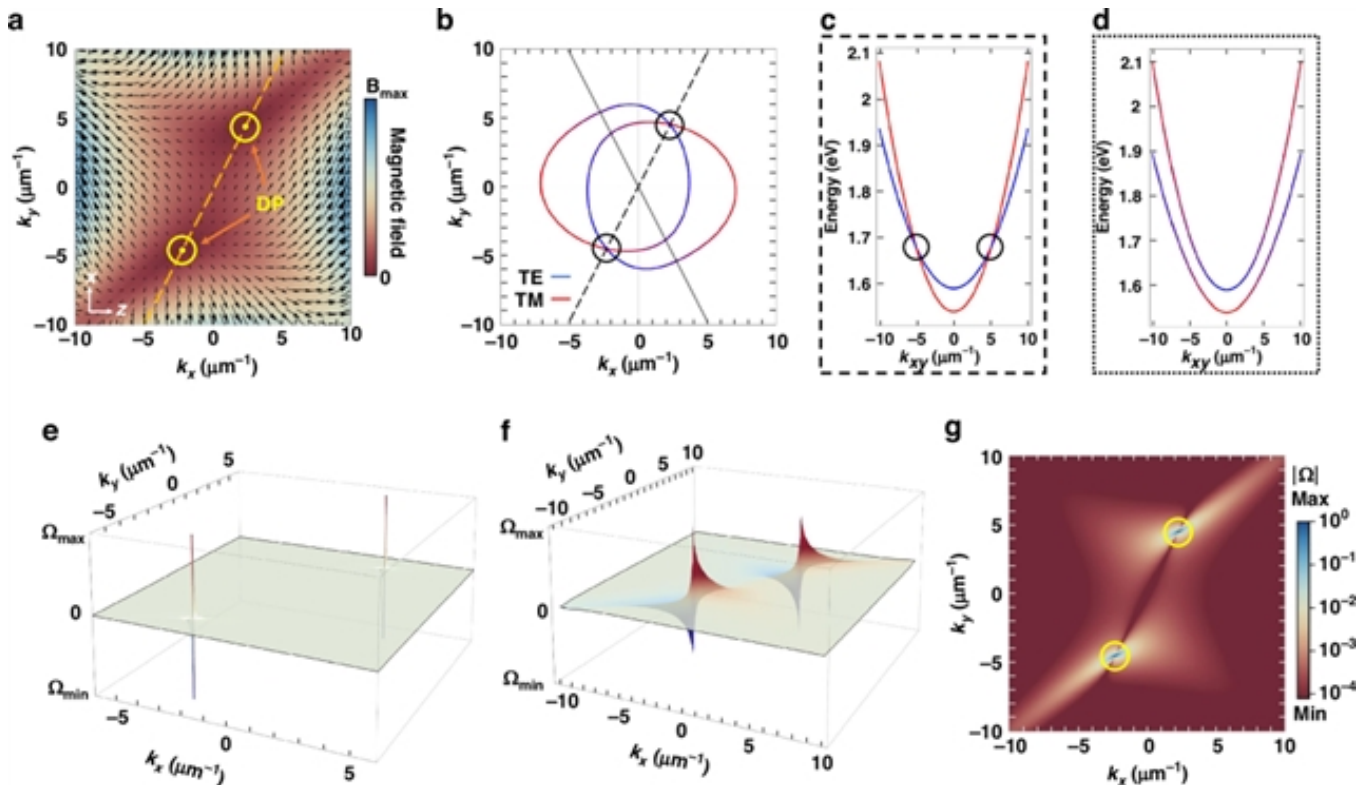


图4. 拓扑特性与锥形奇点

前景展望

本研究成功在室温下实现了二维钙钛矿微腔中的非对称拓扑光子态，通过自组装各向异性晶体（ $(\text{BA})_2(\text{MA})_2\text{Pb}_3\text{I}_{10}$ ）与分布式布拉格反射镜微腔的集成，观测到显著的物理效应：强光-物质耦合（最高Rabi分裂达 97 meV ）和由晶体取向调控的RD自旋轨道耦合，后者诱导了非零Berry曲率及倾斜的锥形奇点（位置： $\pm(2.02, 3.97) \mu\text{m}^{-1}$ ，斜率由参数比 $a_x/a_y \approx -1.97$ 决定）。这一成果突破了传统拓扑光子结构对低温或外场调控的依赖，在光子系统中实现斜率可调的奇点构型，为室温拓扑器件提供了新平台。

未来工作将聚焦三大方向：其一，利用锥形奇点的拓扑保护特性开发低损耗（ $<0.1\text{ dB/cm}$ ）单向传输激光器；其二，通过纳米压印技术精准控制晶体三维取向（角度误差 $<1^\circ$ ），构建多腔阵列以实现复杂拓扑网络；其三，推动硅基集成工艺，结合钙钛矿的高双折射（ $\Delta n=0.5$ ）和强激子稳定性，为高速自旋光电子器件（ $>100\text{ GHz}$ ）及量子模拟平台提供技术支撑。这些进展有望

在光子计算、量子信息处理等领域实现突破性应用。（来源：LightScienceApplications微信公众号）

相关论文信息：<https://doi.org/10.1038/s41377-025-01852-8>

作者：Pavlos G. Savvidis 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