

2025年春季学期组会

个人工作汇报

BY2405316 严五金

moxiyan@buaa.edu.cn

汇报时间：2025 年 5 月 17 日

本周主要工作内容

1. 工具学习:

- 学习开源Python包“torcwa”的具体使用方法，为后续仿真工作做准备。

2. 文献阅读:

- 精读文献 *Nat. Nanotechnol. (IF 38.1)*: "Local control of polarization and geometric phase in thermal metasurfaces"。

3. 论文修改与补充:

- 修改上一篇文章的格式，大幅度调整内容使其符合ACS Photonics期刊的排版要求。
- 补充了20页的Supporting Information，完善了研究细节和数据支撑。

文献讲解

热超表面中偏振和几何相位的局域调控

Local control of polarization and geometric phase in thermal metasurfaces

作者：J. Ryan Nolen, Adam C. Overvig, Michele Cotrufo & Andrea Alù

¹ Photonics Initiative, Advanced Science Research Center, City University of New York, New York, NY, USA.

² Physics Program, Graduate Center of the City University of New York, New York, NY, USA.

期刊：Nature Nanotechnology

发表时间：2024年8月23日 (Published Online)

DOI: 10.1038/s41565-024-01763-6 [↑](#)

研究背景与意义

- 热辐射的普遍性与局限性:

- 热辐射，如白炽灯发光，是一种普遍存在的光源。
- 然而，其本质特征——**非相干、宽带、非准直、非偏振**——极大地限制了其在现代光学技术中的高级应用，与激光等相干光源形成对比。

- 传统调控技术的挑战 (1/2):

- 体块光学元件: 棱镜、波片等, 体积大, 集成度低。

- 声子极化激元 (Phonon Polaritons, PhPs):

- 可增强热辐射相干性, 实现窄带、定向、线偏振发射。

- 局限性: 依赖特定材料 (如SiC, hBN), 工作波段受材料本征共振限制 (例如, 难以覆盖中红外3-5 μm 大气窗口)。

- 传统调控技术的挑战 (2/2):

- 声子极化激元 (PhPs) 的其他局限:

- 通常仅限于TM (p) 偏振光的调控。
 - 与CMOS集成工艺的兼容性也是一个考量。

- 传统超表面 (Metasurfaces):

- 通常设计为调控外部相干光源的波前 (振幅、相位、偏振)。
 - 依赖入射光的空间相干性，自身不产生光或关联孔径内的光场。

- **新兴交叉领域：热超表面 (Thermal Metasurfaces):**

- 目标：将超表面的强大光场调控能力与热辐射相结合，克服传统热辐射的无序性。
- **先前进展:**
 - **光子Rashba效应**: 特定材料或结构中观察到自旋（圆偏振）相关的动量劈裂，导致特定手性光向特定方向发射。但多限于倾斜发射，或依赖有损金属结构 (限制时空相干性、效率低)。
 - **法向圆偏振发射**: 近期有工作实现，但仍面临挑战。
 - **介质超表面**: 周期倍增的介质超表面可产生法向发射的相干光，但仅限于非偏振、无图案的光束。

- 亟待解决的关键问题:

- i. 任意偏振控制: 如何实现对热发射光任意偏振态 (包括椭圆偏振) 的精确控制?
- ii. 单向辐射与互易性: 如何在单层、互易的超表面中实现特定偏振态向单一半空间的非对称/单向辐射? 这表面上似乎与互易性原理相悖。
- iii. 普适性与集成性: 如何发展一个普适的、与标准制造工艺兼容的平台, 实现对红外全波段热辐射的定制化调控?

- 本文工作内容:

- 提出一种单层介质热超表面平台，利用对称性破缺和非局域调控思想：
 - 实现对热辐射空间和时间相干性的增强。
 - 实现对发射光偏振态和几何相位的逐点精确控制。
- 针对中红外3-5 μm 大气窗口波段，采用标准CMOS兼容的低损耗介质材料(a-Si)。

- 本文核心贡献:
 - 实验上首次证明:
 - a. 任意椭圆偏振态的窄带热辐射。
 - b. 广义光子Rashba效应: 将传统自旋相关的Rashba效应推广到任意一对正交偏振态的双向分离发射。
 - c. 基于热几何相位 (thermal geometric phase) 实现自旋选择的单向热辐射, 突破了互易结构中对称发射的传统观念, 证明了非对称手性发射的可能性。

研究方法：超表面总体设计 (图1)

- 核心策略 (参考图1a):

- 通过精心设计的亚波长结构单元 (meta-unit)，激发并调控**热填充的准连续域束缚态 (thermally populated quasi-Bound States in the Continuum, q-BIC)**。

- q-BIC模式具有高Q特性，其向自由空间的泄漏辐射过程被精确控制。

- 对称性控制的散射 (参考图1a):

- 通过单元内不同组件的对称性和相对取向，控制q-BIC的激发和散射路径，进而控制发射光的偏振、相位和方向。

- 目标(参考图1a):
 - 实现对出射波前任意位置的椭圆偏振态 (χ, ψ) 的精确指定。
 - 甚至引入空间梯度以实现光束偏转 (θ_{out})。

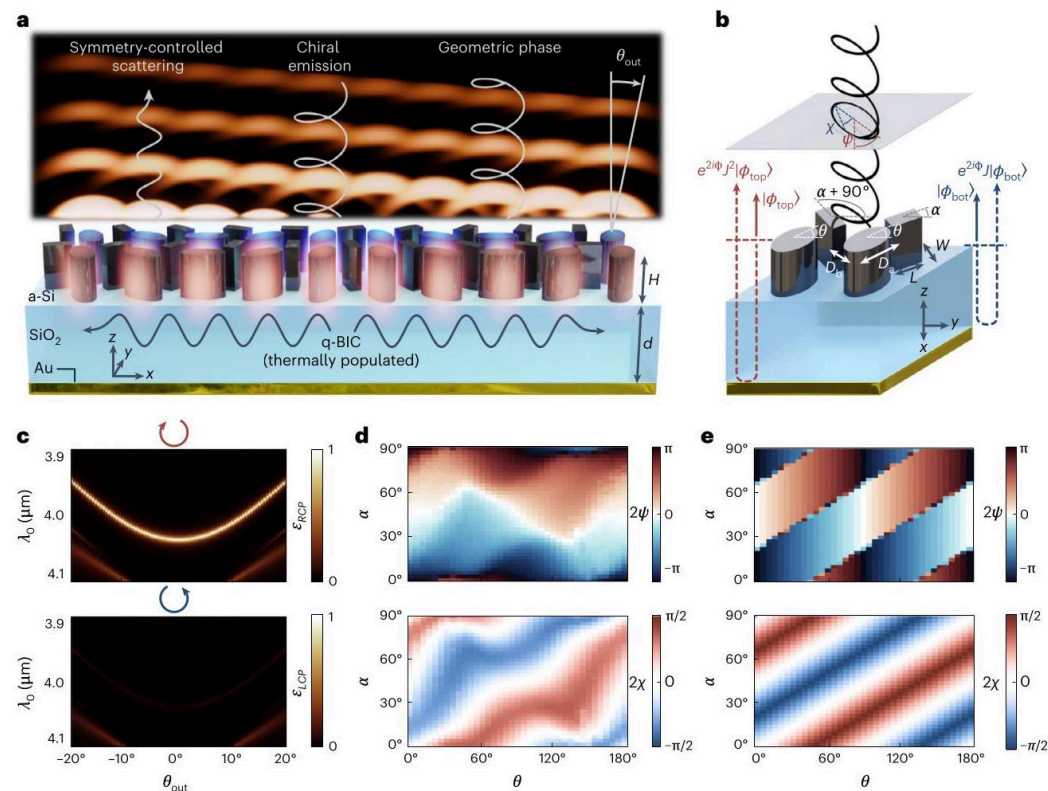


图1: 热超表面设计与功能。(a)为方法示意图。(b)为单元结构几何。下图(c,d,e)为偏振调控仿真与理论计算结果。

- **单元结构与散射机制 (参考图1b):**

- 详细单元结构：顶层a-Si图案层包含局域椭圆柱和非局域矩形柱。
- 通过控制琼斯矩阵 J 和线偏振态 $|\phi_{\text{top,bottom}}\rangle$ ，可实现任意椭圆度和方向的热发射。

- **偏振调控与性能 (参考图1c,d,e):**

- 模拟结果显示可实现RCP/LCP发射 (图1c)。
- 理论与仿真均表明可在庞加莱球上覆盖任意偏振态 (图1d,e)。

研究方法：关键技术细节 (1/3)

- 单元结构 (Meta-unit):

- 材料体系:

- Si晶圆 (衬底) \rightarrow Au (150nm, 反射镜) \rightarrow Al_2O_3 (40nm, 隔离层) \rightarrow SiO_2 (2640nm, 间隔层) \rightarrow a-Si (1460nm, 图案层)。

- 亚波长微柱: 每个单元包含四根a-Si微柱。

- 两根局域椭圆柱 (Local Pillars): 方向角 θ , 提供双折射响应, 用于局域相位控制。

- 两根非局域矩形柱 (Non-local Pillars): 尺寸 $L \times W$, 方向角 α 和 $\alpha + 90^\circ$, 控制扩展的q-BIC模式。

研究方法：关键技术细节 (2/3)

- BIC 到 q-BIC 的转变:

- 当 $L = W$ (非局域柱为正方形) 时, 单元具有高对称性。
- 此时支持对称性保护的**连续域束缚态 (BIC)**, 理论上Q因子无穷大, 无辐射。
- 当 $L \neq W$ (破坏旋转对称性) 时, BIC转变为**准-BIC (q-BIC)**。
- q-BIC 允许能量泄漏到自由空间, 形成热辐射。辐射 Q 因子 $Q_{rad} \propto (L - W)^{-2}$ 。

研究方法：关键技术细节 (3/3)

- 偏振控制机制:

- 抑制底部界面散射: 通过优化a-Si薄膜的平均折射率和SiO₂薄膜的厚度, 实现底部界面散射的相消干涉, 使得顶层a-Si/空气界面的散射占主导。

- 顶部界面散射叠加:

- 发射偏振态由直接散射光 $|\phi_{\text{top}}\rangle$ (其偏振方向主要由非局域柱的取向 α 决定, 近似 2α) 和经过两次超表面透射的间接散射光 $e^{2i\Phi} J^2 |\phi_{\text{top}}\rangle$ (J 为单次通过的琼斯矩阵, 由局域柱 θ 控制) 叠加而成。
 - 合理选择 θ 和 α 可合成任意目标椭圆偏振态。

- **临界耦合 (Critical Coupling):**

- 为实现最大发射率（接近黑体），需要使结构的辐射Q因子 (Q_{rad}) 与非辐射Q因子 (Q_{nr} , 由材料吸收等引起) 相匹配, 即 $Q_{rad} = Q_{nr}$ 。
- 通过调节 L, W (改变 Q_{rad}) 和材料损耗 (影响 Q_{nr}) 来实现。

研究结果：任意偏振发射的实验验证 (图2)

- 实验设计与样品:

- 精确设计并制造了六种不同的超表面样品。
- 目标：分别实现对应庞加莱球上六个基本状态的热发射：
 - 线偏振: 水平 ($|H\rangle$, x-pol), 垂直 ($|V\rangle$, y-pol)
 - 对角线偏振: 对角 ($|D\rangle$), 反对角 ($|A\rangle$)
 - 圆偏振: 右旋 (RCP, $|R\rangle$), 左旋 (LCP, $|L\rangle$)

- 实验表征与结果:

- 图2展示了这六种超表面的**偏振分辨吸收光谱**。
- 根据基尔霍夫热辐射定律 ($\epsilon = A$)，吸收谱特性反映其热发射特性。
- 结果清晰显示：每种超表面都在其设计的目标偏振方向上表现出强吸收（即高峰值发射率），而在正交偏振方向上吸收较弱。

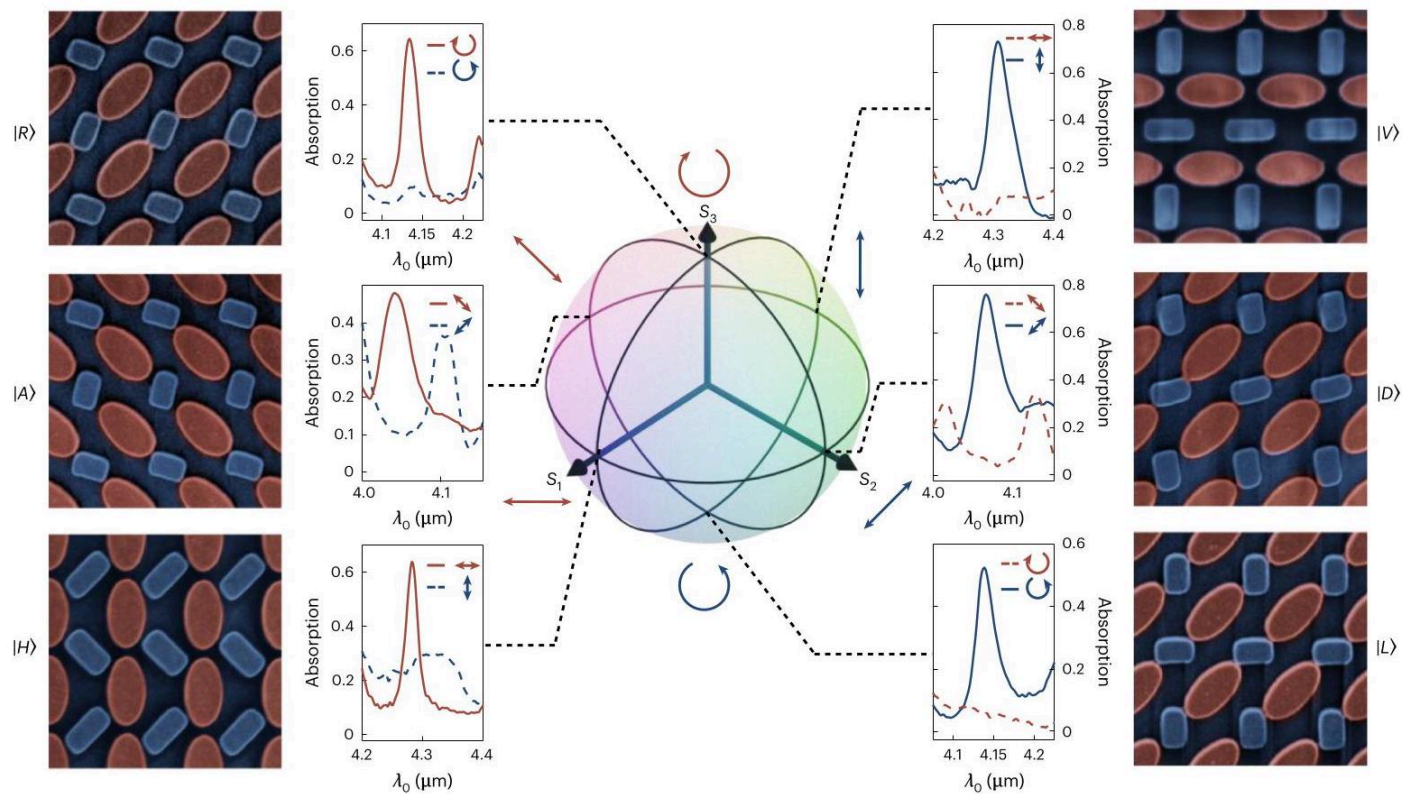


图2: 偏振调控的实验验证。六种超表面的偏振分辨吸收光谱及其SEM图像。

- 图2 核心结论:

- 实验成功验证了该单层介质超表面平台能够产生窄带、且具有任意定制偏振态的热辐射。
- 为后续实现偏振梯度、几何相位等更复杂的光场调控奠定了基础。

研究结果：广义光子Rashba效应 (图3)

- 背景：光子Rashba效应：

- 通常指光子的自旋（如左旋/右旋圆偏振）与其动量（传播方向）发生耦合，导致不同自旋的光子向不同方向传播的现象，即**自旋-动量锁定**。对应庞加莱球上的 S_3 分量。

- 本文的推广：广义光子Rashba效应：

- **核心思想**：将Rashba效应中的“自旋”概念从圆偏振推广到**任意一对正交的偏振态**。
- **实现方式**：通过在超表面上引入**局域偏振态的连续梯度**。这个梯度轨迹对应庞加莱球上的一个大圆。

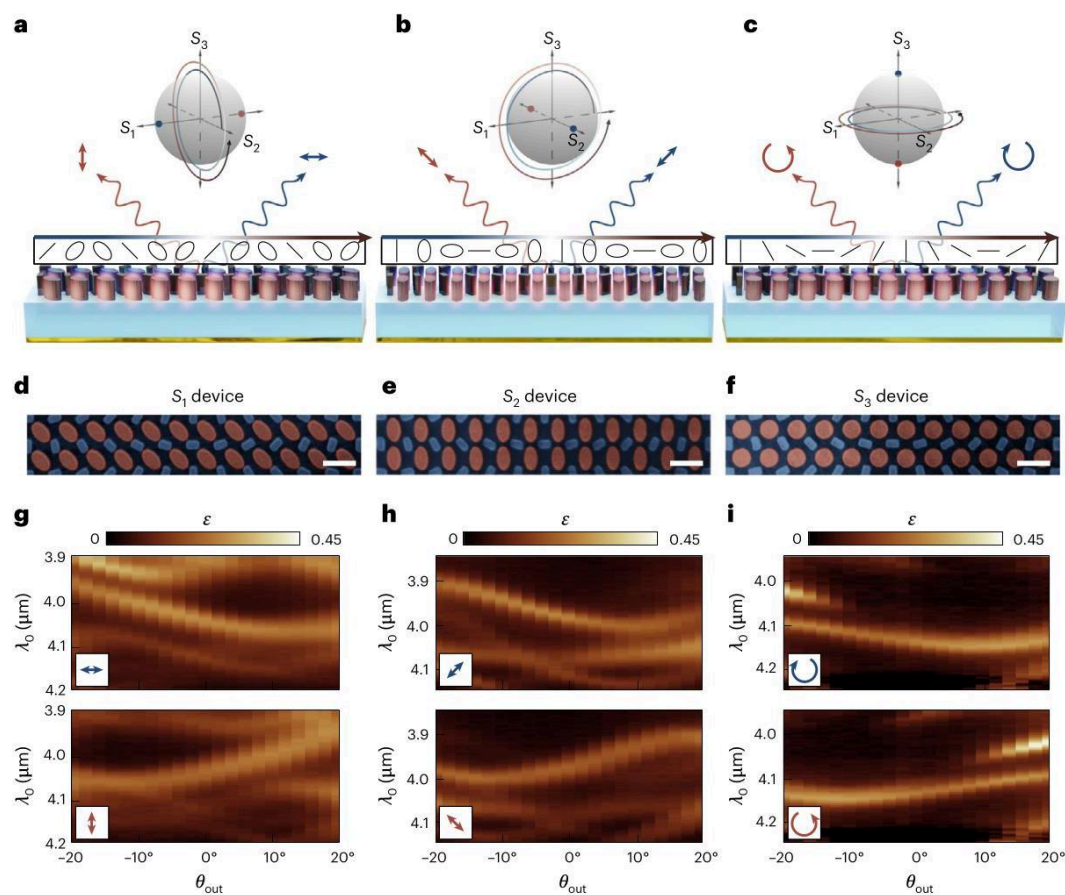


图3: 广义光子Rashba效应。*a-c*为三种器件设计示意图，*d-f*为SEM图，*g-i*为对应的实验测量热发射结果。

- 器件设计细节 (参考图3a-f):

- 制造了三种代表性的器件，它们分别在庞加莱球的不同平面上实现偏振梯度，从而劈裂不同的斯托克斯 (Stokes) 参数定义的正交偏振对:

- a. S_1 器件 (图3a,d,g): 劈裂 s -偏振 ($|V\rangle$) 和 p -偏振 ($|H\rangle$)。

- b. S_2 器件 (图3b,e,h): 劈裂对角偏振 ($|D\rangle$) 和反对角偏振 ($|A\rangle$)。

- c. S_3 器件 (图3c,f,i): 实现传统热光Rashba效应，劈裂 $|L\rangle$ 和 $|R\rangle$ 。

- **实验结果与意义 (参考图3g-i):**

- 实验测量的偏振分辨热辐射角谱清晰地展示了这三种器件分别对相应正交偏振对的劈裂发射。
- 例如，在 S_1 器件中 (图3g)，一种线偏振主要向正角度发射，而其正交线偏振主要向负角度发射。
- **理论发射率限制**: 由于能带向左、右两个方向劈裂，对于给定的偏振态，其峰值发射率理论上限制为0.5。
- **重要意义**:
 - **首次实验证明**了超越传统自旋（圆偏振）的**广义偏振劈裂效应**。
 - 表明先前观察到的光子Rashba效应仅仅是这一更普适现象的一个特例。
 - 极大地扩展了利用超表面调控热辐射方向与偏振自由度的能力。

研究方法：热几何相位 (图4)

- 背景：几何相位 (Pancharatnam-Berry Phase):

- 当偏振态在庞加莱球上经历一个闭合路径演化后，会额外获得一个相位，其大小等于该闭合路径所围立体角的一半。
- 在超表面中，通常通过空间上旋转各向异性单元的取向角 θ 来引入空间变化的几何相位 2θ (针对圆偏振光)。

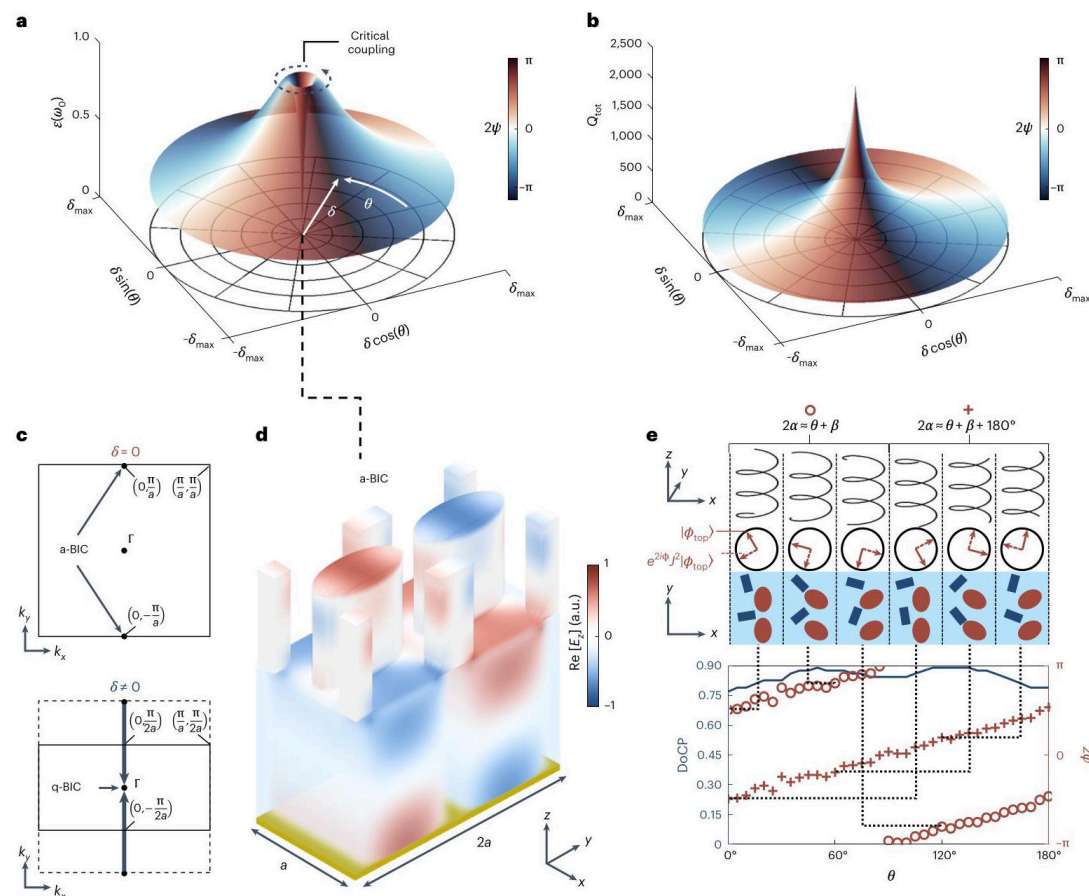


图4: 热几何相位。a,b显示TCMT计算的发射率和Q因子。c为能区折叠。d为a-BIC模场。e为临界耦合线上单元的DoCP和几何相位。

- 本文提出的“热几何相位”(参考图4):
 - **核心思想**: 将几何相位的概念应用于热辐射, 通过调控超表面单元的局域取向 ψ (偏振主轴方向), 赋予发射的圆偏振(CP)热光一个几何相位。
 - **关键机制**: 此几何相位产生于一个**拓扑奇点 (BIC点)**附近的**临界耦合条件**。
- **理论分析 (TCMT) (参考图4a,b)**:
 - 参数空间: 对称性破缺程度 $\delta = L - W$ (半径), 局域柱取向角 θ (角坐标)。
 - **奇点 ($\delta = 0$) (参考图4c,d)**:
 - 此时为严格的**连续域束缚态 (BIC)** 或 “人造BIC (a-BIC)”, $Q_{rad} = \infty$, 无热辐射。这是一个拓扑奇点。

- 偏离奇点 ($\delta \neq 0$):
 - a-BIC转变为**q-BIC**，允许热辐射。发射的CP态的偏振主轴方向 2ψ 依赖于局域柱的取向角 θ 。
- 临界耦合与单位发射率 (参考图4a):
 - 对于特定的扰动幅度 δ_c ，可以实现**临界耦合条件** ($\varepsilon(\omega_0) = 1$)。
 - 这条临界耦合等高线 (图4a中虚线轮廓) 上的所有点 (δ_c, θ) 均可实现近乎完美的黑体发射。

- 几何相位的获得 (参考图4e):

- 沿着这条单位发射率的临界耦合等高线，通过连续改变局域柱的取向角 θ (从 0° 到 360°)，可以使得发射的CP光获得一个连续变化的几何相位 $\Phi_{\text{geo}} \propto \theta$ (或 2ψ)。
- 同时，圆偏振度 (DoCP) 保持很高。CP发射条件： $2\alpha \approx \theta + \beta$ 。

- 意义: 实现了在获得高效热发射的同时，对CP光附加一个由单元局域几何参数 (θ) 控制的纯相位项。

研究结果：自旋选择单向热辐射 (图5)

- 目标: 利用热几何相位, 实验演示对CP热辐射的单向、自旋选择性发射。
- 器件设计与制造 (参考图5a,b):
 - 在超表面上引入一个局域几何相位的梯度 (通过空间上连续改变单元中局域椭圆柱的取向角 $\theta(x)$)。
 - 根据广义斯涅尔定律, 相位梯度 $\nabla\Phi$ 会导致光束偏转。样品横向尺寸为 $4\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ 。

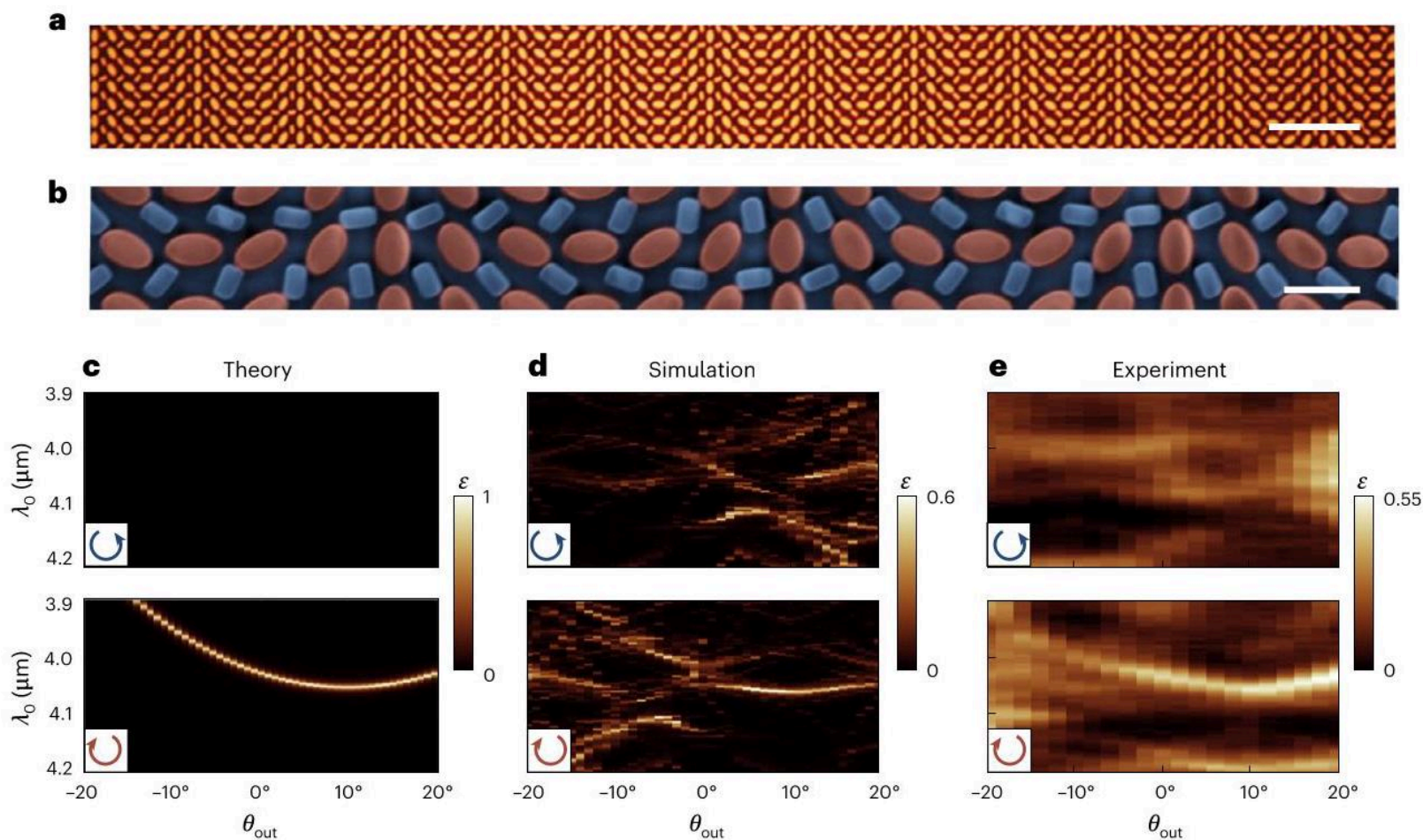


图5: 自旋选择的单向热辐射。*a,b*为器件的光学和SEM图。*c,d,e*分别为理论、仿真和实验的LCP/RCP发射角谱。

- **理论与仿真预测 (参考图5c,d):**

- **STCMT 计算 (图5c):** 预测了清晰的自旋相关的动量空间偏移。例如, LCP光主要向正角度 ($\theta_{out} > 0$) 发射, 而RCP光在该区域被抑制。
- **全波数值仿真 (图5d):** 结果与STCMT相似, 显示了单向的LCP发射。观察到由目标q-BIC模式与其他晶格模式耦合引起的额外光谱特征和模式劈裂。

- **实验验证 (参考图5e):**

- 样品在 300°C 下加热, 测量其角度分辨的热发射光谱。
- **清晰的单向、自旋选择性发射:** LCP光 (图5e上) 主要集中在一个动量方向, 形成一个偏移的窄带发射。而RCP光 (图5e下) 在同一方向的发射被显著抑制。
- **实现了自旋不对称 (Spin Asymmetry):** 与传统光子Rashba效应的自旋反对称形成鲜明对比。

- 性能参数与核心意义:

- 测量的Q因子 $Q \approx 128$ 。
- 背景发射率 $\varepsilon \approx 0.10$ 。
- 目标特征峰发射率 $\varepsilon \approx 0.55$ (高于传统Rashba效应0.5的理论上限)。
- 圆偏振度 DOCP (S_3/S_0) 约为 0.38。
- **核心意义: 首次实验证明**在互易的、单层介质超表面中可实现**单向的、自旋不对称的手性热辐射**。这种本征手性响应**不需要多层器件结构或倾斜刻蚀**。

结论与展望

- 主要研究成果总结 (1/2):

- i. 通用热超表面平台: 实验上引入了一个基于单层、低损耗介质 (a-Si) 的热超表面平台, 显著增强了对热辐射 (中红外 $3\text{-}5\mu\text{m}$ 波段) 的调控能力。
- ii. 任意偏振态控制: 实现了对热发射光任意椭圆偏振态的窄带、逐点精确控制。
- iii. 广义光子Rashba效应: 将传统的自旋相关Rashba效应推广到任意一对正交偏振态, 并通过实验验证了其双向分离发射。

- **主要研究成果总结 (2/2):**

4. **热几何相位**: 提出了“热几何相位”的概念，通过在拓扑奇点（BIC）附近调控临界耦合条件，实现了高效热发射的同时赋予CP光可控的几何相位。

5. **自旋选择单向辐射**: 利用热几何相位梯度，实验证明了在互易系统中可以实现单向的、自旋不对称的手性热辐射，峰值发射率达0.55。

6. **高Q因子与工艺兼容性**: 器件展现出较高的实验Q因子 (约100-200)，且设计原理和材料体系与标准CMOS制造工艺兼容。

- **技术优势与突破:**

- **超越传统局限:** 打破了传统热源非相干、无偏振的特性。
- **简化制造:** 单层图案化结构，避免了复杂的多层对准或三维倾斜刻蚀工艺。
- **互易性下的不对称性:** 证明了在完全满足互易性原理的系统中，可以实现强烈的偏振和方向不对称性发射。

- **未来展望与潜在应用 (1/2):**

- **性能提升:** 通过优化材料吸收、结构设计和FoM, 进一步提高发射效率、圆偏振度、抑制背景和非目标模式。
- **功能扩展:** 实现更复杂的波前调控, 如热辐射聚焦、产生轨道角动量 (OAM) 光束、定制矢量光束等。
- **平台推广:**
 - 将设计原理拓展到其他波段 (可见光、太赫兹等)。
 - 应用于其他发光体系, 如荧光、电致发光 (LED)、二维材料发光、激光、非线性及量子光学体系。

- 未来展望与潜在应用 (2/2):

- 新物理探索:

- 结合非互易材料, 有望以新的方式突破基尔霍夫定律的限制。
 - 研究热发射过程中的光力学反作用。

- 实际应用:

- 高效、波长选择性的热能利用: 太阳能热电转换器。
 - 紧凑型、定制化红外传感器和红外通讯平台。
 - 生物传感、拓扑光子学、手性光学等需要精确光场控制的领域。

与我的工作的关联

- 学习借鉴 (1/2):

- **q-BIC调控思想**: 本文通过精巧设计单元结构（局域柱+非局域柱）实现对q-BIC泄漏的精密控制，进而调控偏振、相位和方向，对我理解非局域效应、设计BIC/q-BIC态有深刻启发。
- **几何相位与梯度设计**: 对我的超表面相位调控设计有重要指导意义，特别是临界耦合下的几何相位获取及梯度应用。

- **学习借鉴 (2/2):**

- **多自由度优化与参数扫描:** 文中通过TCMT进行参数空间扫描（如图4a,b）来寻找最优工作点（如临界耦合线），这种系统性的分析方法值得学习。
- **仿真工具的应用与验证:** "torcwa" (RCWA工具) 可用于分析此类周期结构的响应，是复现和拓展工作的基础。

- 后续研究方向思考 (1/2):

- 基于"torcwa"的仿真复现与拓展:

- 尝试复现文中基本单元在特定参数下的偏振分辨吸收/发射谱，分析参数敏感性。
 - 深入分析几何参数（如柱的尺寸、周期、材料折射率、层厚）对q-BIC模式、临界耦合条件以及最终发射特性的影响。
 - 探索不同材料体系的可行性。

- 后续研究方向思考 (2/2):

- 新功能与应用探索:

- 将局域偏振和几何相位调控能力拓展到我关注的波段或特定应用（如气体传感）。
 - 思考如何将热发射控制技术与我目前研究的超表面功能（如消色差、涡旋光）相结合。

- 逆向设计方法的应用:

- 考虑将逆向设计方法（拓扑优化、深度学习）应用于此类复杂热超表面的设计，自动寻找满足特定热辐射需求的最优结构。

讨论与问题

1. 文章强调了单层介质结构在制造上的优势。与多层结构或需要倾斜刻蚀的3D手性结构相比，这种单层设计在实现复杂功能（如高效单向手性发射）时，其性能上限（如效率、带宽、角度范围）和设计自由度方面可能存在哪些潜在的折衷或挑战？

2. 文中的“热几何相位”是围绕一个 α -BIC奇点，在满足临界耦合的条件下获得的。这种几何相位的鲁棒性如何？对实际制造中不可避免的误差（如尺寸偏差几个纳米、材料介电常数漂移）的敏感度怎样？临界耦合条件是否容易在实验中精确满足？

3. 广义光子Rashba效应展示了对任意正交偏振对的劈裂。这种劈裂的角度、效率和工作带宽是否受到某些基本物理原理（如衍射极限、模式容量）的限制？对于不同的正交偏振基（如线偏振vs圆偏振），实现劈裂的难易程度或最佳性能有何不同？

4. 文章提到实验测得的Q因子 (≈ 128) 低于仿真值, 且存在背景发射 ($\varepsilon \approx 0.10$)。除了未来优化, 这些差异的主要物理原因可能是什么 (例如, 非理想的材料损耗、结构缺陷、非局域柱间距不均匀等)? 非局域柱引入的q-BIC模式的相干长度与实际样品尺寸、缺陷密度等有何关联?

5. 该平台被展望用于光束聚焦、OAM产生等更复杂的波前调控。在热辐射这种自发、非相干驱动的过程中，如何确保不同单元间的相位关系，从而构建复杂的相干波前？是否依赖于q-BIC本身的相干长度？

感谢聆听！



moxiyan@buaa.edu.cn



dreamseeker_626



SH2-B216