

纳米结构单元内扰动调控 q-BIC 超表面的本征偏振*

李克武¹⁾²⁾ 刘波¹⁾²⁾ 吴晓岚¹⁾²⁾ 董业²⁾ 王爽^{2)3)†}

1) (中北大学电气与控制工程学院, 太原 030051)

2) (中北大学, 山西省智能微波光电技术创新中心, 太原 030051)

3) (中北大学计算机科学与技术学院, 太原 030051)

(2025 年 12 月 29 日收到; 2026 年 2 月 6 日收到修改稿)

准连续域束缚态 (quasi-bound states in the continuum, q-BIC) 超表面具有高 Q 值和强局域场, 能够实现共振波长、振幅、相位及偏振等有效操控, 是实现高性能传感和光电子器件的理想平台. 现有 q-BIC 偏振调控多依赖旋转纳米结构单元或改变结构高度, 加工复杂且灵活性不足, 限制了其在偏振维度的多功能集成. 本研究提出了一种在纳米结构单元内部引入孔洞微扰的策略, 直接调控 q-BIC 的本征偏振模式. 研究通过耦合模理论和多极子分解解析了微扰改变结构单元局域介电常数及电偶极矩分布, 从而影响本征偏振方向的物理机制. 设计并制备了基于 a-Si 纳米柱二聚体的系列超表面样品, 通过改变孔洞数量及排布引入微扰. 仿真与实验结果表明, 随着孔洞数量增加, q-BIC 的本征偏振方向能从初始 0° 发生顺时针偏转, 同时共振波长产生蓝移. 实验测得的偏振响应与仿真结果一致. 本文研究提供了一种简易、灵活的 q-BIC 偏振操控手段, 为发展紧凑型偏振转换、偏振测量与信息处理超表面开辟了新途径.

关键词: 准连续域束缚态, 超表面, 本征偏振, 偏振调控**DOI:** 10.7498/aps.75.20251777**CSTR:** 32037.14.aps.75.20251777

1 引言

连续域束缚态 (bound states in the continuum, BIC) 是一种存在于辐射连续谱中的局域共振态^[1,2], 其物理机制源于多模态或多通道间的干涉相消, 从而抑制了能量向远场的辐射, 使得能量被有效束缚在结构内部, 形成具有超高 Q 值的“隐身”共振态. 基于超表面单元结构的对称性, 可通过对称性破坏实现共振模与辐射模的正交, 构建对称性保护型准 BIC(q-BIC)^[3,4]. 这类 q-BIC 凭借高 Q 值、强局域场以及良好的可调性, 成为实现高性能传感和光电子器件的理想平台——通过调节周期纳米结构单元的几何对称性、介电常数等参数, 可精确调控其 Q 值、共振波长、振幅及相位等特

性^[5-7]. 与此同时, 大多数 q-BIC 超表面展现高灵敏的偏振响应, 也成为调控和探测光场偏振的重要载体. 经过精心设计的 q-BIC 超表面能够实现对特定偏振光的高灵敏度选择与高效率转换, 为偏振编码、手性传感及矢量光场生成等前沿应用开辟了新的途径^[8-11].

Koshelev 等^[12] 首先系统揭示了在超表面中引入面内对称性破坏可产生的高 Q 值共振, 明确了 BIC 和 Fano 共振之间的物理联系, 并建立了 Q 因子与非对称系数之间的定量关系. 自此, 各种功能结构的 q-BIC 超表面被相继提出, 用于调控透射光的波长、振幅与相位等信息, 在传感、光电子器件等领域获得了广泛应用^[13,14]. 偏振作为光波的另一维重要信息, 在基于 q-BIC 超表面的光与物质相互作用研究中, 也日益受到关注. Leitis 等^[15] 通

* 国家自然科学基金 (批准号: 62575269, 62205310, 62205309) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: 20200150@nuc.edu.cn

过将结构单元旋转 10° 打破面内对称性, 构造了 q-BIC 超表面, 并研究了其对不同入射角度的光谱响应. 该结构通过 TE_y 与 TM_x 两种模式实现了共振频率的双向调谐, 进而提出一种基于角度复用的全介质超表面传感器. Feng 等^[16] 利用介电超表面, 引入了 y 偏振的 q-BIC 偏振模式与 x 偏振的米氏共振偏振模式, 实现了交叉偏振控制, 可选择性增强 540 和 660 nm 共振场, 并提出了一种基于共振介电超表面增强稀土掺杂上转换纳米粒子双波段偏振发光策略, 显著提升了荧光的强度与偏振度. Qin 等^[17] 采用双层扭曲的光子晶体平板, 通过调节两层光子晶体的扭曲角打破上下对称性, 实现了任意偏振态的 BIC, 并深入探讨了其在动量空间中的偏振拓扑特性. Kühner 等^[18] 通过改变 q-BIC 超表面的纳米结构单元高度, 打破了传统平面对称限制, 将线偏振模式转化为圆偏振模式, 实现了具有光学手性响应的全介质 q-BIC 超表面. He 等^[19] 利用双纳米结构单元 q-BIC 本征偏振模式响应, 构建了兼具高 Q 值与偏振敏感辐射的分焦面成像超表面, 将光谱和偏振检测功能集成, 实现了多波段、高分辨率、无需机器学习的高精度光谱偏振成像. Wu 等^[20,21] 在双脊亚波长光栅中提出了动量失配驱动型 q-BIC. Zhou 等^[22] 和 Dong 等^[23] 分别通过破坏纳米柱高度和介电常数的对称性, 实现了圆偏振选择的手性超表面设计. 当前, q-BIC 超表面在偏振转换与偏振测量等方面的应用需求日益增长. 然而, 针对 q-BIC 超表面的本征偏振模式研究还比较缺乏. 现有偏振调控多依赖在厚度方向上旋转纳米结构单元或调节单元间高度差来实现. 这类方法不仅操作复杂, 而且加工难度巨大, 制约了 q-BIC 偏振操控技术的进一步发展, 限制了 q-BIC 超表面在偏振信息维度上的高容量、多功能集成应用.

综上, 本文提出了一种基于“结构内微扰”的 q-BIC 超表面本征偏振调控新方法. 通过在超表面纳米结构单元内部引入矩形孔, 打破其局部介质分布的对称性, 从而直接调控电偶极矩模式与辐射通道的耦合关系, 实现对共振本征偏振方向的操控. 首先通过耦合模理论与多极子分解, 从理论上阐明孔微扰影响电偶极矩分量及本征偏振方向的物理机制; 进而, 基于该原理设计并制备了具有不同孔洞数量、位置及排布对称性的 a-Si 纳米柱二聚体超表面阵列样品; 通过搭建的高精度偏振显微光谱系统, 系统地测量了各样品在不同线偏振光激发

下的透射光谱与偏振响应; 最后, 将理论分析与实验结果结合, 分析获得了 q-BIC 超表面本征偏振调控的打孔微扰方法. 本文旨在通过 q-BIC 超表面纳米结构单元打孔微扰, 打破结构对称性, 实现灵活的 q-BIC 本征偏振调控, 拓展 q-BIC 超表面在偏振转换和偏振测量等方面的应用.

2 原理与仿真

q-BIC 超表面展现出了窄带、高 Q 值、共振波长可调和共振强度大等光谱特性, 变化急剧、强色散特性和干涉增强等相位特性, 并获得了广泛应用. 同时, 为了研究 q-BIC 超表面本征偏振模式. q-BIC 超表面的光学特性可以通过耦合模理论进行建模, 该理论将光散射描述为直接背景通道与共振通道的干涉, 而共振通道则基于 q-BIC 本征态的激发和再辐射. 本文设计的超表面结构示意图如图 1 所示, 超表面的每个纳米结构单元均可视为支持多种多极模式的米氏共振纳米粒子, 本征态与正入射光的相互作用采用耦合参数 m_e 描述^[12,18],

$$m_e \propto \int_{V_1, V_2} \mathbf{J}(\mathbf{r}) \cdot \mathbf{e} e^{ikz} dV, \quad (1)$$

式中, $\mathbf{J}(\mathbf{r})$ 为位移电流密度, V_1 和 V_2 分别为纳米结构单元 1 和 2 的体积. 波数 $k = \omega/c$, 沿 z 轴正方向传播, 偏振方向为 \mathbf{e} . 将函数 e^{ikz} 进行泰勒级数展开, 耦合参数 m_e 可采用电偶极矩 \mathbf{P} 、磁偶极矩 \mathbf{M} 以及电四极矩 \hat{Q} 等多极子来表示^[24,25], 即

$$\begin{aligned} m_e &\propto \int_{V_1, V_2} \mathbf{J}(\mathbf{r}) \cdot \mathbf{e} e^{ikz} dV \\ &\approx \int_{V_1, V_2} \mathbf{J}(\mathbf{r}) \cdot \mathbf{e} (1 + ikz) dV \\ &\approx -i\omega \mathbf{P} \cdot \mathbf{e} + i(\mathbf{k} \times \mathbf{M}) \cdot \mathbf{e} \\ &\quad - \frac{\omega}{6} (\mathbf{e})_\alpha (\mathbf{k})_\beta Q_{\alpha\beta}, \end{aligned} \quad (2)$$

式中, 电偶极矩 $\mathbf{P} = \frac{i}{\omega} \int_{V_1, V_2} \mathbf{J}(\mathbf{r}) dV$; 磁偶极矩 $\mathbf{M} = \frac{1}{2} \int_{V_1, V_2} \mathbf{r} \times \mathbf{J}(\mathbf{r}) dV$; 电四极矩分量 $Q_{\alpha\beta} = \frac{3i}{\omega} \int_{V_1, V_2} [r_\alpha J(r)_\beta + r_\beta J(r)_\alpha - \frac{2}{3} \delta_{\alpha\beta} \mathbf{r} \cdot \mathbf{J}(\mathbf{r})] dV$, 其中坐标下标 $\alpha, \beta = x, y, z$, $\delta_{\alpha\beta}$ 为克罗内克算符.

同样, 入射到超表面背面的波耦合系数 m'_e 也可通过 (1) 式积分表示, 但传播方向相反 (e^{ikz} 变为 e^{-ikz}). 入射光 (偏振方向沿 \mathbf{e}) 到出射光 (偏振方向沿 \mathbf{f}) 透过率可描述为^[16]

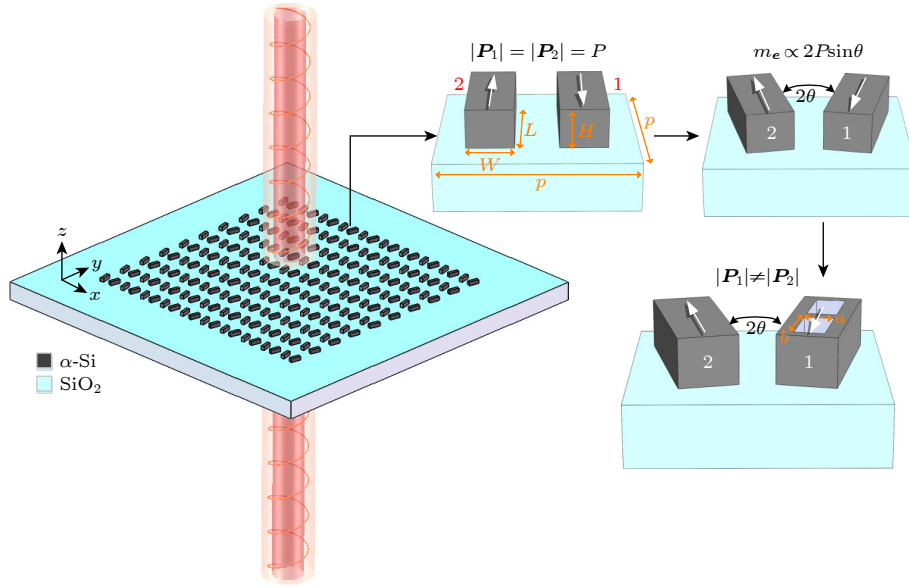


图 1 q-BIC 超表面结构示意图

Fig. 1. Schematic of the q-BIC metasurface.

$$T_{ef}(\omega) = |t_{ef}(\omega)|^2,$$

$$t_{ef}(\omega) = t_{bg}\delta_{ef} - \frac{m_e m'_f}{i(\omega - \omega_0) + (\gamma_d + \gamma_e)}, \quad (3)$$

其中 t_{bg} 为背景透射系数, m'_f 为偏振方向沿 f 的出射光波耦合系数, ω_0 为共振频率, γ_d 为吸收或散射损耗, γ_e 为辐射损耗. 辐射模式的品质因子 $Q_{rad} = \omega_0/(2\gamma_e)$.

本文设计的 q-BIC 超表面采用双纳米柱二聚体结构, 首先通过旋转角度 θ , 破坏 C_{2v} 对称保护实现 q-BIC. 对称破坏二聚体结构 q-BIC 主要贡献来自电偶极矩, 因此由 (1) 式和 (2) 式描述的耦合参数可简化为

$$m_e \propto \mathbf{P}_1 \cdot \mathbf{e} + \mathbf{P}_2 \cdot \mathbf{e}, \quad (4)$$

式中 \mathbf{P}_1 和 \mathbf{P}_2 分别表示纳米柱 1 和 2 的电偶极矩. 很显然, 两纳米柱材料和大小一致时, $|\mathbf{P}_1| = |\mathbf{P}_2| = P$; 当旋转角度 $\theta = 0$, 两个纳米柱平行时, $\mathbf{P}_1 = -\mathbf{P}_2$, 对于所有偏振 $m_e = 0$, 完美的 BIC; 当旋转角度 $\theta \neq 0$ 时, 耦合系数 $m_e \propto 2P \sin \theta$, 仅在 x 方向存在 q-BIC 的本征偏振. 这种 BIC 的保护由纳米结构单元的 C_{2v} 旋转对称性决定. 如图 1 所示, 若在纳米柱上打孔, 由于打孔区域高折射率介质被空气取代, 引起的局域介电常数扰动 $\Delta\varepsilon > 0$, 使得 $|\mathbf{P}_1| \neq |\mathbf{P}_2|$, 本征偏振发生改变. 利用位移电流密度与电场之间的本构关系 $\mathbf{J}(\mathbf{r}) = -i\omega\varepsilon_0[\varepsilon(\omega_0, \mathbf{r}) - 1] \times \mathbf{E}(\mathbf{r})$ [24], (4) 式可改写为

$$m_e \propto \int_{V_1} [\varepsilon(\omega_0, \mathbf{r}) + \Delta\varepsilon - 1] \mathbf{E}(\mathbf{r}) dV \cdot \mathbf{e}$$

$$+ \int_{V_2} [\varepsilon(\omega_0, \mathbf{r}) - 1] \mathbf{E}(\mathbf{r}) dV \cdot \mathbf{e}$$

$$= 2 \sin \theta \int_{V_2} [\varepsilon(\omega_0, \mathbf{r}) - 1] \mathbf{E}(\mathbf{r}) dV e_x$$

$$+ \cos \theta \int_{V_1} \Delta\varepsilon \mathbf{E}(\mathbf{r}) dV e_y. \quad (5)$$

根据 (5) 式, 通过打孔引入的微扰, 能够增加 y 方向上的本征偏振分量, 最终实现 q-BIC 本征偏振方向操控.

如图 1, 设置超表面基底为石英, 纳米结构单元为 a-Si 纳米柱. 在纳米柱上开矩形通孔构建微扰来调节 y 方向的本征偏振分量. 设置两个纳米柱构成的超表面单元的周期 $p = 780$ nm. 纳米粒子大小宽为 $w = 160$ nm, 长为 $L = 520$ nm, 厚度为 140 nm, 其对称结构破坏角度 θ 取 12.5° , 每个纳米柱上打孔大小 $a \times b = 65$ nm \times 150 nm, 位置取在纳米柱的半中心. 纳米柱上引入的孔洞加剧了原有的 q-BIC 超表面对称破坏性. 采用多物理场仿真软件 COMSOL Multiphysics 进行 q-BIC 透射仿真分析. 设激励光源为沿 z 轴正方向垂直入射超表面. 仿真中 a-Si 的折射率设置为 3.73 [26], 石英基底的折射率设置为 1.45 , 厚度设为 500 μm . 仿真分析了 0, 1, 2, 3 孔, 不同打孔参数的正交偏振 (x -和 y -偏振) 激发 q-BIC 情况.

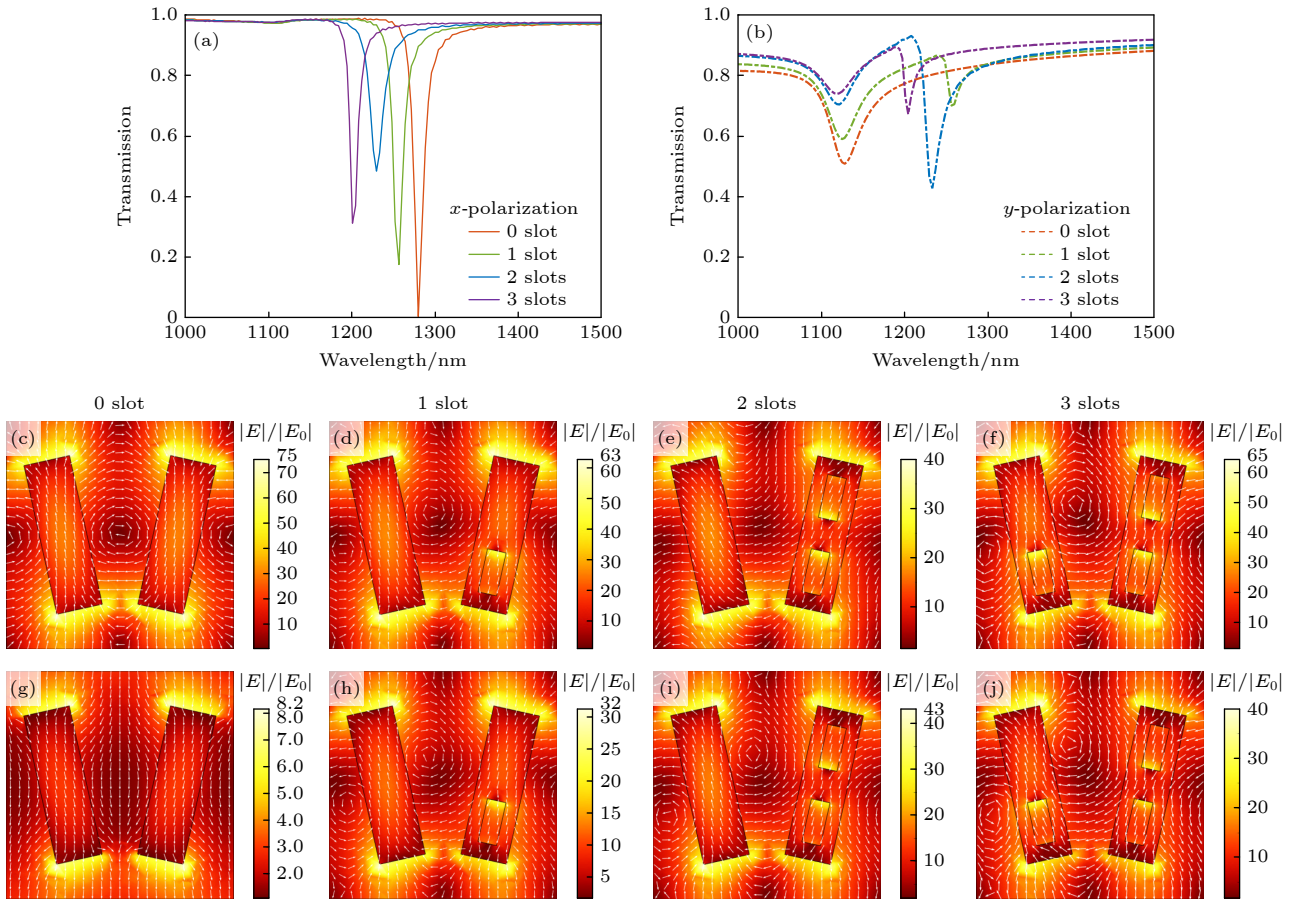


图 2 正交偏振 (x -和 y -偏振) 激发 q-BIC (a), (b) 分别为 x 和 y 偏振光透过率; (c)–(f) 仿真分析得到的 x 偏振光下, 共振波长位置 0, 1, 2, 3 孔的 x - y 电场分布; (g)–(k) 仿真分析得到的 y 偏振光下, 共振波长位置 0, 1, 2, 3 孔的 x - y 电场分布, 位置在 $z = 70$ nm 处

Fig. 2. Excitation of q-BIC by orthogonal polarizations (x - and y -polarization): (a), (b) The transmittance under x - and y -polarized light, respectively; (c)–(f) simulated x - y electric field distributions at resonance wavelengths for 0, 1, 2, and 3 slots under x -polarized light; (g)–(k) simulated x - y electric field distributions at resonance wavelengths for 0, 1, 2, and 3 slots under y -polarized light, at the position of $z = 70$ nm.

如图 2 所示, 在 q-BIC 共振波长处, x 和 y 偏振模式下表现出不同的透射光谱特性, x 偏振透光率高于 y 偏振. 随着打孔微扰, 孔数从 0 增加至 2 孔, x 偏振光入射激励的共振电场逐渐减弱, y 偏振光入射激励的共振电场逐渐增强. 结合 (5) 式理论分析, 仿真结果表明打孔微扰对本征偏振模式的改变, 是通过增加 y 方向上的本征偏振分量来改变 q-BIC 的本征偏振方向. 当左边的 2 纳米柱也打孔, 孔数增加至 3 孔时, x 和 y 偏振激励的共振电场, 与仅在右边的 1 纳米柱上打单孔结果相当.

3 实验与结果

为了进行实验验证, 我们完成了超表面样品的制备. 制备流程如图 3(a) 所示, 选用尺寸为 20 mm × 20 mm、厚度为 500 μm 的双面抛光石英玻璃基底.

基底依次在丙酮、乙醇和去离子水中进行超声清洗 (各 15 min), 以去除表面有机污染物和颗粒杂质, 使用高纯氮气吹干备用. 首先, 采用物理气相沉积设备 (PVD, 日本 ULVAC 公司 CEBP-101 型) 在其表面沉积 140 nm 厚的 a-Si 薄膜; 接着旋涂电子束抗蚀剂 ZEP520A (日本 ZEON 公司), 并在 180 °C 的热板上烘烤以完成光刻胶固化. 利用高分辨率电子束光刻系统 (EBL, 日本 JEOL 公司 JBX-9500FS 型) 在 100 kV 加速电压与 2 nA 束流下进行纳米柱阵列图案的直写曝光, 随后依次经二甲苯显影、异丙醇定影并干燥; 之后通过电子束蒸发镀膜设备 (EBE, 美国 KURT J. LESKER 公司 Labline PVD 75 型) 蒸镀铬 (Cr) 层, 并通过剥离工艺去除多余光刻胶, 形成图形化的 Cr 掩模; 继而采用感应耦合等离子体干法刻蚀系统 (ICP, 英国 Oxford

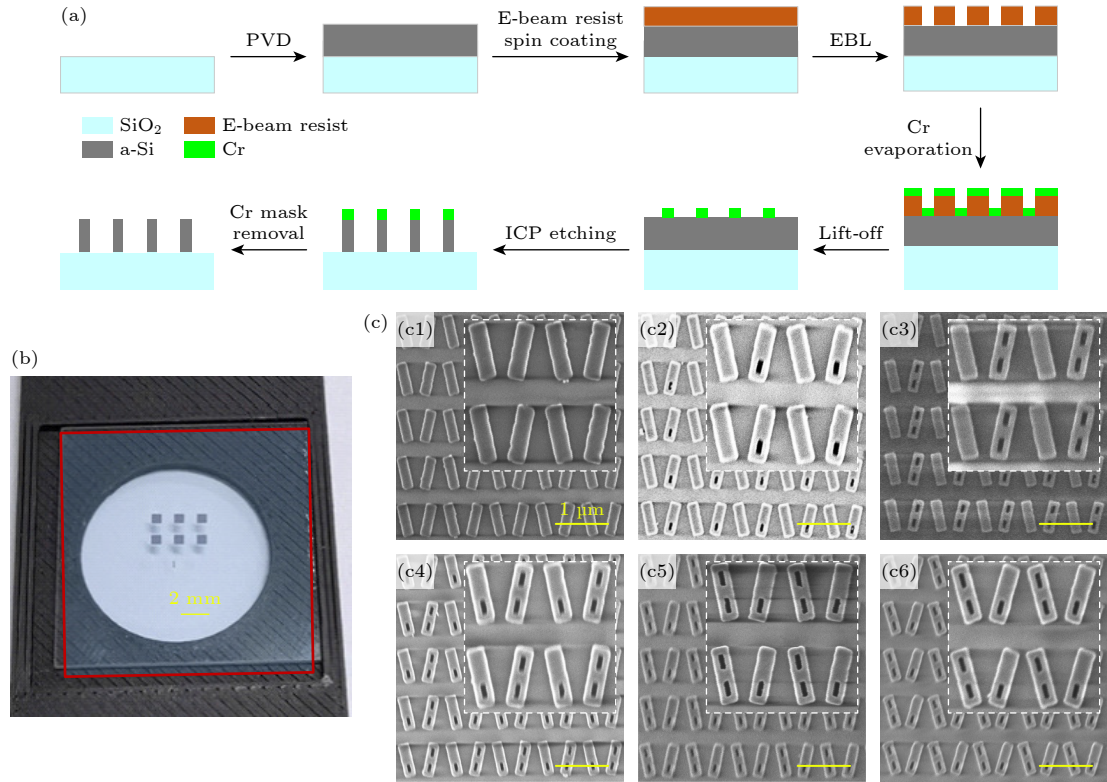


图3 超表面样品制备 (a) 制备流程; (b) 超表面光学图, 比例尺 2 mm; (c) 超表面 SEM 图, 图 (c1)–(c4) 分别为 0 至 3 孔的超表面, 图 (c5) 为左 2 孔/右 1 孔的 3 孔超表面, 图 (c6) 为左 2 孔/右 1 孔的 3 孔超表面, 对称结构破坏角度 θ 扩大到 15° , 所有图的比例尺为 $1 \mu\text{m}$. 每个图在右上角插入了结构放大图

Fig. 3. Fabrication of the metasurface samples: (a) Fabrication process; (b) optical image of the metasurface, scale bar 2 mm; (c) SEM images of the metasurface. Subfigures (c1)–(c4) show metasurfaces with 0 to 3 slots, respectively. Subfigure (c5) shows a 3 slots metasurface with left 2 slots/right 1 slot. Subfigure (c6) shows a 3-slots metasurface with left 2 slots/right 1 slot, with the symmetry-breaking angle θ increased to 15° . Scale bars for all subfigures are $1 \mu\text{m}$. An enlarged structural view is inserted in the upper-right corner of each subfigure.

Instruments 公司 Plasmalab System100-ICP-180 型) 以 $\text{C}_4\text{F}_8/\text{SF}_6$ 混合气体对 a-Si 层进行刻蚀, 将纳米柱结构转移至 a-Si 膜中; 刻蚀完成后在同一 ICP 系统中通过氯基气体工艺去除残留铬掩模, 完成样品加工. 利用场发射扫描电子显微镜 (德国蔡司公司 GeminiSEM 500 型) 对样品表面形貌进行了观测, 超表面样品如图 3(b) 和图 3(c) 所示.

如图 3 所示的 6 个超表面样品, 我们依次可以将 0–3 孔结构阵列分别标记为, 0 孔 (左 0 孔/右 0 孔, $\theta = 12.5^\circ$)、1 孔 (左 0 孔/右 1 孔, $\theta = 12.5^\circ$)、2 孔 (左 0 孔/右 2 孔, $\theta = 12.5^\circ$)、3 孔 1 (左 1 孔/右 2 孔, $\theta = 12.5^\circ$)、3 孔 2 (左 2 孔/右 1 孔, $\theta = 12.5^\circ$)、3 孔 3 (左 2 孔/右 1 孔, $\theta = 15^\circ$).

对超表面样品进行不同偏振入射光的透射光谱测量, 按图 4 所示的装置示意图搭建偏振显微光谱测量实验装置. 光源选用卤钨灯光源, Thorlabs QTH10/M 型, 光源发出的光经透镜 L1 和 L2 和可

调光阑构成缩束准直装置, 对入射光缩束准直后入射到起偏器. 起偏器选用 Thorlabs WP25M-UB1 型超宽带线栅偏振片, 并安装在电动旋转平台上 (thorlabs PRM1), 实现线偏振片的透光轴方向在 $0\text{--}360^\circ$ 范围内可调, 旋转平台的角度重复性 $\pm 0.1^\circ$. 经起偏器后, 线偏振光入射到超表面样品. 超表面透射光采用 20 倍显微物镜 (Mitutoyo IOPAMI 136120X-NIR) 收集后, 再经透镜 L3 成像到光谱仪的光纤端面, 光谱仪为 Avantes AvaSpec-NIR256-1.7 型光栅光谱仪.

本文分别测量了各超表面样品阵列的偏振显微光谱. 起偏器透光轴从 0° 旋转至 360° , 步进 2° , 每个角度下记录透射光谱. 为了很好地显示出不同偏振下, 0 孔、1 孔、2 孔和 3 孔各超表面样品的透射光谱差异, 选择偏振方向 $0^\circ\text{--}180^\circ$, 每间隔 20° 的归一化透射光谱透过率记录入图 5 中. 由图 5 可知, 0 孔、1 孔、2 孔和 3 孔超表面样品的 q-BIC

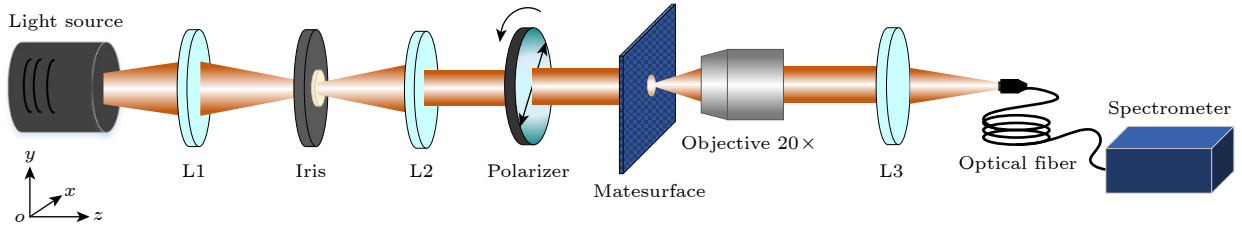


图 4 偏振显微光谱测量实验装置的示意图

Fig. 4. Schematic diagram of the polarized microscopic spectroscopic measurement experimental setup.

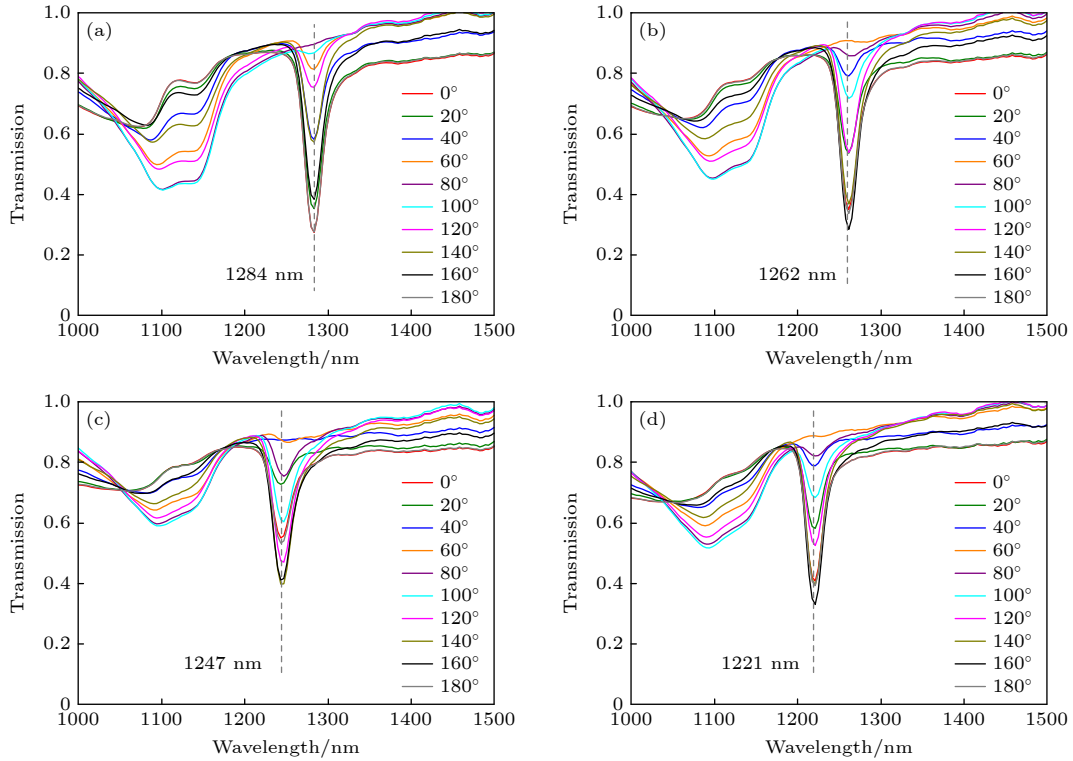


图 5 样品透射光谱测量结果 (a)–(d) 分别为 0 孔、1 孔、2 孔和 3 孔 1 超表面样品的透射光谱图

Fig. 5. Measurement results of the transmission spectra of the metasurface samples: (a)–(d) The transmission spectra of metasurface samples with 0, 1, 2, and 3 slots, respectively.

共振波长不同, 分别为 1284 nm, 1262 nm, 1247 nm 和 1221 nm. 并且每个超表面样品, 在共振波长位置的偏振模式有所区别, 0 孔超表面在 $0^\circ(180^\circ)$ 偏振存在较小透过率, 1 孔、2 孔和 3 孔分别在 160° , 140° 和 160° 偏振存在较小透过率.

在 q-BIC 共振波长位置, 精细记录起偏器透光轴从 0° 旋转至 360° , 步进 2° , 每个偏振角度下透过率, 如图 6 所示. 所有样品都显示出“8 字”形状偏振极化图, 揭示了较强的线偏振本征模式, 并且 0 孔、1 孔、2 孔和 3 孔超表面样品的本征偏振模式方向分别为 0° , 162° , 146° 和 160° . 孔数从 0 增加至 2 孔, 纳米柱 1 电偶极矩减小加剧, y 方向本征偏振分量增强, 使得耦合参数, (4) 式和 (5) 式, 方

向从 0° 顺时针方向偏转. 当在纳米柱 2 上再打一个孔, 使得纳米柱 2 电偶极矩减小时, 3 孔超表面样品的偏振极化与 1 孔接近. 因此, 能够通过打孔位置、数量等参数来实现 q-BIC 本征偏振模式的调控. 为了进一步试验验证, 我们还加工了纳米柱 2 上两孔, 纳米柱 1 上 1 孔的样品, 并且还尝试改变对称结构破坏角度 θ , 样品 3 孔 2 (左 2 孔/右 1 孔, $\theta = 12.5^\circ$) 和 3 孔 3 (左 2 孔/右 1 孔, $\theta = 15^\circ$), 测量的光谱透过率如图 7 所示.

由图 7(a) 和图 7(b) 实验结果能够看出, 两个样品的共振波长均为 1221 nm, 并且均在 20° 左右偏振入射光位置获得较小透射光谱. 图 7(c) 和图 7(d) 显示两个样品的本征线偏振方向均在 20°

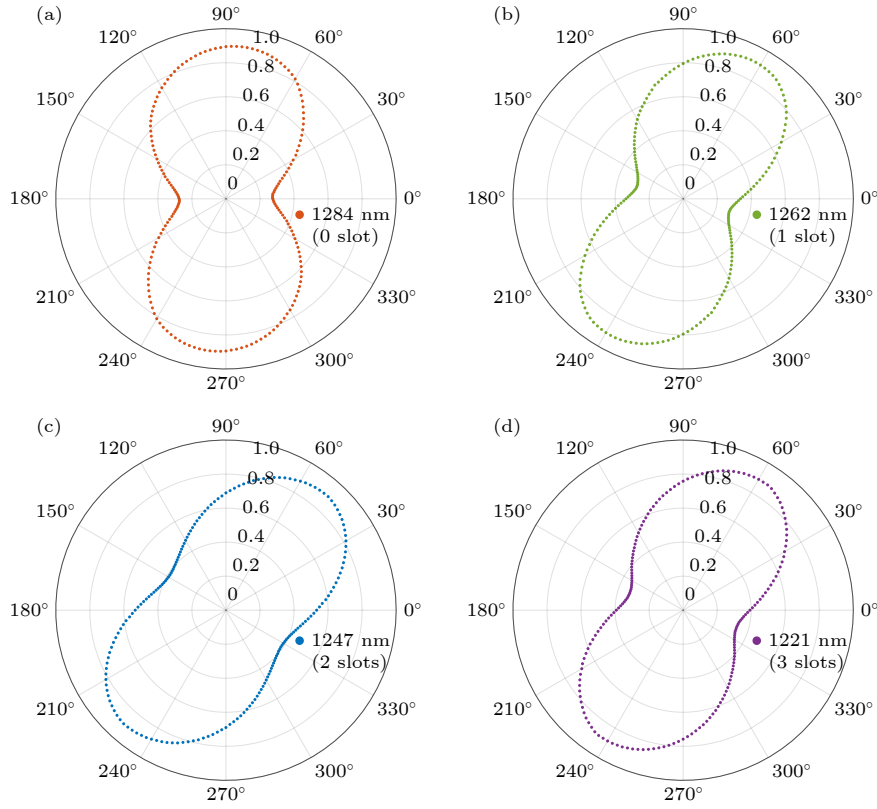


图 6 q-BIC 偏振极化图 (a)–(d) 分别为 0 孔、1 孔、2 孔和 3 孔超表面样品偏振极化图

Fig. 6. Polarization mapping of q-BIC: (a)–(d) The polarization mapping of metasurface samples with 0, 1, 2, and 3 slots, respectively.

方向上. 当对称结构破坏角度 θ 由 12.5° 增加至 15° 时, 能够获得更小的透过率.

偏振显微光谱测量结果, 如图 5—图 7 所示, 显示了不同打孔参数的超表面样品的偏振光谱响应, 并通过 q-BIC 共振波长下的透过率极化图可以获得, 打孔微扰下的超表面样品的本征偏振模式. 将各打孔结构超表面的本征偏振模式透射光谱图实验结果和仿真结果对比分析, 如图 8 所示. 可以看出, 实验结果与仿真结果吻合. 随着打孔数增加, 微扰增大, q-BIC 超表面的本征偏振方向从 0° 顺时针方向偏转, 共振波长发生蓝移. 当超表面打孔参数镜像对称时, 本征偏振方向关于 0° 方向对称, 并且对称结构破坏角度 θ 增加时, 不影响本征偏振模式方向.

4 讨论与结论

本文通过在 q-BIC 超表面的纳米结构单元上打孔, 引入介电常数微扰, 成功实现了对 q-BIC 超表面本征偏振模式的调控, 理论与实验很好的吻合. 但由图 8 实验结果和仿真结果对比, 每个偏振

模式下实验测量的光谱透过率还是略小于仿真结果, 这主要是来源于纳米柱侧壁的刻蚀粗糙度以及通孔尺寸的纳米级精度偏差, 导致了实验与仿真结果之间的细微差异. 此外, 本文引入微扰的孔主要是矩形通孔, 其形状、尺寸与位置的可调控参数仍有一定限制. 根据本文理论与实验结果, 下一步研究将引入更多元的微扰方式, 如椭圆形孔、缺口或材料掺杂, 以更精细、更灵活地操控电偶极矩等模式分量, 完成 q-BIC 超表面的本征偏振精密操控.

本文提出并验证了一种通过在纳米结构单元内部引入矩形通孔微扰, 来实现对 q-BIC 超表面本征偏振模式进行主动调控的新方法. 研究结合耦合模理论与多极子分解分析, 从原理上阐明了微扰通过改变结构单元的局域介电常数分布, 从而调控其电偶极矩分量, 最终实现对本征偏振方向旋转的物理机制. 在此基础上, 我们设计并制备了具有不同打孔数量与排布方式的 a-Si 纳米柱二聚体超表面. 理论分析、仿真结果与实验结果均表明: 随着微扰 (打孔数) 的增加, q-BIC 的本征偏振方向可从 0° 发生顺时针偏转, 同时共振波长发生蓝移; 当

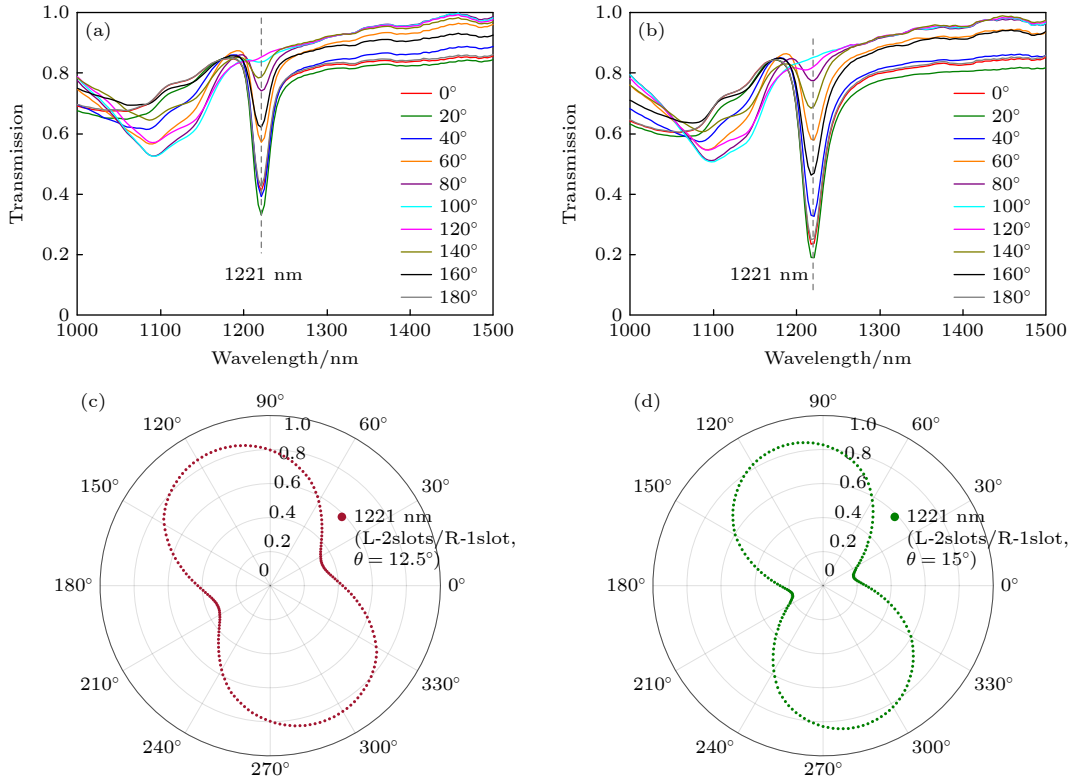


图 7 3 孔偏振光谱图 (a), (b) 分别为 3 孔 2 (左 2 孔/右 1 孔, $\theta = 12.5^\circ$) 和 3 孔 3 (左 2 孔/右 1 孔, $\theta = 15^\circ$) 的透射光谱图; (c), (d) 分别为两个样品在 q-BIC 共振波长位置的偏振极化图

Fig. 7. Polarization spectra of 3-slots structures: (a), (b) The transmission spectra of 3-slots sample 2 (left 2 slots / right 1 slot, $\theta = 12.5^\circ$) and 3-slots sample 3 (left 2 slots / right 1 slot, $\theta = 15^\circ$), respectively; (c), (d) the polarization mapping of the two samples at the resonance wavelength of q-BIC.

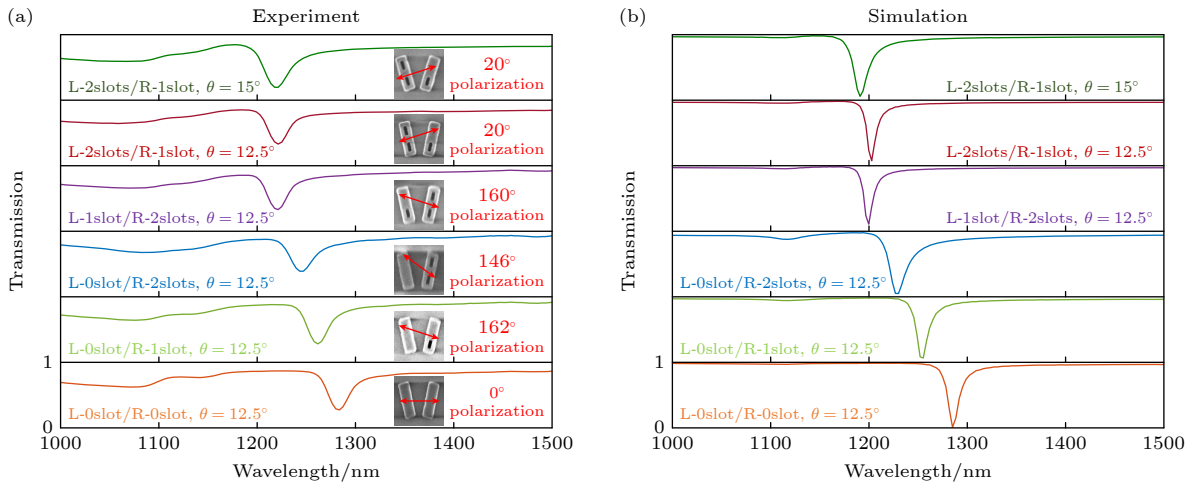


图 8 本征偏振模式透射光谱图 (a) 实验测量结果; (b) 仿真结果

Fig. 8. Transmission spectra of the intrinsic polarization modes: (a) Experimental measurement results; (b) simulation results.

微扰在单元内镜像对称时, 本征偏振方向呈现对称分布. 本文实验结果验证了“结构内微扰”是一种有效且灵活的偏振调控手段. 本研究可为基于 q-BIC 超表面的偏振转换、偏振测量及偏振编码等集成光子器件设计提供新思路, 推动超表面在超紧凑偏振光学与信息处理等前沿领域发挥作用.

参考文献

- [1] Hsu C W, Zhen B, Stone A D, Joannopoulos J D, Soljačić M 2016 *Nat. Rev. Mater.* **1** 16048
- [2] Liang H W, Liu Y Z, Zeng Y J, Cai Y J, Ning T Y 2025 *Chin. Phys. Lett.* **42** 080401
- [3] Koshelev K L, Sadrieva Z F, Shcherbakov A A, Kivshar Yu S, Bogdanov A A 2023 *Phys. Usp.* **66** 494

- [4] Cai Y P, Huang Y, Zhu K Y, Wu H H 2021 *Opt. Lett.* **46** 4049
- [5] Long X L, Yang W Z, Chen Z Q, Xu H, Hou H L, Zhang X J, Dong Y L, He L H 2025 *Acta Phys. Sin.* **74** 197801 (in Chinese) [龙鑫琳, 杨惟智, 陈智全, 许辉, 侯海良, 张小姣, 董玉兰, 贺龙辉 2025 物理学报 **74** 197801]
- [6] Zhou C B, Zhou M M, Fu Z C, He H X, Deng Z L, Xiang H, Chen X S, Lu W, Li G H, Han D Z 2025 *Nano Lett.* **591** 132141
- [7] Berté R, Weber T, Menezes L D, Kühner L, Aigner A, Barkey M, Wendisch F J, Kivshar Y, Tittl A, Maier S A 2023 *Nano Lett.* **23** 2651
- [8] Zhang H, Zhang W, Chen S, Duan P, Li J, Shi L, Zi J, Zhang X 2023 *Adv. Opt. Mater.* **11** 2203118
- [9] Wang D, Xiong A Y, Zhang J Q, She Z D, Kang X F, Zhu Y, Ghosh S, Xiong Q H 2024 *Chin. Phys. B* **33** 128103
- [10] Xia Z S, Liu Y H, Bao Z, Wang L H, Wu B, Wang G, Wang H, Ren X G, Huang Z X 2024 *Acta Phys. Sin.* **73** 178102 (in Chinese) [夏兆生, 刘宇行, 包正, 王丽华, 吴博, 王刚, 王辉, 任信钢, 黄志祥 2024 物理学报 **73** 178102]
- [11] Wang B, Liu W, Zhao M, Wang J, Zi J 2020 *Nat. Photonics* **14** 623
- [12] Koshelev K, Lepeshov S, Liu M K, Bogdanov A, Kivshar Y 2018 *Phys. Rev. Lett.* **121** 193903
- [13] Jahani Y, Arvelo E R, Yesilkoy F, Koshelev K, Cianciaruso C, De Palma M, Kivshar Y, Altug H 2021 *Nat. Commun.* **12** 3246
- [14] Liu Z, Guo T, Tan Q, Sun Y, Fan H, Zhang Z, Jin Y, He S 2023 *Nano Lett.* **23** 8
- [15] Leitis A, Tittl A, Liu M, Bang H L, Altug H 2019 *Sci. Adv.* **5** eaaw2871
- [16] Feng Z, Shi T, Geng G, Li J, Deng Z L, Kivshar Y, Li X 2023 *eLight* **3** 100054
- [17] Qin H, Su Z, Liu M, Zeng Y, Tang M C, Li M, Shi Y, Huang W, Qiu C W, Song Q 2023 *Light Sci. Appl.* **12** 542
- [18] Kühner L, Wendisch F J, Antonov A A, Bürger J, Hüttenhofer L, Smenezes L D, Maier S A, Gorkunov M V, Kivshar Y, Tittl A 2023 *Light Sci. Appl.* **12** 2423
- [19] He H Y, Lai F X, Zhang Y, Zhang X, Tian C Y, Li X, Wang Y T, Xiao S M, Huang L L 2025 *Opto-Electron. Adv.* **8** 250015
- [20] Wu F, Qi X, Qin M B, Luo M, Long Y, Wu J J, Sun Y, Jiang H T, Liu T T, Xiao S Y, Chen H 2024 *Phys. Rev. B* **109** 085436
- [21] Wu F, Wu J J, Guo Z W, Jiang H T, Sun Y, Li Y H, Ren J, Chen H 2019 *Phys. Rev. Appl.* **12** 014028
- [22] Zhou H M, Qin M, Xu H S, Wei G A, Li H J, Gao W Q, Liu J Q, Wu F 2024 *Phys. Rev. B* **109** 125201
- [23] Dong A L, Zhu Y, Wu H S, Wang J R, Qin M, Liu J Q, Wu F, Li H J 2025 *Phys. Rev. B* **111** 075301
- [24] Hu H Y, Lu W Z, Antonov A, Berté R, Maier S A, Tittl A 2024 *Nat. Commun.* **15** 7050
- [25] Weiss T, Mesch M, Schaeferling M, Giessen H, Langbein W, Muljarov E A 2016 *Phys. Rev. Lett.* **116** 237401
- [26] De Dood M J A, Polman A, Zijlstra T, van der Drift E W J M 2002 *J. Appl. Phys.* **92** 649

Intra-meta-atom perturbations for manipulating the intrinsic polarization of q-BIC metasurface*

LI Kewu¹⁾²⁾ LIU Bo¹⁾²⁾ WU Xiaolan¹⁾²⁾ DONG Ye²⁾ WANG Shuang^{2)3)†}

¹⁾ (School of Electrical and Control Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

²⁾ (Shanxi Provincial Engineering Technology Research Center for Optoelectronic Information and Instruments, North University of China, Taiyuan 030051, China)

³⁾ (School of Computer Science and Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China)

(Received 29 December 2025; revised manuscript received 6 February 2026)

Abstract

Quasi-bound states in the continuum (q-BIC) supported by metasurfaces enable resonant modes with ultra-high quality factors, making them promising for nanophotonic applications. Manipulating the polarization of these modes, however, remains challenging. Conventional approaches rely on rotating the meta-atoms or varying their vertical geometry, which complicates fabrication and limits design flexibility. Here, we introduce an alternative strategy: embedding rectangular slots directly within the dielectric meta-atoms. This intra-unit perturbation locally modifies the permittivity distribution, thereby altering the optical response without requiring complex three-dimensional reconfiguration.

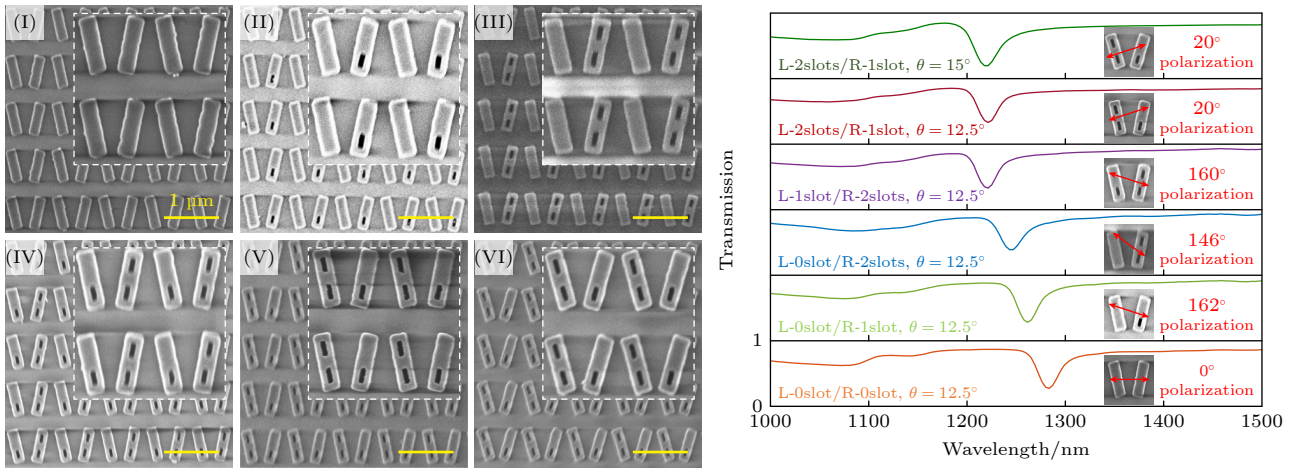
The physical mechanism is analyzed using coupled-mode theory and multipole expansion. The intrinsic polarization direction is shown to be governed by the superposition of electric dipole moments in the dimer unit cell. Introducing slots into a nanorod reduces its effective polarizability, selectively modifying specific components of the dipole moment. As a result, the overall polarization axis can be rotated in a controlled

manner. We experimentally realized this concept using amorphous-silicon nanorod dimers fabricated on quartz. The base q-BIC resonance was excited by rotating the rods by 12.5° to break in-plane symmetry. Through electron-beam lithography and dry etching, we introduced 0 to 3 slots per dimer in various arrangements. Polarization-resolved transmission spectroscopy is performed using a motorized rotating polarizer and a microscope-coupled spectrometer.

Measurements reveal that increasing the number of slots in one rod from 0 to 2 progressively rotates the intrinsic polarization clockwise from 0° , accompanied by a blue shift of the resonance. For instance, samples with 0, 1, and 2 slots exhibited polarization angles of 0° , 162° , and 146° , respectively. When slots are added to both rods to restore approximate intra-unit symmetry (e.g., 3-slot designs), the polarization realigns closer to the unperturbed orientation. These results confirm that slot-based perturbations offer a reliable and lithographically accessible means to independently tailor both the polarization state and the spectral position of q-BIC resonances.

This work demonstrates a straightforward and effective method for polarization engineering in high- Q metasurfaces, opening avenues for designing versatile polarization-sensitive devices such as tunable waveplates, polarimetric sensors, and compact polarization encoders in integrated photonic systems.

Keywords: quasi-bound state in the continuum, metasurface, intrinsic polarization, polarization manipulation



DOI: [10.7498/aps.75.20251777](https://doi.org/10.7498/aps.75.20251777)

CSTR: [32037.14.aps.75.20251777](https://cstr.cn/32037.14.aps.75.20251777)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 62575269, 62205310, 62205309).

† Corresponding author. E-mail: 20200150@muc.edu.cn

纳米结构单元内扰动调控q-BIC超表面的本征偏振

李克武 刘波 吴晓岚 董业 王爽

Intra-meta-atom perturbations for manipulating the intrinsic polarization of q-BIC metasurface

LI Kewu LIU Bo WU Xiaolan DONG Ye WANG Shuang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 75, 090403 (2026) DOI: 10.7498/aps.75.20251777

CSTR: 32037.14.aps.75.20251777

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251777>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

探究四聚体超表面中多极准连续域束缚态的调控机制

Exploring the tuning mechanism of multipolar quasi-continuous domain bound states in tetramer metasurface

物理学报. 2024, 73(10): 107801 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240272>

基于准连续域束缚态的全介质超构表面双参数传感器

All-dielectric metasurface two-parameter sensor based on quasi-bound states in continuum

物理学报. 2024, 73(4): 047802 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231514>

基于准连续域束缚态的强圆二色性超表面

Strong circular dichroism chiral metasurfaces generated by quasi bound state in continuum domain

物理学报. 2024, 73(17): 178102 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240834>

双谐振环金属超表面中的连续域束缚态

Bound states in continuum domain of double resonant ring metal metasurfaces

物理学报. 2024, 73(5): 057801 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231556>

液晶驱动高Q值准连续域束缚态动态调谐

Dynamic tuning of high-Q quasi-bound states in continuum driven by liquid crystal

物理学报. 2025, 74(14): 147801 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250337>

基于矢量焦点超构透镜的偏振结构及高安全性光学加密

Polarization structures generated through metalenses with vectorial foci for high-security optical encryption

物理学报. 2025, 74(17): 174201 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250508>