

光学学报

光子学中连续域束缚态相关的手性现象(特邀)

杜康¹, 曾益轩¹, 欧阳旭¹, 张旭东¹, 肖淑敏^{1,2}, 宋清海^{1,2*}¹哈尔滨工业大学微纳光电信息系统理论与技术工信部重点实验室, 广东 深圳 518055;²鹏城实验室, 广东 深圳 518055

摘要 快速发展的超构表面具有较强的光场操控能力,然而要在该平台实现强手性光学效应始终面临挑战。超构表面中的连续域束缚态(BIC)是一类在辐射连续域内被完全束缚的特殊本征态,它不仅具有更强的光场局域能力,还能带来诸多有趣的物理现象,这为实现最大手性光学响应带来了新的机遇。首先简要回顾了BIC在光子学中的发展过程,随后主要围绕手性BIC的产生及相关特性进行讨论,接着补充介绍了几种与BIC相关的其他光学手性现象,最后针对手性BIC的潜在应用领域和现有挑战进行了总结。光子学中诸多关于手性BIC的最新研究为设计性能卓越的低功耗、小型光电子器件提供了全新的可能途径。

关键词 物理光学; 连续域束缚态; 光学手性; 超构表面; 对称性; 动量空间

中图分类号 O436 **文献标志码** A

DOI: 10.3788/AOS240632

1 引言

在微纳结构中,光与物质的相互作用是实现微型功能光电子器件的基础,也始终是国际前沿研究热点之一。由于在实际过程中器件存在能量泄漏及损耗的问题,研究人员持续关注非厄密光子学,其中被称为奇异点(EP)的特殊光学简并态已成为该方向的研究核心^[1]。在EP上的模式具有完全相同的动量和能量,并且会造成希尔伯特解空间的不完备性^[2]。近年来,几乎所有在微纳光学领域中进行的物理机制研究都围绕EP展开,包括模式的强耦合、宇称时间对称、几何相位、非对称散射的手性场,以及连续域束缚态(BIC)等诸多热门研究方向。这些不寻常的物理机制和现象将为量子计算、先进材料以及低功耗光电子设备等领域的发展注入新的活力。

本文主要关注BIC这一特殊模式,其概念来自量子力学,最初由 von Neumann 和 Wigner 于 1929 年提出,他们发现了满足薛定谔方程的一类特殊解,即在辐射连续谱中也存在具有零线宽和正能量特性的空间局域电子态^[3]。在理论上BIC是波动方程的非辐射解,可以普遍存在于声学、流体等各类波动系统中,但直到2008年,这一物理概念才被 Marinica 等^[4]引入光学领域中。随后,Plotnik 等^[5]利用单模光波导一维阵

列实现了BIC模式的实验观测,他们利用增加温差引起的折射率梯度打破了结构对称性,从而使波导中偶对称的束缚态扩散到奇对称的连续域中。2013年,麻省理工的Hsu等^[6]通过实验观察到了周期性光子晶体平板(PCS)中的光学BIC,由此引发了研究者对平面人工微纳结构中BIC模式更深入的探索。例如,该团队在2014年就深入挖掘了PCS中稳健BIC的拓扑性质,指出其为远场辐射的偏振涡旋中心^[7]。相关的实验观测也于2018年由两个团队分别在一维光栅^[8]和二维等离激元周期结构^[9]中实现。由此可见,光学BIC模式不仅在实空间具有限制光场并提升共振Q值的能力,还在动量空间具有丰富的偏振拓扑特性。通过调整模场间的相互作用,人们可以依托BIC实现对光场的分布、偏振、发射性能的精确控制。近十年来,得益于设计自由度高且易于加工的超构表面平台,光学BIC已经作为一种光场调控的新方法取得了飞速发展。

人工纳米材料可以提供远超自然材料的手性光学响应,所涉及的复杂物理机制在近些年获得了广泛关注^[10-12]。尽管在线偏振光和平面对称结构约束下,超构表面的圆偏振波前转换效率受到理论限制^[13-14],但光学BIC的动量空间特性为优化手性超构表面的手性光学响应提供了新的理论支撑和设计方法。理想的

收稿日期: 2024-02-08; 修回日期: 2024-03-25; 录用日期: 2024-03-29; 网络首发日期: 2024-04-12

基金项目: 国家自然科学基金(12334016, 12025402, 12261131500, 11934012, 12304416, 12304414)、中央高校基本科研业务费专项(2022FRRK030004)、深圳市基础研究专项(JCYJ20210324120402006, JCYJ20200109112805990)、深圳市高等院校稳定支持计划(GXWD20220817145518001)

通信作者: *qinghai.song@hit.edu.cn

BIC 模式与自由空间完全解耦,通过打破对称性使其动量空间拓扑荷劈裂形成圆偏振态,并同时精确控制本征态与自由空间的辐射耦合过程,由此可实现手性光学响应的最大化。2020 年前后,来自俄罗斯科学院^[15-16]及纽约市立大学^[17]的两个研究团队分别采用具有垂直偏移量的条形二聚体阵列及双层超构表面系统,各自独立地证实了具有高 Q 值的准 BIC (Quasi-BIC) 共振能够对圆偏振光实现高效波前整形,使超构表面的手性光学响应最大化。上述两项研究均采用了具有双调节参数的周期性超构表面体系,并且通过两个调节参数的相互配合可轻松破坏结构面内及面外的对称性,从而将理想的 BIC (Q 值无限大) 转变为手性准 BIC (Chiral quasi-BIC, Q 值有限)。由此看来,常被忽略的超构表面纵向维度特性(尤其是对称性)是影响其与圆偏振光相互作用的关键参数^[18]。然而受限于多层超构表面的制备工艺,相应的光学频段实验测试并不顺利,直到 2022 年,本团队采用倾斜刻蚀方案解决了面外对称性的难题,并在可见光段实现了手性准 BIC 的观测^[19-20]。

在过去的十几年里,BIC 已经在多种光子结构中得到了证实,并在超构表面平台中引发了许多奇妙现象。在实空间和动量空间深入探索 BIC 的基本物理机制,其相关应用的研究也迅速发展,同时也有许多高质量的综述文章^[21-28]对该领域的基础理论^[21-23]和应用进展^[24-25]做了全面梳理。本文首先简述 BIC 的分类及特性,引出手性准 BIC (后文简称手性 BIC) 的概念;随后围绕本团队近些年的代表性工作,着重梳理手性 BIC 的应用及其他与 BIC 相关的手性现象;最后针对该领域的现有挑战和潜在应用进行讨论。

2 BIC 的基础知识

BIC 的概念从提出至今已近百年,有相对完整的基础理论和物理特性研究,许多综述也就此进行过详细梳理。因此,本节只简要介绍 BIC 的概念和特性,更加详尽的概念发展历史^[27]、理论体系描述^[21-23,27]和特性分析^[24-27]可参见本文所列的相关参考文献。

2.1 BIC 的分类及基础理论

理论上,BIC 可以在任意波动系统中出现,其频率在连续谱之内,却不产生辐射泄漏,具有无限大的 Q 值。如图 1(a) 所示,Koshelev 等^[27]将具有 z 方向平移对称性的一维量子阱与平行平板波导系统相对应,在量子力学与光子学系统中形象地类比了 BIC 的出现区域。

由于理想的 BIC 与远场辐射连续域完全解耦,因此通常会根据产生 BIC 的解耦方式对其进行分类^[21],包括一类由辐射模式对称性失配形成的对称保护 BIC 以及一类源于有限辐射通道干涉相消的调参 BIC (或称为偶发 BIC)。其中,后者又可根据辐射通道类型分为 Fabry-Pérot BIC、Friedrich-Wintgen BIC

和单共振 BIC 三种,分别对应于不同位置的两个共振相干相消、同一位置的两个共振相干相消和单一共振中不同波的相干相消三种情形。上述各类 BIC 之间的相互关系整理在图 1(b) 中。然而,这样的归类机制也存在争议,因为在某些情况下对称保护 BIC 也可以用于干涉相消的方式来描述^[24,29]。目前主要采用的理论解释包括时域耦合模理论^[30]、多极子理论^[31]和能带理论模型^[32]等。

以具有二维周期性结构的 PCS 为例,图 1(c) 展示了对称保护 BIC 和调参 BIC 在光子能带图中出现的位置,以及在实际实验观测时入射角和共振 Q 值的依赖关系^[6,21]。需要说明,理想的 BIC 一般仅会出现在至少具有一个无限维度的周期性光子结构中,而独立的亚波长共振体受限于非零且有限的介电常数,只能通过调参方式构造有限高 Q 值的准 BIC 模式^[33-35]。对于光学 BIC 来说,电磁场的矢量特性和周期光子结构的丰富对称性使其拥有更加多样化的物理现象。

2.2 准 BIC 及手性 BIC

尽管理想的 BIC 具有无限高 Q 值和零辐射衰减速率,但其仍然是嵌入连续谱中的一类特殊泄漏模式^[36]。在实际应用中,一方面激发并观测不向外场辐射的暗态 BIC 极具挑战^[37],另一方面存在一些不可避免的有限结构单元、加工误差以及材料吸收等因素,改变 BIC 辐射特性,使其与外场发生耦合,从而转变为具有有限 Q 值的 Fano 共振^[35,38],即准 BIC,如图 2(a) 所示。通过破坏单元结构对称性等方式^[39-40]来有意图地设计超构表面参数,因此实际光子器件中准 BIC 模式的 Q 值依然可以很高^[41-42],且该准 BIC 模式具有极强的光场束缚能力,可被广泛地用于增强光与物质相互作用的场景。准 BIC 模式不仅可以在独立的开放式光学微腔、纳腔中构建^[33],还会为周期性光子结构带来很多有趣的物理现象^[7]。

在一维光栅、二维 PCS 等周期性光子结构中,每个 BIC (包括对称保护 BIC 和调参 BIC) 都与其动量空间中的偏振涡旋相关,可以被归为一类携带整数拓扑电荷的偏振奇点^[7]。对于同一个周期性光子结构所支持的多个 BIC 模式,在总拓扑电荷守恒的前提下可通过结构参数调整实现动量空间中 BIC 的合并与分裂。其中,BIC 的合并常被用于提升共振 Q 值和稳健性^[43-47],而 BIC 的分裂为偏振控制(尤其是圆偏振光波前调控)提供了新的方式^[48-52]。

对于周期性光子结构中的对称保护 BIC,可以通过打破面内或面外对称性的方法将其变为准 BIC,此时动量空间中 Γ 点的涡旋偏振奇点 (V 点) 会消失,并伴随产生一对临近 Γ 点的圆偏振态 (C 点)^[48]。不过 C 点的产生并不都源于对称保护 BIC,例如在蜂窝状 PCS 中,在 K 点附近通过参数调节所产生的 C 点对^[49]。引入结构手性扰动,可以将 Γ 点的对称保护 BIC 诱导

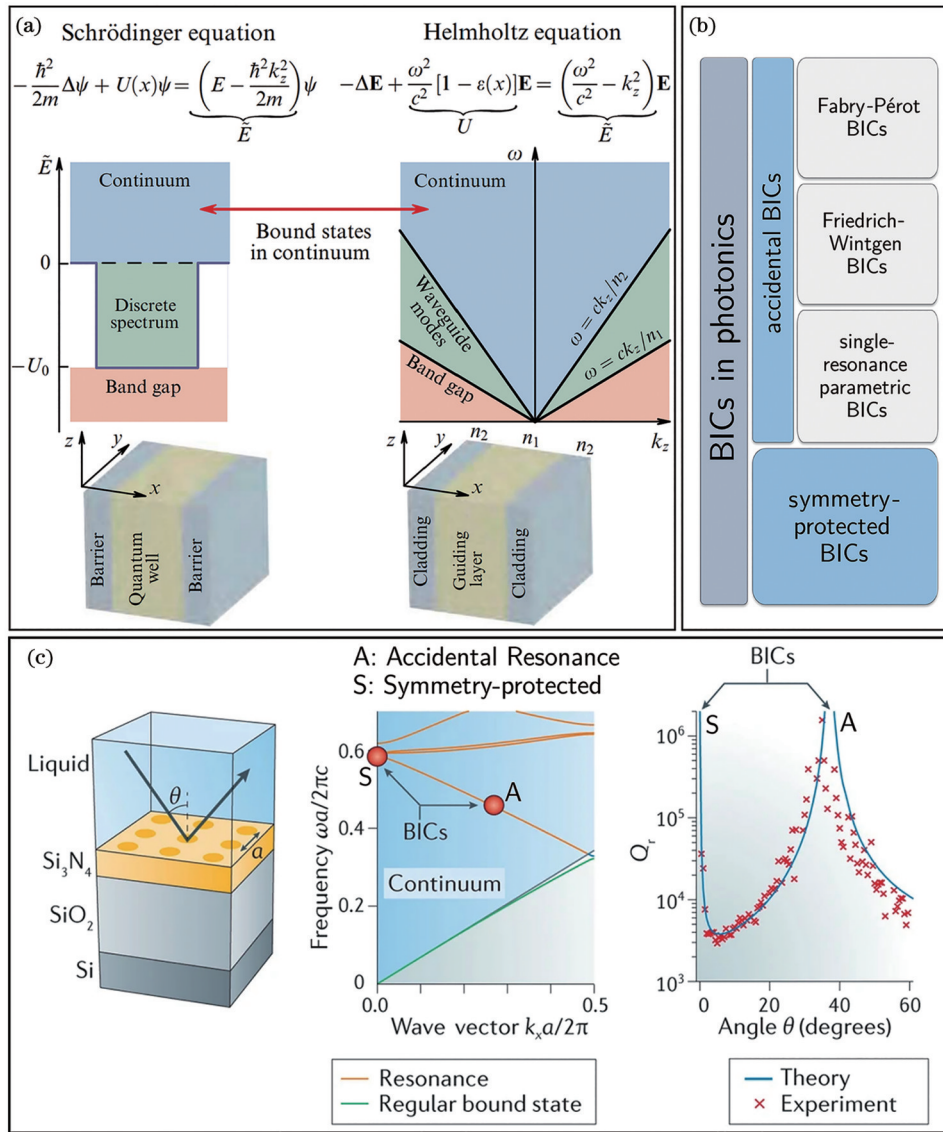


图 1 BIC 的概念及分类。(a)一维量子阱和平面介质波导中的 BIC 对照^[27];(b)光子学中的 BIC 分类关系图;(c) PCS 中的对称保护 BIC 和偶发 BIC^[21]

Fig. 1 Concept and classification of BIC. (a) Correspondence between BIC in one-dimensional quantum well and planar dielectric waveguide^[27]; (b) diagram for classification of BIC in photonics; (c) symmetry-protected BIC and accidental BIC in PCS^[21]

为手性 BIC,这不仅有 助于实现任意椭圆偏振态^[17],还可以让人工微纳结构的手性光学响应最大化^[15]。手性 BIC 的概念并无严格定义,只是在最初提出时特指可产生内禀手性 (Intrinsic chirality) 的案例^[15,17],如图 2(b)所示,但随着研究的扩展与深入,许多产生外禀手性 (Extrinsic chirality) 的案例也采用了该名词,因此本文也不再严格区分。

3 手性 BIC 的实现

手性是普遍存在于自然界的一种几何特性,小至亚分子尺度,大至宇宙星系尺度,都可以找到与其镜像不能重合的物体,在自然科学中具有至关重要的地位^[53]。对于常见的天然材料来说,其内禀手性很弱,通常依据其与不同手性电磁场之间的不同相互作用来进行定量评估,如最常见的一类电磁手性,圆二色性

(CD)^[10-11]。早期利用人工手性结构来增强手性光与物质相互作用的研究常涉及到金属三维纳米结构^[54-60]和平面万字型结构^[61]等。在研究中,人们发现除了手性结构自身引起的 CD 信号外,通过给不具有两重旋转对称性的超构表面引入斜入射测量条件,该表面也可以表现出强烈的 CD 信号,被称为外禀手性^[62-63]。一般情况下,需要在垂直入射条件下测量人工纳米结构的内禀手性,以免受到无法分辨的外禀手性信号的影响^[64-65]。这两类起源不同的手性信号都可以有效地应用于偏振转换器件领域^[64],但在手性发射、手性激光以及偏振光探测等领域中,具有显著内禀手性的超构表面更具优势^[19-20]。

最近,人们在周期性光子结构中发现了远场手性与准 BIC 之间的关系^[48-50]。如图 3 所示,通过打破结构对称性可以在 PCS 上实现手性 BIC,该过程更清晰地

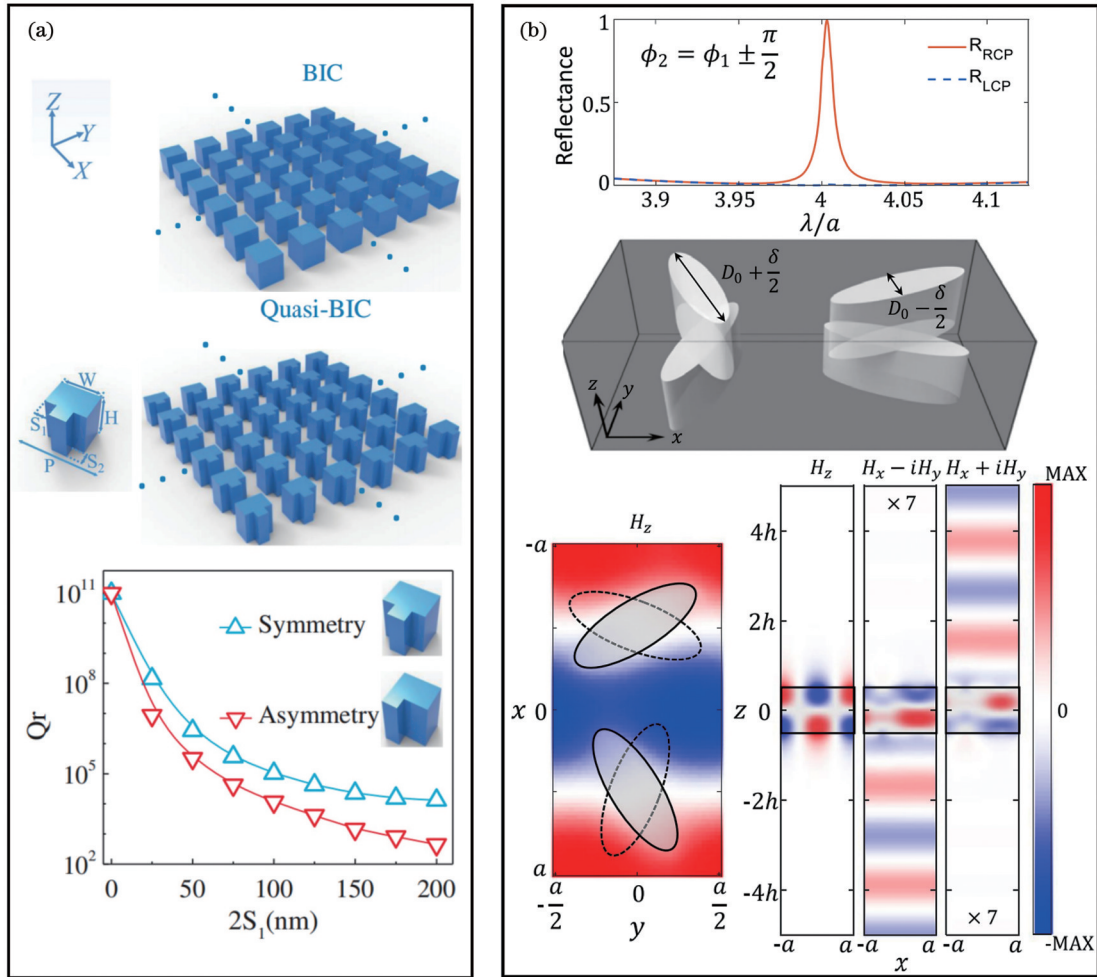


图 2 准 BIC 和手性 BIC。(a) 从 BIC 转变为准 BIC^[41], 支持 BIC 的周期 Mie 共振结构(上), 支持准 BIC 的 $N \times N$ 对称缺陷周期结构(中), 准 BIC 本征模式 Q 值与面内对称性破缺程度的关系(下); (b) 手性准 BIC 示意图^[17], 在共振处具有完全 CD 的器件光谱示意图(上), 具有可调手性微扰单元的结构示意图(中), 磁场分量受到扰动时, 束缚态对右旋圆偏振光发生泄漏(下)

Fig. 2 Quasi-BIC and chiral BIC. (a) Transition from BIC to quasi-BIC^[41], periodic Mie resonance structures supporting BIC (upper), $N \times N$ periodic structure with symmetric defects that supports quasi-BIC (center), relationship between Q-value of quasi-BIC eigenmodes and degrees of in-plane symmetry breaking (lower); (b) schematic diagram of chiral quasi-BIC^[17], spectral diagram of device with full CD at resonance (upper), schematic diagram of structure with adjustable chiral perturbation units (center), bound state leaks out of right-handed circularly polarized light, when magnetic field component is disturbed (lower)

展现出外禀手性和内禀手性的差异。在图 3(a)~(c)中, 上图为俯视图, xy 截面; 下图为侧视图, xz 截面。图 3(b)、(e) 具有外禀手性, 图 3(c)、(f) 具有内禀手性。例如, 当仅打破 PCS 的面内结构对称性时, 临近 Γ 点的圆偏振态 C 点就会从 BIC 中衍生出来, 并在斜入射条件下表现出外禀手性。若要进一步实现内禀手性响应, 就必须引入面外对称性扰动, 进一步将 C 点调整回 Γ 点。此时的手性 BIC 不仅具有高 Q 值, 更是在垂直入射条件下具有完全的圆偏振耦合选择性, 非常有利于增强手性光与物质的相互作用^[15-17, 19-20, 66-68]。本节将按照超构表面对称性破缺的维度对近些年与手性 BIC 相关的研究工作进行重点介绍和比较。

3.1 单一对称性破缺

通过打破超构表面结构的对称性来构建 C 点是获得手性 BIC 最常用的方法, 其中最直观且最容易实现

的就是破坏面内的 C_2 对称性。2019 年, 复旦大学的资剑团队通过打破方孔阵列的面内 C_2 对称性, 消除了 Γ 点 BIC 并在其附近产生了具有相反手性的成对 C 点, 如图 4(a)、(b) 所示^[48]。他们借助圆偏振入射的角分辨透射光谱对该现象进行了实验验证, 其中打破面内 C_2 对称性的样品可在非垂直入射条件下获得最大外禀手性(指相反圆偏振透过率差异最大)。随后, Yoda 和 Notomi^[50] 在满足面内 C_6 对称性的蜂窝状 PCS 中讨论了 Γ 点高阶 BIC(拓扑电荷 $q = -2$) 随对称性破缺的偏振拓扑演化过程, 当用等边三角形孔替代圆形孔时, 面内 C_2 对称性被破坏(C_3 对称性保留), Γ 点 BIC 拓扑电荷变为 +1 的同时, 会在其附近出现 6 个 C 点($q = -1/2$, 左、右旋 C 点各 3 个)。

2021 年, 同济大学的江海涛团队直接通过改变入射波与非对称双开口谐振环超构表面的相对倾斜角,

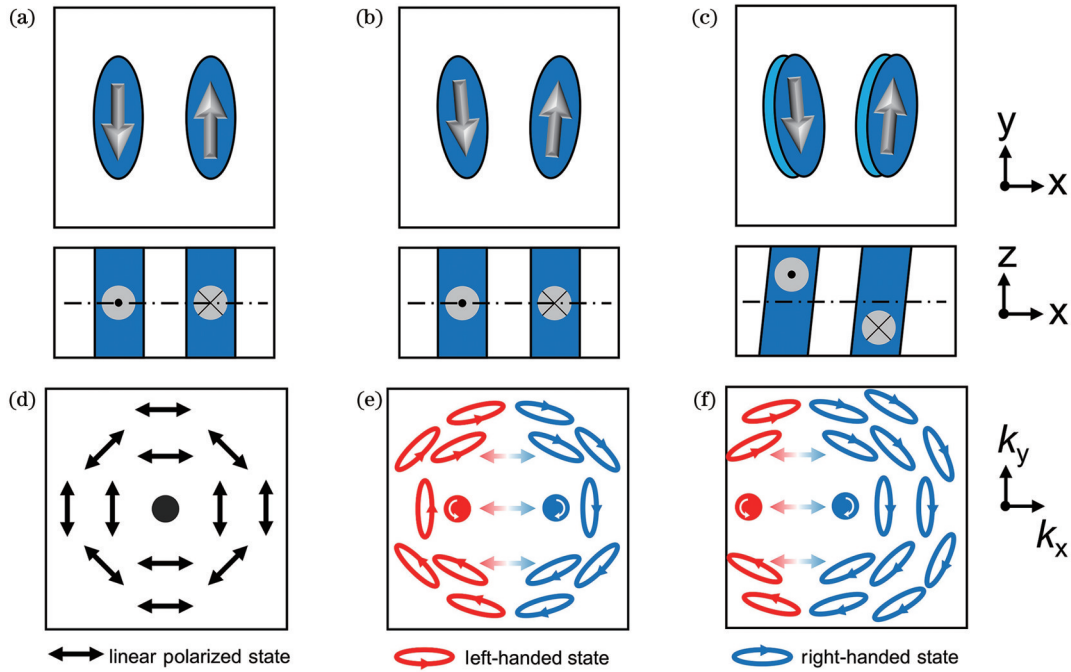


图 3 由 BIC 到手性 BIC。(a)~(c)PCS 单元对称结构、面内对称性破缺结构、面内及面外对称性破缺结构示意图；(d)~(f)与(a)~(c)结构对应的动量空间 C 点演化示意图

Fig. 3 Transition from BIC to chiral BIC. (a)~(c) Schematic diagram of PCS unit symmetry structure, in-plane symmetry breaking structure, in-plane and out of plane symmetry breaking structure;(d)~(f) schematic diagram of evolution of C point over momentum space corresponding to structures (a)~(c)

实现了对不同圆偏振光透过率及 CD 符号的任意控制,并在微波频段的准 BIC 共振处具有 ± 0.85 CD 极值的外禀手性响应^[69]。在类似的立体双开口谐振环阵列中添加金属背底,并通过合理的参数设计,就可以在准 BIC 诱导的严格耦合区内实现近乎完美的选择性圆偏振吸收^[70]。若进一步同时打破超构表面的面内反转对称性和镜面对称性,在特定结构参数下可表现出较强的手性准 BIC,从而产生高 Q 值共振的同时获得接近 1 的 CD 信号^[71]。这类类似于早期利用平面手性超构表面实现巨大内禀手性响应的研究^[72-74],其中由结构各向异性诱导的偏振转换会对超构表面的光学手性效应有显著贡献^[65]。随后在 2022 年,暨南大学的李向平团队通过理论和实验详细探究了如何在支持 BIC 的平面手性超构表面中获得最大的手性光学响应^[75]。他们提出了两种途径来优化手性:一是改变入射角以获得最大的外禀手性响应;二是优化结构不对称系数以便将 C 点调制到 Γ 点,从而获得最大的内禀手性响应。在垂直入射的条件下,他们实验测得表现最优的样品具有高达 0.93 的线性 CD 值以及高达 0.81 的三阶非线性 CD 值。

除了打破面内对称性外,上下对称性(面外对称性)的破缺也可用来构建手性 BIC。早在 2019 年,在参考文献[48]的支撑材料中就提到通过添加基底或倾斜孔洞侧壁的方式就可打破结构的上下镜面对称性,该行为不会造成 Γ 点 BIC 的分裂,但会使非 Γ 点 BIC

分裂为两个 C 点。与此同时,北京大学的彭超团队在实验上证实了该现象,如图 4(c)、(d)所示,他们在具有倾斜侧壁的一维 PCS 中观察到了非 Γ 点 BIC 分裂为两个具有半整数拓扑电荷的 C 点,并且在这对 C 点再次相遇时会出现单侧辐射的导模共振态^[52]。2021 年,新加坡国立大学的仇成伟团队在两个错位叠层的介质光栅体系中详细展示了从 0 拓扑电荷出发实现的两对 C 点的完整演化过程,该体系虽然具有反转对称性,但通过改变错位参数可破坏其上下镜面对称性,由此两次实现了 C 点的合并与分裂,对应产生了两个单向辐射的谐振模式和 Γ 点的偶发 BIC^[51]。

实现手性 BIC 是为了更好地设计和优化光子系统的手性光学效应,而仅打破单一维度对称性所产生的 C 点通常不会位于 Γ 点,这意味着系统的手性响应会与特定的入射方向紧密关联。采用更为复杂的平面手性结构可拓宽系统自由度,从而利用更多参数将非 Γ 点的 C 点精细调控至 Γ 点,以此获得垂直入射条件下的最大内禀手性。该方案一方面增加了设计复杂度,另一方面还引起了有关偏振转换诱导手性的讨论^[12,16,20]。还有研究揭示了斯托克斯参数与 CD 之间的关系,并指出一个具有本征(几何)手性的结构可能完全不表现出光学手性,甚至在不同入射方向上表现出相反的光学手性^[76]。因此,在避免使用平面手性结构的前提下,急需提出一种可以在周期性光子结构 Γ 点获得 C 点的简单通用方案,这就需要同时打破面内

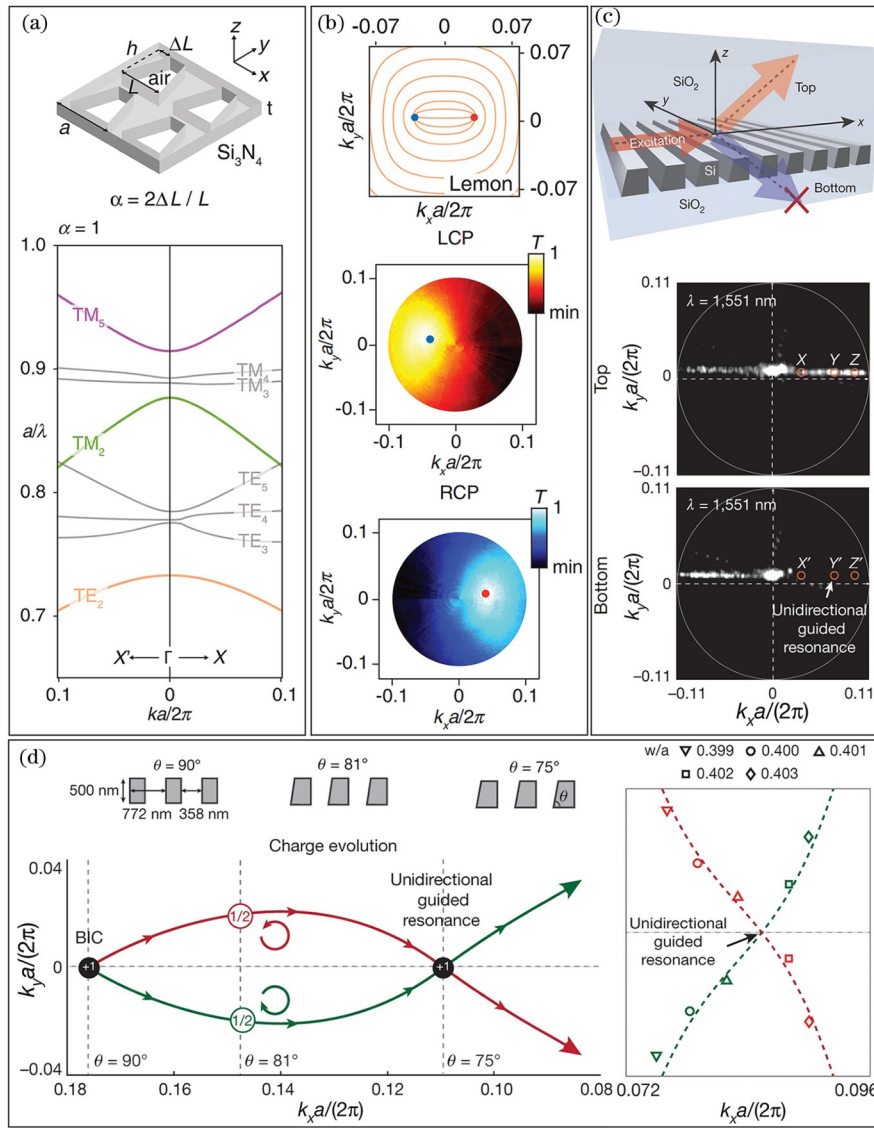


图 4 一维对称性破缺诱导的手性 BIC。(a) 面内对称性破缺诱导手性 BIC^[48], 结构示意图(上), 对应结构能带图(下); (b) 与(a)中 TE₂ 模式对应的动量空间偏振主轴图^[48](上), 及沿 TE₂ 的可见光透过率庞加莱球实验观测图^[48](中和下); (c) 面外对称性破缺诱导手性 BIC^[52], PCS 支持的单向导模共振示意图(上), 1551 nm 共振处的上、下辐射强度(下); (d) 当(c)中结构倾斜角 θ 变化时两个半整数拓扑电荷在动量空间的轨迹^[52](左), 五种样品的半整数拓扑电荷实验测量轨迹^[52](右)

Fig. 4 Chiral BIC induced by breaking one-dimensional symmetry. (a) Chiral BIC induced by breaking in-plane symmetry^[48], schematic diagram of structure (upper), corresponding structural band diagram (lower); (b) momentum space polarization main axis diagram corresponding to TE₂ mode in (a)^[48] (upper), and experimental observation diagram of Poincaré sphere presented by visible transmittance along TE₂^[48] (center and lower); (c) chiral BIC induced by breaking out-of-plane symmetry^[52], schematic diagram of PCS supporting unidirectional guided resonance (upper), upward and downward radiation intensities from resonances at 1551 nm (lower); (d) trajectories of two half-integer charges in momentum space as θ of structure in (c) is varied^[52] (left), experimental measurement trajectories of half-integer charges from five samples^[52] (right)

及面外对称性。

3.2 完全对称性破缺

2020年初, 斯坦福大学的 Dionne 团队借助具有内禀三维手性的高 Q 值介质超构表面, 实现了一种既能作为相干光源又能作为自身光隔离器的单一器件, 其表现出对正交圆偏振光的自旋选择透射性^[66]。随后, 纽约市立大学的 Alù 团队为了实现 Fano 共振下更为灵活的偏振态及相位控制, 在紧密堆叠的双层椭圆柱

超构表面中引入手性扰动, 并由此来改变器件的本征偏振态^[17]。当圆偏振为本征偏振态时, 该器件所支持的本征圆偏振态将被完全反射, 而仅会使与本征圆偏振态正交的另一圆偏振光透过。几乎在同一时间, 俄罗斯科学院的研究团队在具有旋转对称性的手性超构表面中获得了光学手性响应最大的尖锐共振, 其源自对 BIC 模式的精确塑造^[15]。可以看出, 讨论手性 BIC

的三篇理论性文章都点明了器件所具有的圆偏振光选择性,而实现该功能的关键在于打破结构的所有镜面对称性。此外,香港城市大学的蔡定平团队还在缺乏对称性的三维等离子激元超构表面中也获得了具有大 CD 值的高 Q 值手性 BIC 共振^[68]。

由于最初的手性 BIC 器件总会涉及双层超构表面或三维立体结构,这就对制备工艺提出了严峻挑战,尤其限制了可见光范围的实验可行性。因此,在微波频段,Gorkunov 等^[15]优化了他们的原始设计,利

用缺乏任意点对称性的矩形条对作为单元,构建了微波陶瓷超构表面,并在微波暗室中验证了不存在偏振转换的样品,其具有最大手性^[16]。2022 年,本团队联合仇成伟团队改进了样品设计,将纳米结构纵向倾斜角度作为变量引入系统,避免了使用复杂的双层结构设计,同时结合倾斜反应离子刻蚀工艺成功制备了手性 BIC 超构表面,突破了在可见光范围内的实验^[20]。如图 5(a) 所示,通过引入并协同设计面内和面外扰动,可以使 BIC 的 V 点分裂为一对 C 点,并将其中的

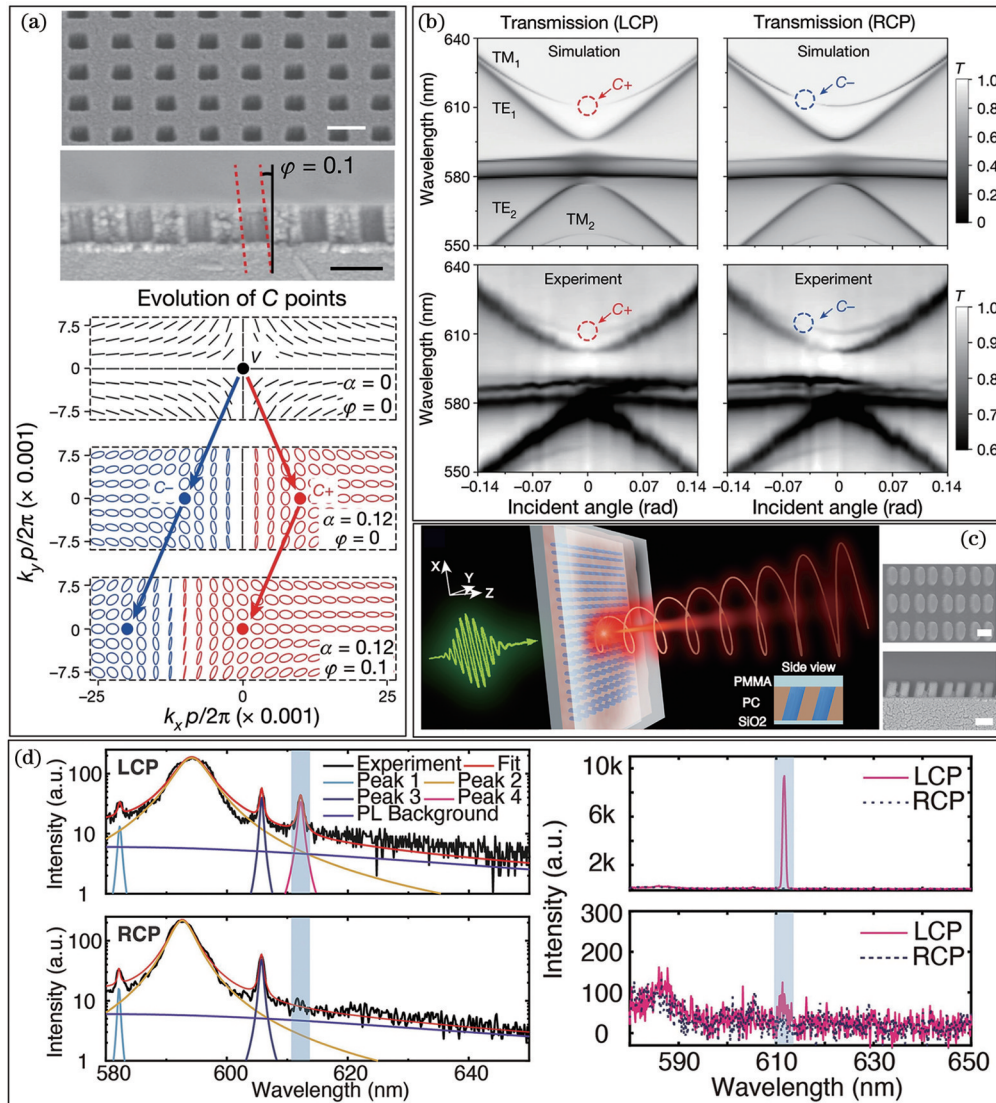


图 5 完全对称性破缺结构诱导的手性 BIC。(a) 内禀手性超构表面的设计和制备^[20],超构表面的扫描电镜(SEM)图,比例尺为 300 nm(上),不同结构参数下的动量空间 C 点演化过程(下);(b) 内禀手性超构表面的实验表征,LCP 和 RCP 入射的超构表面角分辨透射谱^[20];(c) 共振超构表面的手性光辐射^[19],纳米结构示意图(左),超构表面的 SEM 图,比例尺为 200 nm(右);(d) 正向手性荧光辐射光谱^[19](左),正向手性激光辐射光谱^[19],泵浦能量密度为 58.9 mJ/cm²(右上)和 16.5 mJ/cm²(右下)

Fig. 5 Chiral BIC induced by complete symmetry breaking structure. (a) Design and fabrication metasurfaces with intrinsic chirality^[20], scanning electron microscope (SEM) images of metasurface, scale bar is 300 nm (upper), evolution of C points over momentum space for metasurfaces of different structural parameters (lower); (b) experimental characterization of metasurfaces with intrinsic chirality, angle-resolved transmission spectra of metasurface under LCP (left) and RCP (right) incidence^[20]; (c) chiral emission from resonant metasurfaces^[19], schematic diagram of nanostructures (left), SEM images of metasurface, scale bar is 200 nm (right); (d) spectra of chiral emissions in normal directions (left), chiral laser radiation spectra in normal direction, pumping densities are 58.9 mJ/cm² (upper right) and 16.5 mJ/cm² (lower right)

一个 C 点移动至 Γ 点,从而使样品获得内禀手性。如图 5(b)所示,在左旋及右旋圆偏振光(LCP和RCP)入射的超构表面角分辨透射谱中,观察到了具有内禀手性的 BIC,与之对应的是高达 0.93 的 CD 值和高达 2663 的共振 Q 值^[20]。可以看出, Γ 点处的 C 点兼具大手性和高 Q 值的特点,十分有利于实现高纯度的手性光辐射。如图 5(c)、(d)所示,将掺杂 DCM[2-methyl-6-(4-dimethylaminostyryl)-4H-pyran] 染料的 PC (Polycarbonate) 薄膜与具有内禀手性的 BIC 超构表面相结合,利用位于 Γ 点处 C 点极高的局域态密度实现了无自旋注入的手性激光,所对应的偏振度为 0.989 ± 0.02 ,而远场发散角为 1.06° ^[19]。由于该手性光源是通过控制动量空间中的 C 点与局域态密度来实现的,因此无论泵浦功率大小,所实现的手性自发辐射和手性

激光都具有高纯度、高 Q 值与高方向性的特点。

近期还有一些工作就实现手性 BIC 提出了打破面外对称性的不同实验方案。如图 6(a)、(b)所示,韩国蔚山科学技术院的 Jun 团队提出利用灰度电子束刻蚀技术来控制透明玻璃的刻蚀深度,从而制备具有面外对称性破缺的图案化基底^[67]。随后通过给基底旋涂有机-无机混合钙钛矿,在垂直方向上实现了高纯度的手性光辐射。2023 年,德国慕尼黑大学的 Tittl 团队将多次电子束刻蚀和多次沉积工艺相结合,制备了可控制单一共振体高度的介质超构表面,由此打破了器件的面外对称性,并实现了基于 BIC 的最大内禀手性响应,如图 6(c)、(d)所示^[77]。与倾斜刻蚀工艺相比,通过控制单一共振体的高度来打破面外对称性的实验制备方案还是显得较为繁杂,但其可寻址化定制空间也更大。

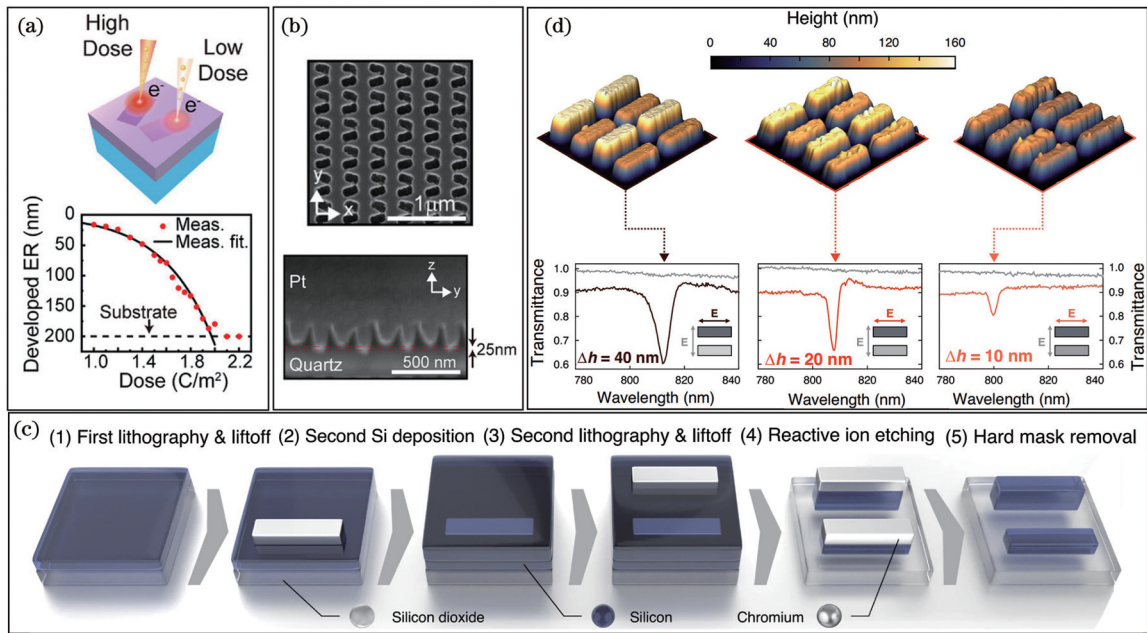


图 6 打破面外对称性的实验方法。(a)灰度电子束刻蚀技术与样品制备^[67],灰度电子束刻蚀制备不同高度样品示意图(上),电子束曝光剂量与抗蚀剂深度的关系(下);(b)显影后的电子束光刻胶的 SEM 图^[67](上),刻蚀玻璃基底截面 SEM 图^[67](下);(c)多种高度超构表面^[77]的制备流程示意图;(d)多种高度超构表面样品的 SEM 图^[77](上),透射光谱随样品不对称高度差的变化^[77](下)

Fig. 6 Experimental methods to break out-of-plane symmetry. (a) Grayscale electron beam lithography and sample fabrication^[67], schematic diagram of manufacturing metasurfaces with different height bars defined by grayscale electron beam lithography (upper), relationship between electron beam exposure dose and depth of electron beam resist (lower); (b) SEM image of developed electron beam photoresist after development (upper), cross-sectional SEM image of etched glass substrate (lower)^[67]; (c) schematic diagrams of fabrication workflow of multi-height metasurfaces^[77]; (d) SEM images of fabricated multi-height metasurface^[77] (upper), and variation of transmittance spectra with asymmetric height difference^[77] (lower)

与普通谐振相比,手性 BIC 具有一系列独有的特性,例如超高 Q 值、大 CD 响应、强局域场和高局域态密度等。本节已对近年来利用手性 BIC 优化相关器件 CD 响应及手性光辐射的偏振度(DOP)的研究工作进行了梳理介绍,现将其中通过实验测得的特性指标整理在表 1 中,以供参考。其中,不对称形式(Asymmetry type)包括面内、面外对称性破缺,以及完

全对称性破缺。

4 基于 BIC 的其他手性现象

光学中有许多不同的手性现象,包括线性 CD、非线性 CD、旋光色散、光学力以及轨道角动量(OAM)等物理现象。而与 BIC 相关的手性效应研究不仅限于优化线性 CD 响应,本节将补充介绍基于 BIC 的其他手

表 1 手性 BIC 器件的实验特征指标对比

Table 1 Comparison of experimental characteristic indicators of chiral BIC devices

Asymmetry type	CD/DOP	Material	Q factor	Wave band	Ref.
Both	0.989	TiO ₂	1250	Vis	[19]
Both	0.93	TiO ₂	2663	Vis	[20]
Both	0.90	Perovskite	-	Vis	[67]
Both	0.986	Ceramic	-	GHz	[16]
Out-of-plane	-	Si	2080 ($Q_{\text{non-rad}}$) ~450 (Q_{tot})	NIR	[52]
In-plane	-	Si ₃ N ₄	-	Vis	[48]
In-plane	0.85	Copper	-	GHz	[69]
In-plane	0.93	Si	602	NIR	[75]

性现象,包括非线性 CD、涡旋光束产生、超手性场增强以及光的自旋霍尔效应。

4.1 非线性 CD 效应

准 BIC 最吸引人的特性之一就是具有极高 Q 值,可在 nm 尺度内提供显著的局域场以增强光与物质的相互作用,因此早被用于频率转换等非线性光学领域,例如二次^[78]、三次^[79]、高次谐波^[80]以及混频效应^[81]。尽

管利用 BIC 的非线性手性光学效应研究并不多见,但现有工作已经证实了将手性 BIC 与强非线性响应相结合可为该方向的发展提供一个前景广阔的平台^[82]。

来自意大利的 Gandolfi 等^[83]在 2021 年提出了利用不对称介质超构表面的准 BIC 来增强三次谐波 CD 的方法,并通过数值模拟对该方法进行验证。他们借助手性 BIC 所具有的自旋选择激发特性,实现了高效且幅值接近 1 的非线性 CD。随后在双层扭曲超构表面系统也验证了这一方法,该超构表面由不对称的双条形孔阵列构成,也利用手性 BIC 实现了双波段相反的三次谐波 CD 响应^[84]。

近期该领域也出现了少量实验工作,例如,李向平团队在验证完平面手性超构表面中的最大线性 CD 响应后,证实了在 CD 响应只有 0.65 的手性 BIC 样品中,也能够凭借高对比度的近场增强效果产生高达 0.81 的三次谐波 CD 值,如图 7(a)所示^[75]。2023 年,澳大利亚国立大学的 Kivshar 团队重点研究了介质超构表面中不同类型的高 Q 值共振对非线性手性光学效应的影响,如图 7(b)所示,他们发现在临界耦合条件下 Mie 共振和一些准 BIC 模式都可以产生很大的三次谐波信号,通过实验他们还测得 -0.771 和 0.918 的三次谐波 CD 极值^[85]。由此可见,利用手性 BIC 来优化人工结构的非线性手性响应是一种普遍且高效的策略。

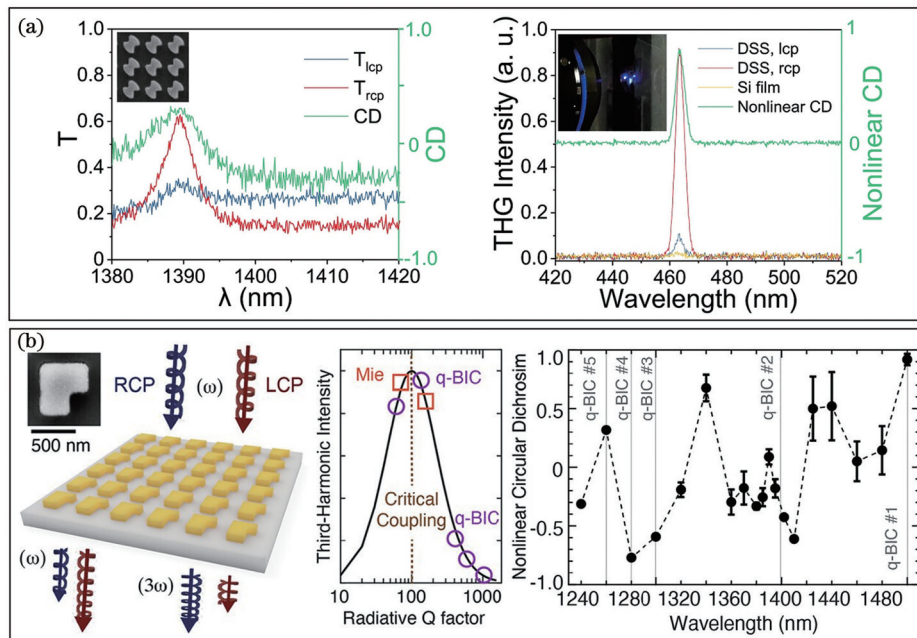


图 7 非线性 CD 效应。(a)手性 BIC 诱导的非线性三次谐波^[75],准 BIC 附近的圆偏振透射谱和线性 CD(左),准 BIC 诱导的三次谐波 CD 信号(右);(b)非对称 Si 超构表面的三次谐波 CD 响应^[85],结构示意图及单元结构 SEM 图(左),准 BIC 和 Mie 共振在临界耦合条件下产生最强三次谐波(中),三次谐波 CD 及其共振峰(右)

Fig. 7 Nonlinear CD effect. (a) Chiral BIC induced nonlinear third harmonic generation^[75], circular polarization transmission spectra and linear CD near quasi-BIC (left), third harmonic CD signal induced by quasi-BIC (right); (b) third harmonic CD response of asymmetric Si metasurface^[85], structural schematic diagram and SEM image of unit structure (left), quasi-BIC and Mie resonance generate strongest third harmonic under critical coupling conditions (center), third harmonic CD and its resonant peak (right)

4.2 涡旋光束产生

涡旋光束的主要特性体现在螺旋波前分布和相位奇点上,其光子携带的OAM为 $l\hbar$, \hbar 为普朗克常量,整数 l 代表拓扑电荷,决定了涡旋光束的螺旋波前分布^[86-87]。 l 的绝对值表示涡旋光束的OAM大小,其符号决定了螺旋波前的手性,即其旋转方向。通过螺旋相位板或空间光调制器等大体积器件生成的涡旋光束很难直接应用于集成光学领域,因此紧凑型涡旋光束生成和探测器件广受关注^[88]。起初,多数生成涡旋光束的研究在实空间中进行,需要严格对准入射光束与微纳器件的几何中心或类涡旋排列构型,以获得相位奇点。然而在PCS的动量空间中,BIC模式的偏振涡旋特性也能诱导产生相位奇点,这种非中心周期性纳米结构不仅可以灵活地产生涡旋光束,还可实现相位调制和高效光开关,避免了高难度的实验问题^[88]。

早在2011年,京都大学的Iwahashi等^[89]就分析了正方形和三角形晶格PCS在 Γ 点的腔模式,发现其对称性会严重影响光子晶体激光器的出射特性,并由此实现了多种高阶涡旋光束。随后,麻省理工学院的Zhen等^[7]从理论上证明了PCS里的BIC是远场辐射中偏振方向的涡旋中心,其携带守恒且量子化的拓扑电荷,可以保证BIC在产生、演化和湮灭过程中的稳健性。2018年,研究者们分别采用一维光栅和二维等离子元周期结构,并通过在样品的动量空间中做偏振成像,最终确定了拓扑涡旋的存在,及在远场偏振涡旋实

验中观测到了BIC^[8-9]。

由于实空间与动量空间之间是共轭关系,因此利用动量空间中的偏振涡旋结构也可以实现实空间光束的涡旋相位调制^[88]。2020年,复旦大学的资剑团队提出并验证了该光场调控方案^[90]。在BIC附近,PCS相当于一个偏振涡旋器件,如图8(a)所示,其线性偏振方向在动量空间中随角度旋转^[90-91]。当一束具有平行动量分量的特定频率圆偏振高斯光束垂直入射到PCS时,与导模共振的相互作用使其产生正交偏振光,并获得了依赖于偏振方向的几何相位,从而使出射光束形成涡旋状的相位分布。同年,本团队设计了相关主动型器件,提出了基于钙钛矿PCS的微型涡旋激光器,并展示了涡旋激光与线偏振激光之间的超低能耗超快速(1.0~1.5 ps)切换功能^[92],如图8(b)所示。该工作既利用了BIC的高 Q 值以降低能耗,又利用其模式对称性和远场特性来实现超快速切换,从原理上突破了激光寿命对调制速度的限制,打破了超低能耗与超快调制间的固有矛盾。此外,使用对称性更高的PCS样品或者调节工作波长,可以携带更高阶OAM的涡旋光束^[89];而结合双共振纳米腔设计^[93]或非线性几何相位^[94],也可将BIC生成涡旋光束的过程拓展至二次和高次谐波过程。若要进一步提升该方案下的涡旋光束转换效率,则可通过添加完美镜面的反射式构造来实现,或者设计具有双重简并共振(即满足Kerker条件)的器件^[95];而在实际系统中,提升辐射损耗与固有吸收的比例值也可显著提升转换效率^[96]。

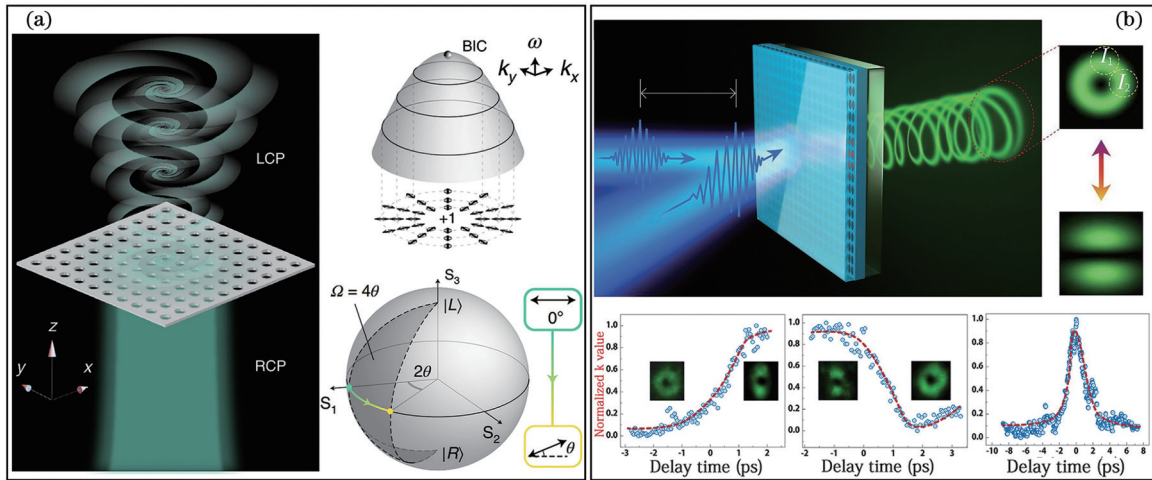


图8 PCS产生涡旋光束。(a)利用BIC在动量空间中的偏振特性产生涡旋光束示意图^[90],动量空间中BIC的电场分布(右上),涡旋光束产生原理图(右下);(b)准BIC微型激光器的超快调控^[92],双光束泵浦实验原理图(上),线偏振激光与涡旋激光的动态切换过程(下)

Fig. 8 Generation of vortex beams by PCS. (a) Schematic diagrams of generating vortex beams using the polarization characteristics of BIC in momentum space^[90], electric field distribution of BIC in momentum space (upper right), schematic diagram of vortex beam generation (lower right); (b) ultra-fast control of quasi-BIC micro-laser^[92], principle diagram of dual beam pumping experiment (upper), dynamic switching process between linearly polarized laser and vortex laser (lower)

4.3 超手性场增强

要增强手性光与物质的相互作用,一方面需要构

建具有大手性光学响应的人工结构,另一方面需要利用人工结构优化局域光场,使其光学手性远大于圆偏

振光,即形成“超手性场(Superchiral fields)”^[11]。前者已详细梳理了手性 BIC,由于多数结构自身具有较大的内禀手性响应,不便于应用在手性分子探测等领域。因此,在低损耗的非手性纳米结构中,设计可被外界分子触及的超手性场是一项对于手性分子传感应用来说十分重要的研究,且在近些年受到了广泛关注^[97-99]。相比于等离激元共振和 Mie 共振,BIC 不仅提供了更具优势的高 Q 值共振,还能更容易地利用非局域效应优化其超手性场的出现位置。

2020 年,仇成伟团队基于偶发 BIC 模式实现了超手性场^[100]。他们利用具有非手性结构单元的金属-介质混合超构表面构造了表面晶格共振与环形偶极子的强耦合体系,其中一种混合模式在 x 和 y 偏振方向上均形成了 BIC 模式。该研究尽管在一定程度上牺牲了超手性场强度但却优化了其出现位置,在提升手性分子 CD 信号的同时还可通过共振峰位偏移实现样品中手性物质的浓度(物质的量浓度)探测。为了避免混合超构表面中的金属材料对 BIC 共振 Q 值以及超手性场增强系数的限制,在全介质 PCS 中进行相关器件设计更为合理。前期就有研究展示了 PCS 中矢量 EP 在优化超手性场上的优势,尽管获得了可接触的均一超手性场,但对向双光束的激发条件还是严重制约了实验进展^[101]。近期,本团队在非手性介质超构表面中详细探究了对称保护 BIC 下的超手性场优化,通过调节各项几何参数使超构表面中的类 TE 和类 TM 型 BIC 模式在同一位置下发生聚合,从而获得了增强系数高达 10^4 量级的超手性场^[102]。需要指出的是,该聚合过程仅涉及 Γ 点的不同 BIC 并且它们之间不会发生拓扑电荷的

变化,与动量空间中 BIC 的合并不同。北京理工大学的张向东团队也提出了类似概念,他们称之为矢量 BIC,通过调节 PCS 的几何参数来构造对称保护的矢量 BIC,其中一对类 TE 和类 TM 模式的特征频率相互重合,由此可以实现比圆偏振光大 3 个数量级的均匀超手性场^[103-104]。如图 9(a)所示,他们还通过表征一系列 PCS 的能带,从实验上证实了矢量 BIC 的出现^[104]。

4.4 光的自旋霍尔效应

类似于电子会在自旋轨道耦合时发生劈裂,光也会在光学界面上被微观地分裂为两个圆偏振态,被称为光的自旋霍尔效应(Spin Hall effect of light),其根本上是由光的自旋轨道相互作用引起的^[105-106]。在微纳光学中,光的自旋轨道耦合现象几乎无处不在,尤其随着超构表面等人工材料的迅速发展,设计具有强自旋轨道耦合的光子结构以增强自旋霍尔效应的研究十分引人注目^[106-107]。光的自旋霍尔效应一般体现为与自旋相关的光束横向位移、角偏转和近场方向性传输等现象^[108]。

实空间的相位梯度会导致动量空间的波矢偏移,由互易关系可知,动量空间的相位梯度也会导致实空间的光束偏移^[24]。在 PCS 的动量空间中,BIC 具有显著的偏振各向异性,可以通过模式转换造成强烈的自旋轨道耦合效应,从而实现对光的自旋霍尔效应的增强。2021 年,资剑团队通过打破 PCS 面内反转对称性来控制其本征模式在动量空间中的偏振分布,然后基于该偏振分布,与入射光束偏振态正交的透射光会在动量空间中获得相应的几何相位梯度,从而实现实空间中的大横向位移^[109]。另外,若在圆孔 PCS 中,结合

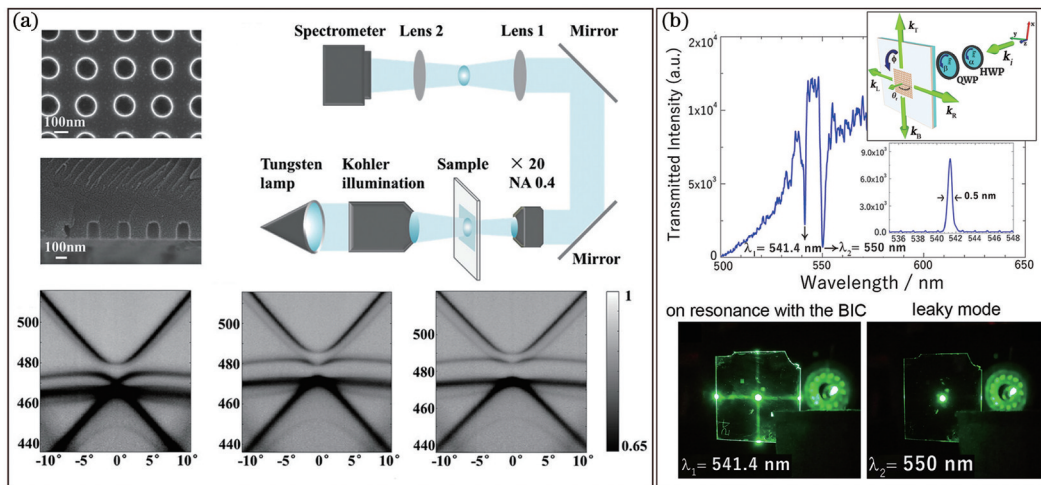


图 9 BIC 增强超手性场和光的自旋霍尔效应。(a) 矢量 BIC 实验验证^[104], 实验样品 SEM 图及实验测试光路(上), 实验样品能带图, 展示了类 TE 和类 TM 模式的相互重合(下); (b) BIC 增强的方向性耦合^[113], 样品透过率及实验装置示意图, 541.4 nm 的共振为 BIC(上), 在 BIC 下的垂直入射光重新定向(下)

Fig. 9 Superchiral fields and spin Hall effect of light enhanced by BIC. (a) Experimental observation of vector BIC^[104], SEM images of experimental sample and experimental testing optical path (upper), band diagrams of experimental sample, indicating overlap between TE- and TM-like modes (lower); (b) BIC enhanced directional coupling^[113], sample transmittance and experimental setup diagram, resonance at 541.4 nm as BIC (upper), normal incident light reorientation under BIC (lower)

BIC 附近波矢依赖的几何相位梯度和正交偏振获得的共振相位梯度,最终可以实现光束自旋依赖的面内斜向位移^[108]。除上述实验研究外,还有在介电常数近零(ENZ)材料^[110]、宇称时间对称结构^[111]以及复合光栅波导结构^[112]中通过理论研究 BIC 引起的强自旋霍尔效应和其在传感领域中的应用前景。另外,如图 9(b)所示,意大利的 Zito 等^[113]还在对称激发条件下通过实验观察到了 BIC 增强的方向性耦合,其布洛赫波在共振时被宏观放大,会在 PCS 的对称轴上传播,即使在垂直入射时也遵循自旋动量锁定。由此可见,PCS 动量空间中 BIC 所对应的偏振拓扑涡旋可为增强自旋轨道相互作用提供一种新的方式。

5 总结与展望

简要介绍了 BIC、准 BIC 以及手性 BIC 的概念和特性。随后,根据光子结构对称性破缺的维度详细整理并比较了手性 BIC 的相关研究工作。另外还补充梳理了涉及 BIC 共振的其他 4 种手性光学现象,包括非线性 CD、涡旋光束产生、超手性场增强以及光的自旋霍尔效应。丰富的手性光学现象涉及到复杂的物理过程,而 BIC 的介入不仅可增强相关的手性效应,还能够更加清晰地展示出各类现象背后的物理本质。

在光子学中,BIC 因其卓越的共振 Q 值表现而获得关注,后又因为特殊的动量空间偏振特性而被深入研究^[24]。BIC 的高 Q 值特性可以显著提升依赖于强光与物质相互作用的应用表现,例如降低激光阈值^[114]、提升非线性频率转换效率^[78]、改善传感器的分辨率和灵敏度^[115]等。而 BIC 动量空间的偏振特性更是极大地扩展了其应用领域,例如实现偏振转换^[116]、设计非局域共振模式^[117]、增强手性光与物质的相互作用^[19-20]等。此外,结合新型材料或特殊光子结构体系探索 BIC 的新应用及新机制也备受关注,例如借助主动材料实现 BIC 的动态调控^[118]、宇称时间对称系统中的 BIC 特性^[119]、莫尔超晶格中 BIC 的实现^[120]等。针对 BIC 光子器件,一方面可利用高 Q 值增强光与物质的相互作用来提升器件集成度,另一方面可借助动量空间的多种物理量实现多维度信息复用,这将非常有利于构建新型光子信息处理系统^[121]。

尽管微纳结构中的 BIC 研究从理论到实验都得到了快速发展,但仍面临着诸多挑战。对于样品设计来说,设计具有特定功能的 BIC,尤其是在调控动量空间特性时,往往依赖于大量扫描参数式的数值仿真,因此急需探索利用人工智能或逆向设计等手段实现 BIC 功能器件的快速设计方案^[122]。对于样品制备来说,几乎都面临如何提高加工精度来实现高 Q 值 BIC 样品的普遍性难题,其中工作在紫外和可见光范围的样品更具挑战;而就手性 BIC 中常涉及的双层结构和面外对称性破缺设计,更需要从制备方案出发对工艺进行针对性的优化;另外,新型主动半导体材料的生长制备工艺

是否完善,会严重影响特殊 BIC 功能器件的实现^[44,77]。对于样品表征来说,极高的共振 Q 值以及苛刻的激发条件都会显著增加相应 BIC 共振峰附近的物理特性测量难度^[37]。整体来讲,虽然该领域面临的巨大挑战来自于样品制备,但若将精妙的工艺步骤与合理的样品设计相结合,可推动 BIC 光子器件的发展。

参 考 文 献

- [1] Li A D, Wei H, Cotrufo M, et al. Exceptional points and non-Hermitian photonics at the nanoscale[J]. *Nature Nanotechnology*, 2023, 18: 706-720.
- [2] Chen H Z, Liu T, Luan H Y, et al. Revealing the missing dimension at an exceptional point[J]. *Nature Physics*, 2020, 16: 571-578.
- [3] Koshelev K, Bogdanov A, Kivshar Y. Engineering with bound states in the continuum[J]. *Optics & Photonics News*, 2020, 31 (1): 38.
- [4] Marinica D C, Borisov A G, Shabanov S V. Bound states in the continuum in photonics[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100 (18): 183902.
- [5] Plotnik Y, Peleg O, Dreisow F, et al. Experimental observation of optical bound states in the continuum[J]. *Physical Review Letters*, 2011, 107(18): 183901.
- [6] Hsu C W, Zhen B, Lee J, et al. Observation of trapped light within the radiation continuum[J]. *Nature*, 2013, 499(7457): 188-191.
- [7] Zhen B, Hsu C W, Lu L, et al. Topological nature of optical bound states in the continuum[J]. *Physical Review Letters*, 2014, 113(25): 257401.
- [8] Doeleman H M, Monticone F, den Hollander W, et al. Experimental observation of a polarization vortex at an optical bound state in the continuum[J]. *Nature Photonics*, 2018, 12: 397-401.
- [9] Zhang Y W, Chen A, Liu W Z, et al. Observation of polarization vortices in momentum space[J]. *Physical Review Letters*, 2018, 120(18): 186103.
- [10] Chen Y, Du W, Zhang Q, et al. Multidimensional nanoscopic chiroptics[J]. *Nature Reviews Physics*, 2022, 4: 113-124.
- [11] Mun J, Kim M, Yang Y, et al. Electromagnetic chirality: from fundamentals to nontraditional chiroptical phenomena[J]. *Light: Science & Applications*, 2020, 9: 139.
- [12] Fernandez-Corbaton I, Fruhert M, Rockstuhl C. Objects of maximum electromagnetic chirality[J]. *Physical Review X*, 2016, 6(3): 031013.
- [13] Overvig A C, Malek S C, Yu N F. Multifunctional nonlocal metasurfaces[J]. *Physical Review Letters*, 2020, 125(1): 017402.
- [14] Overvig A C, Malek S C, Carter M J, et al. Selection rules for quasibound states in the continuum[J]. *Physical Review B*, 2020, 102(3): 035434.
- [15] Gorkunov M V, Antonov A A, Kivshar Y S. Metasurfaces with maximum chirality empowered by bound states in the continuum [J]. *Physical Review Letters*, 2020, 125(9): 093903.
- [16] Gorkunov M V, Antonov A A, Tuz V R, et al. Bound states in the continuum underpin near-lossless maximum chirality in dielectric metasurfaces[J]. *Advanced Optical Materials*, 2021, 9 (19): 2100797.
- [17] Overvig A, Yu N F, Alù A. Chiral quasi-bound states in the continuum[J]. *Physical Review Letters*, 2021, 126(7): 073001.
- [18] Dixon J, Pan F, Moradifar P, et al. Through thick and thin: how optical cavities control spin[J]. *Nanophotonics*, 2023, 12 (14): 2779-2788.
- [19] Zhang X D, Liu Y L, Han J C, et al. Chiral emission from resonant metasurfaces[J]. *Science*, 2022, 377(6611): 1215-1218.

- [20] Chen Y, Deng H C, Sha X B, et al. Observation of intrinsic chiral bound states in the continuum[J]. *Nature*, 2023, 613 (7944): 474-478.
- [21] Hsu C W, Zhen B, Stone A D, et al. Bound states in the continuum[J]. *Nature Reviews Materials*, 2016, 1(9): 16048.
- [22] Sadreev A F. Interference traps waves in an open system: bound states in the continuum[J]. *Reports on Progress in Physics*, 2021, 84(5): 055901.
- [23] 姚建铨, 李继涛, 张雅婷, 等. 周期光学系统中的连续域束缚态[J]. *中国光学*, 2023, 16(1): 1-23.
Yao J Q, Li J T, Zhang Y T, et al. Bound states in continuum in periodic optical systems[J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(1): 1-23.
- [24] Kang M, Liu T, Chan C T, et al. Applications of bound states in the continuum in photonics[J]. *Nature Reviews Physics*, 2023, 5: 659-678.
- [25] Xu G Z, Xing H Y, Xue Z Q, et al. Recent advances and perspective of photonic bound states in the continuum[J]. *Ultrafast Science*, 2023, 3: 33.
- [26] Joseph S, Pandey S, Sarkar S, et al. Bound states in the continuum in resonant nanostructures: an overview of engineered materials for tailored applications[J]. *Nanophotonics*, 2021, 10 (17): 4175-4207.
- [27] Koshelev K L, Sadrieva Z F, Shcherbakov A A, et al. Bound states in the continuum in photonic structures[J]. *Physics-Uspexhi*, 2021, 66(5): 494-517.
- [28] 毕千惠, 彭于娟, 陈润, 等. 光子学连续域束缚态的理论及应用[J]. *光学学报*, 2023, 43(16): 1623008.
Bi Q H, Peng Y J, Chen R, et al. Theory and application of bound states in the continuum in photonics[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(16): 1623008.
- [29] Hu P, Wang J J, Jiang Q, et al. Global phase diagram of bound states in the continuum[J]. *Optica*, 2022, 9(12): 1353-1361.
- [30] Hsu C W, Zhen B, Chua S L, et al. Bloch surface eigenstates within the radiation continuum[J]. *Light: Science & Applications*, 2013, 2(7): e84.
- [31] Sadrieva Z, Frizyuk K, Petrov M, et al. Multipolar origin of bound states in the continuum[J]. *Physical Review B*, 2019, 100 (11): 115303.
- [32] Azzam S I, Shalaev V M, Boltasseva A, et al. Formation of bound states in the continuum in hybrid plasmonic-photonic systems[J]. *Physical Review Letters*, 2018, 121(25): 253901.
- [33] Rybin M V, Koshelev K L, Sadrieva Z F, et al. High-Q supercavity modes in subwavelength dielectric resonators[J]. *Physical Review Letters*, 2017, 119(24): 243901.
- [34] Monticone F, Doleman H M, Den Hollander W, et al. Trapping light in plain sight: embedded photonic eigenstates in zero-index metamaterials[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2018, 12(5): 1700220.
- [35] Bogdanov A A, Koshelev K L, Kapitanova P V, et al. Bound states in the continuum and Fano resonances in the strong mode coupling regime[J]. *Advanced Photonics*, 2019, 1(1): 016001.
- [36] Huang L J, Xu L, Powell D A, et al. Resonant leaky modes in all-dielectric metasystems: fundamentals and applications[J]. *Physics Reports*, 2023, 1008: 1-66.
- [37] Dong Z G, Mahfoud Z, Paniagua-Dominguez R, et al. Nanoscale mapping of optically inaccessible bound-states-in-the-continuum[J]. *Light: Science & Applications*, 2022, 11(1): 20.
- [38] Overvig A, Alù A. Wavefront-selective Fano resonant metasurfaces[J]. *Advanced Photonics*, 2021, 3(2): 026002.
- [39] Koshelev K, Lepeshov S, Liu M K, et al. Asymmetric metasurfaces with high-Q resonances governed by bound states in the continuum[J]. *Physical Review Letters*, 2018, 121(19): 193903.
- [40] Han S, Pitchappa P, Wang W H, et al. Extended bound states in the continuum with symmetry-broken terahertz dielectric metasurfaces[J]. *Advanced Optical Materials*, 2021, 9(7): 2002001.
- [41] Liu Z J, Xu Y, Lin Y, et al. High-Q quasibound states in the continuum for nonlinear metasurfaces[J]. *Physical Review Letters*, 2019, 123(25): 253901.
- [42] Ndao A, Hsu L, Cai W, et al. Differentiating and quantifying exosome secretion from a single cell using quasi-bound states in the continuum[J]. *Nanophotonics*, 2020, 9(5): 1081-1086.
- [43] Kang M, Mao L, Zhang S P, et al. Merging bound states in the continuum by harnessing higher-order topological charges[J]. *Light: Science & Applications*, 2022, 11(1): 228.
- [44] Chen Z H, Yin X F, Jin J C, et al. Observation of miniaturized bound states in the continuum with ultra-high quality factors[J]. *Science Bulletin*, 2022, 67(4): 359-366.
- [45] Jin J C, Yin X F, Ni L F, et al. Topologically enabled ultrahigh-Q guided resonances robust to out-of-plane scattering[J]. *Nature*, 2019, 574(7779): 501-504.
- [46] Bulgakov E N, Maksimov D N. Topological bound states in the continuum in arrays of dielectric spheres[J]. *Physical Review Letters*, 2017, 118(26): 267401.
- [47] Kang M, Zhang S P, Xiao M, et al. Merging bound states in the continuum at off-high symmetry points[J]. *Physical Review Letters*, 2021, 126(11): 117402.
- [48] Liu W Z, Wang B, Zhang Y W, et al. Circularly polarized states spawning from bound states in the continuum[J]. *Physical Review Letters*, 2019, 123(11): 116104.
- [49] Ye W M, Gao Y, Liu J L. Singular points of polarizations in the momentum space of photonic crystal slabs[J]. *Physical Review Letters*, 2020, 124(15): 153904.
- [50] Yoda T, Notomi M. Generation and annihilation of topologically protected bound states in the continuum and circularly polarized states by symmetry breaking[J]. *Physical Review Letters*, 2020, 125(5): 053902.
- [51] Zeng Y X, Hu G W, Liu K P, et al. Dynamics of topological polarization singularity in momentum space[J]. *Physical Review Letters*, 2021, 127(17): 176101.
- [52] Yin X F, Jin J C, Soljačić M, et al. Observation of topologically enabled unidirectional guided resonances[J]. *Nature*, 2020, 580 (7804): 467-471.
- [53] Barron L D. True and false chirality and absolute enantioselection[J]. *Rendiconti Lincei*, 2013, 24(3): 179-189.
- [54] Gansel J K, Thiel M, Rill M S, et al. Gold helix photonic metamaterial as broadband circular polarizer[J]. *Science*, 2009, 325(5947): 1513-1515.
- [55] Hentschel M, Wu L, Schäferling M, et al. Optical properties of chiral three-dimensional plasmonic oligomers at the onset of charge-transfer plasmons[J]. *ACS Nano*, 2012, 6(11): 10355-10365.
- [56] Zhang S, Zhou J F, Park Y S, et al. Photoinduced handedness switching in terahertz chiral metamolecules[J]. *Nature Communications*, 2012, 3: 942.
- [57] Cui Y H, Kang L, Lan S F, et al. Giant chiral optical response from a twisted-arc metamaterial[J]. *Nano Letters*, 2014, 14(2): 1021-1025.
- [58] Wu Z L, Chen X D, Wang M S, et al. High-performance ultrathin active chiral metamaterials[J]. *ACS Nano*, 2018, 12(5): 5030-5041.
- [59] Ji C Y, Chen S S, Han Y, et al. Artificial propeller chirality and counterintuitive reversal of circular dichroism in twisted metamolecules[J]. *Nano Letters*, 2021, 21(16): 6828-6834.
- [60] Shen Z L, Fan S T, Yin W, et al. Chiral metasurfaces with maximum circular dichroism enabled by out-of-plane plasmonic system[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2022, 16(12): 2200370.
- [61] Kuwata-Gonokami M, Saito N, Ino Y, et al. Giant optical activity in quasi-two-dimensional planar nanostructures[J]. *Physical Review Letters*, 2005, 95(22): 227401.
- [62] Plum E, Fedotov V A, Zheludev N I. Optical activity in extrinsically chiral metamaterial[J]. *Applied Physics Letters*,

- 2008, 93(19): 191911.
- [63] Plum E, Liu X X, Fedotov V A, et al. Metamaterials: optical activity without chirality[J]. *Physical Review Letters*, 2009, 102(11): 113902.
- [64] Plum E, Fedotov V A, Zheludev N I. Extrinsic electromagnetic chirality in metamaterials[J]. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 2009, 11(7): 074009.
- [65] Zhu A Y, Chen W T, Zaidi A, et al. Giant intrinsic chiro-optical activity in planar dielectric nanostructures[J]. *Light: Science & Applications*, 2018, 7: 17158.
- [66] Dixon J, Lawrence M, Barton D R, et al. Self-isolated Raman lasing with a chiral dielectric metasurface[J]. *Physical Review Letters*, 2021, 126(12): 123201.
- [67] Lim Y, Seo I C, An S, et al. Maximally chiral emission via chiral quasi bound states in the continuum[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2023, 17(2): 2200611.
- [68] Tang Y H, Liang Y, Yao J, et al. Chiral bound states in the continuum in plasmonic metasurfaces[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2023, 17(4): 2200597.
- [69] Wu J J, Xu X T, Su X Q, et al. Observation of giant extrinsic chirality empowered by quasi-bound states in the continuum[J]. *Physical Review Applied*, 2021, 16(6): 064018.
- [70] Shen Z L, Fang X D, Li S N, et al. Terahertz spin-selective perfect absorption enabled by quasi-bound states in the continuum[J]. *Optics Letters*, 2022, 47(3): 505-508.
- [71] Kim K H, Kim J R. High-Q chiroptical resonances by quasi-bound states in the continuum in dielectric metasurfaces with simultaneously broken in-plane inversion and mirror symmetries[J]. *Advanced Optical Materials*, 2021, 9(22): 2101162.
- [72] Semnani B, Flannery J, Al Maruf R, et al. Spin-preserving chiral photonic crystal mirror[J]. *Light: Science & Applications*, 2020, 9: 23.
- [73] Khanikaev A B, Arju N, Fan Z, et al. Experimental demonstration of the microscopic origin of circular dichroism in two-dimensional metamaterials[J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 12045.
- [74] Wu C, Arju N, Kelp G, et al. Spectrally selective chiral silicon metasurfaces based on infrared Fano resonances[J]. *Nature Communications*, 2014, 5: 3892.
- [75] Shi T, Deng Z L, Geng G Z, et al. Planar chiral metasurfaces with maximal and tunable chiroptical response driven by bound states in the continuum[J]. *Nature Communications*, 2022, 13: 4111.
- [76] Chen W J, Yang Q D, Chen Y T, et al. Extremize optical chiralities through polarization singularities[J]. *Physical Review Letters*, 2021, 126(25): 253901.
- [77] Kühner L, Wendisch F J, Antonov A A, et al. Unlocking the out-of-plane dimension for photonic bound states in the continuum to achieve maximum optical chirality[J]. *Light: Science & Applications*, 2023, 12(1): 250.
- [78] Koshelev K, Kruk S, Melik-Gaykazyan E, et al. Subwavelength dielectric resonators for nonlinear nanophotonics[J]. *Science*, 2020, 367(6475): 288-292.
- [79] Koshelev K, Tang Y T, Li K, et al. Nonlinear metasurfaces governed by bound states in the continuum[J]. *ACS Photonics*, 2019, 6(7): 1639-1644.
- [80] Zograf G, Koshelev K, Zalogina A, et al. High-harmonic generation from resonant dielectric metasurfaces empowered by bound states in the continuum[J]. *ACS Photonics*, 2022, 9(2): 567-574.
- [81] Camacho-Morales R, Xu L, Zhang H Z, et al. Sum-frequency generation in high-Q GaP metasurfaces driven by leaky-wave guided modes[J]. *Nano Letters*, 2022, 22(15): 6141-6148.
- [82] Koshelev K, Tonkaev P, Kivshar Y. Nonlinear chiral metaphotonics: a perspective[J]. *Advanced Photonics*, 2023, 5(6): 064001.
- [83] Gandolfi M, Tognazzi A, Rocco D, et al. Near-unity third-harmonic circular dichroism driven by a quasibound state in the continuum in asymmetric silicon metasurfaces[J]. *Physical Review A*, 2021, 104(2): 023524.
- [84] Liu Q S, Chao M H, Zhang W J, et al. Dual-band chiral nonlinear metasurface supported by quasibound states in the continuum[J]. *Annalen Der Physik*, 2022, 534(12): 2200263.
- [85] Koshelev K, Tang Y T, Hu Z X, et al. Resonant chiral effects in nonlinear dielectric metasurfaces[J]. *ACS Photonics*, 2023, 10(1): 298-306.
- [86] Yao A M, Padgett M J. Orbital angular momentum: origins, behavior and applications[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2011, 3(2): 161.
- [87] Shen Y J, Wang X J, Xie Z W, et al. Optical vortices 30 years on: OAM manipulation from topological charge to multiple singularities[J]. *Light: Science & Applications*, 2019, 8: 90.
- [88] Ni J C, Huang C, Zhou L M, et al. Multidimensional phase singularities in nanophotonics[J]. *Science*, 2021, 374(6566): eabj0039.
- [89] Iwahashi S, Kurosaka Y, Sakai K, et al. Higher-order vector beams produced by photonic-crystal lasers[J]. *Optics Express*, 2011, 19(13): 11963-11968.
- [90] Wang B, Liu W Z, Zhao M X, et al. Generating optical vortex beams by momentum-space polarization vortices centred at bound states in the continuum[J]. *Nature Photonics*, 2020, 14: 623-628.
- [91] Notomi M. Topology in momentum space becomes real[J]. *Nature Photonics*, 2020, 14: 595-596.
- [92] Huang C, Zhang C, Xiao S M, et al. Ultrafast control of vortex microlasers[J]. *Science*, 2020, 367(6481): 1018-1021.
- [93] Wang J, Clementi M, Minkov M, et al. Doubly resonant second-harmonic generation of a vortex beam from a bound state in the continuum[J]. *Optica*, 2020, 7(9): 1126-1132.
- [94] Kang L, Wu Y H, Ma X Z, et al. High-harmonic optical vortex generation from photonic bound states in the continuum[J]. *Advanced Optical Materials*, 2022, 10(1): 2101497.
- [95] Liu W Z, Shi L, Zi J, et al. Ways to achieve efficient non-local vortex beam generation[J]. *Nanophotonics*, 2021, 10(17): 4297-4304.
- [96] Li T Y, Wang J J, Zhang W J, et al. High-efficiency nonlocal reflection-type vortex beam generation based on bound states in the continuum[J]. *National Science Review*, 2022, 10(5): nwac234.
- [97] Mohammadi E, Tavakoli A, Dehkhoda P, et al. Accessible superchiral near-fields driven by tailored electric and magnetic resonances in all-dielectric nanostructures[J]. *ACS Photonics*, 2019, 6(8): 1939-1946.
- [98] Hu J, Lawrence M, Dionne J A. High quality factor dielectric metasurfaces for ultraviolet circular dichroism spectroscopy[J]. *ACS Photonics*, 2020, 7(1): 36-42.
- [99] Du K, Li P, Wang H, et al. Optical chirality enhancement in hollow silicon disk by dipolar interference[J]. *Advanced Optical Materials*, 2021, 9(5): 2001771.
- [100] Chen Y, Zhao C, Zhang Y Z, et al. Integrated molar chiral sensing based on high-Q metasurface[J]. *Nano Letters*, 2020, 20(12): 8696-8703.
- [101] Wu T, Zhang W X, Zhang H Z, et al. Vector exceptional points with strong superchiral fields[J]. *Physical Review Letters*, 2020, 124(8): 083901.
- [102] Barkaoui H, Du K, Chen Y M, et al. Merged bound states in the continuum for giant superchiral field and chiral mode splitting[J]. *Physical Review B*, 2023, 107(4): 045305.
- [103] Li J H, Ren J, Zhang X D. Three-dimensional vector wave bound states in a continuum[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2017, 34(3): 559-565.
- [104] Zhang H Z, Zhang W X, Chen S H, et al. Experimental observation of vector bound states in the continuum[J]. *Advanced Optical Materials*, 2023, 11(12): 2203118.

- [105] Ling X H, Zhou X X, Huang K, et al. Recent advances in the spin Hall effect of light[J]. Reports on Progress in Physics, 2017, 80(6): 066401.
- [106] Kim M, Yang Y, Lee D, et al. Spin hall effect of light: from fundamentals to recent advancements[J]. Laser & Photonics Reviews, 2023, 17(1): 2200046.
- [107] 冯娟, 王波, 陈险峰. 微纳光学中的光子自旋霍尔效应[J]. 光学学报, 2023, 43(16): 1623003.
Feng J, Wang B, Chen X F. Photonic spin Hall effect in micro- and nano-optics[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(16): 1623003.
- [108] Wang J J, Shi L, Zi J. Spin Hall effect of light via momentum-space topological vortices around bound states in the continuum [J]. Physical Review Letters, 2022, 129(23): 236101.
- [109] Wang J J, Zhao M X, Liu W Z, et al. Shifting beams at normal incidence via controlling momentum-space geometric phases[J]. Nature Communications, 2021, 12: 6046.
- [110] Jiang X, Tang J, Li Z F, et al. Enhancement of photonic spin Hall effect via bound states in the continuum[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2019, 52(4): 045401.
- [111] Song Y F, Shu Y T, Jiang T, et al. Enhanced spin Hall effect of light in the PT-symmetric trilayer structure containing epsilon-near-zero materials[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2023, 56(17): 175102.
- [112] Wu F, Liu T T, Long Y, et al. Giant photonic spin Hall effect empowered by polarization-dependent quasibound states in the continuum in compound grating waveguide structures[J]. Physical Review B, 2023, 107(16): 165428.
- [113] Zito G, Romano S, Cabrini S, et al. Observation of spin-polarized directive coupling of light at bound states in the continuum[J]. Optica, 2019, 6(10): 1305-1312.
- [114] Kodigala A, Lepetit T, Gu Q, et al. Lasing action from photonic bound states in continuum[J]. Nature, 2017, 541(7636): 196-199.
- [115] Yesilkoy F, Arvelo E R, Jahani Y, et al. Ultrasensitive hyperspectral imaging and biodetection enabled by dielectric metasurfaces[J]. Nature Photonics, 2019, 13: 390-396.
- [116] Guo Y, Xiao M, Fan S H. Topologically protected complete polarization conversion[J]. Physical Review Letters, 2017, 119(16): 167401.
- [117] Overvig A, Alù A. Diffractive nonlocal metasurfaces[J]. Laser & Photonics Reviews, 2022, 16(8): 2100633.
- [118] Zhao C, Chen W J, Wei J X, et al. Electrically tunable and robust bound states in the continuum enabled by 2D transition metal dichalcogenide[J]. Advanced Optical Materials, 2022, 10(24): 2201634.
- [119] Song Q J, Hu J S, Dai S W, et al. Coexistence of a new type of bound state in the continuum and a lasing threshold mode induced by PT symmetry[J]. Science Advances, 2020, 6(34): eabc1160.
- [120] Huang L, Zhang W X, Zhang X D. Moiré quasibound states in the continuum[J]. Physical Review Letters, 2022, 128(25): 253901.
- [121] Ma W, Liu Z C, Kudyshev Z A, et al. Deep learning for the design of photonic structures[J]. Nature Photonics, 2021, 15: 77-90.
- [122] Deng R H, Liu W Z, Shi L. Inverse design in photonic crystals[J]. Nanophotonics, 2024, 13(8): 1219-1237.

Chiral Phenomena Related to Bound States in Continuum in Photonics (Invited)

Du Kang¹, Zeng Yixuan¹, Ouyang Xu¹, Zhang Xudong¹, Xiao Shumin^{1,2}, Song Qinghai^{1,2*}

¹Ministry of Industry and Information Technology Key Laboratory of Micro-Nano Optoelectronic Information System, Harbin Institute of Technology, Shenzhen 518055, Guangdong, China;

²Pengcheng Laboratory, Shenzhen 518055, Guangdong, China

Abstract

Significance The light-matter interaction at the nanoscale is crucial for the development of miniaturized optoelectronic devices. These devices often encounter energy leakage and loss, stimulating researchers to explore non-Hermitian photonics. An exceptional point, a specific optical degenerate state with identical momentum and energy has emerged as a research hotspot in this field. In recent years, the research on physical mechanisms of phenomena like parity-time symmetry, geometric phase, asymmetric scattering, and bound states in the continuum (BICs) has all revolved around exceptional points. These unique physical mechanisms are expected to inject new energy into the advancement of fields such as quantum computing, advanced materials, and low-power optoelectronic devices. We primarily focus on the chiral phenomena associated with the BIC mode, a concept originating from quantum mechanics and first proposed by von Neumann and Wigner in 1929. They identified a unique solution to the Schrödinger equation: a spatially localized electronic state with zero linewidth and positive energy, despite existing within the continuum spectrum of the radiation. Theoretically, BICs are non-radiating solutions to the wave equation and can manifest in various systems such as acoustics and fluids. However, it was not until 2008 that this concept was introduced into optics by Borisov et al. Subsequently, Plotnik et al. utilized a single-mode optical waveguide array to achieve an initial experimental observation of BICs. In 2013, researchers from MIT detected optical BICs in periodic photonic crystal slabs, boosting further exploration of BIC modes in planar artificial nanostructures. Optical BICs not only squeeze light fields and enhance resonance Q -factors in real space but also exhibit diverse polarization topological properties in momentum space. By adjusting the interaction between

BIC modes, individuals can precisely manipulate the distribution, polarization, and emission of the light fields. Over the past decade, owing to the easily fabricated metasurface platform with numerous degrees of freedom, optical BICs have rapidly evolved as a novel approach for controlling light fields in nanophotonics. Additionally, artificial nanostructures can offer chiroptical responses surpassing those of natural materials, with the involved intricate physical mechanisms catching significant attention. The momentum space characteristics of optical BICs provide fresh theoretical insights and design strategies for enhancing the chiroptical response of chiral metasurfaces. The ideal BIC mode is completely decoupled from the free space. By breaking the symmetry of the system, the topology charge of the ideal BIC in momentum space splits into two circularly polarized states, which enables precise control of the radiation process to maximize the chiroptical response. In approximately 2020, research teams from the Russian Academy of Science and the City University of New York independently verified that high- Q quasi-BIC resonances can manipulate the wavefront of circularly polarized light and optimize the chiroptical response of metasurfaces. Both studies utilized periodic chiral metasurfaces with dual tuning parameters, and it was easy to break the symmetry within and out of the structural plane by simultaneously controlling the two parameters. This transformation converted the ideal BIC (with an infinite Q -factor) into chiral quasi-BIC. This highlights that the often-disregarded longitudinal dimension of metasurfaces, particularly symmetry, plays a crucial role in their interaction with circularly polarized light. However, the experimental validation was hindered until 2022 due to constraints in fabricating multi-layer metasurfaces. Our team overcame this obstacle by employing a tilted etching scheme to break the out-of-plane symmetry and observe chiral quasi-BIC in the visible spectrum. Over the last decade, BICs have been identified in different photonic structures, particularly in the metasurfaces platform, which leads to numerous fascinating phenomena. By thoroughly investigating the properties of BICs in both real and momentum spaces, it is possible to reveal clearer physical mechanisms behind various intricate chiroptical phenomena.

Progress The concept of BIC has been around for almost a century, with well-established basic theories and various property studies. We begin by briefly outlining the concept and characteristics of BIC (Fig. 1), and then discuss the topic of chiral quasi-BIC (Fig. 2). Subsequently, we explore the applications of chiral BIC and other chiroptical phenomena related to BIC. In Fig. 3, we summarize the methods for creating chiral BIC by breaking the structural symmetry. Figure 4 illustrates instances of chiral BIC resulting from the disruption of the individual dimension symmetry of nanostructures (including the breaking of in-plane or out-of-plane symmetry), while Fig. 5 presents research on intrinsic chirality induced by slant-perturbation metasurfaces that completely break both in-plane and out-of-plane symmetries. In addition to the tilted etching method, out-of-plane symmetry can also be disrupted by grayscale electron beam lithography and multi-step nanofabrication methods (Fig. 6). We have included Table 1 to compare the specific features of chiral BIC nanodevices currently yielded in the laboratory. Furthermore, we present examples of other chiroptical phenomena related to BICs in Figs. 7–9, corresponding to nonlinear circular dichroism, vortex beam generation, superchiral field enhancement, and the optical spin Hall effect, respectively. Finally, we address the current challenges and potential applications in this field.

Conclusions and Prospects In photonics, BIC initially caught attention for its exceptional high- Q resonance and later was extensively studied due to its unique momentum space polarization characteristics. The high- Q BIC can significantly enhance the performance of applications that rely on strong light-matter interaction, with lowered laser thresholds and improved nonlinear conversion efficiency. Meanwhile, the polarization characteristics of BICs in momentum space have greatly expanded the application fields, thus achieving polarization conversion and enhancing chiral light-matter interaction. Furthermore, more attention is paid to exploring new applications and mechanisms of BIC in combination with novel materials or special photonic structural systems. Although research on BICs in nanostructures has rapidly developed from theory to experimental stages, it still faces many challenges. In terms of sample design, there is an urgent need to explore rapid design schemes using artificial intelligence or inverse design methods. In sample fabrication, tasks such as improving the fabrication precision, implementing double-layer metasurfaces, and incorporating active semiconductor materials are very difficult. In terms of sample characterization, the extreme high- Q resonances make it difficult to measure the physical properties of BICs. Generally, although the biggest challenge in this field is from sample fabrication, combining sophisticated fabrication steps with reasonable sample design can accelerate the development of BIC-assisted photonic devices.

Key words physical optics; bound state in the continuum; optical chirality; metasurface; symmetry; momentum space