Modern Physics 现代物理, 2026, 16(6), 226-233
Published Online November 2026 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/mp
https://doi.org/10.12677/mp.2026.166024

Hans汉斯

超表面中的连续谱束缚态研究进展

龙景辉

贵州大学大数据与信息工程学院，贵州 贵阳

收稿日期：2026年10月4日；录用日期：2026年10月26日；发布日期：2026年11月3日

摘　要

连续谱中的束缚态(Bound States in the Continuum, BICs)是一类特殊的光学局域态，其本质是在开放的辐射环境中存在但不与连续辐射通道发生能量交换的束缚模式。由于理论上具有无限大的品质因子(Quality Factor, Q)，BICs打破了传统光学谐振结构受到辐射损耗限制的瓶颈，为实现高性能光子器件提供了新的物理机制。近年来，随着超表面的快速发展，利用人工微纳结构调控光场成为构建和研究BICs的重要途径。本文围绕超表面中的BICs物理机制展开综述，首先介绍连续谱束缚态的基本概念及其形成条件，随后重点讨论Friedrich-Wintgen干涉型BICs、对称保护型BICs以及偶然型BICs的物理来源。在此基础上，进一步介绍利用结构扰动产生准连续谱束缚态(quasi-BICs)，以及通过对功能材料施加外部激励实现BIC动态调控的方法。最后，本文讨论当前BICs超表面研究面临的实际限制，并展望其在动态调控和集成光子学方向的发展前景。

关键词

连续谱中的束缚态，超表面，准连续谱束缚态，高品质因子，光学调控

Research Progress of Bound States in the Continuum in Metasurfaces

Jinghui Long

College of Big Data and Information Engineering, Guizhou University, Guiyang Guizhou

Received: October 4, 2026; accepted: October 26, 2026; published: November 3, 2026

Abstract

Bound States in the Continuum (BICs) are a special type of optical localized states, whose essence is the existence of a confined mode in an open radiation environment without energy exchange with the continuous radiation channel. Due to their theoretically infinite quality factor (Q), BICs break the bottleneck of traditional optical resonant structures that are limited by radiation losses,

文章引用: 龙景辉. 超表面中的连续谱束缚态研究进展[J]. 现代物理, 2026, 16(6): 226-233.
DOI: 10.12677/mp.2026.166024

providing a new physical mechanism for the realization of high-performance photonic devices. In recent years, with the rapid development of metasurfaces, the use of artificial micro-nano structures to control the light field has become an important approach for constructing and studying BICs. This article provides a review of the physical mechanism of BICs in metasurfaces, starting with the basic concepts and formation conditions of continuum bound states, followed by a focus on the physical origins of Friedrich-Wintgen interference-type BICs, symmetric protected-type BICs, and accidental-type BICs. On this basis, it further introduces the generation of quasi-BICs through structural perturbations and the method of achieving dynamic control of BICs by applying external excitation to functional materials. Finally, this article discusses the current practical limitations of BICs research in metasurfaces and looks forward to its development prospects in dynamic control and integrated photonics.

Keywords

Bound States in the Continuum, Metasurfaces, Quasi-BICs, High Quality Factor, Optical Manipulation

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Open Access

1. 引言

在光与物质相互作用过程中，如何实现对光场的高效限制和精确调控是现代光学的一个重要研究方向。微腔、光子晶体和介质谐振器等传统光学谐振结构，通常依赖空间约束实现光场局域。然而，由于这些结构不可避免地与外界辐射模式发生耦合，其品质因子受到辐射损耗的限制。因此，如何在开放体系中获得低损耗甚至无辐射损耗的光学模式，一直是光子学领域的重要科学问题。

1929 年，von Neumann 和 Wigner 首次提出了连续谱中的束缚态(Bound States in the Continuum, BICs)的概念[1]。他们的理论证明，在满足特定条件时，离散束缚态可以存在于向外辐射的连续能谱范围内，但在特殊的干涉机制作用下能够避免向外辐射。与传统束缚态不同，BICs 并非由于能量低于连续谱而实现局域，而是通过破坏束缚态与辐射态之间的耦合实现能量局域。因此，BICs 体现了一种不同于传统空间限制的能量局域机制。

近年来，随着超表面(Metasurface)的发展，BICs 研究获得了新的推动力[2] [3]。超表面是一种亚波长尺度的人工微纳结构，通过精心设计结构参数、排列方式及材料性质，可以实现对光场的精确调控[3]。相较于传统光学谐振腔，超表面具备更高的设计自由度与更优异的片上集成潜力，是实现 BICs 以及开展相关物理研究的重要平台。特别是在介质超表面中，利用电磁多极模式之间的耦合与干涉，可以在可见光和近红外波段实现具有高品质因子的 BICs 及准 BICs (quasi-BICs)模式。

凭借极高的光场局域能力，BICs 在非线性光学、传感和微型光源等多个领域展现出重要应用价值。在传感领域尤甚，高 Q 值能显著提高器件对外界环境变化的响应灵敏度，进而大幅提升传感性能。此外，结合电光材料、相变材料和二维材料等新型功能材料，动态调控 BICs 也成为近年来的重要研究方向。

目前，关于 BICs 的研究已经从最初的理论探索逐渐发展为涵盖基础物理、人工结构设计以及器件应用的交叉研究领域。然而，BICs 的形成条件、不同类型 BICs 之间的物理联系以及实际器件中的性能限制仍值得进一步讨论。因此，本文围绕超表面中的 BICs 物理机制展开介绍，重点分析不同类型 BICs 的形成原理以及其调控方式，为理解和利用这一特殊光学态提供参考。

2. 连续谱束缚态的基本物理机制

2.1. 连续谱束缚态的基本概念

在传统光学体系中，束缚态通常被认为需要满足能量低于连续谱的条件，即模式能量不足以向外辐射，因此光场能够被限制在有限空间内。例如，在介质光波导中，当导模处于光锥(light cone)以外时，由于缺少可耦合的传播通道，光场可以实现稳定传播。然而，当模式能量进入辐射连续谱范围后，理论上其会与外部辐射模式发生耦合，并通过电磁波向自由空间泄露。因此，在一般情况下，处于连续谱中的模式无法长期保持局域。

连续谱中的束缚态(Bound States in the Continuum, BICs)打破了这一传统认识。虽然 BICs 频率位于能够向外辐射的能量范围内，但由于模式自身具有特殊性质，使其与辐射通道之间的耦合完全消失，因此仍然能够保持局域状态[2] [4]。

从物理角度来看，BICs 的核心并不是简单地消除所有辐射来源，而是通过对称性限制或辐射场相消等机制，使模式无法将能量有效释放到远场。因此，BICs 与普通束缚态的形成机制不同，传统束缚态依赖于能量限制，而 BICs 依赖于辐射耦合的消失。

光学体系中，模式的品质因子通常定义为：

$$Q = \frac{\omega_0}{\Delta\omega} \tag{1}$$

其中，ω_0 为共振频率，$\Delta\omega$ 为共振线宽。对于实际光学模式，品质因子主要受到辐射损耗、材料吸收以及结构缺陷等因素限制[2]：

$$\frac{1}{Q} = \frac{1}{Q_{rad}} + \frac{1}{Q_{abs}} + \frac{1}{Q_{scat}} \tag{2}$$

其中，Q_{rad} 、Q_{abs} 和 Q_{scat} 分别代表辐射损耗、吸收损耗和散射损耗对应的品质因子。当理想 BICs 形成时，由于辐射损耗完全消失：

$$Q_{rad} \to \infty \tag{3}$$

在忽略材料吸收与结构散射的理想模型条件下，体系理论上可实现无穷大的品质因子。然而，理想 BICs 通常无法被外部光场直接激发，这是因为其与自由空间辐射模式完全解耦。为了实现实际应用，研究人员通常通过引入微小扰动，使 BICs 转变为准连续域束缚态(quasi-BICs)。此时，模式打开有限的辐射耦合通道，在保持高品质因子的同时，也允许外部光场对其进行激发和调控。因此，quasi-BICs 成为当前超表面研究中最常见的形式。

2.2. Friedrich-Wintgen BICs

Friedrich-Wintgen BICs 最初来源于量子体系中的干涉现象，其基本思想是当两个或多个具有相近频率的泄露模式同时与同一连续谱耦合时，它们产生的辐射场可能发生完全相消，使系统形成无辐射状态[5]。假设两个模式分别产生辐射场 E_1 和 E_2，此时系统的总辐射场为：

$$E_{rad} = E_1 + E_2 \tag{4}$$

当两个模式满足 $E_1 = -E_2$ 时，$E_{rad} = 0$。即便两个模式都各自具有辐射能力，但由于远场辐射之间发射相消干涉，最终形成 BICs。Azzam 等人利用一维等离子体光栅实现了这类 BICs，图 1 展示了对应的结构示意图和能带结构[6]。

与下文介绍的对称保护型 BICs 相比，Friedrich-Wintgen BICs 不要求严格的结构对称性，主要依赖模

式之间的频率匹配和耦合关系。在超表面体系中，这种机制通常通过设计多个相互耦合的谐振单元实现。例如，不同尺寸的介质纳米结构可以支持多个 Mie 共振模式，通过调整结构参数，使两个模式发生强耦合并达到辐射抵消条件。该机制的重要意义在于，它说明 BICs 并非一定来源于“禁止辐射”，而也可以来源于“辐射抵消”。

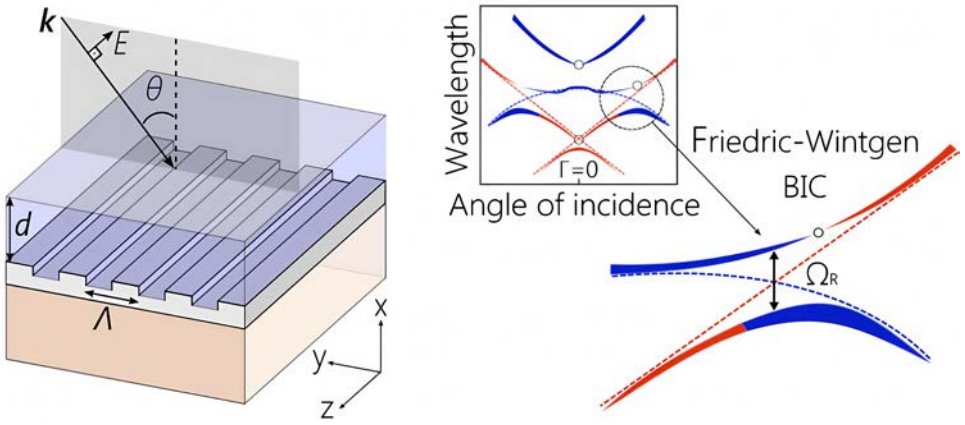


Figure 1. One-dimensional plasma grating structure for realizing Friedrich-Wintgen BICs and its band diagram
图 1. 实现 Friedrich-Wintgen BICs 的一维等离子体光栅结构及其能带图

2.3. 对称保护型 BICs

除了利用不同辐射通道之间的相消干涉外，利用对称保护机制也可以实现对称保护型 BICs (symmetry-protected BICs)，其形成原理是利用模式对称性与辐射通道之间的不匹配[4] [7]。在周期性超表面结构中，光学模式通常具有特定的空间对称性。例如，某些模式可能表现出偶对称或奇对称特征，而自由空间辐射模式也具有对应的对称性质。当两者的对称性不匹配时，例如偶对称的模式与奇对称的辐射通道。即使该模式的能量处于辐射连续谱范围内，也无法有效向外辐射，从而形成 BICs。

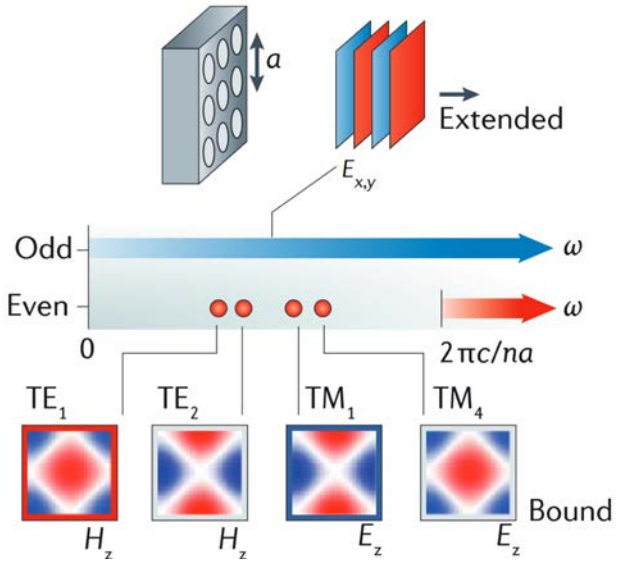


Figure 2. Schematic diagram of photonic crystal slab and mechanism for realizing symmetry-protected BICs
图 2. 实现对称保护型 BICs 的光子晶体板及机制示意

从耦合角度来看，模式与辐射通道之间的相互作用可以表示为：

$$\gamma_{rad} = |C|^2 \tag{5}$$

其中，C 表示模式与辐射通道之间的耦合系数。当对称性要求导致：

$$C = 0$$

则：

$$\gamma_{rad} = 0$$

此时，系统形成理想 BICs。例如，如图 2 所示，一个具有关于 Z 轴 C_2 对称性的光子晶体平板，由于沿法线方向的平面波是奇对称的，因此，在布里渊区中心的所有偶对称模式都无法辐射，表现为对称保护型 BICs [2]。

2.4. 偶然型 BICs

与对称保护型 BICs 不同，偶然型 BICs (Accidental BICs)可以出现在 Γ 点之外的有限波矢位置。但是其形成机制又与同样不在 Γ 点出现的 Friedrich-Wintgen BICs 有所不同。Friedrich-Wintgen BICs 是由两个不同的导模共振在非 Γ 点耦合并符合干涉相消条件所形成；而偶然型 BICs 则是由 Friedrich-Wintgen 模式和导模共振耦合所形成。由于 FP 模式的 Q 因子较低，常被视为光谱背景。因此，偶然型 BIC 常被归类为单共振模态。特别地，偶然型 BICs 不会因结构参数的改变而消失，其波矢会随着结构参数在动量空间中演化[8]。图 3 展示了由光子晶体板实现的偶然型 BICs 和动量空间中的 Q 值图[4]。

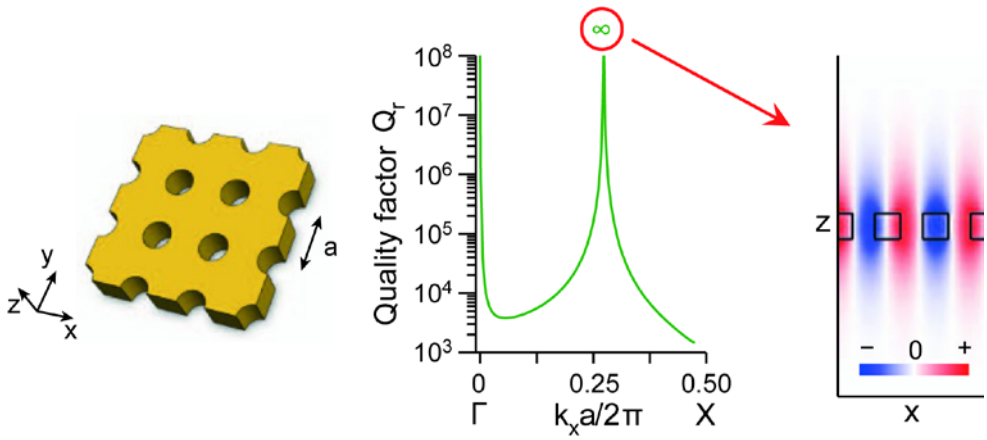


Figure 3. Photonic crystal slab for realizing accidental BICs and its Q factor
图 3. 实现偶然型 BICs 的光子晶体板及 Q 值

3. 超表面中准连续谱束缚态(Quasi-BICs)的实现与调控方法

尽管理想 BICs 由于与外部辐射通道完全解耦，理论上能够实现无限大的品质因子，但同时也限制了其与入射光场之间的能量交换。因此，理想 BICs 通常无法被远场直接激发，在实际光学器件中难以直接应用。为了解决这一问题，研究人员通常通过引入微小扰动，使 BICs 模式产生有限辐射损耗，从而形成具有高品质因子的准连续谱束缚态(quasi-BICs) [8]。

quasi-BICs 保留了 BICs 模式低辐射损耗的特点，同时允许外部光场与其发生耦合，因此成为目前超表面实现高品质光学响应的主要方式。根据调控机制的不同，quasi-BICs 主要可以通过几何结构扰动和材料参数调控实现。

3.1. 几何不对称诱导的 Quasi-BICs

打破几何不对称是目前超表面中实现 quasi-BICs 最常用的方法之一。其基本思想是在具有理想对称性的结构基础上引入微小几何扰动，使原本受到对称保护的 BICs 模式获得有限辐射通道[9] [10]。

例如，在完全对称的纳米结构中，两个等效区域产生的辐射场可以完全抵消，从而形成 BICs。当结构受到微小扰动时，例如改变某一侧结构尺寸、引入位置偏移或者破坏镜面对称性，两个区域之间的辐射平衡被打破，系统产生弱辐射泄露，使 BICs 转变为 quasi-BICs。

通常情况下，结构不对称程度可以通过不对称因子表示：

$$\alpha = \frac{a_1 - a_2}{a_1 + a_2} \tag{6}$$

其中，a_1 和 a_2 表示结构中两个相对应部分的几何参数。当 $\alpha = 0$ 时，结构保持完全对称，此时系统处于理想 BICs 状态；随着 α 增加，辐射损耗逐渐增强。对于许多对称破缺型超表面结构，quasi-BICs 的品质因子与不对称因子的平方成反比关系：

$$Q \propto \frac{1}{\alpha^2} \tag{7}$$

该关系表明，当结构逐渐接近对称状态时，品质因子可以快速提高[9] [10]。这种特性使研究人员能够通过调节不对称因子，在高 Q 模式和光场耦合效率之间实现平衡。

目前，基于几何扰动的 quasi-BICs 已经在多种介质超表面结构中实现，包括硅纳米柱阵列、介质纳米盘、非对称纳米棒以及双层耦合结构等[11]。相比金属结构，低损耗介质材料能够进一步降低吸收损耗，使 quasi-BICs 模式表现出更高的品质因子和更强的场局域能力。然而，几何调控方法也存在一定限制。由于 BICs 依赖于精确的结构关系，超表面实际加工过程中不可避免的尺寸偏差可能导致模式偏移和性能下降。因此，提高结构性能对制造误差的容忍度，是未来 quasi-BICs 器件发展的重要方向。

3.2. 材料调控实现动态 BICs

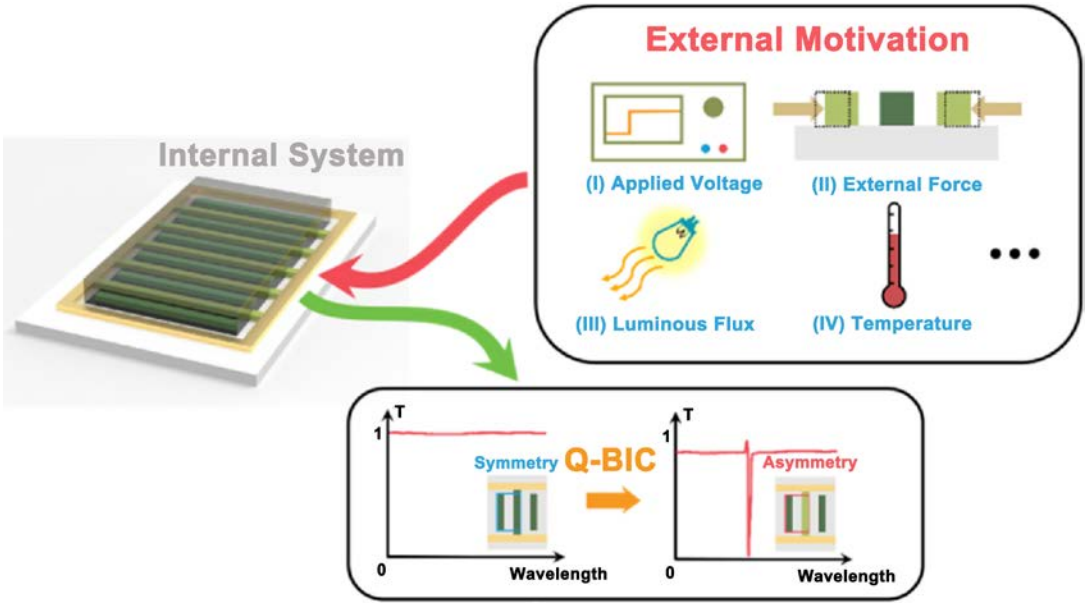


Figure 4. By applying external stimuli to functional materials to achieve quasi-BICs
图 4. 通过对功能材料施加外界刺激以实现 quasi-BICs

除了通过固定几何结构实现 BICs 外，利用功能材料改变光学性质也是近年来的重要研究方向。传统几何调控方法通常仅能实现静态 BICs；器件制备完成后性能便不可调，在一定程度上限制了其应用。而引入具有可调折射率或吸收特性的材料，则能够实现动态调节 BICs 模式。BICs 共振频率通常依赖于结构有效折射率：

$$\omega_0 = f\left(n_{eff}\right) \tag{8}$$

当材料折射率发生变化时，共振位置和品质因子也会随之改变。目前用于 BICs 调控的材料主要有液晶材料、相变材料、二维材料和铁电材料四种。如图 4 所示，通过向功能材料施加电压、外力、光照、温度等外部激励，原本受对称保护的 BICs 能够转化为可被探测的 quasi-BICs [12]。

特别地，具有较高电光系数的材料能够通过施加外部电场实现快速折射率调节，在动态 BICs 器件中具有重要应用潜力。例如，铌酸锂($LiNbO_3$)和钛酸钡($BaTiO_3$)等材料具有较强的电光效应，可以通过外加电压改变折射率，从而快速调节 BICs 模式的位置和强度，甚至开启和关闭。除此之外，此类材料能够将 BICs 与非线性光学过程耦合，依托高 Q 模式的强局域场提升非线性转换效率，同时借助 BICs 的可控调控，实现非线性效率的灵活调制[13] [14]。

3.3. BICs 调控中的物理限制

尽管理论和实验研究表明 BICs 能够实现极高品质因子，但实际器件中的性能仍受到多种因素限制[2] [4]。首先，材料损耗会限制实际品质因子。即使辐射损耗趋近于零，材料吸收仍然会导致：

$$Q_{total} < Q_{ideal} \tag{9}$$

特别是在可见光波段，材料吸收和表面缺陷可能显著降低模式寿命。其次，有限尺寸结构也会破坏理想周期体系中的动量守恒条件，造成 BICs 模式产生额外泄露。此外，现有的制造工艺仍会不可避免地引入随机误差，使器件性能偏离预期设计。因此，BICs 研究中的一个重要问题是如何在理论高 Q 特性和实际器件可实现性之间取得平衡。未来的发展方向不仅包括进一步提高品质因子，也包括发展具有动态调控能力和高稳定性的 BICs 超表面结构。

4. 总结与发展展望

连续谱中的束缚态是一种区别于传统光学束缚模式的新型物理现象，其核心在于通过对称性保护、辐射干涉以及拓扑性质实现开放体系中的能量局域。近年来，超表面的发展为 BICs 研究提供了高度可设计的平台，使研究人员能够通过人工结构更自由地调控光场模式，实现具有高品质因子的光学共振。

在实际应用中，由于理想 BICs 无法直接与外部光场耦合，研究重点逐渐转向 quasi-BICs 的设计。通过结构不对称、多模式耦合以及功能材料调控，可以在保持较低辐射损耗的同时，实现对光学响应的有效控制。

凭借高品质因子和强局域场增强特性，BICs 超表面已经在多个领域展现应用潜力。例如，在非线性光学领域，BICs 增强的局域电场可以提高二次谐波和高次谐波产生效率；在传感领域，高 Q 共振有助于提高折射率检测灵敏度；在光源和集成光子学领域，BICs 模式为低阈值激光和高性能光学器件提供了新的设计思路[14]-[16]。

然而，BICs 从理论模型走向实际应用仍面临一定挑战。一方面，材料吸收、加工误差以及有限尺寸效应会降低实际器件的品质因子；另一方面，高 Q 模式通常伴随着较窄的工作带宽，限制了其在部分应用场景中的适用性。因此，未来研究需要进一步探索高性能材料、动态调控机制以及更加稳定的结构设计。

随着电光材料、非线性材料和智能光子结构的发展，BICs 超表面有望实现更加灵活的主动调控，并推动其在新型光源、量子光学以及集成光子系统中的应用。

参考文献

[1] von Neumann, J. and Wigner, E. (1929) Über Merkwürdige Diskrete Eigenwerte. *Physikalische Zeitschrift*, **30**, 465-467.

[2] Hsu, C.W., Zhen, B., Stone, A.D., Joannopoulos, J.D. and Soljačić, M. (2016) Bound States in the Continuum. *Nature Reviews Materials*, **1**, Article No. 16048. https://doi.org/10.1038/natrevmats.2016.48

[3] Koshelev, K., Bogdanov, A. and Kivshar, Y. (2019) Meta-Optics and Bound States in the Continuum. *Science Bulletin*, **64**, 836-842. https://doi.org/10.1016/j.scib.2018.12.003

[4] Hsu, C.W., Zhen, B., Lee, J., Chua, S., Johnson, S.G., Joannopoulos, J.D., *et al*. (2013) Observation of Trapped Light within the Radiation Continuum. *Nature*, **499**, 188-191. https://doi.org/10.1038/nature12289

[5] Friedrich, H. and Wintgen, D. (1985) Interfering Resonances and Bound States in the Continuum. *Physical Review A*, **32**, 3231-3242. https://doi.org/10.1103/physreva.32.3231

[6] Azzam, S.I., Shalaev, V.M., Boltasseva, A. and Kildishev, A.V. (2018) Formation of Bound States in the Continuum in Hybrid Plasmonic-Photonic Systems. *Physical Review Letters*, **121**, Article ID: 253901. https://doi.org/10.1103/physrevlett.121.253901

[7] Plotnik, Y., Peleg, O., Dreisow, F., Heinrich, M., Nolte, S., Szameit, A., *et al*. (2011) Experimental Observation of Optical Bound States in the Continuum. *Physical Review Letters*, **107**, Article ID: 183901. https://doi.org/10.1103/physrevlett.107.183901

[8] Wang, J., Li, P., Zhao, X., Qian, Z., Wang, X., Wang, F., *et al*. (2024) Optical Bound States in the Continuum in Periodic Structures: Mechanisms, Effects, and Applications. *Photonics Insights*, **3**, R01. https://doi.org/10.3788/pi.2024.r01

[9] Koshelev, K., Lepeshov, S., Liu, M., Bogdanov, A. and Kivshar, Y. (2018) Asymmetric Metasurfaces with High-Q Resonances Governed by Bound States in the Continuum. *Physical Review Letters*, **121**, Article ID: 193903. https://doi.org/10.1103/physrevlett.121.193903

[10] Koshelev, K., Bogdanov, A. and Kivshar, Y. (2020) Engineering with Bound States in the Continuum. *Optics and Photonics News*, **31**, 38-45. https://doi.org/10.1364/opn.31.1.000038

[11] Kuznetsov, A.I., Miroshnichenko, A.E., Brongersma, M.L., Kivshar, Y.S. and Luk'yanchuk, B. (2016) Optically Resonant Dielectric Nanostructures. *Science*, **354**, aag2472. https://doi.org/10.1126/science.aag2472

[12] 田海艺. 基于对称保护型连续域束缚态的动态可调超表面研究: [硕士学位论文]. 贵阳: 贵州大学, 2025.

[13] Wang, L., Kruk, S., Koshelev, K., Kravchenko, I., Luther-Davies, B. and Kivshar, Y. (2018) Nonlinear Wavefront Control with All-Dielectric Metasurfaces. *Nano Letters*, **18**, 3978-3984. https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.8b01460

[14] Carletti, L., Koshelev, K., De Angelis, C. and Kivshar, Y. (2018) Giant Nonlinear Response at the Nanoscale Driven by Bound States in the Continuum. *Physical Review Letters*, **121**, Article ID: 033903. https://doi.org/10.1103/physrevlett.121.033903

[15] Kodigala, A., Lepetit, T., Gu, Q., Bahari, B., Fainman, Y. and Kanté, B. (2017) Lasing Action from Photonic Bound States in Continuum. *Nature*, **541**, 196-199. https://doi.org/10.1038/nature20799

[16] Romano, S., Lamberti, A., Masullo, M., Penzo, E., Cabrini, S., Rendina, I., *et al*. (2018) Optical Biosensors Based on Photonic Crystals Supporting Bound States in the Continuum. *Materials*, **11**, Article No. 526. https://doi.org/10.3390/ma11040526