

连续域束缚态与反连续域束缚态在集成光子器件的应用研究

时尧成¹,刘卫喜¹,陈元辰¹,许弘楠²

(1.浙江大学 光电科学与工程学院,杭州 310058;2.香港中文大学 电子工程系,香港 999077)

摘要:光子连续域束缚态(BIC)及其互补的反连续域束缚态(anti-BIC)为集成光子器件的性能突破提供了全新物理机制。BIC具备卓越的光场局域能力和极高的品质因子,而anti-BIC则能显著提高辐射损耗。综述了光子BIC及anti-BIC这一新兴物理机制在集成光子学中的研究进展。重点探讨了BIC和anti-BIC在低损耗波导、光栅天线、高Q微腔及起偏器中的应用,彰显了二者在光场调控、传感、调制与偏振处理等方面的巨大潜力,并展望了其在通信、传感、计算与量子技术等领域的

关键词:连续域束缚态;反连续域束缚态;光栅天线;超构光栅;起偏器

中图分类号:TN256 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2025)05-0010-05

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2025.05.002

Research on the application of bound states in the continuum and anti-bound states in the continuum in integrated photonic devices

SHI Yaocheng¹, LIU Weixi¹, CHEN Yuanchen¹, XU Hongnan²

(1. College of Optical Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;

2. Department of Electronics Engineering, Chinese University of Hong Kong, Hong Kong 999077, China)

Abstract: Bound states in the continuum(BIC) and their complementary counterparts, anti-bound states in the continuum(anti-BIC), provide a novel physical mechanism for breakthroughs in the performance of integrated photonic devices. BIC enable strong light field localization and extremely high quality factors, whereas anti-BIC can significantly enhance radiative losses. This review summarizes the recent research progress of the emerging physical mechanisms of photonic BIC and anti-BIC in integrated photonics. It focuses on exploring the applications in low-loss waveguides, grating antennas, high-Q microcavities, and polarizers, highlighting their great potential in light field manipulation, sensing, modulation, and polarization processing. The prospects of their applications in communication, sensing, computing, and quantum technologies are also discussed.

Key words: bound states in the continuum, anti-bound states in the continuum, grating antenna, metagratings, polarizer

0 引言

集成光子技术的高性能、微型化与低功耗发展趋势,对光场操控效率提出了更高要求。光子连续域束

缚态(BIC)是一种存在于辐射连续域中的无辐射态,其理论Q因子为无穷大^[1]。作为BIC的互补机制,反连续域束缚态(anti-BIC)则通过泄露通道间的相长干涉,实现束缚态与连续域的强耦合,从而达到可控的高效能量耗散。在应用层面,BIC因其无辐射特性,非常适合制造低损耗波导和高Q值微腔;同时,它对于辐射模的调控能力,也使其可被应用于光栅天线器件。而anti-BIC则凭借其偏振敏感与强辐射特性,为片上偏振滤波和模式转换等应用提供了新方案。

鉴于BIC与anti-BIC表现出的良好性能以及巨大的应用前景和灵活的设计自由度,本文综述其在集成光子平台中的研究应用,主要包括以下4个方面:1)基于连续域束缚态的低损耗波导;2)利用BIC的衍射调

收稿日期:2025-05-20。

基金项目:国家重点研发计划项目(2024YFB3212700)资助;国家自然科学基金(62135011、62405273)资助;国家资助博士后研究人员计划(GZC20250557)资助;浙江省“领雁”研发攻关计划(2022C01103)资助;浙江省重点研发计划(2021C01199)资助;中央高校基本科研业务费资助。

作者简介:时尧成(1981—),男,教授,博士生导师,浙江大学光电科学与工程学院副院长,国家光学仪器工程技术研究中心副主任,国家高层次人才、国家优秀青年科学基金获得者。先后主持国家级科研项目20余项,并荣获浙江省自然科学一等奖。目前主要从事硅基光子集成芯片及其应用研究。



控硅波导光栅天线(SWGA);3)支持BIC的高Q微腔;
4)基于anti-BIC的起偏器。

1 基于BIC的低损耗波导

BIC波导是一种典型的低损耗波导结构,其原理可追溯至2007年,WEBSTER M A等人^[2]在硅基绝缘体脊波导中发现,类横磁(TM)模会因宽度变化而产生显著的横向泄露损耗。然而,当波导宽度处于特定的“magic”尺寸时,不同泄露通道会因相消干涉而使模式泄露被抑制,损耗由此大幅降低,这一现象成为了BIC特性的典型体现。此后,该方案在铌酸锂^[3]平台上也得到验证,为BIC在集成光子芯片中的应用开辟了新路径。

2018年前,由于低损耗铌酸锂刻蚀技术尚未成熟,使得传统的脊型BIC波导难以应用于铌酸锂、金刚石等耐刻蚀材料。在此背景下,一种基于高折射率平板(如硅、氮化硅、铌酸锂、金刚石)支撑低折射率条形波导(如聚合物)的非刻蚀型结构,凭借其简单的制备工艺与良好的光场限制能力,为BIC器件的实现提供了新途径。早在2014年,高折射率平板上低折射率聚合物波导的BIC波导便得到了验证^[4],随后被不断改进并拓展至调制器^[5]、高维通信^[6]、光与物质相互作用^[7]和非线性频率转换^[8]等领域,有效地提升了器件的性能。随着研究的进一步深入,低损耗BIC波导结构从传统的单波导扩展至多波导^[9-10]和多层异质波导^[11]体系,通过聚合物、氮化硅、铌酸锂、硅等材料的异质异构组合,在集成电光调制器^[12]和非线性频率转换^[13]领域取得了较好的应用效果。

2 利用BIC的衍射调控SWGA

SWGA是片上LiDAR和自由空间光通信等系统的重要组成部分,其本质是利用光栅进行衍射强度的控制。传统SWGA采用减小光栅扰动(即减小特征尺寸)的方式降低衍射强度、增加传播距离,但因其需要极小的特征尺寸,工艺难度大。2020年,XU H课题组^[14]首次将BIC应用于SWGA中,提出了一种不需要极小特征尺寸的衍射调控的方法。该BIC-SWGA结构本质是一个带有周期性纳米深孔光栅的硅条形波导。其原理是:结构的束缚态是沿波导传播的横电(TE₀)模,而连续态是自由空间的辐射模。纳米深孔引起波导内的光的衍射,产生向自由空间辐射的光场($E_{L(-)}$, $E_{R(+)}$)和波导内部的局域散射模($E_{L(+)}$, $E_{R(-)}$)。通过精确设计波导的宽度达到临界宽度 w_c ,此时2个散

射模($E_{L(+)}$ 和 $E_{R(+)}$ 、 $E_{L(-)}$ 和 $E_{R(-)}$)满足干涉相消的条件,侧壁的辐射泄露被极大地抑制,形成衍射受限的准BIC。此时,光主要从波导顶部和底部向外辐射(E_T , E_B),在孔半径 $r_{gr}=60$ nm时具有极弱的衍射强度,特征尺寸更大。从理论和实验结果(见参考文献[14])可知,当波导宽度达到临界宽度 $w_{c1}=600$ nm时,器件的衍射强度极低($\alpha\approx 3.3\times 10^{-3}$ dB/ μ m),可实现厘米级的传播长度和超小远场发散角(0.027°)。除此之外,BIC-SWGA还具有衍射色散平坦化的优势,即在中心波长附近衍射强度对波长不敏感($\partial\alpha/\partial\lambda\approx 0$),能够有效降低波束扫描系统因波长调谐造成的误差,进而保证了输出功率和发散角在扫描过程中的稳定性。

本文对比了不同SWGA结构的性能,如表1所示。可以看出,BIC-SWGA突破了其它传统SWGA天线的结构设计思路,将天线长度减小至1 cm量级,并大幅压缩了天线的发散角。这项作为高性能光学天线的设计提供了新途径,通过BIC机制实现了对衍射强度与色散特性的协同调控。

表1 不同SWGA结构的性能对比表

结构	长度/ mm	发散角/ (°)	特征 尺寸/nm	额外损耗/ (dB/ μ m)	刻蚀 次数/次
侧壁光栅 天线 ^[15]	1	0.15	10	—	1
套刻氮化硅 光栅天线 ^[16]	2	0.15	>80	—	2
套刻氮化硅 光栅天线 ^[17]	-1	0.089	>90	—	2
BIC-SWGA ^[14]	10	0.027	60	3.3×10^{-3}	1

3 支持BIC的高Q微腔

低损耗的BIC波导具有制备高Q微腔的潜力。近年来,片上集成高Q BIC微腔的研究主要围绕3类结构展开:BIC光子晶体腔、BIC脊型波导谐振腔和BIC微环谐振腔。2016年,浙江大学陈红胜团队^[18]与俄罗斯圣光机大学的SADRIEVA Z F团队^[19]在一维光子晶体平板中验证了BIC现象。2024年,丹麦科技大学的Rodrigo Sato团队^[20]首次发现,在截断的光子晶体边缘处也可支持一种特殊BIC现象。这些研究虽为高性能光子晶体微腔的设计开辟了新思路,但其结构普遍存在与硅基光子平台集成难度高的问题。与传统光子微腔不同,基于BIC机制的脊型波导能够形成高Q值

时尧成,刘卫喜,陈元辰,等:连续域束缚态与反连续域束缚态在集成光子器件的应用研究

微腔^[21-22],且具备与硅基光子平台的天然兼容性,但其主要受限于波导的传输与散射损耗,目前实验实现的Q值仅为520。相比之下,BIC微环/盘谐振腔可以实现更高的Q值,例如香港中文大学孙贤开团队^[5,23]已实现了品质因子分别达 2.2×10^5 和 5×10^5 的BIC波导微腔,但其结构尺寸较大,限制了部分集成应用。因此,如何在实现高Q因子的同时兼顾结构的小型化,仍是当前BIC微腔研究的重要方向。

基于小型化和高Q因子BIC微腔的研究目标,本文团队提出了免刻蚀的一维光子晶体腔(详细过程和结果见参考文献[24])和高Q BIC超构光栅(详细过程和结果见参考文献[25])等2种新型BIC微腔结构。首先,在薄膜铌酸锂上制备了具有“magic”宽度的周期性聚合物条状光子晶体,由此构建出免刻蚀的BIC一维光子晶体腔。该结构整体尺寸约为100 μm ,其Q因子超过12 000,并基于此实现了电光调制,调制效率达1.5 pm/V,调制带宽为28 GHz。随后,本文团队又提出一种完全兼容标准硅光工艺的超构光栅(metagrating),其整体尺寸约为180 μm 。当横向输入的平板波导光满足二阶布喇格条件 $\lambda_{\text{Brag}}=n_{\text{ridge,neff}}\Lambda_g$ 时($n_{\text{ridge,neff}}$ 为脊波导中TE₀模式的有效折射率, Λ_g 为深刻蚀孔阵列的周期),它将会耦合到纵向脊形波导的谐振模式。利用波导内的法布里-珀罗干涉来抑制横向泄露,从而获得高达5 200的Q因子,并验证了其作为温度传感器的可行性(77 pm/K的温度灵敏度)。上述工作进一步丰富了BIC高Q微腔的结构,为电光调制和温度传感提供了新的技术支撑。

BIC微腔的性能对比如表2所示。可以看出,BIC微腔有实现超高Q因子的潜力,并且通过聚合物波导

实现耐刻蚀平板薄膜材料的免刻蚀高Q微腔,为新材料平台的高性能谐振腔提供了有效的解决途径。

4 基于anti-BIC的起偏器

当波导宽度从“magic”变到“anti-magic”时,对应的BIC会转变为anti-BIC;此时,模式泄漏因泄漏通道之间的相长干涉而显著增强。基于anti-BIC机制,硅基平台已实现了低损耗起偏器^[29-30];在铌酸锂平台上,通过采用TFLN或TFLN上Si₃N₄的脊波导结构,则理论上可实现插入损耗小于1 dB、消光比大于20 dB的高性能起偏器^[31-32]。然而,由于束缚模式与连续模式之间的耦合较弱,此类器件的尺寸通常较大(已达毫米量级),因而难以实现高密度集成。针对上述问题,本文团队基于anti-BIC效应,提出了一种增强束缚态和连续域耦合的薄膜铌酸锂起偏器设计(具体过程和结果见参考文献[33])。通过调控脊型波导宽度和侧壁倾角,有效增强了模式间的耦合强度,从而将器件尺寸缩减至50 μm 以内,同时实现了低于0.05 dB的极低插入损耗和高于20 dB消光比。此外,传统的anti-BIC起偏器仅依赖波导宽度来调控耦合强度,而本工作则揭示了侧壁倾角可作为调控anti-BIC效应的一个新自由度,为BIC或anti-BIC器件性能优化提供了更多维度。

本文对已报道的片上薄膜铌酸锂起偏器进行了性能对比,结果如表3所示。可以看出,传统的薄膜铌酸锂起偏器普遍存在损耗高或尺寸大的问题。与之相比,anti-BIC起偏器兼具小尺寸与极低插入损耗的显著优势,因此为实现高性能片上低损耗光子回路提供了关键的器件保障。

表2 BIC微腔的性能对比表

结构	Q因子	尺寸/ μm	温度灵敏度/(pm/K)	调制效率/(pm/V)	刻蚀次数/次
微环腔 ^[26]	4.3×10^7	$\pi\times 200^2$	—	—	1
一维光子晶体腔 ^[27]	1.34×10^5	<50	—	16	2
BIC微环腔 ^[5]	$>10^5$	$\pi\times 68^2$	—	—	0
二维BIC光子晶体腔 ^[28]	10^6	—	—	—	1
一维BIC光子晶体腔 ^[24]	$>10^4$	~100	—	1.5	0
脊波导BIC腔 ^[22]	520	—	19.5	—	1
超材料光栅BIC腔 ^[25]	5 200	~180	77	—	2

表3 片上薄膜铌酸锂上偏振起偏器的性能对比

结构	是否有反射	透射偏振	长度/ μm	插损/dB	偏振消光比/dB	带宽/nm
SWG a) ^[34]	是	TM	~55	<1.5	>20	36
ADC b) ^[35]	否	TE	1240	<0.5	20	110
MC+ADC+MMI c) ^[36]	否	TE	>400	0.65	20	80
MC+ADC c) ^[37]	否	TE	>2000	~2	~8	130
长周期光栅 a) ^[38]	否	TE	~100	<2	>20	260
		TM				90
CADC b) ^[39]	否	TE	180	<2.6	>26	50
		TM		<3.3	>13	50
anti-BIC a) ^[33]	否	TE	46	<0.04	>20	>140

注:a)起偏器;b)偏振分束器;c)偏振旋转分束器;SWG:亚波长光栅;MC:模式转换器;ADC:非对称方向耦合器;MMI:多模干涉耦合器;CADC:级联ADC。

5 结束语

本文系统综述了BIC与anti-BIC在集成光子器件中的研究进展,涵盖低损耗BIC波导、BIC光栅天线、BIC高Q微腔及anti-BIC起偏器等4个方向。BIC基于泄漏通道间的相消干涉有效抑制模式泄漏,为低损耗波导、衍射可控光栅天线和高Q微腔提供了物理基础;anti-BIC则借助泄漏通道间的相长干涉增强能量辐射,为高效偏振控制器件奠定了设计原理。本文重点介绍了4项创新工作:无需极小特征尺寸的BIC光栅天线、免刻蚀BIC光子晶体腔、BIC超构光栅以及紧凑型anti-BIC起偏器,为高性能集成光栅天线、微腔与偏振器件的实现提供了新路径。

未来,BIC/anti-BIC研究可进一步拓展至硫系玻璃、钽酸锂、锆钛酸铅等新材料体系,以发掘其中红外波段及非线性光学等领域的应用潜力;通过引入相变材料(如 Sb_2Se_3 、GST)或电光调控等技术,有望实现器件功能的动态重构。最终,在片上实现多功能集成的BIC/anti-BIC光子回路,将为光通信、传感、计算及量子信息技术等领域持续注入新动力。

参考文献:

- [1] 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): 112-125.
- [2] WEBSTER M A, PAFCHEK R M, MITCHELL A, et al. Width dependence of inherent TM-mode lateral leakage loss in silicon-on-insulator ridge waveguides[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2007, 19(6): 429-

431.

- [3] KANG Y. Shallow etched low-loss thin film lithium niobate waveguides with bound states in the continuum[J]. AIP Advances, 2023, 13(3): 035332-1-035332-7.
- [4] ZOU C L, CUI J M, SUN F W, et al. Guiding light through optical bound states in the continuum for ultrahigh-Q microresonators[J]. Laser & Photonics Reviews, 2014, 9(1): 114-119.
- [5] YU Z, XI X, MA J, et al. Photonic integrated circuits with bound states in the continuum[J]. Optica, 2019, 6(10): 1342-1348.
- [6] YU Z, TONG Y, TSANG H K, et al. High-dimensional communication on etchless lithium niobate platform with photonic bound states in the continuum[J]. Nature Communications, 2020, 11(1): 2602-1-2602-9.
- [7] ZHOU P, ZHANG H Z, LI T M, et al. Efficient on-chip platform for coherent light-matter coupling using bound states in the continuum[J]. Science Advances, 2025, 11(17): eadu0976-1-eadu0976-7.
- [8] YUAN Z, CHEN J, CHEN D, et al. An ultra-low-loss waveguide based on BIC used for an on-chip integrated optical gyroscope[J]. Photonics, 2023, 10(4): 453-1-453-17.
- [9] QIN H, SHI X, OU H. Exceptional points at bound states in the continuum in photonic integrated circuits[J]. Nanophotonics, 2022, 11(21): 4909-4917.
- [10] GU Z, JIANG S, LIU C, et al. Robust bound states in the continuum in a dual waveguide system[J]. Photonics Research, 2023, 11(4): 575-580.
- [11] HAN K, LEBRUN T W, AKSYUK V A. Bound-state-in-continuum guided modes in a multilayer electro-optically active photonic integrated circuit platform[J]. Optica, 2024, 11(5): 706-713.
- [12] LI X, MA J, LIU S, et al. Efficient second harmonic generation by harnessing bound states in the continuum in semi-nonlinear etchless lithium niobate waveguides[J]. Light: Science & Applications, 2022, 11(1): 317-1-317-8.

- [13] CHAKKORIA J J, AONI R A, DUBEY A, et al. Efficient poling-free wavelength conversion in thin film lithium niobate harnessing bound states in the continuum[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2024, 18(11): 2301335-1-2301335-7.
- [14] XU H, SHI Y. Diffraction engineering for silicon waveguide grating antenna by harnessing bound state in the continuum[J]. *Nanophotonics*, 2020, 9(6): 1439-1446.
- [15] MILLER S A, PHARE C T, CHANG Y-C, et al. 512-element actively steered silicon phased array for low-power LIDAR[C]//OSA. proceedings of the Conference on Lasers and Electro-Optics, California: OSA, 2018: 2018 : JTh5C.2-1-JTh5C.2-2.
- [16] SHANG K, QIN C, ZHANG Y, et al. Uniform emission, constant wavevector silicon grating surface emitter for beam steering with ultra-sharp instantaneous field-of-view[J]. *Optics Express*, 2017, 25(17): 19655-19661.
- [17] ZADKA M, CHANG Y-C, MOHANTY A, et al. On-chip platform for a phased array with minimal beam divergence and wide field-of-view[J]. *Optics Express*, 2018, 26(3): 2528-2534.
- [18] GAO X, HSU C W, ZHEN B, et al. Formation mechanism of guided resonances and bound states in the continuum in photonic crystal slabs[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 31908-1-31908-7.
- [19] SADRIEVA Z F, BOGDANOV A A. Bound state in the continuum in the one-dimensional photonic crystal slab[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2016, 735: 012122-1-012122-6.
- [20] SATO R, VINTHER BERTELSEN C, NIKITIN M, et al. Observation of edge bound states in the continuum at truncated silicon pillar photonic crystal[J]. *Nature Communications*, 2024, 15(1): 10544-1-10544-8.
- [21] BEZUS E A, BYKOV D A, DOSKOLOVICH L L. Bound states in the continuum and high-Q resonances supported by a dielectric ridge on a slab waveguide[J]. *Photonics Research*, 2018, 6(11): 1084-1093.
- [22] NGUYEN T G, REN G, SCHOENHARDT S, et al. Ridge resonance in silicon photonics harnessing bound states in the continuum[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2019, 13(10): 1900035-1-1900035-9.
- [23] YU Z, SUN X. Acousto-optic modulation of photonic bound state in the continuum[J]. *Light: Science & Applications*, 2020, 9(1): 467-387.
- [24] ZHANG J, PAN B, LIU W, et al. Ultra-compact electro-optic modulator based on etchless lithium niobate photonic crystal nanobeam cavity[J]. *Optics Express*, 2022, 30(12): 20839-20846.
- [25] XU H, SHI Y. Silicon-waveguide-integrated high-quality metagrating supporting bound state in the continuum[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2020, 14(6): 1900430-1-1900430-6.
- [26] GAO R, YAO N, GUAN J, et al. Lithium niobate microring with ultra-high Q factor above 108[J]. *Chinese Optics Letters*, 2022, 20(1): 011902-1-011902-5.
- [27] LI M, LING J, HE Y, et al. Lithium niobate photonic-crystal electro-optic modulator[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 4123-1-4123-8.
- [28] HSU C W, ZHEN B, LEE J, et al. Observation of trapped light within the radiation continuum[J]. *Nature*, 2013, 499(7457): 188-191.
- [29] NGUYEN T G, BOES A, MITCHELL A. Lateral leakage in silicon photonics: theory, applications, and future directions[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2020, 26(2): 1-13.
- [30] DAI D, WANG Z, JULIAN N, et al. Compact broadband polarizer based on shallowly-etched silicon-on-insulator ridge optical waveguides[J]. *Optics Express*, 2010, 18(26): 27404-27415.
- [31] SAITOH E, KAWAGUCHI Y, SAITOH K, et al. TE/TM-Pass polarizer based on lithium niobate on insulator ridge waveguide[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2013, 5(2): 6600610-1-6600610-11.
- [32] LIU Y, HUANG X, LI Z, et al. TE/TM-pass polarizers based on lateral leakage in a thin film lithium niobate - silicon nitride hybrid platform[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(17): 4915-4918.
- [33] LIU W, LI H, WEN C, et al. Ultra-low loss lithium niobate polarizer with enhanced anti bound state in the continuum[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2024, 18(12): 2400177-1-2400177-8.
- [34] HAN X, CHEN L, JIANG Y, et al. Integrated subwavelength gratings on a lithium niobate on insulator platform for mode and polarization manipulation[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2022, 16(7): 2200130-1-2200130-10.
- [35] GAN R, QI L, RUAN Z, et al. Fabrication tolerant and broadband polarization splitter-rotator based on adiabatic mode evolution on thin-film lithium niobate[J]. *Optics Letters*, 2022, 47(19): 5200-5203.
- [36] LUO H, CHEN Z, LI H, et al. High-performance polarization splitter-rotator based on lithium niobate-on-insulator platform[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2021, 33(24): 1423-1426.
- [37] CHEN Z, YANG J, WONG W-H, et al. Broadband adiabatic polarization rotator-splitter based on a lithium niobate on insulator platform[J]. *Photonics Research*, 2021, 9(12): 2319-2324.
- [38] JIN W, CHIANG K S. Leaky-mode long-period grating on a lithium-niobate-on-insulator waveguide[J]. *Optica*, 2021, 8(12): 1624-1631.
- [39] WU Y, SUN X, LI H, et al. Lithium niobate thin film polarization beam splitter based on asymmetric directional coupling[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2022, 40(24): 7843-7847.