

基于非厄米和拓扑效应的光场调控机制与 光学器件研究进展 (特邀)

颜士玲, 朱学艺, 王洪飞, 解碧野, 张秀娟, 卢明辉, 詹 鹏, 张利剑, 芦 红

(南京大学 现代工程与应用科学学院, 江苏 南京 210019)

摘 要: 光的传输与调控是光子集成器件发展的重要基础, 光子晶体作为一种新型的光学功能材料, 在光操控上有着巨大的潜力。与传统的基于实空间光场叠加原理和倒空间固体能带色散理论的光场调控思想不同, 受凝聚态物理中拓扑相概念启发, 通过在光子晶体的能带系统研究中引入拓扑相能够提供新颖的光场调控机制和丰富的输运以及光操控性质, 如高维度的光场调控等。文中分别从非厄米光子体系和拓扑光子学体系两个方面综述了近年来笔者所在的课题组所取得的研究成果。首先, 回顾了光学拓扑研究和光学非厄米研究的背景; 其次, 介绍了在高阶光子拓扑绝缘体、高阶量子自旋霍尔效应、光子晶体的拓扑场局域以及非厄米体系拓扑光传输等领域的研究进展; 最后, 对研究结果在相关领域如光量子计算、光通信等的应用发展趋势进行了总结与展望。

关键词: 拓扑光局域; 拓扑光传输; 非厄米; 光子晶体; 趋肤效应

中图分类号: O436 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20211001

Research progress in optical field regulation mechanism and optical devices based on non-Hermitian and topological effects (*Invited*)

Yan Shiling, Zhu Xueyi, Wang Hongfei, Xie Biye, Zhang Xiujuan,
Lu Minghui, Zhan Peng, Zhang Lijian, Lu Hong

(College of Engineering and Applied Sciences, Nanjing University, Nanjing 210019, China)

Abstract: Optical transmission and regulation is an important basis for the development of photonic integrated devices. As a new optical functional material, photonic crystals have great potential in optical manipulation. Inspired by the concept of topological phase in condensed matter physics, the introduction of topological phase in photonic crystal energy band system research breaks through the traditional light field regulation ideas based on the superposition principle of real space light field and the inverse space solid energy band dispersion theory, and provides a novel light field regulation mechanism, rich transport and light control properties, such as high dimensional light field regulation. In this paper, the research achievements of the research group in recent years were reviewed from two aspects: non-Hermitian photon system and topological photonics system. Firstly, the background of optical topology research and optical non-hermitic research was reviewed. Then, the research progress in the fields of high-order photonic topological insulators, high-order quantum spin hall effect, topological field local area of photonic crystals and topological optical transmission in non-Hermitical systems were introduced. In the end, the development trend of the research results in related fields such as optical quantum computing and optical communication was summarized and prospected.

Key words: topological localization; topological transport; non-Hermitian; photonic crystal; skin effect

收稿日期:2020-11-04; 修订日期:2020-12-08

基金项目:国家重点研发计划(2018YFA0306200);国家自然科学基金(11804149)

0 引言

长期以来,作为现代光子集成器件的核心,光的局域与传输一直是人们研究的热点。如何调控光的传输与局域亦是现阶段学者的研究重点。

光子晶体作为一种新型的光学功能材料,在光操控上有着巨大的潜力。利用光学周期性介质中的能带色散理论,光子晶体可以实现缺陷态、谐振腔等光局域效应,以及负折射、零折射、全反射等新奇的光传输效应。受凝聚态中电子体系拓扑相与拓扑相变的启发,光子晶体中的能带系统也可引入拓扑的概念,从而产生一系列拓扑保护的光传输与局域效应,由此基于拓扑能带理论的新的研究领域——拓扑光子学开始兴起。这些新型效应为光学片上器件、光学输运等领域带来了新的机遇。

与拓扑给光学操控带来新的方式相同,非厄米自由度也能够带来新颖的光学现象和更强大的光学调控能力。非厄米研究与很多光学器件和光学体系都能够完美兼容,如光波导、光子晶体、光学谐振腔和光学超晶格等。这使得光学系统和非厄米研究能够相互促进,相得益彰。

在“量子调控与量子信息”重点研发计划支持下,文中主要介绍了在光学拓扑人工微结构和光学非厄米拓扑研究中取得的一系列研究成果。

1 光学拓扑人工微结构

1.1 高阶光子拓扑绝缘体

拓扑绝缘体^[1]和拓扑半金属^[2]作为拓扑物理研究的重要组成部分,由于其独特的边界态和输运性质,得到了广泛的理论与实验研究。通常一个 d 维的拓扑绝缘体具有 d 维有带隙的体带以及 $d-1$ 维无带隙的边界态。为了描述具有更低维拓扑无能隙边界态的拓扑绝缘体,高阶拓扑绝缘体^[3]开始被提出。高阶拓扑绝缘体相是一种新型拓扑物质相,具有非传统的体-边对应关系和新型低维拓扑边界态的材料;它能够存在更低维边界态的拓扑绝缘体,例如二维高阶拓扑绝缘体具有零维角态。这些新型低维拓扑边界态,比如拐角态和铰链态具有一些特殊性质,比如亚波长,分数荷以及鲁棒性。在此之后,人们在实验上设

计并观察到了相关的低维界面态。然而这些实验设计往往需要在晶格近邻格点之间引入负耦合 (negative coupling),这在一定程度上增加了方案的复杂度和难度。

光子晶体作为一种人工带隙材料,为研究凝聚态理论提供了一种很好的实验平台,其本身也在电磁波的调控中有着广泛的应用价值,比如实现单向电磁波的鲁棒性传输,光的负折射等。因此,设计并实现光子晶体中的拓扑相开始受到越来越多的关注。在前期的利用全介质 (all-dielectric) 光子晶体,在不需要引入负耦合的基础上,便可以实现二阶拓扑光子绝缘体和零维拐角态的理论研究工作^[4]基础上,课题笔者组进一步研究,利用二维全介质光子晶体,提出了一种高阶光子拓扑绝缘体,这是一种超越传统“体-边”对应关系的全新拓扑态,并在光学系统中首次实验观察到了受拓扑保护的零维光学拐角态^[5]。

笔者所在课题组设计出一种具有四重旋转对称性 (C_4) 的光子晶体。其单个元胞内有四个由氧化铝陶瓷构成的圆柱。通过调节圆柱在元胞内的位置,可以实现“扩张晶格”和“收缩晶格”两种构型,其对应的光子能带 (photonic band structure) 则是具有全带隙且具有能带翻转 (band inversion) 的特征。此外,这种“扩张”和“收缩”的能带分别对应拓扑非平庸和拓扑平庸的能带。根据体边对应关系 (当两种具有不同拓扑不变量的材料拼接时,在界面处会在位于特定能量处出现空间场局域,出现边界态),将这两种构型的晶格拼接在一起,则界面处存在拓扑保护的一维边界态。更进一步,则用四层拓扑平庸晶格包围一个 8×8 的拓扑非平庸晶格。通过数值计算这个拼接结构的本征模式,发现在带隙中存在四个简并的态,其垂直于平面的电场分布局域在非平庸构型四个拐角处,对应零维拐角态,如图 1 所示。实验上,利用近场扫描技术对激发的场分布进行探测。激励源 (放置于其中一个拐角处) 激发出垂直于平面的点源电场。当激励源频率从 5.32 GHz 逐步增加到 6.52 GHz 的时候,探测到的电场分布经历了从体态-边界态-拐角态-体态的转变,从而验证了体系具有高阶拓扑相,并揭露出一种不同阶拓扑相的维度层级 (dimensional hierarchy) 结构。这个工作的重要意义在于: (1) 国际上首

次利用全介质在实验上实现了二维高阶拓扑光子晶体,为实现低维度拓扑边界态提供物理机制。(2)实现了一种结构中同时具有不同频率的二维体态,一维边界态和零维拐角态,为实现集成化光子器件提供潜

在指导。(3)利用全介质材料实现,因此理论上可以做到光波频段。其中四重简并拓扑拐角态为研究单光子,多光子量子态的拓扑保护提供新的潜在可能^[5]。

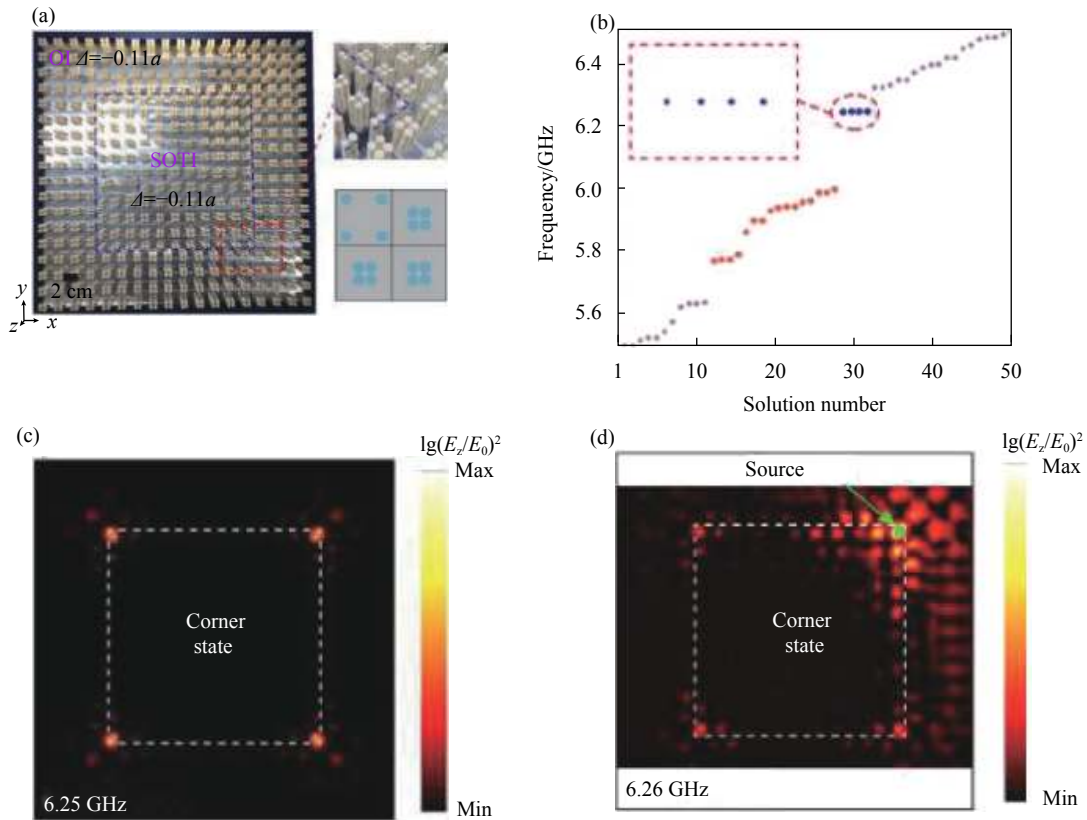


图 1 (a) 二维拼接结构实验照片; (b) 二维拼接结构的本征模式计算 (灰色点表示体态, 黄色点代表边界态, 蓝色点表示拐角态); (c) 模拟的拐角态场分布; (d) 实验测量的拐角态场分布

Fig.1 (a) Photograph of a meta-structure with upper metallic plate removed; (b) Eigenmodes calculation of the meta-structure with the same parameters (Grey dots stand for bulk states, yellow dots represent the dispersive 1D edge states and blue dots stand for corner states); (c) A simulated electric field distribution of one of the four corner states; (d) Experimental visualization of corner states at 6.26 GHz

1.2 高阶量子自旋霍尔效应

传统光子器件在制作过程中不可避免地出现缺陷和杂质,光在传统器件中的局域与传播十分脆弱,存在背向散射的问题。幸运的是,将光子的自旋(或赝自旋)自由度与拓扑能带理论相结合,带有自旋的光可以选择性单向传输从而消除背向散射的影响,这就是现在所熟知的光的量子自旋霍尔效应^[6]。

传统的光量子自旋霍尔效应只关注了光的一维传播,自旋极化的光波被限定在比材料低一个维度的边界上传播,这在某种程度上限制了相关器件的多功

能和可集成化。实现具有拓扑保护和自旋极化的高阶量子自旋效应是一项更具挑战性的任务。

以二维全介质光子晶体为研究平台,首次理论提出并实验证实了高阶量子自旋霍尔效应^[7]。设计出一种具有六重旋转对称性(C6)的光子晶体。其单个元胞内有六个由氧化铝(Al_2O_3)陶瓷构成的圆柱,如图 2 所示。通过调节圆柱在元胞内的位置,可以实现“扩张晶格”和“收缩晶格”两种构型,其对应的光子能带具有全带隙且具有能带翻转的特征。这种“扩张”和“收缩”的晶格构型分别对应于高阶拓扑相和拓扑

平庸相。根据高阶拓扑绝缘体的体边对应关系,将这两种构型的晶格拼接在一起,则界面处存在拓扑保护的一维边界态和零维拐角态。通过计算手性源与赝自旋的交叠程度,推测出不同手性的源能够激发出具有不同赝自旋的拐角态,实现拐角态的选择性激发。

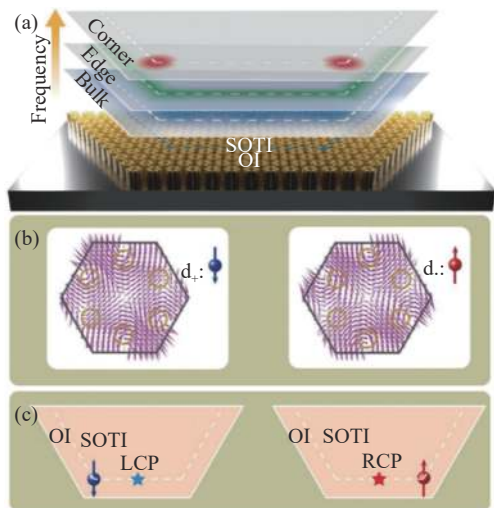


图 2 (a) 高阶拓扑绝缘不同维度的拓扑态; (b) 拐角态的赝自旋; (c) 手性源选择性激发的拐角态

Fig.2 (a) Different dimensional topological states of higher-order topological insulators; (b) Pseudospins of corner states; (c) Corner states selected by pseudospin-dependent sources

将左旋光和右旋光放置在半六角结构的两个拐角中间界面处时,对于左旋光和右旋光激励,光波分别被主要局域在左边拐角和右边拐角处。这种对光波的方向选择性局域是对之前光量子自旋霍尔效应的高阶推广,亦即高阶量子自旋霍尔效应。该研究结果为进一步研究高阶光子拓扑绝缘体的自旋极化提供基础。此外,从应用的角度考虑,该研究为将来实现新型自旋拓扑激光、具有自旋的多光子高阶拓扑量子态、手性量子发光点等提供潜在可能^[7]。

2 光子晶体中的拓扑场局域

光子晶体的研究目前主要集中在二维周期系统,而在实验中二维周期结构在其非周期方向上具有有限尺寸。对微波波段来说金属可以起到很好的约束作用,因此将金属放置在结构上下面,系统还可以等效为一个近似完美的二维周期系统。但对红外或者更短波长的系统,引入金属将不再适用。因此,需要

研究如何在全介质系统中将光束束缚在光子晶体中。

光子晶体板中光的连续束缚态为解决准二维系统中光局域束缚问题提供了有效途径。连续束缚态超越了空气锥的限制为垂直腔面激光器、光缓存器、光量子器件等提供了重要思路。之前对光子晶体板中的连续束缚态研究只针对 TE 或 TM 一种模式进行。光学系统特有的 TE 与 TM 耦合情况下是否存在连续束缚态仍是未知。

构造了具有 TE-TM 耦合的双层光子晶体板结构,板的最外层被空气包裹,两层板间紧密贴合以增强层间的耦合,如图 3 所示。通过在两层光子晶体板堆叠方向引入失配,证实了在 TE 与 TM 耦合情况下仍然存在受对称性保护的连续束缚态,如图 4 所示^[8]。不同于传统单一偏振下的光学束缚态,TE-TM 耦合的连续束缚态的实现大大扩展了束缚态的存在条件,为 TE-TM 混合偏振器件(如激光器)的实现提供理论基础;同时也为集成化光缓存、光量子信息器件等提供了前提和基础^[8]。

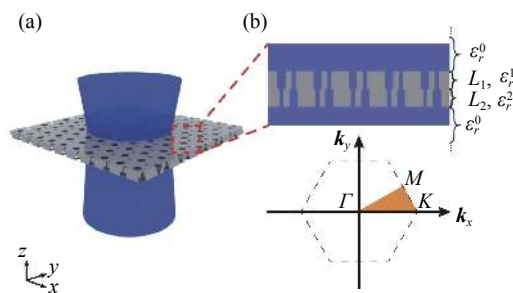
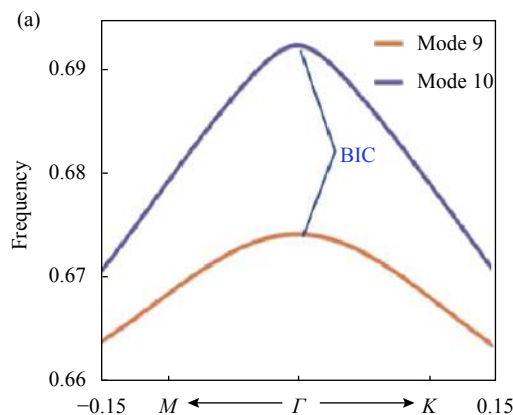


图 3 (a) 双层光子晶体板示意图; (b) 剖面图^[8]

Fig.3 (a) Schematic of bilayer photonic crystal slabs; (b) Cross-section schematic of bilayer photonic crystal slabs and their first Brillouin zone^[8]



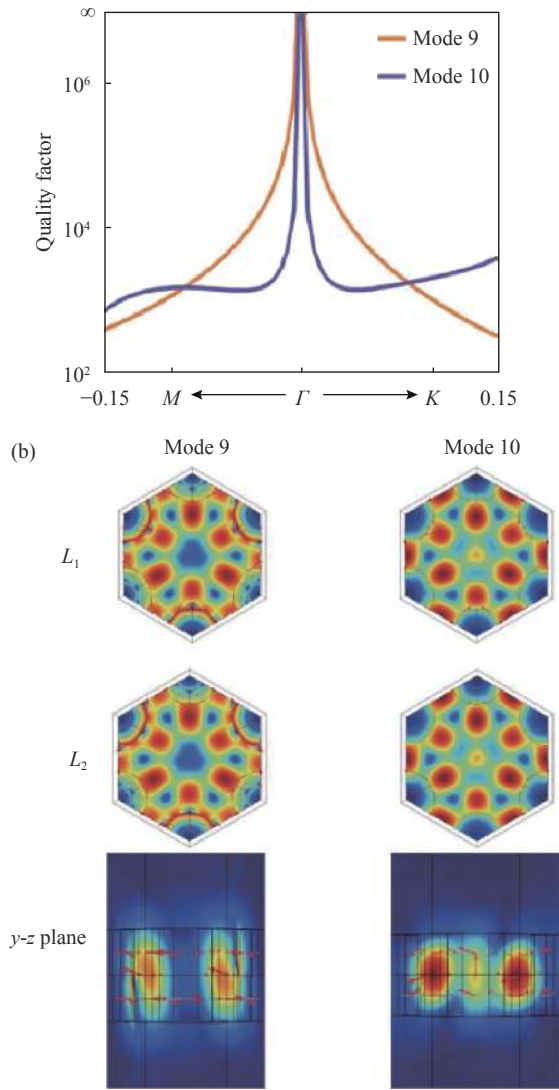


图 4 (a) TE 和 TM 耦合的能带与品质因子; (b) 模式 9 和 10 的归一化电场分布^[8]

Fig.4 (a) Band structures and Q factor with the TE and TM coupling; (b) Normalized electric fields of modes 9 and 10^[8]

3 非厄米体系拓扑光传输

光子系统中的增益和损耗是长久以来研究人员关注的重点。这些光子系统中的传统调控手段与凝聚态物理的拓扑相研究结合催生了对非厄米光子体系的广泛研究。目前非厄米体系拓扑光传输的研究主要可以划分为两个方面：一、体带无能隙的非厄米拓扑系统；二、体带有能隙的非厄米拓扑系统。对体带无能隙的非厄米拓扑系统主要关注奇异点^[9]，奇异环，趋肤效应^[10]等对光在非厄米光子晶体体块材料中的传输具有新颖调控作用的物理机制。同时，由于光

学系统具有易调控、少杂质、易制备等优势，利用光学系统研究量子力学中的非厄米现象也有着极大的优势。

3.1 基于双层光子晶体的非厄米紧束缚模型

光子晶体的堆叠构造了新的物理系统(堆叠二维光子材料), 其中的非厄米的引入涉及到多 EP 点的协调组合, 为平带调控以及由其引申的群速度的调控具有重大意义, 但详细机制仍然不为人所知。课题组成员首先建立了基于双层光子晶体的非厄米紧束缚模型, 并探讨了 PT 对称性以及粒子空穴对称性对 EP 点组合的影响, 发现了 EP 环与 EP 同心环的演变规律^[11], 如图 5 所示。之后, 通过构造基于复杂 EP 系统的拓

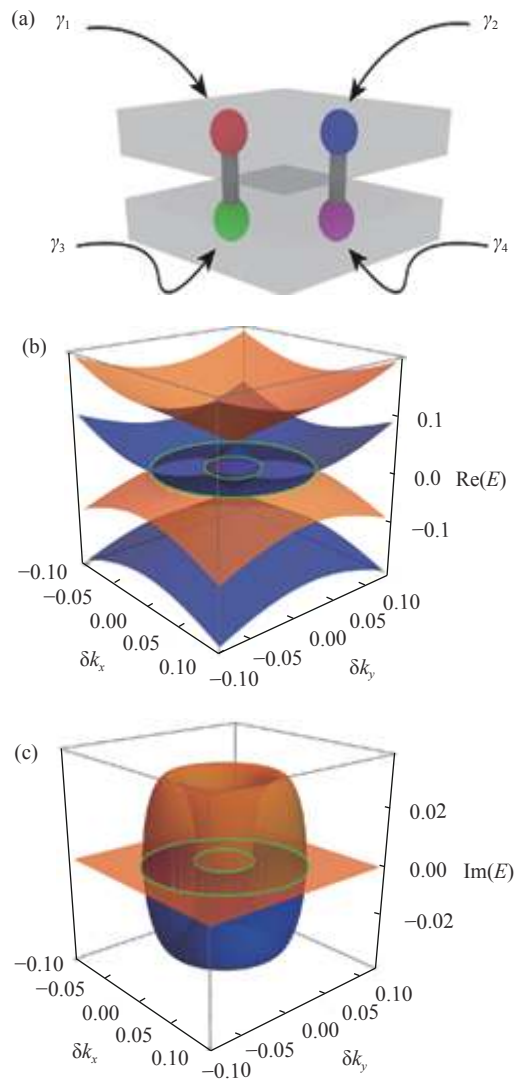


图 5 (a) 光子晶体周期单元; (b) 和 (c) Type II 能带结构

Fig.5 (a) Unit cell of photonic crystals; (b) and (c) band structures of type II

扑不变量, 将 EP 环与 EP 同心环进行定性描述, 并在以硅材料为基础的双层光子晶体中通过模拟实验观察到了 EP 同心环以及具有增益与损耗的边界态表面弧。

该研究首次揭示了堆叠二维光子材料中的非厄米效应, 并模拟观测到了 EP 同心环的群速度调节新平台, 以及具有增益损耗的表面弧行为, 极大地促进了人们对堆叠材料中非厄米效应的认识与应用^[11]。

3.2 基于耦合共振光波导的非厄米趋肤效应及体边不对应

非厄米趋肤效应是非厄米系统一个具有代表性的现象, 在此效应之下系统所有本征态都位于边界

处, 并由此导致传统的拓扑体边对应关系失效。课题组成员基于光学 CROW 结构, 设计了一种非厄米的一维 Su-Schrieffer-Heeger (SSH) 模型。SSH 模型是一种一维紧束缚模型, 其拓扑性质来源于具有交替变化的耦合强度。由于 CROW 结构具有特殊的单向耦合性, 通过设计非厄米调制的区间, 实现左右非对称的耦合。这种特殊的结构设计使得模型具有不同于以往的特殊现象。当取开放边界和周期性边界条件时, 奇异点的位置发生变化, 从而产生特殊的体边对应关系。在非厄米的 SSH 模型中, 其波函数随传播过程而产生幅值和相位的变化, 所有的体态场分布都局域在边界上, 呈现出特殊的非厄米趋肤效应^[12], 如图 6 所示。

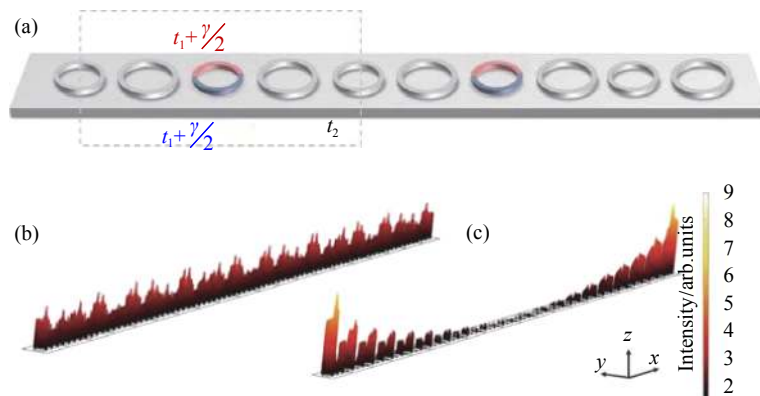


图 6 (a) 耦合共振光波导 SSH 模型; (b) 厄米系统中普通体态场分布; (c) 非厄米体态趋肤效应场分布

Fig.6 (a) Schematic diagram of the CROW SSH model; (b) Field distribution of Hermitian bulk state; (c) Field distribution of non-Hermitian skin effect

光学非厄米趋肤效应提供了收集光能并将光局域在边界上的一种全新的机制, 有望应用于宽带光能捕获等领域, 并且本身可光子集成的特点能够有望应用于耦合器、分束器、非对称器件、激光器等^[12]。

4 结 论

文中聚焦于拓扑光子领域和光学非厄米领域, 将其与传统光学器件相结合, 探究由此引发的新现象和新效应对光传输与局域的调控以及由此导致的潜在应用。在“量子调控与量子信息”重点研发计划支持下, 课题组成员结合人工带隙微结构设计理论, 在国际上率先提出并实现多种具有拓扑性质的人工微结构, 探索其对光场操控的新效应和新机制, 取得了一系列成果。这些成果对集成化场局域器件和光操控器件的发展有着重要意义, 为其在光传感、光通信、光量子计算方面的应用奠定了基础。

参 考 文 献:

- [1] Xia Y, Qian D, Hsieh D, et al. Observation of a large-gap topological-insulator class with a single Dirac cone on the surface [J]. *Nature Physics*, 2009, 5(6): 398-402.
- [2] Wan X G, Turner A M, Vishwanath A, et al. Topological semimetal and Fermi-arc surface states in the electronic structure of pyrochlore iridates [J]. *Physical Review B*, 2011, 83(20): 205101.
- [3] Xue H R, Yang Y H, Gao F, et al. Acoustic higher-order topological insulator on a kagome lattice [J]. *Nature Materials*, 2019, 18(2): 108-112.
- [4] Xie B Y, Wang H F, Wang H, et al. Second-order photonic topological insulator with corner states [J]. *Physical Review B*, 2018, 98(20): 205147.
- [5] Xie B Y, Su G X, Wang H F, et al. Visualization of higher-order topological insulating phases in two-dimensional dielectric photonic crystals [J]. *Physical Review Letters*, 2019, 122(23):

- 233903.
- [6] Simon J, Tanji H, Ghosh S, et al. Single-photon bus connecting spin-wave quantum memories [J]. *Nature Physics*, 2007, 3: 765-769.
- [7] Xie B Y, Su G X, Wang H F, et al. Higher-order quantum spin Hall effect in a photonic crystal [J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 3768.
- [8] Wang H F, Samit K G, Zhu X Y, et al. Bound states in the continuum in a bilayer photonic crystal with TE-TM cross coupling [J]. *Physical Review B*, 2018, 98(21): 214101.
- [9] Jerrard H. Optical compensators for measurement of elliptical polarization [J]. *Journal of The Optical Society of America*, 1948, 38(1): 35-59.
- [10] Yao S, Wang Z. Edge states and topological invariants of non-Hermitian systems [J]. *Phys Rev Lett*, 2018, 121(8): 086803.
- [11] Wang H F, Xie B Y, Samit K G, et al. Exceptional concentric rings in a non-Hermitian bilayer photonic system [J]. *Physical Review B*, 2019, 100(16): 165134.
- [12] Zhu X Y, Wang H Q, Samit K G, et al. Photonic non-Hermitian skin effect and non-Bloch bulk-boundary correspondence [J]. *Physical Review Research*, 2020, 2(1): 013280.



第一作者简介：颜士玲，女，博士，2017年获得南京理工大学光学工程博士学位，后续在南京现代工程与应用科学学院从事博士后工作。2019年获国家自然科学基金青年基金资助。主要从事激光超声，光声成像以及人工微结构方面的研究。Email: yanshiling89@163.com



导师简介：卢明辉，男，博士，教授，2007年获得南京大学材料物理学博士学位。现任南京大学现代工程与应用科学学院教授，获得2016年度国家自然科学基金杰出青年基金资助；入选2017年度科技部创新人才推进计划“中青年科技创新领军人才”；2018年度江苏特聘教授。主要研究领域是人工结构材料的物理效应和器件性能，发表包括 *Nature Materials*, *Science*, *Nature Physics*, *Nature Communications* 等高水平期刊论文多篇。其研究成果“在声子晶体中实现声波双负折射”入选“2007年度中国基础研究十大新闻”。作为第二完成人，获得2015年自然科学二等奖（声子晶体等人工带隙材料的设计、制备和若干新效应的研究）。Email: luminghui@nju.edu.cn