

# 太赫兹人工表面等离激元波导阵列中拓扑零模的激发

胡攀\*, 马毅, 黄俐皓

上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海

收稿日期: 2023年4月14日; 录用日期: 2023年5月24日; 发布日期: 2023年5月31日

## 摘要

一维拓扑波导阵列探索新的拓扑相位和拓扑模式提供了一个良好的平台。基于Su-Schriffer-Heeger (SSH)模型, 我们通过在太赫兹人工表面等离激元(SSPP)波导阵列中构造长-长缺陷结构和短-短缺陷结构来激发拓扑零模和束缚模。仿真结果表明, 太赫兹SSPP能很好地束缚在波导中心界面, 并表现出非扩散特性。零模出现在波导阵列对应的能带隙中, 并且不同数量的波导对应不同数量的零模式。我们的研究为未来研究太赫兹拓扑器件提供了一条新的途径。

## 关键词

太赫兹, 波导, 拓扑, 模式

# Excitation of Topological Zero Mode in Terahertz Spoof Surface Plasmon Waveguide Array

Pan Hu\*, Yi Ma, Lihao Huang

School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Apr. 14<sup>th</sup>, 2023; accepted: May 24<sup>th</sup>, 2023; published: May 31<sup>st</sup>, 2023

## Abstract

One-dimensional topological waveguide array provides a good platform for exploring new topological phases and topological modes. Based on the Su-Schriffer-Heeger (SSH) model, we excited

\*通讯作者。

**topological zero mode and binding mode by constructing long-long defect structures and short-short defect structures in terahertz spoof surface plasmon polariton (SSPP) waveguide arrays. The simulation results show that the terahertz SSPP is well bound to the central interface of the waveguide and exhibits non-spreading feature. The zero modes appear in the energy band gap corresponding to the waveguide array, and different numbers of waveguides correspond to different numbers of zero modes. Our study provides a new avenue for future research on terahertz topology devices.**

## Keywords

**Terahertz, Waveguide, Topology, Mode**

Copyright © 2023 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

表面等离激元(SPP)是沿金属与介质界面传播的局域表面波,在垂直于界面的两个方向上呈指数衰减[1]。在太赫兹(THz)领域中,由于金属的行为接近于完美的导体,因此无法实现太赫兹波在平面金属表面的强约束。为了解决这个问题,科研工作者提出了一种超材料方法来预测局限于波纹金属表面的表面波能够模拟 SPP 熟悉的色散特性,称为人工 SPP (SSPP) [2] [3]。SSPP 是在完美导体极限下由周期性金属结构支撑的表面约束电磁波,在场约束和色散特性方面与光学领域下的 SPP 相似。这一概念为在太赫兹频率的平面几何结构上激发 SPP 提供了一条有效的路径。太赫兹 SSPP 波导可以提供亚波长限制,并使太赫兹波能够在特定方向的长距离上以低损耗传播。到目前为止,基于周期性凹槽或柱的太赫兹 SSPP 波导已经被提出和演示。通过利用这些波导组件,可以实现一些基本功能,如直波导[4]、弯曲波导、分束波导[5]和定向耦合[6]等。利用这些基本功能,还可以实现一些复杂的传输形式,如 SSPP 逻辑门。根据波导阵列中电磁场的场分布,将波导阵列中的电磁场分为不同类型的特定场模,常见的模式有拓扑零模[7]、边缘局域模等。由于电磁波在波导阵列中传播的数学形式与薛定谔方程的数学形式一致,因此波导阵列可以作为研究量子力学中某些效应的一个很好的平台[8]。

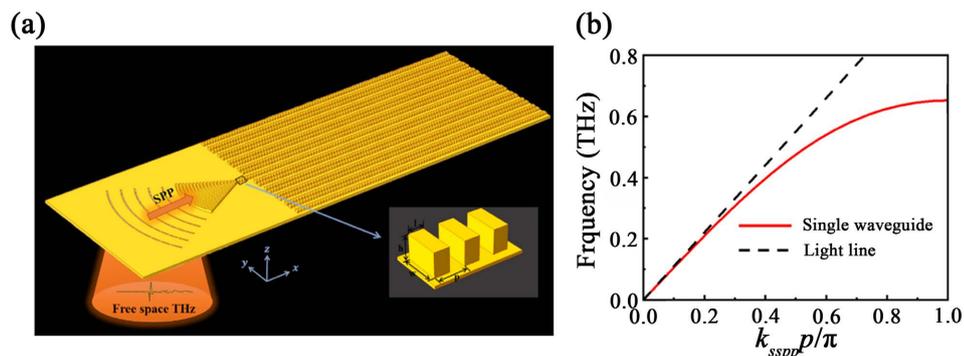
拓扑光子学[9] [10]是从拓扑绝缘体领域发展而来,突破了传统的倒空间固体能带色散的光场调节理论和实空间光场叠加理论,为光场操纵和光输运提供了前所未有的机遇。Su-Schriffer-Heeger (SSH)模型[11]是拓扑光子学研究的热点之一,揭示了在一维系统中局部结构波动和无序的鲁棒性[12],在光传输、激光和光子集成方面发挥着重要作用。在 SSH 模型的基础上,研究了耦合波导和耦合谐振器等光学模拟方法。二聚体打开了能带隙,产生了零模式,零模式局域在系统的边缘,不受不纯体环境和无序的影响。此外,由于手性对称性的保持,拓扑零模的振幅分布呈现出一种特殊的空间分布,只占据了奇位点或偶位点。利用 SSH 模型的原理,调整波导的排列、形状和波导结构,可以构造出具有拓扑特征的边界态,它们出现在波导带的带隙中,对局部结构扰动具有鲁棒性。

在本文中,我们基于 SSH 模型,演示了在一个具有长-长缺陷结构和短-短缺陷结构的太赫兹 SSPP 波导阵列中的拓扑零模式。通过耦合模理论计算,在两种结构的能带图中都发现了零模。仿真结果表明,对于短-短缺陷结构,从中心波导注入太赫兹波激发了一对束缚模,这对束缚模式位于两个次中心波导上;对于长-长结构,从中心波导注入太赫兹波激发了太赫兹拓扑零模。我们对不同数量的波导的能

带图进行分析,发现不同数量的波导对应的能带中的零模式的数量也不同。我们认为,本文的结果为研究太赫兹波导阵列中的拓扑光子输运提供了一种新的方法。

## 2. 建模与理论分析

图 1(a)显示了基于 SSPP 波导阵列实现拓扑零模的仿真结构示意图。金属表面周期性地排列着类似于多米诺骨牌的金属柱。该结构分为激发区、能量聚焦区和能量传输区三个部分。太赫兹 SSPP 由弯曲孔阵列激发。激发的 SSPP 通过周期性递减的扇形漏斗波导聚焦,最终通过传输区传输。单个波导结构如图 1(a)右下插入图所示。以往的研究表明,金属结构的几何尺寸对 SPP 模式的色散关系有显著的影响。因此,我们选择的参数为  $w = 120 \mu\text{m}$ ,  $p = 100 \mu\text{m}$ ,  $h = 80 \mu\text{m}$  和  $l = 50 \mu\text{m}$ 。图 1(b)显示了使用商业软件 CST 微波工作室的本征模求解器计算出的波导结构的色散关系( $k_{\text{sspp}}$  相对于频率)。在数值模拟中,考虑了波导结构的一个单元格。波导和柱子的底部被认为是完美的电导体。在  $x$  方向上采用周期边界条件,在  $x$  方向上的相位变化为  $\theta$ 。根据方程  $k_{\text{sspp}} = \theta * \pi / (180 * p)$ ,可以获得  $k_{\text{sspp}}$  的值。这里的  $k_{\text{sspp}}$  等价于波导中的传播常数  $\beta$ 。在第一个布里渊区内,随着频率的增加,SSPP 模式的  $k_{\text{sspp}}$  大于光线(黑色虚线),说明有柱的纹理表面具有良好的场约束能力。从图 1(b)可以看出,在 0.3 THz 以上,SSPP 模式可以被支持并沿着金属结构的表面传播。然而,在 0.65 THz 左右时,SSPP 模式的群速度在第一个布里渊区边界处逐渐下降到零( $k_{\text{sspp}} = \theta/p$ )。



**Figure 1.** Structure and dispersion relation. (a) Schematic diagram and geometric parameters of the structure (the red arrow depicts the propagation direction of SSPP). The red funnel region is the terahertz wave in free space. The lower right inset is detailed single waveguide structure, where  $w = 120 \mu\text{m}$ ,  $p = 100 \mu\text{m}$ ,  $h = 80 \mu\text{m}$ , and  $l = 50 \mu\text{m}$ ; (b) The simulated dispersion relation (red line) of SSPP mode for one row of metal pillars. The red solid line separates from the black dotted line with increasing frequency, indicating that the terahertz wave is bound to the waveguide surface

**图 1.** 结构和色散关系。(a) 该结构的示意图和几何参数(红色箭头表示 SSPP 的传播方向)。红色漏斗区域是自由空间中的太赫兹波。右下插图为例详细的单个波导结构,其中  $w = 120 \mu\text{m}$ ,  $p = 100 \mu\text{m}$ ,  $h = 80 \mu\text{m}$ ,  $l = 50 \mu\text{m}$ ; (b) SSPP 模式的色散关系的模拟结果(红线),其中红色实线随着频率的增加不断地与黑色虚线分离,表明太赫兹波被束缚在波导表面

需要一种特殊的相位匹配技术来耦合自由空间的太赫兹辐射来激发 SSPP。这是因为 SSPP 的传播常数大于电介质中的波矢量,导致它们之间的不匹配。薄金属上的周期性亚波长空穴阵列常被用来激发 SSPP。周期空穴阵列为入射波提供了额外的波矢量分量,从而可以满足波矢量匹配条件。本文采用弧形弯曲孔阵列实现了较高的耦合效率。弯曲孔阵列的最内层和最外层半径分别为  $2220 \mu\text{m}$  和  $3820 \mu\text{m}$ ,每个阵列的宽度为  $40 \mu\text{m}$ 。弯曲孔的中心角为  $60^\circ$ ,沿径向方向的周期为  $400 \mu\text{m}$ 。弯曲的孔阵列由间距为  $50 \mu\text{m}$ 、中心角为  $5^\circ$  的金属条分成更小的孔。此外,所有弯曲孔的中心都与波导的第一柱重合,以获得较高的耦合效率。激发的 SSPP 通过由周期减小的柱组成的扇形漏斗结构与波导耦合。

在模拟中,将一个极化方向平行于  $x$  轴的线性极化太赫兹波从样品的底部聚焦到  $z$  方向的空穴阵列上。在 SSH 模型中,拓扑相变界面可以通过将平庸相和非平庸相结合来形成。界面的形式也有两种不同,这取决于不同的组合方式。两个晶格由一个弱耦合的  $\kappa_1$  连接,称为长-长缺陷界面。两个晶格由一个更

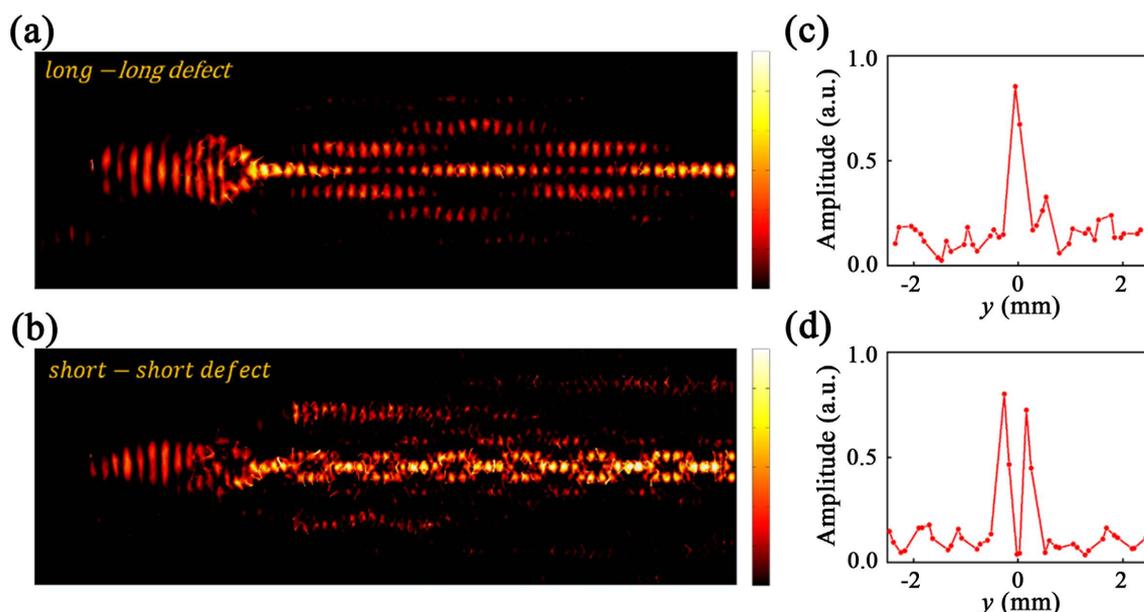




对于具有 19 个波导的短 - 短缺陷结构, 零模对应的场表现为奇对称分布。对于零模以外的两种模式, 电场的分布也呈现出局域分布的情况, 如图 3(e)所示。对于具有 17 个波导的长 - 长缺陷结构, 界面模式呈现中心偶对称, 如图 3(f)所示。

### 3. 结果与讨论

为了验证太赫兹 SSPP 波导阵列中的长 - 长缺陷结构和短 - 短缺陷结构的输运特性。我们使用商业有限元解决方案(Comsol 多物理 5.6)对这两种结构进行了模拟分析。我们将金属柱和基底结构设置为完美的电导体。从弯曲槽结构下方输入太赫兹波, 在 0.5 THz 下观察到的长 - 长缺陷结构和短 - 短缺陷结构的能量分布如图 4(a)和图 4(b)所示。对于长 - 长缺陷结构, 传播模拟显示了一个拓扑缺陷, 它在波导阵列的中心波导上传播。由于相邻波导之间的能量耦合, 一部分能量仍然耦合到上下波导中, 但大部分能量仍然集中在中心波导上。长 - 长缺陷结构输出处的归一化振幅分布如图 4(c)所示。可以看出, 大部分的能量都集中在中心波导上, 原因是我们的太赫兹波从中心波导中输入, 且激发了位于中心波导处的拓扑零模, 没有激发上下两侧边缘波导的零模。对于短 - 短缺陷结构, 除了零模外, 还有两个束缚模式, 它们位于能带结构的体带外, 并且在次中心波导上有很强的能量分布。因此, 在中心的单波导输入将同时激发两个束缚模, 由于它们的模态常数不同, 太赫兹能量输运呈现出拍频效应。短 - 短缺陷结构输出处的归一化振幅分布如图 4(d)所示。由于能量在两个亚中心波导上呈现拍频效应, 因此大部分能量都局限在这两个波导中。这两种结构的能量传输形式与理论分析完全吻合。



**Figure 4.** Simulation results at the 0.5 THz frequency. (a) The normalized power  $|E_z|^2$  distributions corresponding to the long-long defect structure; (b) The normalized power  $|E_z|^2$  distributions corresponding to the short-short defect structure; (c) Amplitude distribution of the output for the long-long defect structure; (d) Amplitude distribution of the output for the short-short defect structure

**图 4.** 0.5 THz 频率下的模拟结果。(a) 长 - 长缺陷结构对应的归一化功率  $|E_z|^2$  分布; (b) 短 - 短缺陷结构对应的归一化功率  $|E_z|^2$  分布; (c) 长 - 长缺陷结构对应的输出端口的振幅分布; (d) 短 - 短缺陷结构对应的输出端口的振幅分布

为了理解得出波导数目与零模数量之间的关系, 我们对 17~21 根波导下的长 - 长缺陷结构和短 - 短缺陷结构的能带图进行了绘制分析。在这里, 从 17 到 21 个波导数的长 - 长缺陷结构和短 - 短缺陷结构分别绘制在图 5(a)和图 6(a)中。长 - 长缺陷结构和短 - 短缺陷结构的能带图也分别见图 5(b)~(f)和

图 6(b)~(f)。这两种情况下的带图的特征是两个由带隙分隔的带。

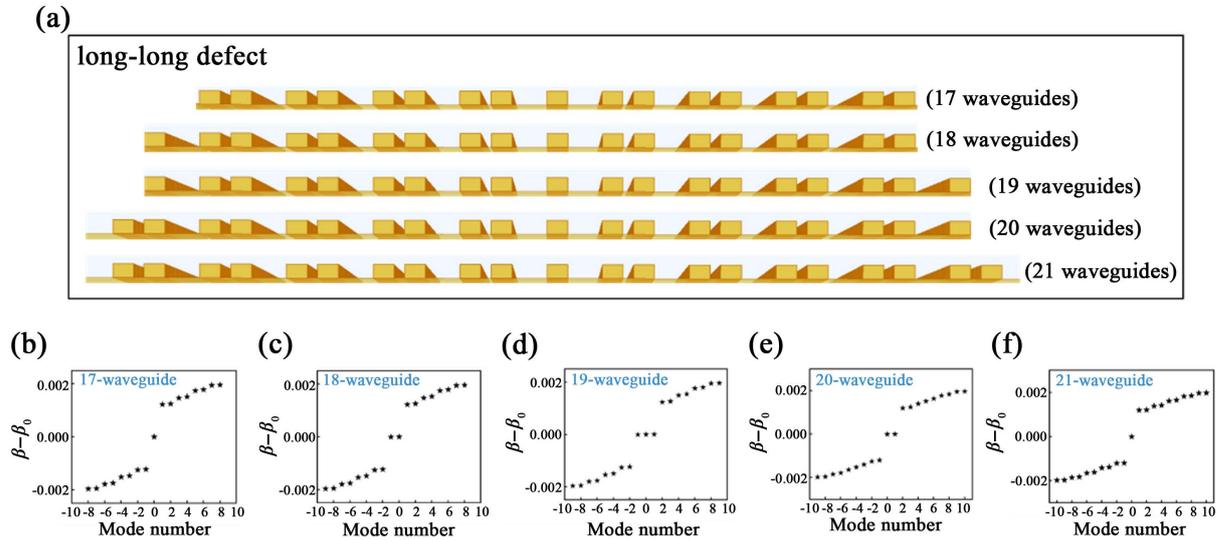


Figure 5. (a) The schematic of the long-long defect structures with different number of waveguides; (b)~(f) Mode (band) diagrams of the long-long defect structure with different number of waveguides

图 5. (a) 不同波导数量的长 - 长缺陷结构示意图; (b)~(f) 不同波导数量的长 - 长缺陷结构的模式图(带图)

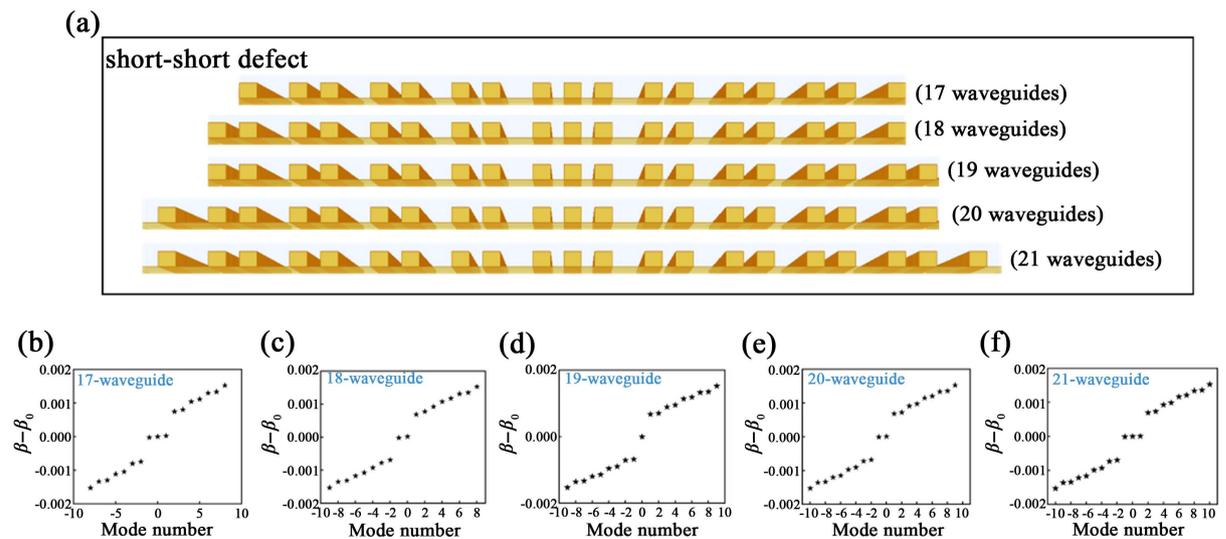


Figure 6. (a) The schematic of the short-short defect structures with different number of waveguides; (b)~(f) Mode (band) diagrams of the short-short defect structure with different number of waveguides

图 6. (a) 不同波导数量的短 - 短缺陷结构示意图; (b)~(f) 不同波导数量的短 - 短缺陷结构的模式图(带图)

对于长 - 长缺陷结构，中心波导与次中心波导之间分离度最大。当波导数为 17 或 21 时，在长 - 长缺陷结构的波导阵列结构外的左右两侧都有波导对，导致在带隙中间只出现一种拓扑缺陷状态，如图 5(b)和图 5(f)中的星点所示。由于横向传播常数为零，模定位于中心波导周围的界面。由于波导数为 18 或 20 个，在长 - 长缺陷结构的波导阵列结构的左右两侧存在单个悬浮波导。发现了两种拓扑缺陷模式，如图 5(c)和图 5(e)中的星点所示。对于波导数为 19，在长 - 长缺陷结构的波导阵列结构的两侧有两个悬浮的单波导，发现了三种拓扑缺陷模式，如图 5(d)中的星点所示。

对于短 - 短缺陷结构，中心波导与次中心波导之间分离度最大，如图 6(a)所示。其对 17~21 根波导

的能带图也分别显示在图 6(b)~(f)中。附加的拓扑缺陷模式是由于短-短缺陷的波导阵列结构左右两侧的单悬浮波导,类似于长-长缺陷波导阵列结构。对于偶数根波导(18 或 20),在长-长缺陷和短-短缺陷的情况下,能带图中都有两种拓扑缺陷状态。为了在能带图中只实现一个拓扑缺陷状态,对于长-长缺陷结构,应选择 17 或 21 根,而对于短-短缺陷结构,则选择 19 根波导。

#### 4. 结论

综上所述,我们通过在太赫兹多米诺波导阵列中同时构造短-短缺陷和长-长缺陷结构,实现了太赫兹拓扑保护的零模和束缚模。利用色散理论分析了波导的色散特性和耦合特性。通过理论分析,太赫兹零模出现在能带的中心,并且能带中零模的数量与波导阵列的数量有一定的关系。从仿真结果中还观察到了拓扑零在波导阵列中的中心传输以及束缚波导在波导阵列的次中心波导上传输。我们的工作将拓扑光子学引入太赫兹波导阵列平台。

#### 参考文献

- [1] 牛昭然,蔡志鹏,张岩. 太赫兹表面等离激元的研发与应用[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2023, 21(1): 1-15.
- [2] 熊飞. 基于人工表面等离激元的漏波天线及其高扫描率的研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京邮电大学, 2022. <https://doi.org/10.27251/d.cnki.gnjdc.2022.001314>
- [3] 王萌,彭玉婷,马慧锋. 基于人工表面等离激元周期调制的漏波天线设计[J]. 移动通信, 2022, 46(3): 2-7.
- [4] 王长,郑永辉,谭智勇,何晓勇,曹俊诚. 太赫兹波导发展现状与展望[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2022, 20(3): 241-260.
- [5] 周冬梅,王爱环,李翠然,吴小所,闫保万. 基于三波导定向耦合器的紧凑型偏振分束器的设计[J]. 光子学报, 2022, 51(1): 288-297.
- [6] 王凯. 太赫兹金属波导的传输与耦合[D]: [博士学位论文]. 上海: 上海大学, 2018.
- [7] 宋万鸽. 拓扑波导阵列中的光场调控研究[D]: [博士学位论文]. 南京: 南京大学, 2021. <https://doi.org/10.27235/d.cnki.gnju.2021.000313>
- [8] 程庆庆. 等离激元波导中模式调控与应用的研究[D]: [博士学位论文]. 南京: 南京大学, 2015.
- [9] 张硕实,何辛涛,陈晓东,董建文. 拓扑光子晶体与超构光子学(特邀)[J]. 光子学报, 2022, 51(5): 88-103.
- [10] 刘超,郭小伟,李绍荣,高原. 拓扑光子晶体边缘态理论与应用[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(1): 9-23.
- [11] 郭思嘉,李昱增,李天梓,范喜迎,邱春印. 二维各向异性 SSH 模型的拓扑性质研究[J]. 物理学报, 2022, 71(7): 8-17.
- [12] 王洪飞,解碧野,詹鹏,卢明辉,陈延峰. 拓扑光子学研究进展[J]. 物理学报, 2019, 68(22): 51-68.