

光通信波段中基于谷霍尔效应的单向波导

李雪梅^{1,2}, 张明达^{1,2,3*}, 朱小冬^{1,2}, 杨毅彪^{1,2}, 费宏明^{1,2}, 曹斌照^{1,2}, 刘欣^{1,2}, 张娅敏^{1,2}¹太原理工大学物理与光电工程学院, 山西 太原 030024;²太原理工大学新型传感器与智能控制教育部重点实验室, 山西 太原 030024³天津大学理学院量子交叉研究中心, 天津 300350

摘要 提出了一种基于谷霍尔效应的单向波导, 波导结构由两种不同拓扑性质的光子晶体组成。这两种光子晶体均是由 $\text{Al}_{70}\text{Ga}_{30}\text{As}$ 和 Si 介质柱构成, 可以实现光在通信波段中的单向通过。仿真结果表明, 所提结构不仅可以实现光路的大角度转弯, 还对缺陷具有良好的耐受性, 为具有高效光传输特性的新型光波导设计提供了参考。

关键词 集成光学; 光子晶体; 谷霍尔效应; 拓扑光学; 单向传输; 边界态

中图分类号 O469

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1913001

Unidirectional Wave Guide Based on Valley Hall Effect in Optical Communication Band

Li Xuemei^{1,2}, Zhang Mingda^{1,2,3*}, Zhu Xiaodong^{1,2}, Yang Yibiao^{1,2}, Fei Hongming^{1,2}, Cao Binzhao^{1,2}, Liu Xin^{1,2}, Zhang Yamin^{1,2}¹College of Physics and Optoelectronics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China;²Key Laboratory of Advanced Transducers and Intelligent Control System, Ministry of Education, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China;³Center for Joint Quantum Studies, School of Science, Tianjin University, Tianjin 300350, China

Abstract In this paper, we propose a unidirectional wave guide based on valley Hall effect, which is composed of two kinds of photonic crystals with different topological properties. These two kinds of photonic crystals are composed of $\text{Al}_{70}\text{Ga}_{30}\text{As}$ and Si dielectric cylinders, which can realize the unidirectional passage of light in the communication band. The simulation results show that the proposed structure can not only realize the large angle turn of the optical path, but also has good tolerance to defects, which provides a reference for the design of new optical waveguides with efficient optical transmission characteristics.

Key words integrated optics; photonic crystals; valley Hall effect; topological photonics; unidirectional transmission; interface state

OCIS codes 130.5296; 050.5298

1 引言

在过去的 20 年中, 拓扑光子系统受到了人们的广泛关注。由于拓扑光子系统对缺陷和位置参数的紊乱不敏感, 因此该系统对光子特性具有很好的稳定性, 且对微纳米制造工艺中可能存在的缺陷与误

差具有良好的耐受性。拓扑现象不仅存在于一维到三维光子系统中, 还存在于含有角动量的涡旋光中^[1]。在一维光子系统中, 人们关注的是 Zak 相位^[2-4], 它与拓扑性质和电磁手性、表面等离子体激元以及其他新颖性质密切相关, 如 Sinc 函数型光子晶体的 Kerr 效应等^[5]。Weyl 点可以反映三维系统

收稿日期: 2021-02-08; 修回日期: 2021-03-28; 录用日期: 2021-04-29

基金项目: 国家自然科学基金(11704275, 11904255)

通信作者: *zhangmingda@tyut.edu.cn

中的拓扑现象,研究人员在光子系统中也发现了它的存在^[6-12]。虽然三维系统促进了拓扑主题的丰富多样,但是其工业制造较为困难。

二维系统不仅比一维系统具有更多的可调参数,在实验和制造中还比三维系统更容易实现。因此,与一维和三维系统相比,二维系统更有可能被应用于日常生活中。二维拓扑光子系统可以分为光量子霍尔系统,光量子自旋霍尔系统和光量子谷霍尔系统。在前两个系统中,主要利用法拉第效应材料^[13-17]和谐振腔^[18-19]来实现拓扑特性。在谷霍尔系统中,主要利用蜂窝状结构来降低实现拓扑特性的需求,在此结构的能带图中,可以在能带结构的 $K(K')$ 点处找到狄拉克点,并且通过连续改变结构的参数可以解除 K 点的简并^[20-22]。在两种不同拓扑边缘间的边界处实现了单向传输,这使得单向波导的实现成为可能。

与在光子晶体中添加非线性材料和利用传统集成波导的方式来实现光子单向传输相比^[23-29],利用谷霍尔系统的优点是不需要极高的能量就可实现光子的单向传输,这降低了对设备设计和应用的要求。在本文中,提出了一种二维光子晶体复合结构,该结构由两种蜂窝结构的光子晶体组

成,在这两种光子晶体的连接处,可以实现在光通信波段中光子的单向传输。此外,设计这两种结构的材料是 $\text{Al}_{70}\text{Ga}_{30}\text{As}$ 与 Si ,两种材料均是优秀的微纳半导体材料,且加工工艺相对成熟。所提方法简单且易操控,可为设计光通信波段单向波导提供参考。

2 二维拓扑光子晶体结构

图 1(a)为两种光子晶体的原胞示意图。所提二维拓扑单向波导结构如图 1(b)所示,其由两种以空气为背景的蜂窝状光子晶体结构组成,结构的晶格常数 a 均为 600 nm 。组成该波导结构的光子晶体分别为 PhC1 和 PhC2 ,这两种光子晶体的原胞中均包含两个介质柱($\text{Al}_{70}\text{Ga}_{30}\text{As}$ 和 Si),两个介质柱的半径 R 大小相等,均为 70 nm 。在室温下, $\text{Al}_{70}\text{Ga}_{30}\text{As}$ 和 Si 在 $0.2\sim 2\text{ }\mu\text{m}$ 波长范围内的色散曲线如图 1(c)、(d)所示。色散曲线的数据从常用折射率数据库 Refractive index database 中获得,色散曲线中同时给出了复折射率的实部 n 与虚部 k 。从图 1(c)、(d)中可以看出,这两种材料在光通信波段中的虚部 k 几乎为 0 ,即在此波段范围内,可不考虑材料对电磁波的吸收。

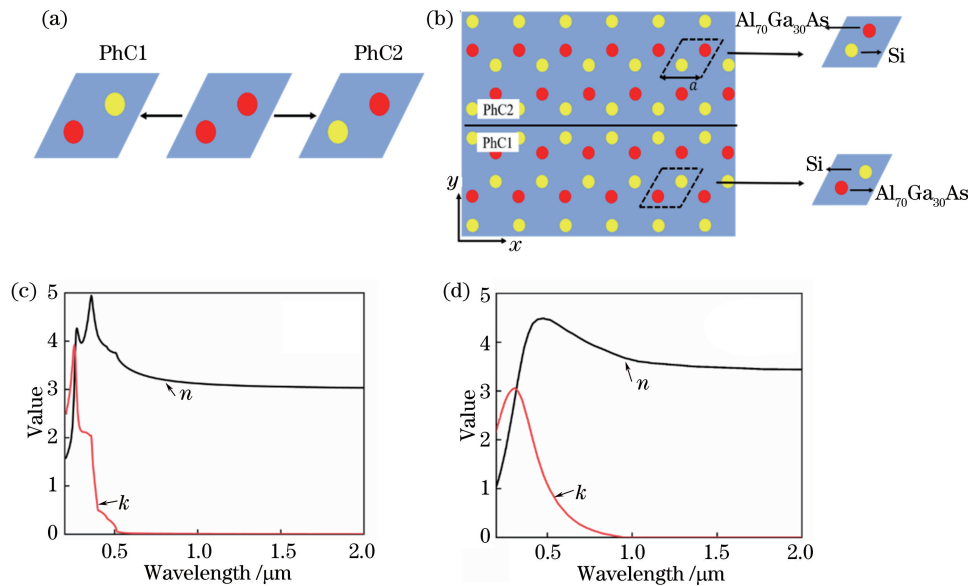


图 1 光子晶体结构示意图与不同材料色散曲线。(a)两种光子晶体的原胞示意图;(b)二维蜂窝结构光子晶体的示意图;
(c) $\text{Al}_{70}\text{Ga}_{30}\text{As}$ 和(d) Si 在 $0.2\sim 2\mu\text{m}$ 波长范围内的色散曲线

Fig. 1 Structural diagrams of photonic crystals and dispersion curves of different materials. (a) Schematic diagrams of primitive cells of two kinds of photonic crystals; (b) Schematic diagram of two-dimensional honeycomb structure photonic crystal; dispersion curves of (c) $\text{Al}_{70}\text{Ga}_{30}\text{As}$ and (d) Si in the wavelength range from $0.2\text{ }\mu\text{m}$ to $2\text{ }\mu\text{m}$

光子晶体 PhC1 和光子晶体 PhC2 的结构参数相同,原胞内均包含半径相同的两个介质柱,整体组

成满足 $C6$ 对称群的六角蜂窝结构。 PhC1 与 PhC2 的不同之处在于,原胞内介质柱的材料是相反的。

在 PhC1 中,原胞内上方的介质柱是 Si,下方的介质柱是 $\text{Al}_{70}\text{Ga}_{30}\text{As}$ 。在 PhC2 中,原胞内上方的介质柱是 $\text{Al}_{70}\text{Ga}_{30}\text{As}$,下方的介质柱是 Si。由于在 PhC1 与 PhC2 中有两种不同的材料,因此两种光子晶体仅满足 C3 对称群。利用 Lumerical FDTD Solutions 以及 Comsol Multiphysics 等软件进行模拟计算,可以发现,如果原胞中两个介质柱的材料全部为 $\text{Al}_{70}\text{Ga}_{30}\text{As}$ 时,对于横磁(TM)波,能带将在频率为 208 THz 处简并形成狄拉克点,对应的波长为 1440 nm,如图 2(a)所示。在保持其他光学参数不变的情况下,无论是增加还是减小原胞中某一介质柱的折射率,都会破坏晶格对称性,促使狄拉克

点简并解除,进而在能带中产生带隙使能带性质发生拓扑相变。因此,将光子晶体 PhC1 原胞内上方的介质柱材料和光子晶体 PhC2 原胞内下方的介质柱材料设置为 Si,可以解除能带的简并,形成两种拓扑性不同的结构,如图 2(b)、(c)所示。这两种光子晶体的能带均在频率范围为 188~207 THz 处出现带隙。图 2(d)、(e)展示了两种光子晶体在 k_1 点和 k_2 点处的本征场,可以发现,不仅这两种光子晶体的本征场是相反的,在同一点处箭头标出的能量流方向也是反向的。图 2(d)、(e)表明能带的拓扑性质随介质柱的交换而变化,这为构建包含两种光子晶体的单向波导提供了新的思路。

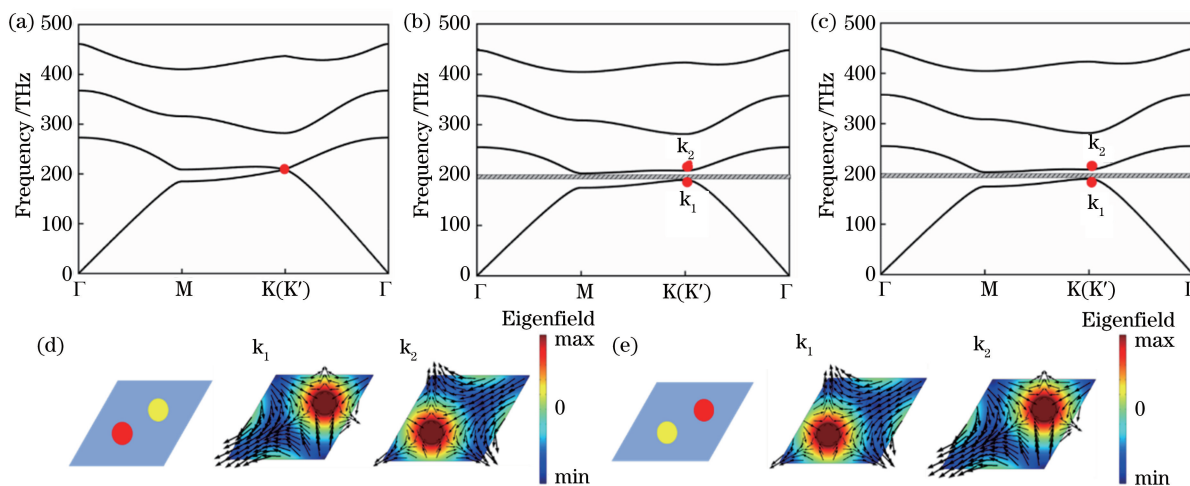


图 2 能带结构与本征场分布。(a)当原胞中两个介质柱的材料都是 $\text{Al}_{70}\text{Ga}_{30}\text{As}$ 时,光子晶体的能带结构;(b) PhC1 和(c) PhC2 的能带结构,阴影部分是禁带;在(d) PhC1 和(e) PhC2 中, k_1 和 k_2 处的本征场分布

Fig. 2 Energy-band structures and eigenfield distributions. (a) Energy-band structure of photonic crystal when the materials of two dielectric cylinders are $\text{Al}_{70}\text{Ga}_{30}\text{As}$ in primitive cell; (b) (c) energy-band structures of PhC1 and PhC2, the shaded parts represent forbidden bands; eigenfield distributions at k_1 and k_2 in (d) PhC1 and (e) PhC2

3 结构模型与仿真

由第 2 节可知,光子晶体 PhC1 和光子晶体 PhC2 具有不同的拓扑性质,而在具有相反能带性质的两种光子晶体结构之间的界面处存在边界状态。以光子晶体 PhC1 和光子晶体 PhC2 间的边界为分界线,上方和下方各放置 4 个原胞,如图 3(a)所示。使用 Comsol Multiphysics 计算超元胞,将结构沿 k_x 方向进行投影来确定边界状态,结构的色散关系如图 3(b)所示。其中,在 200 THz 附近处,左侧的空心线和右侧的实线表示的是边界态的色散关系,其余部分表示光子晶体的体带,波导可实现单向传输的工作频率范围为 190~202 THz。曲线的斜率表示边界态的传播方向,一个自旋向上,另一个自旋向下。从图 3(b)中还可以看出,边界态的频率

处于两个光子晶体的公共带隙处。为了更形象地描述边界态的本征模,在图 3(c)中给出了频率为 201.92 THz,波矢为 $-0.46 \times (2\pi/a)$ 时,界面态的 E_z (沿介质柱的 z 方向)本征场分布。可以发现,本征场集中在两个光子晶体的界面处,并从中间沿光子晶体结构的两侧快速衰减。当两个光子晶体的间距 l 为 $0.1a$ 时,虽然边界态仍然存在,但是与 $l=0$ 时相比,边界态向低频方向偏移,上下的体带都向高频方向偏移。由于两个光子晶体之间的距离较小,因此上述现象在图 3(d)中不够明显。

随后,通过仿真模拟来验证图 3(a)中结构具有稳定的单向传播特性。在两个光子晶体分界面的中心处放置 6 个激发源^[30],这 6 个激发源均匀分布在半径为 $0.02a$ 的圆上,相位沿逆时针方向依次增加 $\pi/6$,组成左旋光源。取激发源的频率为

201.92 THz(相应波长为 1486 nm),该频率处于两个光子晶体的公共带隙中,所激发的场分布如图 4 (a)所示,可以看出,光源在光子晶体波导结构中所激发的场只沿边界向左传播。为了更清晰地观察到单向传播,给出了坡印廷矢量的传播方向,如图 4

(b)所示,光沿着距离边界最近的介质柱向左传播,并且没有向右传播的光。如果将激发源的初始相位顺时针增大,将会形成向右传播的光场,这里不再赘述。当 $l=0.1a$ 时,场分布和坡印廷矢量分布并没有发生变化,如图 4(c)、(d)所示。

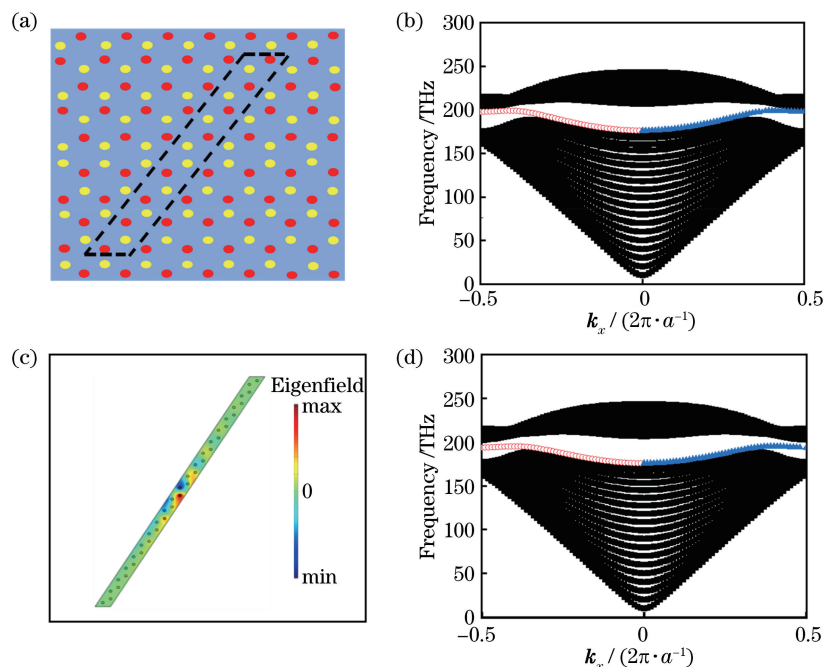


图 3 单向传输波导结构示意图与投影能带结构。(a)单向传输波导结构示意图,虚线框表示用于能带计算的超原胞的结构图;(b)当 $l=0$ 时,两光子晶体的投影能带结构;(c)边界态的 E_x 本征场分布;(d)当 $l=0.1a$ 时,两光子晶体的投影能带结构

Fig. 3 Structural diagram of unidirectional wave guide and projected energy-band structures. (a) Structural diagram of unidirectional wave guide, the area in the dotted box represents structural diagram of super-primitive cell used for band calculation; (b) the projected energy-band structures of two photonic crystals when $l=0$; (c) E_x eigenfield distribution of the interface state; (d) the projected energy-band structures of two photonic crystals when $l=0.1a$

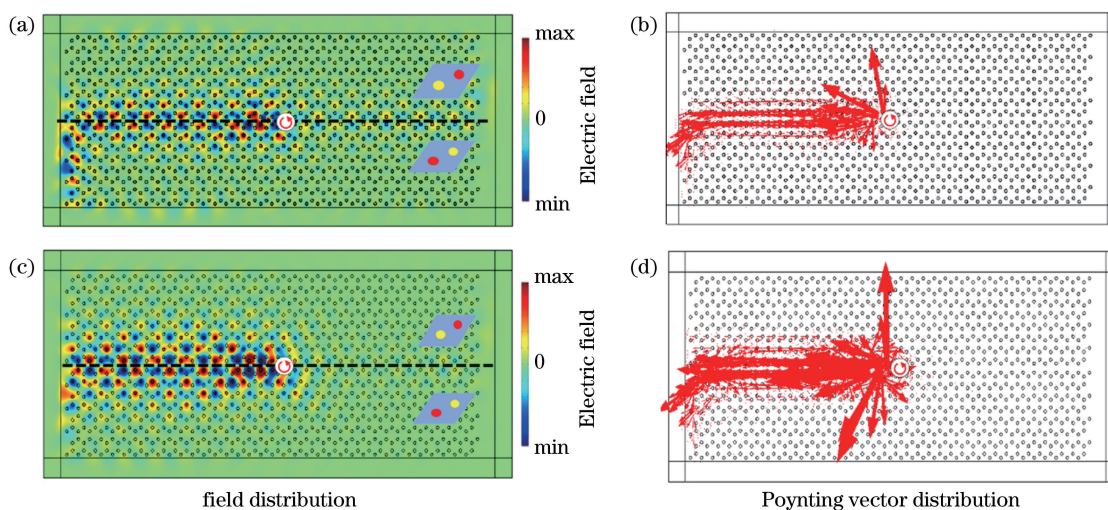


图 4 在不同间隔下,光子晶体波导结构中的场分布和坡印廷矢量分布。(a)(b) $l=0$; (c)(d) $l=0.1a$
 Fig. 4 Field distributions and Poynting vector distributions in photonic crystal waveguide structures at different intervals. (a)(b) $l=0$; (c)(d) $l=0.1a$

光在传统微纳光子器件中传输时,会遇到诸如大角度转弯等问题,这会降低光在光子器件中的传输效率。而拓扑光子器件对大角度转弯和缺陷有很强的耐受性。为了进一步验证拓扑光子器件对大角度转弯的耐受性,将两种光子晶体的分界面构造成

Z型,如图 5(a)所示。相位顺时针增大的光源在该结构中激发场的模拟结果如图 5(b)所示,可以发现,光沿着 Z 型边界单向传播且在传播过程中没有发生衰减。这证实了在拓扑光子器件中,光在遇到大角度转弯时依然会沿着边界传播。

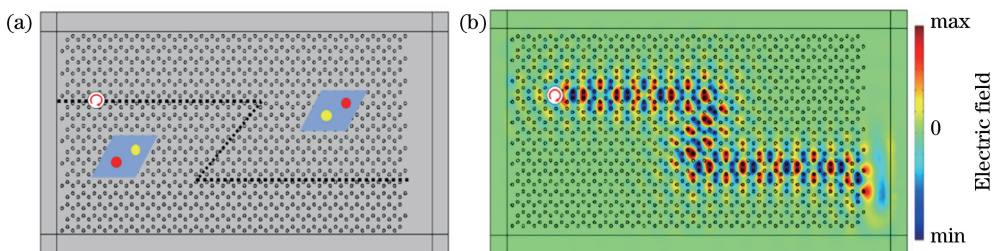


图 5 Z 型光子晶体波导结构中的(a)结构图和(b)场分布

Fig. 5 (a) Structural diagram and (b) field distribution of Z-shaped photonic crystal waveguide structure

为了验证拓扑光子器件对缺陷的耐受性,随机将边界中的某一介质柱移除,该操作已在图 6(a)中用虚线矩形框标出。从图 6(b)中可以看出,这种操作不会影响光子晶体单向传输的特性。此外,随机将边界中多个介质柱的位置向左或向右移动,该操作已在图

6(c)中用虚线矩形框标出。从图 6(d)中可以看出,结构整体仍然显示出良好的单向传输性。这表明由两种具有不同拓扑特性的光子晶体组合而成的拓扑光子器件具有良好的鲁棒性,并且在有缺陷的情况下也不会影响拓扑光子器件单向传播的特性。

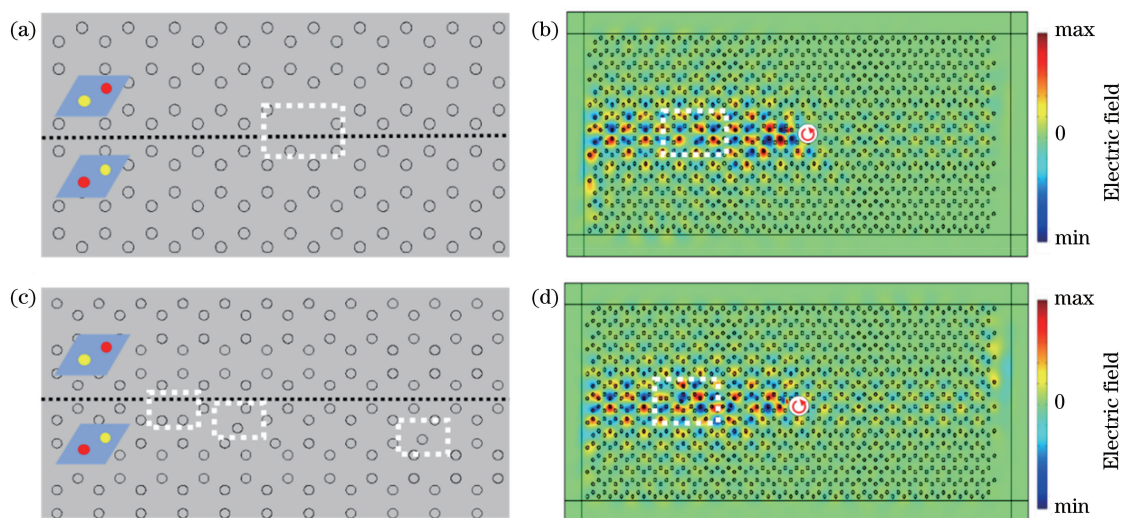


图 6 在不同情况下,光子晶体波导结构中的结构图和场分布。(a)(b)随机移除边界中一个介质柱;
(c)(d)随机移动边界中多个介质柱的位置

Fig. 6 Structural diagrams and field distributions in photonic crystal waveguide structures at different cases.
(a)(b) Removing a dielectric cylinder at the boundary randomly; (c)(d) moving the positions of multiple dielectric cylinders at the boundary randomly

4 结 论

利用 $Al_{70}Ga_{30}As$ 和 Si 构造了一种具有蜂窝结构的拓扑光子晶体,通过交换原胞内 $Al_{70}Ga_{30}As$ 介质柱和 Si 介质柱的位置,获得了两种具有不同拓扑性质的光子晶体。将这两种不同性质的光子晶体组合起来后,构建出了新的光子晶体波导结构。不论

边界是何种形状,光都会沿着它们的共同边界单向传播。通过构造 Z 型结构的光子晶体,或者在边界处引入缺陷,如移除边界中某个介质柱、移动边界处多个介质柱的位置,验证了该光子晶体波导结构对大角度转弯和缺陷的耐受性。所提光子晶体波导结构在一定程度上提高了制造器件的容错率,同时为新型光单向传输波导结构的设计提供了参考,具有

一定的应用价值。

参 考 文 献

- [1] Zou W K, Yang C Y, Hou J, et al. Measurement of topological charges for vortex beams using gradually-changing-period annular gratings [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(14): 140501.
邹文康, 杨春勇, 侯金, 等. 环形渐变型光栅用于涡旋光束拓扑荷数测量的研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(14): 140501.
- [2] Xiao M, Zhang Z, Chan C. Surface impedance and bulk band geometric phases in one-dimensional systems [J]. *Physical Review X*, 2014, 4(2): 021017.
- [3] Tan W, Sun Y, Chen H, et al. Photonic simulation of topological excitations in metamaterials [J]. *Scientific Reports*, 2014, 4: 3842.
- [4] Poddubny A, Miroshnichenko A, Slobzhanyuk A, et al. Topological Majorana states in zigzag chains of plasmonic nanoparticles[J]. *ACS Photonics*, 2014, 1(2): 101-105.
- [5] Wang Y. Kerr and faraday effects at interface between topological insulator and Sinc-functional photonic crystal [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(10): 1003002.
王筠. 拓扑绝缘体与 Sinc 函数型光子晶体分界面处 Kerr 效应和 Faraday 效应研究[J]. *中国激光*, 2020, 47(10): 1003002.
- [6] Lu L, Fu L, Joannopoulos J D, et al. Weyl points and line nodes in gyroid photonic crystals[J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(4): 294-299.
- [7] Yang B, Guo Q, Tremain B, et al. Ideal Weyl points and helicoid surface states in artificial photonic crystal structures[J]. *Science*, 2018, 359(6379): 1013-1016.
- [8] Lu L, Wang Z, Ye D, et al. Experimental observation of Weyl points[J]. *Science*, 2015, 349(6248): 622-624.
- [9] Gao W L, Yang B, Lawrence M, et al. Photonic Weyl degeneracies in magnetized plasma[J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 12435.
- [10] Noh J, Huang S, Leykam D, et al. Experimental observation of optical Weyl points and Fermi arc-like surface states [J]. *Nature Physics*, 2017, 13(6): 611-617.
- [11] Chen W J, Xiao M, Chan C T. Photonic crystals possessing multiple Weyl points and the experimental observation of robust surface states [J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 13038.
- [12] Wang Q, Xiao M, Liu H, et al. Optical interface states protected by synthetic Weyl points [J]. *Physical Review X*, 2017, 7(3): 031032.
- [13] Haldane F D, Raghu S. Possible realization of directional optical waveguides in photonic crystals with broken time-reversal symmetry [J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100(1): 013904.
- [14] Wang Z, Chong Y, Joannopoulos J D, et al. Observation of unidirectional backscattering-immune topological electromagnetic states[J]. *Nature*, 2009, 461(7265): 772-775.
- [15] Poo Y, Wu R X, Lin Z, et al. Experimental realization of self-guiding unidirectional electromagnetic edge states [J]. *Physical Review Letters*, 2011, 106(9): 093903.
- [16] Fang K J, Yu Z F, Fan S H. Realizing effective magnetic field for photons by controlling the phase of dynamic modulation [J]. *Nature Photonics*, 2012, 6(11): 782-787.
- [17] Rechtsman M C, Zeuner J M, Plotnik Y, et al. Photonic Floquet topological insulators [J]. *Nature*, 2013, 496(7444): 196-200.
- [18] Hafezi M, Demler E A, Lukin M D, et al. Robust optical delay lines with topological protection [J]. *Nature Physics*, 2011, 7(11): 907-912.
- [19] Gao F, Gao Z, Shi X H, et al. Probing topological protection using a designer surface plasmon structure [J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 11619.
- [20] Dong J W, Chen X D, Zhu H Y, et al. Valley photonic crystals for control of spin and topology [J]. *Nature Materials*, 2017, 16(3): 298-302.
- [21] Chen X D, Deng W M, Lu J C, et al. Valley-controlled propagation of pseudospin states in bulk metacrystal waveguides [J]. *Physical Review B*, 2018, 97(18): 184201.
- [22] Ma T, Shvets G. Scattering-free edge states between heterogeneous photonic topological insulators [J]. *Physical Review B*, 2017, 95(16): 165102.
- [23] Gallo K, Assanto G, Parameswaran K R, et al. All-optical diode in a periodically poled lithium niobate waveguide [J]. *Applied Physics Letters*, 2001, 79(3): 314-316.
- [24] Wei Y, Fang Y T. Coding control of optical path of two-dimensional magneto-optical photonic crystal [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(9): 0905002.
魏芸, 方云团. 二维磁光光子晶体光路的编码控制 [J]. *中国激光*, 2020, 47(9): 0905002.
- [25] Hu J F, Liu B, Liang H Q, et al. Achieving nonreciprocal transmission by breaking symmetry of nonlinear Fano cavity structure in photonic crystals [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(3): 0323002.
胡金凤, 刘彬, 梁红勤, 等. 打破光子晶体非线性 Fano 腔结构对称性实现单向传输 [J]. *光学学报*, 2017, 37(3): 0323002.

- [26] Ren K, Fan J Y, Ren X B. Active control of nonreciprocal optical transmission direction[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(7): 0726003.
任坤, 范景洋, 任晓斌. 非互易光传输方向的主动调控[J]. 光学学报, 2017, 37(7): 0726003.
- [27] Mingaleev S F, Kivshar Y S. Nonlinear transmission and light localization in photonic-crystal waveguides[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2002, 19(9): 2241-2249.
- [28] Dang T T, Wang J F. Control of Gaussian optical waves in Gaussian parity-time symmetric waveguide[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(3): 0319001.
党婷婷, 王娟芬. 高斯型 PT 对称波导中高斯光波的控制[J]. 光学学报, 2020, 40(3): 0319001.
- [29] Fei H M, Wu M, Liu H Y, et al. Study on unidirectional transmission characteristics of waveguide heterostructure based on total reflection[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(3): 0323001.
费宏明, 武敏, 刘辉阳, 等. 基于全反射的波导异质结构单向传输性能研究[J]. 光学学报, 2018, 38(3): 0323001.
- [30] Yang Y, Jiang H, Jiang H, et al. Topological valley transport in two-dimensional honeycomb photonic crystals[J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 1588.
- [31] Gao Y F, Jiang Z, Zhang L L, et al. Unidirectional propagation of coupled edge states in sandwich topological photonic crystals[J]. Journal of Applied Physics, 2018, 124(21): 213107.