

设计低对称性全电介质椭圆格点能谷光子晶体

张娅敏^{1,2}, 费宏明^{1,2*}, 林瀚³, 韩雨辉^{1,2}, 张明达^{1,2}, 李雪梅^{1,2}, 杨毅彪^{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 030024;

3. 斯威本科技大学 埃米材料转化科学中心, 澳大利亚 3122)

摘要: 二维拓扑光子绝缘体中格点的对称性作为一个设计的自由度还未被探索。在此研究中通过使用对称性较低的椭圆形格点来研究格点对于能谷光子禁带的影响。通过改变椭圆形格点的长轴方向能够改变能谷光子禁带的中心波长及宽度, 并将具有不同禁带宽度及中心波长的全电介质能谷光子晶体结构以镜面对称的方式组合实现全电介质光子拓扑绝缘体波导结构, 实现了抗散射鲁棒单向光传输。该研究拓展了能谷光子晶体设计的自由度, 为全电介质能谷光子晶体设计提供了新的可能性。

关键词: 拓扑光子晶体; 能谷霍尔效应; 拓扑光传输; 能谷光子晶体

中图分类号: O43 文献标识码: A

Design of all-dielectric valley photonic crystals with low symmetry elliptical lattice

ZHANG Ya-Min^{1,2}, FEI Hong-Ming^{1,2*}, LIN Han³, Han Yu-Hui^{1,2}, ZHANG Ming-Da^{1,2},
LI Xue-Mei^{1,2}, YANG Yi-Biao^{1,2}

(1. Department of Physics and Optoelectronics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;

2. Key Laboratory of Advanced Transducers and Intelligent Control System, Ministry of Education, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;

3. Centre for Translational Atomaterials, Swinburne University of Technology, Victoria 3122, Australia)

Abstract: The symmetry of lattice points in a two-dimensional topological photonic insulator has not been explored as a design freedom. In this study, the influence of the symmetry of the lattice points on the photonic bandgap of an all-dielectric valley photonic crystal (VPC) structure is analyzed by using elliptical lattice points with lower symmetry. The central wavelength and width of the photonic bandgap of the VPC can be modified by varying the direction of the long axis of the elliptical lattice points. The all-dielectric VPC structures with different bandgap widths and central wavelengths are combined in a mirror-symmetrical manner to form all-dielectric photonic topological insulator waveguides, which achieve anti-scatter robust unidirectional optical transmission. This study adds new degree of freedom and provides new possibilities to all-dielectric VPC designs.

Key words: topological photonic crystal, quantum valley Hall effect, topological optical transmission, valley photonic crystal

引言

光子拓扑绝缘体的反向散射抑制且缺陷免疫的边界输运特性、自旋轨道选择传输特性、高维度

的光场调控等特性使得拓扑光子学在近年来引起了广泛关注。拓扑绝缘体这个概念最早是在电子系统中提到的, 电子在拓扑绝缘体系统中有自旋性

收稿日期: 2020-10-12, 修回日期: 2021-04-21

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(11704275; 11904255)

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China (11704275, 11904255)

作者简介(Biography): 张娅敏(出生年1995-), 性别女, 山西省运城市盐湖区人, 硕士研究生, 主要研究领域为微纳光电器材. E-mail: 919516411@qq.com

*通讯作者(Corresponding author): E-mail: feihongming@tyut.edu.cn

Received date: 2020-10-12, Revised date: 2021-04-21

质可以沿边缘单向传播。随后研究者将拓扑绝缘体引入到光学中,实现了宽带单向传输、抗散射传输等功能^[1-4],拓扑理论在一维^[5-6],二维,三维^[7-12]中均有运用。一维中主要讨论的是手性的对称性,其最具代表性的是SSH模型^[13];二维体系包括光学类量子霍尔系统^[14-17]、光学类量子自旋霍尔系统^[18-22],光学类能谷霍尔系统^[23-26]以及Floquet拓扑绝缘体^[27];三维体系中主要研究集中于无能隙系统的Weyl点和节线以及三维光子拓扑绝缘体。二维光子拓扑绝缘体相对于一维体系而言,可以调节的参数更为丰富,同时可以使用目前很成熟的半导体微纳加工技术在目前广泛使用的硅和二氧化硅材料上加工,并能与现有的硅基光子学器件实现芯片级的集成。目前已经有研究展示出可以工作在光通信波段(1 550 nm)的光子拓扑绝缘体结构,实现了高于90%正向透射率的单向光传输^[28]。因此,本研究将集中于二维光子拓扑绝缘体的设计。

二维光子拓扑绝缘体中光学类量子霍尔系统常通过引入磁场打破时间反演对称性,产生单向传输的边界态;光学类量子自旋霍尔系统可以通过光子晶体晶格结构设计实现能带翻转,导致能带上出现非平庸的拓扑结构,从而实现二维的量子自旋霍尔效应^[29]。与前者相比,光学类量子能谷霍尔系统可以由两个具有相同禁带的光子晶体结构组成,其设计更加简单,而且限制更少,因此具有相对优势。能谷光子晶体的晶胞结构通过打破空间反演对称性发生拓扑相变,形成能谷霍尔效应,并且实现对于缺陷免疫的鲁棒单向光传输^[30]。之前关于能谷光子晶体结构的设计是通过改变蜂窝晶格结构的三个格点的大小来实现光子禁带,降低结构对称性^[31](从C6变成C3),来破坏K与K'点的简并。格点的形状的选取局限于对称性比较高的圆形和三角形(C3对称性)格点,而对称性较低的结构尚未被系统研究。因此,本研究提出通过使用椭圆形(x轴对称性)格点来降低整个全电介质能谷光子晶体的结构对称性,来研究结构对称性对于光子晶体禁带以及基于低对称性光子晶体结构的全电介质光子拓扑绝缘体的单向光传输性能的影响。本研究发现,椭圆形格点的长轴的取向能够影响光子晶体结构的禁带的宽度及单向光传输的带宽。而不同长轴取向的光子晶体都能在光通信波段(1 550 nm)附近实现高正向透射率的单向光传输。因此,本研究从格点对称性出发为全电介质光子拓扑绝缘体

的设计提供了新的思路。同时,本研究设计的结构基于全电介质硅和二氧化硅材料,可以用现在成熟的半导体微纳加工工艺实验制作。

1 能谷光子晶体设计与能带结构

1.1 结构设计及分析

本研究结构设计的全电介质能谷光子晶体结构如图1(a)所示,其设计为一片独立式的光子拓扑绝缘体波导,两边连接耦合矩形波导,实现单向光传输。本文设计了两种硅基蜂窝晶格椭圆格点光子晶体结构,均为在硅基板上(折射率3.495)周期排列椭圆二氧化硅柱(折射率1.45)(如图1(b)所示)。其中 R_i 轴定义为椭圆短轴($R_i=0.128a$), R_0 定义为椭圆的长轴($R_0=0.167a$),硅基板的厚度为200 nm。这里晶格常数 $a=390$ nm其中,长轴沿x轴方向的定义为VPC \parallel +,长轴沿y轴方向的定义为VPC \perp +)。用时域差分有限法,首先考虑所有的椭圆大小一致的情况,这时是关于x轴对称,其能带图分别由图1(c)和(d)中的紫色实线(椭圆大小一致,长轴沿x方向的结构定义为VPC \parallel ,长轴沿y方向的结构定义为VPC \perp)所示。由于蜂窝晶格的对称性,在TE模式下能带发生简并产生一个狄拉克点。在此基础上,通过改变其中三个椭圆格点的大小($R_i=0.232a, r_i=0.0782a, R_0=0.282a, r_0=0.129a$,其中 R_i, r_i 为短轴长度, R_0, r_0 为长轴长度)来破坏x方向上晶格对称性光子晶体的对称性,形成低对称性的结构,打破了空间反演对称性,之前的狄拉克点会打开出现禁带实现光子禁带,如图1(c)和(d)中蓝色虚线所示。将VPC \parallel +)和VPC \perp +)反对称结构的光子晶体分别定义为VPC \parallel -(长轴沿x方向)和VPC \perp -(长轴沿y方向)。其中VPC \parallel +(VPC \parallel -)的禁带宽度为140 nm(从1 390 nm到1 520 nm),VPC \perp +(VPC \perp -)的禁带宽度为150 nm(从1 360 nm到1 510 nm)。其禁带的中心波长分别为1 455 nm(VPC \parallel +)和1 435 nm(VPC \perp +)。由此可见,光子晶体格点的长轴方向不但影响了禁带的宽度,同时影响的禁带的中心波长。并且随着禁带的打开,K和K'的能谷简并被打破^[30]。能谷霍尔效应中谷赝自旋是能谷自由度中两个像电子自旋向上、向下态一样作为信息运输的载体,谷赝自旋劈裂依赖能谷,K'能谷的赝自旋向上态只沿 Γ -K'方向传输,而K能谷的赝自旋向下态只沿 Γ -K方向传输^[32]。因此出现谷偏振光选择性,也就是K谷和K'谷对左旋圆偏振光(LCP)和右旋圆偏振光(RCP)的选择性耦合和传输^[33]。在介质柱正

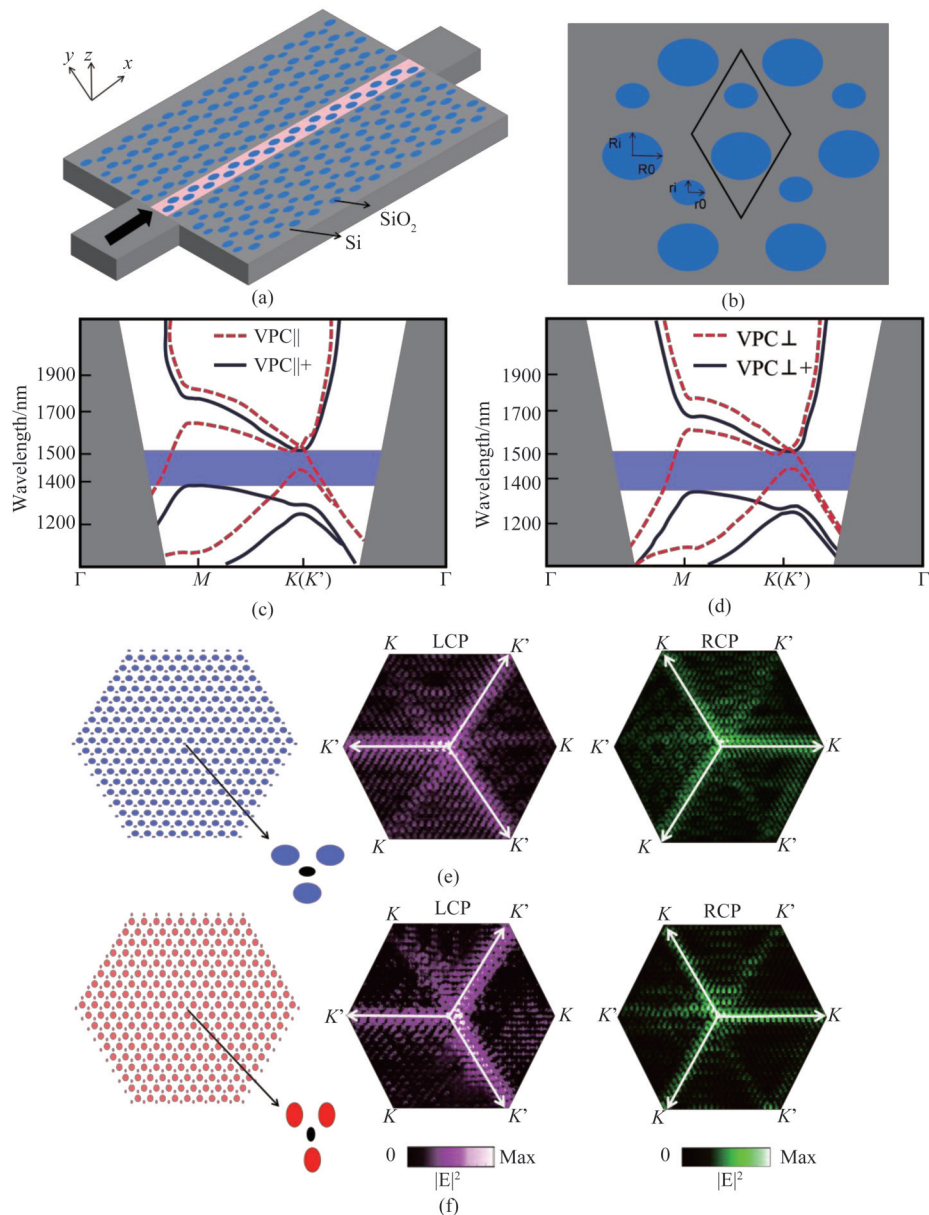


图1 (a)基于椭圆形格点的全电介质能谷光子晶体结构示意图。硅和二氧化硅分别使用是灰色和蓝色表示。波导从左边进入,沿着具有谷霍尔效应的光子晶体波导(红色的)带结构从右边输出,(b)椭圆光子晶体VPC \parallel +晶胞结构示意图,(c)VPC \parallel 和VPC \parallel +的TE模式的能带结构图,(d)为VPC \perp 和VPC \perp +的TE模式的能带结构图,(e)显示了VPC \parallel +在介质柱中心放置左旋圆偏振(LCP)和右旋圆偏振(RCP)光源后的电场强度分布图,图中显示LCP光沿 K 方向传输,以及RCP光沿 K' 方向传输,(f)显示了VPC \perp +在介质柱中心放置LCP和RCP光源后的电场强度分布图,图中LCP光沿 K 方向传输,以及RCP沿 K' 方向传输。图中 K 与 K' 的方向使用白色箭头表示

Fig. 1 (a) Schematic diagram of all-dielectric valley photonic crystal structure based on elliptical lattice. Silicon and silicon dioxide are gray and blue, respectively. The incident light enters from the left waveguide, propagates along the valley photonic crystal waveguide (red) with valley Hall effect, and exits from the right waveguide, (b) Schematic diagram of unit cell structure of the valley photonic crystal VPC \parallel +, (c) Photonic band structure of TE mode of VPC \parallel and VPC \parallel +, (d) Photonic band structure of TE mode of VPC \perp and VPC \perp +, (e) The electric field intensity distributions of left-handed circular polarized (LCP) and right-handed circular polarized (RCP) light sources in the center of the dielectric column in VPC \parallel +, where LCP light propagates along the K direction, while RCP light propagates along the K' direction, (f) The electric field intensity distributions of left-handed circular polarized (LCP) and right-handed circular polarized (RCP) light sources in the center of the dielectric column in VPC \perp +, where LCP light propagates along the K direction, while RCP light propagates along the K' direction. The directions of K and K' in the figure are indicated by white arrows.

中心(图(e)(f)中的黑色介质柱处)放置点光源后,谷偏振光的选择性激发会产生左旋、右旋的传输,如图(e)(f)中的场内分布图所示。

1.2 单向耦合

谷耦合打开了一个完整的禁带,阻止光子在特定禁带范围内进入光子晶体中,但特定偏振态的光

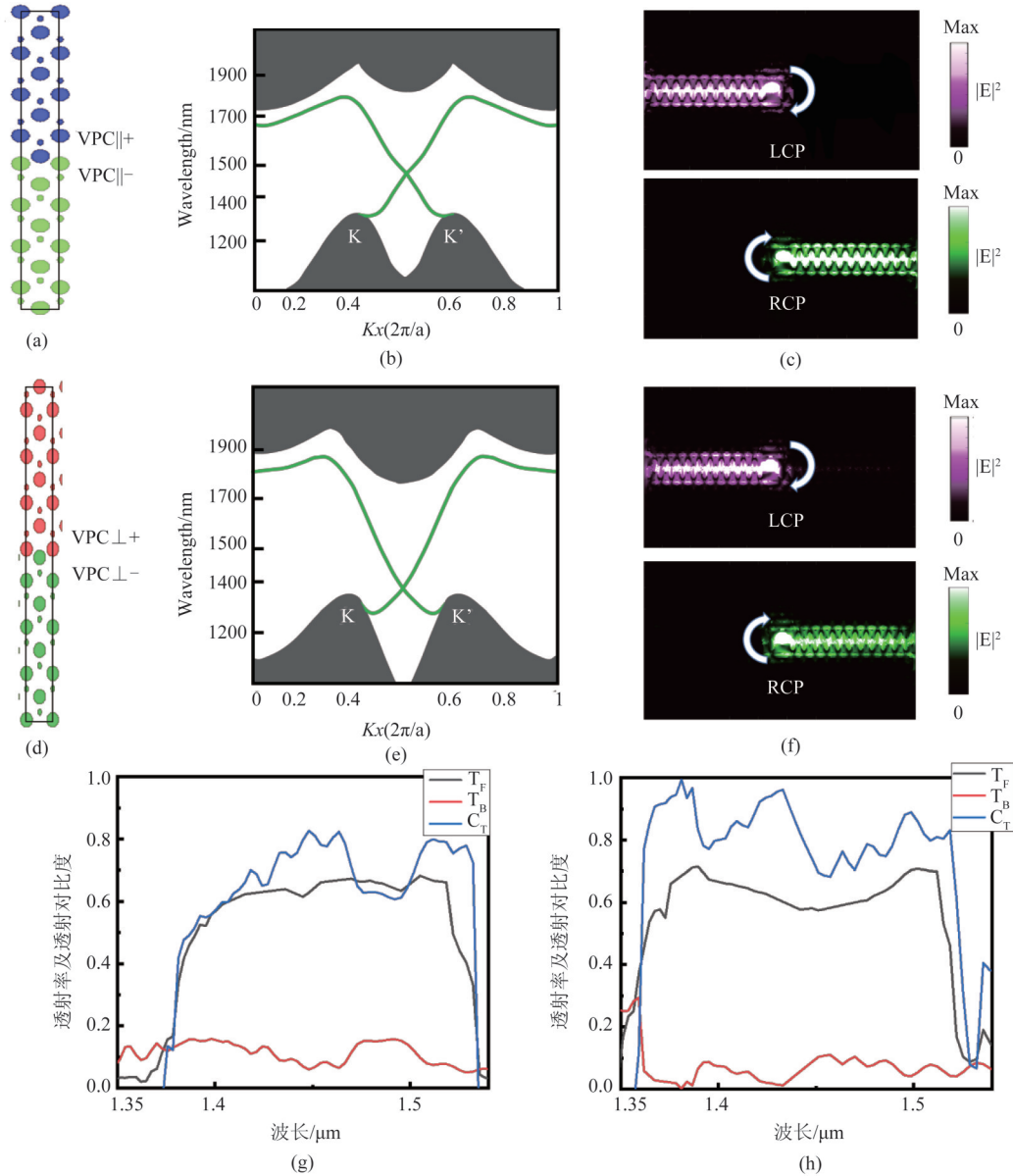


图2 (a)显示了VPC \parallel +和VPC \parallel -构成的超晶胞结构图,上下两边分别为四个周期的VPC \parallel +和VPC \parallel -, (b)为VPC \parallel +和VPC \parallel -构成超晶胞结构的能带图, (c)为VPC \parallel +和VPC \parallel -结构界面中心分别放置LCP、RCP电场图, (d)显示了VPC \perp +和VPC \perp -构成的超晶胞结构图,上下两边分别为四个周期的VPC \perp +和VPC \perp -, (e)为VPC \perp +和VPC \perp -构成超晶胞结构的能带图, (f)为VPC \perp +和VPC \perp -结构界面中心分别放置LCP、RCP电场图, (g)为VPC \parallel +和VPC \parallel -结构组合结构正向和反向透射率,以及其透射对比度, (h)为VPC \perp +和VPC \perp -组合结构的正向和反向透射率,以及其透射对比度

Fig. 2 (a) The supercell structure composed of VPC \parallel + and VPC \parallel -. The upper and lower sides are four periods of VPC \parallel + and VPC \parallel -, (b) The photonic band diagram of the supercell structure composed of VPC \parallel + and VPC \parallel -, (c) The electric field intensity distributions of LCP and RCP light sources placed at the center of the supercell structure (the interface between VPC \parallel + and VPC \parallel -), respectively, (d) The supercell structure composed of VPC \perp + and VPC \perp -. The upper and lower sides are four periods of VPC \perp + and VPC \perp -, (e) The photonic band diagram of the supercell structure composed of VPC \perp + and VPC \perp -, (f) The electric field intensity distributions of LCP and RCP light sources placed at the center of the supercell structure (the interface between VPC \perp + and VPC \perp -), respectively, (g) Plots of forward and backward transmittance of the structure composed of VPC \parallel + and VPC \parallel -, and the contrast ratio, (h) Plots of forward and backward transmittance of the structure composed of VPC \perp + and VPC \perp -, and the contrast ratio

波(包括LCP和RCP)可以沿着VPC \parallel +和VPC \parallel -的边界以不同的方向传播(LCP和RCP的传输方向相反,如图2(c)所示),产生了光子学拓扑性质。在此基础上,通过分别对VPC \parallel +和VPC \perp +取镜像,就形成了在拓扑特性相反的光子晶体结构。这样通过两个互为镜像的光子晶体的结合就能实现光子拓扑绝缘体结构。接下来计算超原胞的能带结构,其中VPC \parallel +及其镜像结构(VPC \parallel -)所组成的全电介质拓扑绝缘体结构如图2(a)所示,其超原胞的能带结构如图2(b)所示,从图中可以看出,群速度为正和群速度为负的谷边缘态相交,与图1(c-d)狄拉克点打开出现禁带的波段相对比,原本出现禁带的波段成为了导带。相似的结果也可以由VPC \perp +及其镜像光子晶体结构(VPC \perp -)(图2(d))及其超原胞能带图(图2(e))中得出。由于其边缘态具有偏振选择特性,组合形成的拓扑绝缘体中,不同的手性的圆偏振态将沿不同的方向传输,其场强分布如图2(c)和(f)所示,其中RCP光沿右传输,LCP光沿左传输^[34]。至此,该设计的光子拓扑绝缘体结构实现了不同偏振态的单向光传输。这里计算RCP光的透射光谱,定义从左侧向右侧为波导的正方向(若是计算LCP光,则此方向需要定义为相反方向),为正向透射率 T_F ,从右侧向左侧为波导的反方向,为反向透射率 T_B 。利用透射对比公式: $C_T = (T_F - T_B)/(T_F + T_B)$,得到透射对比度,所得到的数据如图2(g-h)所示。

1.3 边缘状态的鲁棒传输特性

为了证明谷霍尔拓扑结构的鲁棒传输特性,本研究设计了由VPC \parallel +及VPC \parallel -,以及VPC \perp +及VPC \perp -所构成的直线型、 Ω 型边界态波导的传播,并研究了直线型波导中存在缺陷的情况。其结构设计如图1(a)中所示,结构左右侧分别连接了入射光波导和出射光波导。波导的结构设计及其电场强度分布如图3(a-f)所示。可以从图中看出,光波可以被很好的限制在波导中,同时实现高效率的单向光传输。即使是在 Ω 型光波导的两个锐角弯折处,光波依然可以沿着弯折很好的传输。拓扑光波导中的边缘态模式具有很强的抗散射特性,不受结构缺陷的影响。这里,本研究通过去除交界面上的一个光子晶体格点设计带点缺陷的光波导。从图3(c)和(f)可以看出,虽然有一部分光被耦合进了缺陷态,但是由于反向反射仍然受到抑制,绝大部分的光强仍可以沿着波导传播。由此可见,椭圆形格

点的拓扑光子晶体结构能够实现优异的鲁棒传输特性。

传播的透射率光谱图展示在图3(g-h)中,从图中可以看出,在VPC \parallel +的禁带范围(1 390~1 520 nm)和VPC \perp +的禁带范围(1 360~1 510 nm),光波都有很高的透过率(>-2.5 dB)。可见椭圆长轴的取向主要影响的是光子晶体的禁带位置和禁带宽度,从而影响了光波导结构的工作波长范围。同时,两种椭圆光子晶体结构都能实现高效率的单向光传输。虽然缺陷略微降低了整体透射率,但是相比普通的光子晶体光波导而言其影响是很微弱。在有缺陷存在的情况下其透射率仍然可以保持在(>-3 dB)的水平。这是传统的光子晶体光波导所无法实现的。对比VPC \parallel +和VPC \parallel -与VPC \perp +和VPC \perp -的 Ω 型波导透射率,从图(i)可以看出,两种结构在存在拐角禁带范围内都能良好的传输。然而,其透射光谱确实受到椭圆长轴取向的影响,由此可见,低对称性格点的取向确实能够有效的调节能谷光子晶体的光学性能。从以上分析,可以看出椭圆光子晶体结构对于实验加工要求的宽容度是比较高的,在实验加工中即使是加工的椭圆格点的长短轴不能完全满足设计需求,其加工的结果仍然可以展示出良好的单向光传输的性能。同时加工中引入的缺陷也只对单向光传输产生微弱影响。因此,本研究设计的结构具有可以应用于实验加工制作的可能。

2 结论

本研究提出了全电介质能谷光子晶体结构设计,通过使用对称性较低的椭圆形格点结构,研究了格点长轴的不同取向对于光子晶体禁带中心波长及宽度以及光波导工作带宽的影响。本研究展示了,椭圆形格点的长轴取向主要影响了光子晶体的禁带中心位置及禁带宽度,因此影响了最终设计的结构的工作波长范围。同时,本研究发现不同长轴取向的椭圆格点的光子晶体结构均能实现良好的单向光传输性能,基本不受结构缺陷的影响。本研究所展示的全电介质能谷光子晶体的禁带宽度达到了150 nm,该设计从结构对称性的角度给光子拓扑绝缘体的设计提出新的思路。本研究设计的结构对于加工过程的要求的宽容度较高,在加工过程引入的误差及缺陷将不会对该结构的单向光传输特性造成明显影响。因此,该设计具有实验加工的可能性及应用前景。

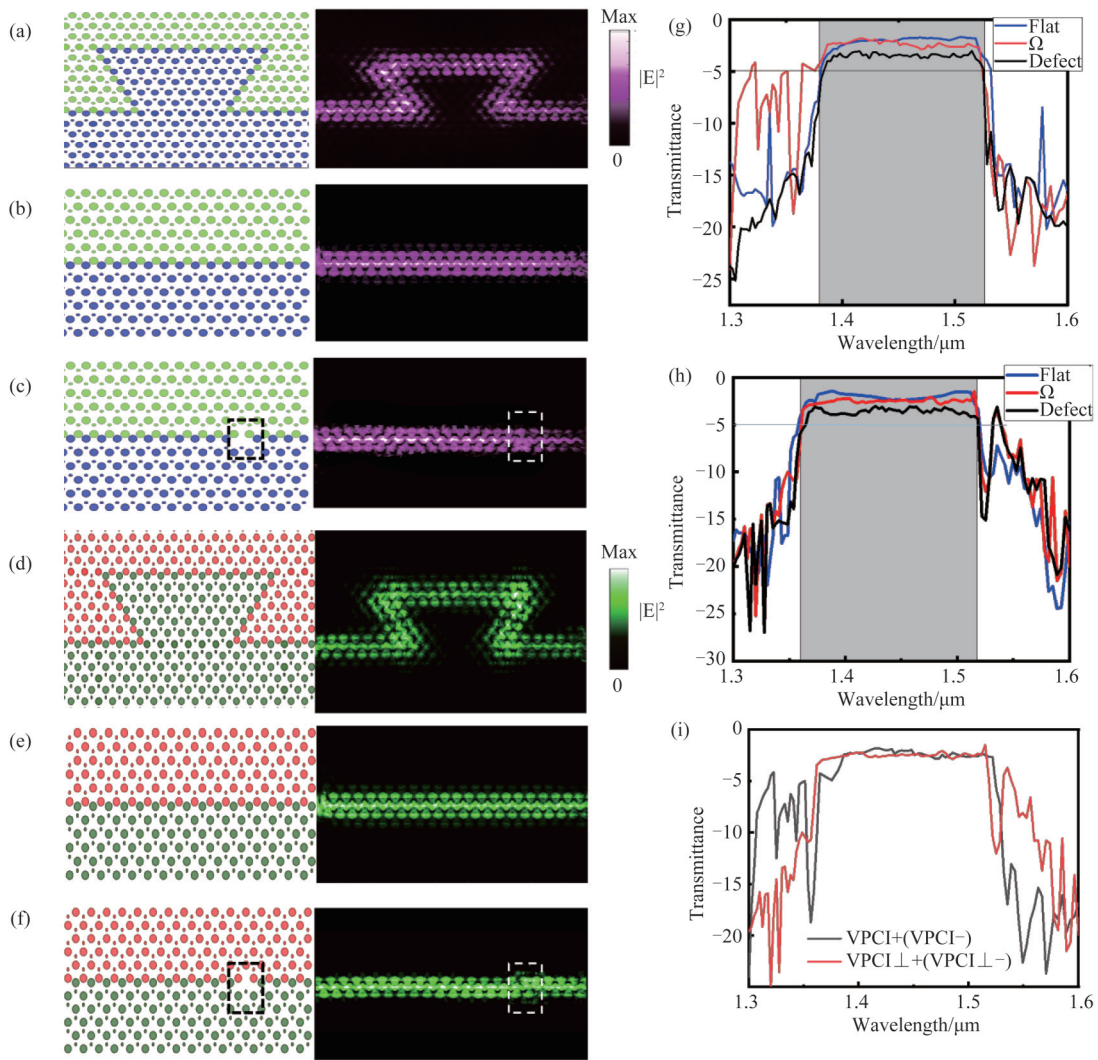


图3 (a) $VPC \parallel +$ 和 $VPC \parallel -$ 构成的 Ω 型拓扑光波导,以及光沿 Ω 型光波导传输的电场强度图,(b) $VPC \parallel +$ 和 $VPC \parallel -$ 构成的直线型拓扑光波导,以及光沿着直线型拓扑光波导传输的电场强度图,(c)由 $VPC \parallel +$ 和 $VPC \parallel -$ 构成的具有点缺陷的直线型拓扑光波导,以及光沿着直线型带有缺陷的光波导传输的电场图,其中点缺陷位置使用矩形框标出,(d) $VPC \perp +$ 和 $VPC \perp -$ 构成的 Ω 型拓扑光波导,以及光沿 Ω 型光波导传输的电场强度图,(e) $VPC \perp +$ 和 $VPC \perp -$ 构成的直线型拓扑光波导,以及光沿着直线型拓扑光波导传输的电场强度图,(f)由 $VPC \perp +$ 和 $VPC \perp -$ 构成的具有缺陷的直线型拓扑光波导,以及光沿着直线型带有缺陷的光波导传输的电场图,其中点缺陷位置使用矩形框标出,(g) $VPC \parallel +$ 和 $VPC \parallel -$ 构成的拓扑光波导的透射率曲线,红色和蓝色分别代表 Ω 型和直线型波导,黑色表示点缺陷波导,灰色区域表示禁带光波段,(h) $VPC \perp +$ 和 $VPC \perp -$ 构成的拓扑光波导的透射率曲线,红色和蓝色分别代表 Ω 型和直线型波导,黑色表示点缺陷波导,灰色区域表示禁带光波段,(i)为 $VPC \parallel +$ 和 $VPC \parallel -$ 构成的 Ω 型波导与 $VPC \perp +$ 和 $VPC \perp -$ 构成的 Ω 型波导的透射率曲线,以方便比较。

Fig. 3 (a) An Ω -shape topological optical waveguide composed of $VPC \parallel +$ and $VPC \parallel -$, and the electric field intensity distributions of light propagating along the Ω -shape optical waveguide, (b) A straight topological optical waveguide composed of $VPC \parallel +$ and $VPC \parallel -$, and the electric field intensity distributions along the straight topological optical waveguide, (c) A straight topological optical waveguide with a point defect, and the electric field intensity distributions of light propagating along the defective waveguide, (d) An Ω -shape topological optical waveguide composed of $VPC \perp +$ and $VPC \perp -$, and the electric field intensity distributions of light propagating along the Ω -shape optical waveguide, (e) A straight topological optical waveguide composed of $VPC \perp +$ and $VPC \perp -$, and the electric field intensity distributions along the straight topological optical waveguide, (f) A straight topological optical waveguide with a point defect, and the electric field intensity distributions of light propagating along the defective waveguide. The point defects are marked by the rectangle, (g) Plots of the forward transmittance of the topological optical waveguide composed of $VPC \parallel +$ and $VPC \parallel -$. Ω -shape (red), straight waveguide (blue) and defective waveguide (black). The gray area represents the wavelength region of the photonic bandgap, (h) Plots of the forward transmittance of the topological optical waveguide composed of $VPC \perp +$ and $VPC \perp -$. Ω -shape (red), straight waveguide (blue) and defective waveguide (black). The gray area represents the wavelength region of the photonic bandgap, (i) Forward transmittance plots of the Ω -shaped waveguide composed of $VPC \parallel +$ and $VPC \parallel -$ and composed of $VPC \perp +$ and $VPC \perp -$, respectively, for comparison.

References

- [1] Zhang M, Wang C, Hu Y W, *et al.* Electronically programmable photonic molecule [J]. *Nature Photonics*, 2019, **13**: 36–40.
- [2] Ni X, Goralach M A, Alu A, *et al.* Topological edge states in acoustic Kagome lattices [J]. *New Journal of Physics*, 2017, **19**(5):055002.
- [3] Sun X C, He C, Liu X P, *et al.* Two-dimensional topological photonic systems [J]. *Progress in Quantum Electronics*, 2017, **55**:52–73.
- [4] Zhu X Y, Gupta S K, Sun X C, *et al.* Z₂ topological edge state in honeycomb lattice of coupled resonant optical waveguides with a flat band [J]. *Optics Express*, 2018, **26**(19): 24307.
- [5] Xiao M, Ma G C, Yang Z Y, *et al.* Geometric phase and band inversion in periodic acoustic systems [J]. *Nature Physics*, 2015, **11**(3):240.
- [6] Poddubny A, Miroshnichenko A, Slobozhanyuk A, *et al.* Topological Majorana states in zigzag chains of plasmonic nanoparticles [J]. *Acs Photonics*, 2014, **1**(2):101–105.
- [7] 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.
- [8] Lu L, Wang Z Y, Ye D X, *et al.* Experimental observation of Weyl points [J]. *Ence*, 2015, **349**:622–624
- [9] Chen W J, Xiao M, *et al.* Photonic crystals possessing multiple Weyl points and the experimental observation of robust surface states [J]. *Nature Communications*, 2016, **7**:13038.
- [10] Gao W L, Yang B, Lawrence M, *et al.* Plasmon Weyl Degeneracies in Magnetized Plasma [J]. *Nature Communications*, 2016, **7**:12435.
- [11] 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.
- [12] Yang B, Guo Q H, Tremain B, *et al.* Ideal Weyl points and helicoid surface states in artificial photonic crystal structures [J]. *Ence*, 2018, **359**(6379):1013–1016.
- [13] Su W P, Schrieffer J R, Heeger A J. Solitons in Polyacetylene [J]. *Physical Review Letters*, 1979, **42**(25): 1698–1701.
- [14] Haldane F D M, Raghu S. Possible realization of directional optical waveguides in photonic crystals with broken time-reversal symmetry [J]. *Physical Review Letters*, 2008, **100**(1):013904.
- [15] Wang Z, Chong Y D, Joannopoulos J D, *et al.* Reflection-free one-way edge modes in a gyromagnetic photonic crystal [J]. *Physical Review Letters*, 2007, **100**(1): 013905.
- [16] Zheng W, Chong Y D, Joannopoulos J D, *et al.* Observation of unidirectional backscattering-immune topological electromagnetic states [J]. *Nature*, 2009, **461**(7265):772.
- [17] Skirlo S A, Lu Ling, Igarashi Y, *et al.* Experimental observation of large chern numbers in photonic crystals [J]. *Physical Review Letters*, 2015, **115**(25):253901.
- [18] Cheng X J, Jouvaud C, Ni X, *et al.* Robust reconfigurable electromagnetic pathways within a photonic topological insulator [J]. *Nature Materials*, 2016, **15**(5): 542–548.
- [19] Nalitov A V, Malpuech G, Tercas H, *et al.* Spin-orbit coupling and optical spin Hall effect in photonic graphene [J]. *Physical Review Letters*, 2014, **114**(2):026803.
- [20] Nalitov A V, Malpuech G, Tercas H, *et al.* Spin-orbit coupling and optical spin Hall effect in photonic graphene [J]. *Physical Review Letters*, 2015, **114**(2):026803.
- [21] Yang Y T, Xu Y F, Xu T, *et al.* Visualization of a unidirectional electromagnetic waveguide using topological photonic crystals made of dielectric materials [J]. *Physical Review Letters*, 2018, **120**(21):217401.1–217401.7.
- [22] Khanikaev A, Hossein Mousavi S, Tse W, *et al.* Photonic topological insulators [J]. *Nature Mater* 2013, **12**: 233–239.
- [23] He X T, Liang E T, Yuan Jia Jun, *et al.* A silicon-on-insulator slab for topological valley transport [J]. *Nature Communications*. 2018.**10**:827
- [24] Ma T, Shvets G. All-si valley-hall photonic topological insulator [J]. *New Journal of Physics*, 2016, **18**(2):025012.
- [25] Ezawa M. Topological Kirchhoff Law and Bulk-Edge correspondence for Valley-Chern and Spin-Valley-Chern numbers [J]. *Physical Review B*, 2013, **88**(16): 3532–3540.
- [26] Chen X D, Dong J W. Valley-protected backscattering suppression in silicon photonic graphene [J]. *Physical Review B*, 2017, **96**: 020202
- [27] Shalaev M I, Walasik W, Tsukernik A, *et al.* Robust topologically protected transport in photonic crystals at telecommunication wavelengths [J]. *Nature Nanotechnology*, 2019, **14**(1):31–34
- [28] Zhu H X, Wang T T, Gao J S, *et al.* Floquet topological insulator in the BHZ model with the polarized optical field [J]. *Chin. Phys. Lett*, 2014, **31**(3):34–37.
- [29] YE Fei, SU Gang. Topological insulators [J]. *Physica* (叶飞, 苏刚. 拓扑绝缘体及其研究发展, 物理) 2010, **39**(8): 564–569.
- [30] Poo Y, He C, Xiao C, *et al.* Manipulating one-way space wave and its refraction by time-reversal and parity symmetry breaking [J] *Entific Reports*, 2016, **6**(1):29380
- [31] Jia Z Y, Yang Y T, Ji L Y, *et al.* Deterministic interface states in photonic crystal with graphene-allotrope-like complex unit cells [J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, **66**(22): 227802.
- [32] Ma T, Khanikaev A B, Mousavi S H, *et al.* Guiding electromagnetic waves around sharp corners: Topologically protected photonic transport in metawaveguides [J]. *Physical Review Letters*, 2015, **114**(12): 127401.
- [33] Yuan H T, Wang X Q, Lian B, *et al.* Generation and electric control of spin-valley-coupled circular photogalvanic current in WSe₂ [J]. *Nature Nanotechnology* 2014, **9**: 851–857
- [34] Qiu P P, Liang R, Qiu W B, *et al.* Topologically protected edge states in graphene plasmonic crystals [J]. *Optics Express*, 2017, **25**(19):22587.