

基于液晶的可调控拓扑谷光子晶体波导耦合功率分配器

沈林伟, 李 妍, 刘传宝, 白 洋

(北京科技大学新材料技术研究院, 北京 100083)

摘 要: 随着片上光子集成、光互连和动态光功率管理技术的快速发展, 兼具低损耗、小型化和高稳定性的片上功率分配器已成为集成光子系统中的关键基础器件。光子拓扑绝缘体凭借其独特的拓扑保护边界态传输, 在抑制背向散射、抗弯折和对缺陷的鲁棒性等方面具有显著优势, 为高性能功率分配器设计提供了新的实现途径。然而, 现有拓扑功率分配器大多仍依赖改变结构几何参数来实现分束比调控, 器件制备完成后难以在同一结构实现连续动态调节, 限制了其在可重构集成光子系统中的应用。针对上述需求, 本工作提出一种基于液晶调控的拓扑谷光子晶体波导耦合功率分配器。该器件以花瓣状孔径的正六边形单胞为功能基元, 通过锯齿状拓扑界面与反向耦合波导的平面空间序构设计建立功率分配器, 并在边界传输波导区域及耦合区域的孔径中引入向列相液晶, 利用外加电场调控液晶分子光轴取向改变波导有效折射率, 从而实现波导间耦合行为和输出功率比的连续调控。数值模拟结果表明, 在目标通信波段(1550 nm)工作波长下, 通过调控液晶作用区域长度, 可在不改变功能基元与整体序构的前提下, 实现两个输出端口间约 0%~100%的连续可调功率分配。进一步, 在引入多种结构缺陷后, 该器件依然保持良好的传输性能, 验证了其优异的鲁棒性。本研究为可重构片上光子路由、动态光互连和拓扑集成光子器件设计提供了新的实现方案, 也为发展兼具鲁棒性与动态调控能力的集成光子系统开辟了可行路径。

关键词: 拓扑谷光子晶体; 功率分配器; 液晶调控; 片上光子器件

中图分类号: O734 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2026)07-2195-09

网络出版时间: 2026-06-04



光子拓扑绝缘体由于其强大的边缘传输能力, 在控制光的传播方面具有巨大的潜力^[1-4]。其中, 基于光子谷霍尔效应的拓扑谷光子晶体(valley photonic crystal, VPC)通过引入谷赝自旋自由度, 仅需打破空间反演对称性即可实现能带拓扑相变, 进而形成受拓扑保护的边界态^[5-8]。基于 VPC 的拓扑边界传输展现出单向传输特性, 能够有效抑制背向散射, 并对结构缺陷表现出优异的鲁棒性^[9]。基于上述优势, VPC 被广泛应用于拓扑激光器、拓扑光开关、拓扑光子波导和片上通信等多个前沿研究领域^[10-15]。

传统片上功率分配器高度依赖相位匹配与模式干涉, 因而在带宽色散、工艺误差及弯折缺陷下易出现分束比漂移、损耗增大及串扰, 难以保证大规模集成中的稳定一致性^[16-18]。VPC 因其独特的拓扑

保护边界态, 对结构缺陷、无序和弯折具有鲁棒性, 可以确保能量分配的高效与稳定, 成为设计高性能拓扑功率分配器的理想平台, 受到研究者的广泛关注^[19-23]。为实现不同分配比的拓扑功率分配器, 研究者围绕不同功能基元及其序构方式设计了多种拓扑结构, 例如, Kang 等^[19]在两类拓扑相界面处构造 Y 形结点谷分束器, 使不同谷极化的边界态在结点处被选择性引导至不同输出端口, 实验实现 20~30 dB 的端口对比度, 并在约 21.0~21.5 GHz 频段观察到被抑制端口约 10 dB 的透射下降。Tang 等^[20]基于特定耦合器构型, 将谷拓扑效应与镜面对称性相结合, 提出并验证了拓扑等功率分束耦合器, 在 1533~1581 nm 的宽工作波长范围内实现了 1:1 的功率分配。Jia 等^[21]通过构建双拓扑波导耦合结构, 在硅基谷霍尔拓扑光子晶体中利用可调长尾边界态

收稿日期: 2026-03-25。 修订日期: 2026-04-28。

基金项目: 国家自然科学基金(92463311, 52372279); 北京市科技新星计划(20240484583)。

第一作者: 沈林伟(2000—), 男, 硕士研究生。

通信作者: 白 洋(1979—), 男, 博士, 教授;

刘传宝(1988—), 男, 博士, 副教授。

Received date: 2026-03-25. Revised date: 2026-04-28.

First author: SHEN Linwei (2000—), male, Master candidate.

E-mail: 1160155572@qq.com

Correspondent author: BAI Yang (1979—), male, Ph.D., Professor.

LIU Chuanbao (1988—), male, Ph.D., Associate Professor.

E-mail: baiy@mater.ustb.edu.cn; cbliu@ustb.edu.cn

与谷涡旋能流实现跨 2.8 个工作波长 λ 间距的高效能量转移与端口分配, 在获得 91.3% 耦合比的同时保持约 -30 dB 的波导隔离。Guan 等^[22]依托“鱼叉形”拓扑分束结点结构, 在相反谷陈数域之间实现了片上紧凑型功率分束, 并在 60°/90°/120° 大拐角条件下保持稳定分束性能。Guo 等^[23]则通过多端口集成输出结构, 将谷光子晶体拓扑边界态与波分复用功能结合, 设计了“功率分配+波分复用”一体化器件, 在 5.4–6.2 GHz 波段实现了 1:1 分束, 并完成了双通道波分复用。上述研究充分展示了拓扑边界态传输在高效、紧凑功率分配器设计中的独特优势, 但其分束功能仍依赖于 Y 形结点^[19]、特定耦合器构型^[20–21]、分束结点形态^[22]或多端口输出^[23]等预设结构, 一旦器件制备完成, 分束比便会随结构一同固定, 难以在同一器件中实现连续动态调控。对于需要动态重构的片上光子系统而言, 这类依赖预设结构参数的调控方式适应性有限, 难以满足动态调控功率分配比例的需求。与此同时, 为获得不同分束功能而频繁调整器件结构, 也会增加设计复杂度与加工难度, 进而影响器件的一致性、可重复性和实际应用能力。因此, 如何在不改变器件几何结构与整体序构的前提下, 实现连续、可逆且稳定的动态调控, 已成为相关研究中的关键问题。近年来, 智能可重构光子器件已成为重要研究方向^[24–25], 尤其是液晶材料体系, 因具备连续可调、响应灵敏和多自由度可编程等优势, 正逐渐成为实现主动可重构光子器件的重要材料平台^[26–27]。这也为在拓扑谷光子晶体中引入液晶调控机制、实现无需改变结构几何形状的动态功率分配提供了新的研究思路。

为克服现有拓扑功率分配器依赖预设结构、难以实现连续动态调控的局限, 本工作以含花瓣状孔径的正六边形单胞作为功能基元, 以锯齿状拓扑界面及反向耦合双波导作为序构基础, 提出了一种基于向列相液晶(liquid crystal, LC)材料耦合拓扑边界态的新型功率分配器方案。在拓扑边界态传播路径中引入 LC, 并通过外加电场或磁场调控液晶分子光轴取向, 从而实现不改变几何结构, 仅通过介质折射率变化来调控两个输出端口间的能量分配比例。相比传统方法, 该方案具有无须结构重构、能在同一结构下动态调控任意比例功率分配的优势, 大大降低了器件的设计和制造成本, 提升了器件的实用性和广泛适用性。同时, 拓扑边界态对结构缺陷与无序扰动的天然鲁棒性, 可在器件存在加工误差与局部扰动时仍维持稳定的能量传输和耦合通

道, 从而显著提升分束比与插入损耗的可重复性与一致性。上述特点使该功率分配器在可重构片上互连、动态功率管理等应用场景中展现出良好的潜在价值。

1 结构设计

本工作提出的拓扑谷光子晶体功率分配器整体结构示意图如图 1a 所示, 该器件以花瓣状孔径的正六边形单胞为功能基元, 通过锯齿状拓扑界面和反向耦合波导的序构设计构建拓扑功率分配器, 其中端口 1(Port 1)为入射端口, 端口 2(Port 2)和端口 3(Port 3)为 2 个出射端口, 中间区域为波导耦合区域, 光信号从端口 1 入射后沿拓扑边界传播, 并在耦合区域内实现波导间的能量耦合与分配; 右侧红色区域表示液晶可调区域, 通过外加电场调控向列相液晶分子光轴取向, 可进一步实现 2 个输出端口间功率分配比例的动态调节。图 1b 显示了 3 种花瓣状孔径的功能基元及其在横磁(TM)模式下模拟的能带结构, 每个功能基元是通过在正六边形硅板上刻蚀 3 个椭圆孔而形成的, 其中旋转角 α 定义为内部空气孔径绕 x 轴旋转的角度。当 $\alpha=0^\circ$ 时, 结构保持 C_{3v} 对称性; 当 $\alpha=30^\circ$ 和 $\alpha=-30^\circ$ 时, 分别对应 A 型谷光子晶体和 B 型谷光子晶体, 分别记为“VPCA”和“VPCB”(其中, 晶格常数 $a=438\text{nm}$, 椭圆长半轴和短半轴的长度分别为 $b=0.32a$ 、 $c=0.25a$, 圆心之间距离 $r=\sqrt{3}a/4$, 背景材料硅在波长为 1550 nm 处的相对介电常数 $\epsilon=11.7$)。对于 $\alpha=0^\circ$, 其在动量空间中 K/K' 谷方向具有空间反演对称性, 存在狄拉克简并; 当 $\alpha=30^\circ$ 或 -30° 时, 由于 K/K' 谷方向的空间反演对称性被打破, 体系的空间对称性由 C_{3v} 降至 C_3 , 狄拉克锥消失, 在 185.1~244.2 THz 频率范围内出现拓扑带隙^[28]。图 1c 同时给出了 VPCA 和 VPCB 在 K 和 K' 谷处的 z 分量电场相位分布, 以及由二者以相反排列顺序构成的 2 种锯齿型拓扑界面序构 Type AB 和 Type BA, 结果表明, 在 VPCA 的下带(185.1THz)和 VPCB 的上带(243.9THz)在 K 谷处分别存在一个右旋圆极化(right-handed circular polarization, RCP)相位涡; 相反地, 在 VPCA 的上带和 VPCB 的下带在 K 谷处存在一个左旋圆极化(left-handed circular polarization, LCP)相位涡。因此, 在 VPCA 或 VPCB 的两个谷附近, 贝里曲率是非零的, 并且在 K 和 K' 谷处取相反符号^[29], 而由于时间反演对称性的存在, 贝里曲率对整个布里渊区的积分等于零。拓扑谷光子学中的谷陈数定义为

贝里曲率在能谷周围一半布里渊区的积分^[30], 故 VPCA 和 VPCB 的谷陈数是非零的, 虽然两者具

有相同的能带结构, 但在两个谷处表现出相反的物理性质。

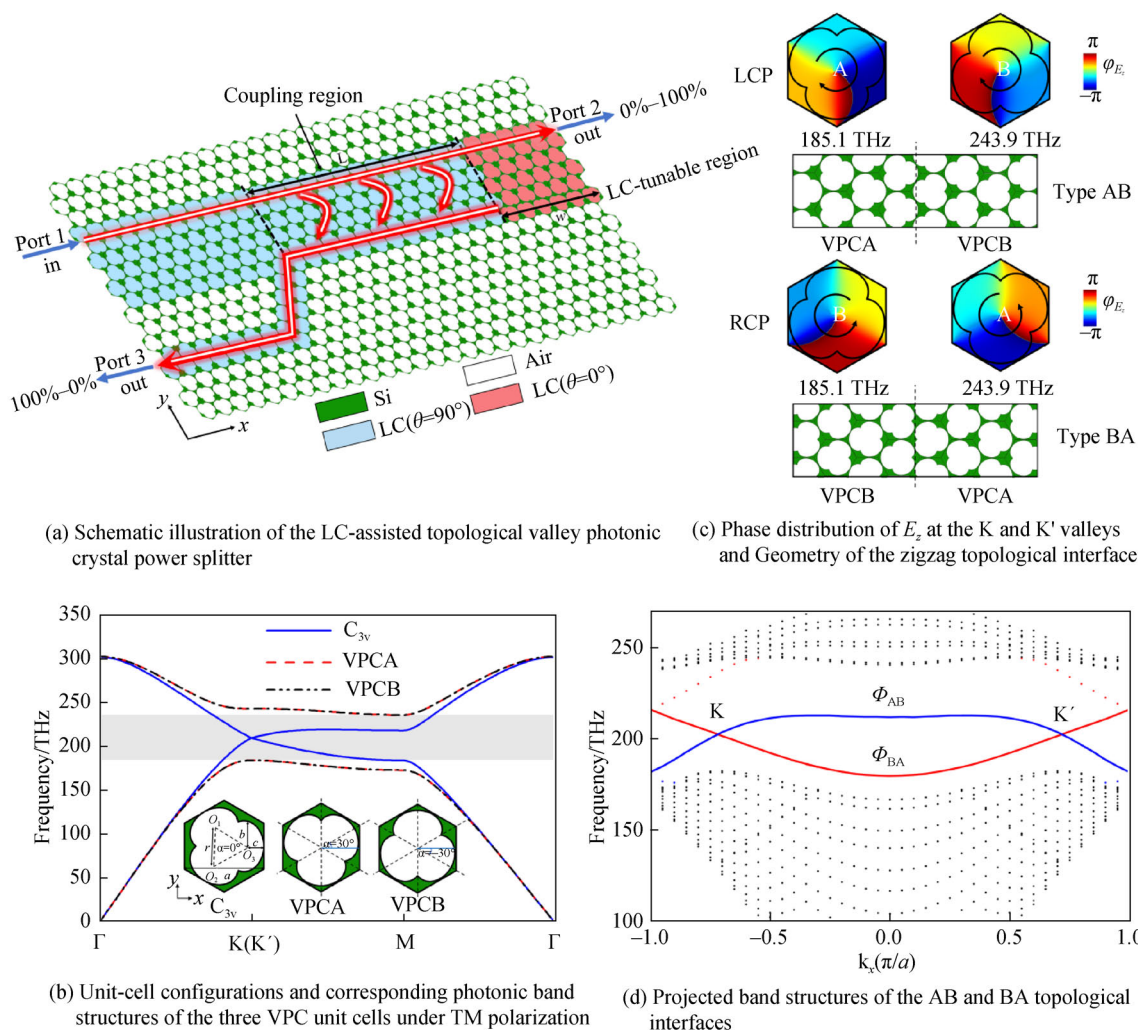


图 1 基于液晶的拓扑谷光子晶体功率分配器示意图及谷光子晶体单胞和拓扑界面特性

Fig. 1 Schematic of the liquid-crystal-based topological valley photonic crystal power splitter, the VPC unit cells, and the characteristics of the topological interfaces

基于这一特性, 通过将 VPCA 和 VPCB 按相反顺序进行有序化排列, 可构建出 2 种锯齿型拓扑界面序构 Type AB 和 Type BA, 从而诱导拓扑谷边缘态的出现^[31], 两种结构的投影能带图如图 1d 所示, 可以观察到, 在体态之间出现间隙边缘状态, 其中蓝线表示 AB 型结构边缘状态的投影, 红线表示 BA 型结构边缘状态的投影, 且 2 种结构的边缘态色散曲线在 K 和 K' 谷处相交。由于边缘态的群速度与边缘态所在点处的斜率有关, 故 AB 与 BA 结构在 K(K') 谷处的群速度相反。所以, 2 种结构在 K(K') 谷处的谷极化边缘态均锁定在单向传播方向, 可以实现拓扑保护的单向边缘态传输。这说明对花瓣状孔径功能基元 VPCA 和 VPCB 进行有序化排列, 能够形成支撑拓扑边界态的锯齿状界面序构。

2 结果与讨论

2.1 拓扑功率分配器结构

基于上述花瓣状孔径功能基元及其形成的锯齿状拓扑界面序构实现的拓扑边缘态传输, 设计了如图 2a 所示的片上液晶拓扑功率分配器方案。其中, WG1 和 WG2 分别代表由 2 种相反锯齿型拓扑界面序构构成的谷边缘态传输波导, Port 1 为入射端口, Port 2 和 Port 3 为 2 个出射端口, 红色虚线框是一个矩形耦合区域, 其耦合距离 $d=4a$, 耦合长度 $L=170a$, 蓝色区域表示在边界传输波导区域以及耦合区域的花瓣状空气孔径中添加向列相液晶。当电磁波从 Port 1 进入耦合区域后, 体系进入谷锁定状态, 由于 WG1 和 WG2 具有相反的群速度, 在较小

的距离内可以实现反向耦合,使接近 100%的能量从 WG1 传递到 WG2,并在 WG2 中向反方向传输^[21]。模拟耦合区域的功率流如图 2b 所示。当 WG1 中的电磁波向 $x>0$ 方向传输时,该区域附近的谷手性被逆时针锁定。当引入 WG2 构建出拓扑耦合界面时, WG2 中顺时针的谷手性将电磁波引导向 $x<0$ 方向传输,从而使由谷相位涡旋诱导的局域能流在 WG1 和 WG2 之间形成耦合回路,实现两条波导间的高效能量耦合。在此基础上,为了进一步验证在引入液晶后该波导耦合效应是否仍然存在,并分析加入液晶后耦合频段的改变,分别模拟了未添加液晶和在边界传输波导区域及耦合区域孔径中添加液晶两种情况下的双端口透射率,结果如图 2c 所示。由图 2c 可见,2 种情况下均能在一定频率范围内实现波导间的能量耦合,说明液晶的引入并未破坏原有的拓扑耦合机制,而是通过改变液晶分子光轴取向改

变了耦合出现的工作频率。具体而言,在未添加液晶时,耦合频段位于 202.1~203.8 THz,如图 2c 中的黑线和红线所示;当在孔径中添加液晶后,耦合频段移动至 192.5~194.0 THz,如图 2c 中的蓝线和绿线所示。图 2d 是添加液晶后的透射率局部放大图,此时在 193.1~193.6 THz 范围内均可以实现 2 个波导之间的能量耦合,在 $L=170a$ 时,能量全部由 WG1 耦合至 WG2,并由 Port 3 输出。将器件总传输效率(η)定义为输出总功率与输入功率之比,即:

$$\eta = \frac{P_2 + P_3}{P_{in}} \quad (1)$$

其中: P_{in} 为 Port 1 的入射功率; P_2 和 P_3 分别为 Port 2 和 Port 3 的输出功率;在 193.4 THz 下,器件的总传输效率 $\eta=93\%$,传输过程中 Z 分量电场绝对值 $|E_z|$ 的电场图如图 2e 所示。

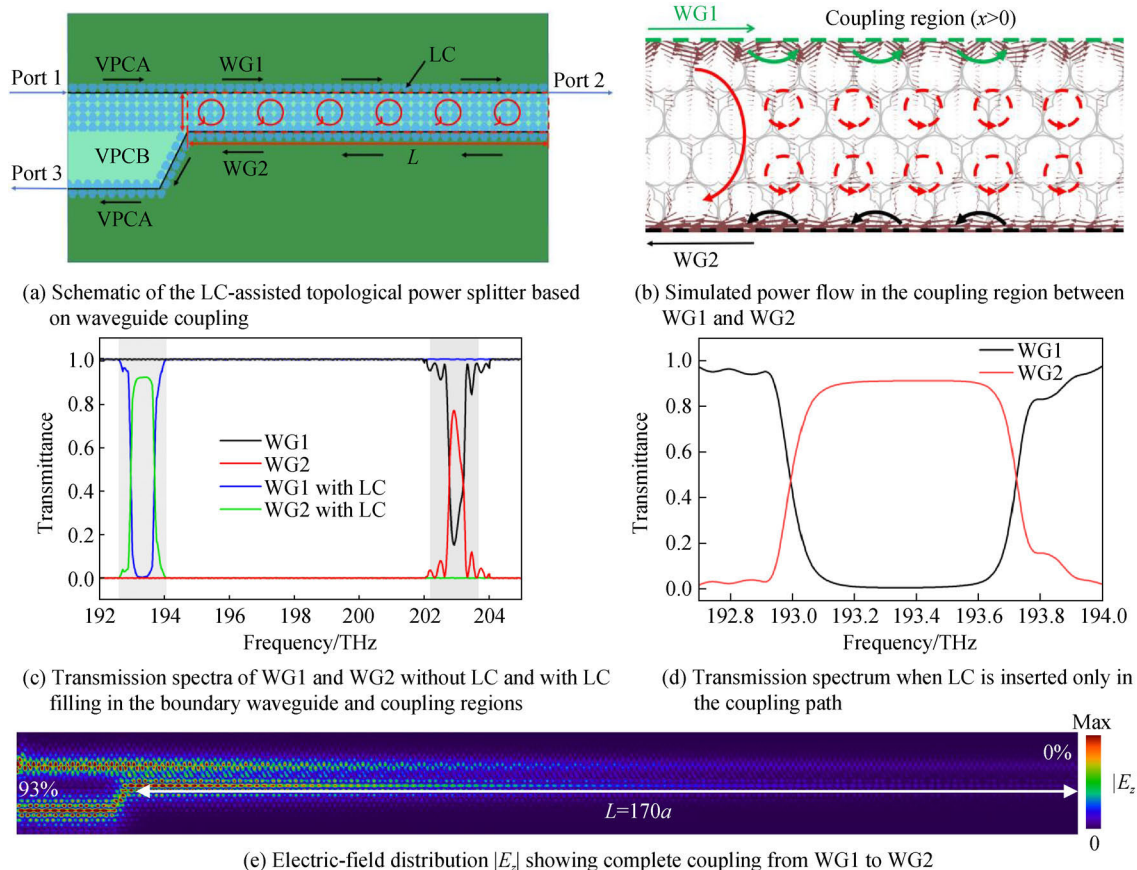


图 2 基于液晶调控的拓扑功率分配器结构及耦合特性

Fig. 2 Structure and coupling characteristics of the liquid-crystal-assisted topological power splitter

2.2 液晶调控任意比例拓扑功率分配器

在上述花瓣状功能基元与反向耦合波导序构基础上,进一步确定了该体系在引入液晶后仍能保持稳定耦合,这为在不改变器件几何功能基元

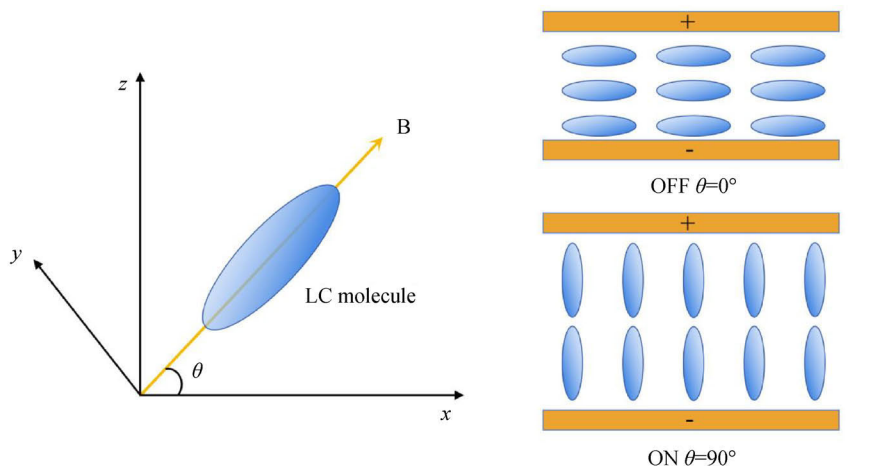
和整体序构的前提下,通过局部调控液晶折射率实现能量分配提供了可能。图 3a 给出了外加电场作用下向列相液晶分子光轴取向变化的示意图,向列相液晶属于典型单轴各向异性介质,其光学

响应与液晶分子光轴方向密切相关。本工作将向列相液晶视为可电控各向异性背景介质, 并采用液晶分子光轴在 xz 平面内旋转的全张量介电矩阵描述其取向变化过程。液晶的相对介电张量可表示为:

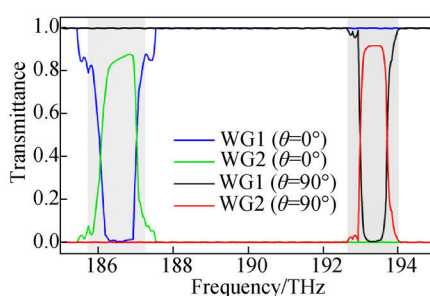
$$\boldsymbol{\varepsilon}_{\text{LC}}(\theta) = \mathbf{R}_y(\theta) \begin{bmatrix} \varepsilon_e & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_o & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_o \end{bmatrix} \mathbf{R}_y^{-1}(\theta) \quad (2)$$

其中: $\varepsilon_e = n_e^2$ 、 $\varepsilon_o = n_o^2$, 分别表示液晶非常光方向和寻常光方向对应的介电常数, $\mathbf{R}_y(\theta)$ 为绕 y 轴旋转角 θ 的旋转矩阵。将其展开后, 液晶在 xz 平面内旋转时的相对介电张量可写为:

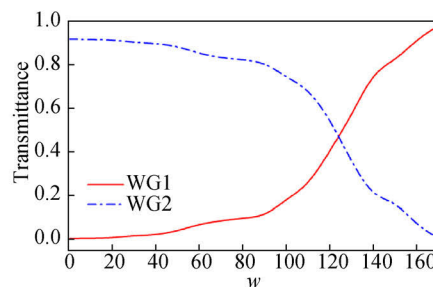
$$\boldsymbol{\varepsilon}_{\text{LC}}(\theta) = \begin{bmatrix} \varepsilon_e \cos^2 \theta + \varepsilon_o \sin^2 \theta & 0 & (\varepsilon_e - \varepsilon_o) \sin \theta \cos \theta \\ 0 & \varepsilon_o & 0 \\ (\varepsilon_e - \varepsilon_o) \sin \theta \cos \theta & 0 & \varepsilon_e \sin^2 \theta + \varepsilon_o \cos^2 \theta \end{bmatrix} \quad (3)$$



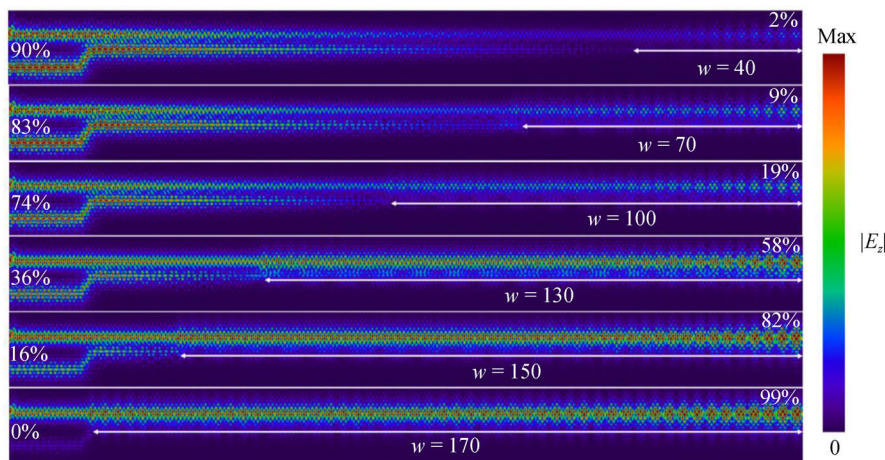
(a) Schematic of the reorientation of nematic liquid crystal molecules under an external electric field



(b) Transmission spectra of the device for two representative liquid crystal orientation states in the coupling region



(c) Transmission of WG1 and WG2 as a function of LC control length w at 193.4 THz



(d) Electric-field distributions $|E_z|$ for different LC control lengths w at 193.4 THz

图 3 液晶调控下的可调功率分配特性

Fig. 3 Tunable power splitting controlled by liquid crystal refractive index

参考已有液晶可调拓扑谷光子晶体研究^[32], 选取向列相液晶的寻常折射率 $n_o=1.45$ 和非常折射率 $n_e=1.75$ 作为液晶的材料参数, 并据此构建液晶的各向异性介电张量模型。图 3a 所示外场关闭与开启 2 种情形分别对应液晶分子在 xz 平面内的 2 种代表性取向状态, 即 $\theta=0^\circ$ 与 $\theta=90^\circ$ 。在如图 1a 所示的功率分配器结构中, 首先在整个耦合路径区域施加外场(如电场或磁场), 使所有液晶的取向保持 $\theta=90^\circ$; 随后, 通过在局部区域撤去外场, 使该部分液晶的取向更改为 $\theta=0^\circ$, 从而实现有效耦合区域的调节。由图 3b 可见, 当路径孔径上的液晶取向从 $\theta=90^\circ$ 变为 $\theta=0^\circ$ 时, 耦合发生的区域从 192.5~194.1 THz 变为 185.8~187.2 THz。这说明, 当入射频率为 193.4 THz 时, 液晶取向改变至 $\theta=0^\circ$ 的区域将不再满足耦合条件。将 w 定义为通过局部关闭外场改变液晶分子光轴取向的区域长度, 随着 w 的增大, 实际参与耦合的区域不断减小, 从 WG2 传输的能量也随之减小, 而保留在 WG1 中传输的能量则不断增加, 从而实现在不改变功能基元几何结构与整体序构的

情况下, 仅通过外场控制液晶材料折射率实现两端口任意比例的能量分配。当入射频率为 193.4 THz 时, 改变折射率的区域长度 w 与两端口透射率的关系如图 3c 所示(其中 w 值为折射率改变区域的长度, 以晶格常数 a 为单位), 而图 3d 则分别展示了在 193.4 THz 下 $w=40, 70, 100, 130, 150, 170$ 时的电场分布及两端口输出的功率占比。

2.3 对缺陷的鲁棒性

为了验证该拓扑功率分配器的拓扑保护特性, 我们在原始结构内的随机位置同时引入了 6 个不同种类的缺陷, 包含空缺缺陷、半径缺陷和角度缺陷。其中, 空缺缺陷表示将对应位置的空气孔完全移除; 半径缺陷表示将原有空气孔中的 3 个椭圆更换为半径为 $R=0.25a$ 的圆; 角度缺陷表示空气孔的旋转角 $\alpha=0^\circ$, 如图 4a 所示。与传统光子晶体波导不同, 拓扑边界态具有抗散射能力, 因此即使在传播路径中出现大尺度缺陷, 依然能够维持稳定传输^[33]。图 4b 对比展示了在 193.4 THz 下 $w=70$ 时结构在有缺陷条件下 2 个输出端口的透射谱。由图 4b 可见, 引入

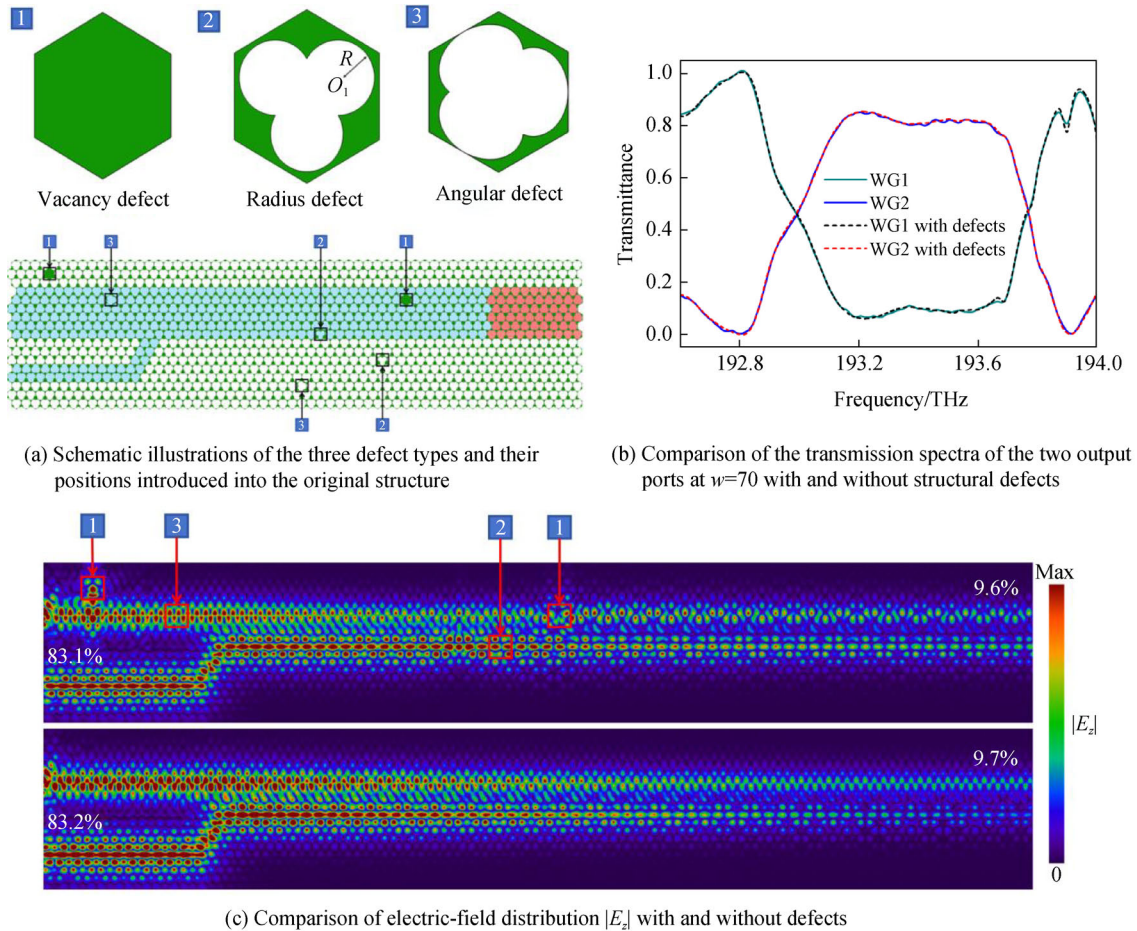


图 4 拓扑功率分配器对结构缺陷的鲁棒性
Fig. 4 Robustness of the topological power splitter against structural defects

缺陷后, 器件仍能在特定频率范围内保持明显的波导耦合特征, 且两端口的透射率分配关系与无缺陷情况下基本一致, 说明该结构的耦合性能对缺陷扰动具有良好的鲁棒性。图 4c 为在频率 193.4 THz 处, 结构引入缺陷后与未引入缺陷时的 z 方向电场绝对值 $|E_z|$ 的对比图。在引入缺陷后, 器件两输出端口的能量分配比例与无缺陷情形几乎一致: 缺陷情况下两端口对应的能量占比分别约为 83.1% 和 9.6%, 而无缺陷情况下分别约为 83.2% 和 9.7%, 二者差异极小。

进一步分析电场变化可知, 在非传输路径上引入角度缺陷和半径缺陷时, 对结构整体的传输完全没有影响; 在传输路径上引入角度缺陷和半径缺陷时, 对结构整体的传输影响也可忽略不计, 电场并未产生明显改变; 而在传输路径上及其附近引入空缺陷时, 边界态电场传输受到了一定影响, 但并未发生明显反射或散射损耗, 而是沿着拓扑边界重组并绕过障碍, 重新实现平滑传输, 最终对两端口的能量传输几乎不存在影响。该结果表明, 在本工作所考察的代表性缺陷类型、缺陷数量及缺陷分布条件下, 器件对缺陷表现出较好的鲁棒性。这一特性在片上光子电路的实际应用中至关重要, 能够有效降低对加工精度的依赖, 保证器件在复杂环境下的稳定运行。

3 结论

本工作以液晶可调拓扑光子晶体功率分配器作为核心研究对象, 围绕器件的功能基元与序构构建、耦合机理与可调功率分配功能开展了系统的数值模拟与机理分析研究。首先, 基于花瓣状孔径功能基元构建了拓扑光子晶体, 通过调控功能基元对称性打开拓扑带隙, 并在锯齿状域壁序构上激发和验证了谷锁定拓扑边界态的稳定传输。其次, 提出了由 2 条反向拓扑波导与矩形耦合区组成的功率分配器序构, 利用反向传播条件下的能流回路实现了高效的波导间耦合能量转移, 在目标频段内获得了 93% 的总传输效率, 并证明了在该序构中引入液晶后仍可保持稳定耦合行为。在此基础上, 通过外场调控液晶分子光轴取向并结合调控区域长度 w 的设置, 实现了在固定功能基元与序构框架下 2 个输出端口间任意比例功率分配的连续可调, 并在 193.4 THz 频率下展示了随 w 变化的端口功率分配特性及对应电场的分布演化。最后, 通过在器件中引入多种代表性结构缺陷, 对其抗缺陷传输能力进行了验

证。结果表明, 在本工作所考察的缺陷类型、缺陷数量及缺陷分布条件下, 该拓扑功率分配器仍能保持较稳定的传输特性与功率分配功能, 表现出较好的鲁棒性。综上, 本工作提出的液晶可调拓扑光子晶体功率分配器兼具高效耦合、连续可调和强鲁棒性, 为可重构片上光子路由、动态光互连及主动可调拓扑光子器件的设计提供了新的实现思路。

参考文献:

- [1] RECHTSMAN M C, ZEUNER J M, PLOTNIK Y, et al. Photonic floquet topological insulators[J]. *Nature*, 2013, 496(7444): 196–200.
- [2] KHANIKAEV A B, SHVETS G. Two-dimensional topological photonics[J]. *Nature Photon*, 2017, 11(12): 763–773.
- [3] LU L, JOANNOPOULOS J D, SOLJAČIĆ M. Topological photonics[J]. *Nature Photon*, 2014, 8(11): 821–829.
- [4] OZAWA T, PRICE H M, AMO A, et al. Topological photonics[J]. *Rev Mod Phys*, 2019, 91(1): 76.
- [5] DONG J W, CHEN X D, ZHU H Y, et al. Valley photonic crystals for control of spin and topology[J]. *Nature Mater*, 2017, 16(3): 298–302.
- [6] GAO F, XUE H R, YANG Z J, et al. Topologically protected refraction of robust kink states in valley photonic crystals[J]. *Nat Phys*, 2018, 14(2): 140–144.
- [7] MA T, SHVETS G. All-Si valley-Hall photonic topological insulator[J]. *New J Phys*, 2016, 18(2): 025012.
- [8] CHEN X D, ZHAO F L, CHEN M, et al. Valley-contrasting physics in all-dielectric photonic crystals: Orbital angular momentum and topological propagation[J]. *Phys Rev B*, 2017, 96(2): 020202.
- [9] HAFEZI M, DEMLER E A, LUKIN M D, et al. Robust optical delay lines with topological protection[J]. *Nature Phys*, 2011, 7(11): 907–912.
- [10] HAFEZI M, MITTAL S, FAN J, et al. Imaging topological edge states in silicon photonics[J]. *Nature Photon*, 2013, 7(12): 1001–1005.
- [11] ST-JEAN P, GOBLOT V, GALOPIN E, et al. Lasing in topological edge states of a one-dimensional lattice[J]. *Nature Photon*, 2017, 11(10): 651–656.
- [12] MITTAL S, FAN J, FAEZ S, et al. Topologically robust transport of photons in a synthetic gauge field[J]. *Phys Rev Lett*, 2014, 113(8): 087403.
- [13] BANDRES M A, WITTEK S, HARARI G, et al. Topological insulator laser: Experiments[J]. *Science*, 2018, 359(6381): eaar4005.
- [14] BARIK S, KARASAHIN A, FLOWER C, et al. A topological quantum optics interface[J]. *Science*, 2018, 359(6376): 666–668.
- [15] BANDRES M A, WITTEK S, HARARI G, et al. Topological insulator laser[C]//*Frontiers in Optics / Laser Science*. Washington, DC: OSA, 2018: FTu4C. 1.
- [16] BACHMANN M, BESSE P A, MELCHIOR H. General self-imaging properties in $N \times N$ multimode interference couplers including phase relations[J]. *Appl Opt*, 1994, 33(18): 3905–3911.
- [17] DRAGONE C. Efficient $N \times N$ star couplers using Fourier optics[J]. *J Light Technol*, 1989, 7(3): 479–489.
- [18] SOLDANO L B, PENNINGS E C M. Optical multi-mode interference devices based on self-imaging: Principles and applications[J]. *J Light Technol*, 1995, 13(4): 615–627.
- [19] KANG Y H, NI X, CHENG X J, et al. Pseudo-spin–valley coupled edge states in a photonic topological insulator[J]. *Nat Commun*, 2018, 9: 3029.

- [20] TANG G J, CHEN X D, SUN L, et al. Broadband and fabrication-tolerant 3-dB couplers with topological valley edge modes[J]. *Light Sci Appl*, 2024, 13: 166.
- [21] JIA R D, TAN Y J, NAVARATNA N, et al. Photonic supercoupling in silicon topological waveguides[J]. *Adv Mater*, 2025, 37(6): 2415083.
- [22] GUAN Z W, DOU R X, XIE C X, et al. Harpoon-shaped topological photonic crystal for on-chip beam splitter[J]. *Sci China Phys Mech Astron*, 2024, 67(9): 294211.
- [23] GUO G T, WANG H, WANG Q, et al. Topologically protected power divider and wavelength division multiplexer based on valley photonic crystals[J]. *Opt Express*, 2025, 33(5): 12240.
- [24] ZHAO S Q, FAN Y C, YANG R S, et al. Smart reconfigurable metadevices made of shape memory alloy metamaterials[J]. *Opto-Electron Adv*, 2025, 8(2): 240109.
- [25] YI P, WANG Z P, JIANG L, et al. Reconfigurable holographic patterns for optical security multiplexing fabricated by 3D spatially modulated femtosecond pulses[J]. *Gxjzz*, 2025, 6(4): 1.
- [26] ZHANG Y X, ZHENG Z G, LI Q. Multiple degrees-of-freedom programmable soft-matter-photonics: Configuration, manipulation, and advanced applications[J]. *Responsive Mater*, 2024, 2: e20230029.
- [27] GONG R, TIAN S Y, LEI Y K, et al. Tunable pure interference colors of 2D titania liquid crystal with ultrasensitive electroresponse[J]. *Sci Adv*, 2025, 11(8): eads0034.
- [28] WU L H, HU X. Scheme for achieving a topological photonic crystal by using dielectric material[J]. *Phys Rev Lett*, 2015, 114(22): 223901.
- [29] XIAO D, CHANG M C, NIU Q. Berry phase effects on electronic properties[J]. *Rev Mod Phys*, 2010, 82(3): 1959–2007.
- [30] XIAO D, YAO W, NIU Q. Valley-contrasting physics in graphene: Magnetic moment and topological transport[J]. *Phys Rev Lett*, 2007, 99(23): 236809.
- [31] MA T, KHANIKAEV A B, MOUSAVI S H, et al. Guiding electromagnetic waves around sharp corners: Topologically protected photonic transport in metawaveguides[J]. *Phys Rev Lett*, 2015, 114(12): 127401.
- [32] WANG Y J, ZHANG W X, ZHANG X D. Tunable topological valley transport in two-dimensional photonic crystals[J]. *New J Phys*, 2019, 21(9): 093020.
- [33] WANG Z, CHONG Y D, JOANNOPOULOS J D, et al. Observation of unidirectional backscattering-immune topological electromagnetic states[J]. *Nature*, 2009, 461(7265): 772–775.

作者贡献声明:

沈林伟、白 洋、刘传宝: 提出研究方向、设计论文框架、撰写论文
 沈林伟、李 妍: 绘制图表、参与数据分析与论文撰写
 沈林伟、刘传宝: 完善论文框架, 修订论文

Tunable Liquid Crystal Topological Valley Photonic Crystal Waveguide-Coupled Power Splitter

SHEN Linwei, LI Yan, LIU Chuanbao, BAI Yang

(Institute for Advanced Materials and Technology, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100080, China)

Extended Abstract

Introduction Power splitters with low loss, compact footprint, and high stability are essential building blocks in modern on-chip photonic integrated systems for optical interconnection, signal routing, and dynamic optical power management. Conventional on-chip power splitters rely on phase matching and modal interference, and therefore usually suffer from splitting-ratio drift, increased loss, and enhanced crosstalk under bandwidth dispersion, fabrication errors, and bending-induced defects, making it difficult to maintain stable and consistent performance in large-scale integration. Photonic topological insulators (PTIs) exhibit remarkable advantages in suppressing backscattering, tolerating sharp bends, and maintaining robustness against defects due to their unique topologically protected edge-state transport, thus providing an effective route for the design of high-performance power splitters. However, the existing topological power splitters still regulate the splitting ratio *via* modifying geometric parameters, reconfiguring topological interfaces, or changing the coupling path length, so continuous dynamic tuning within a fixed structure remains difficult after fabrication, which restricts their application in reconfigurable integrated photonic systems. To overcome this limitation, this work was to propose a liquid-crystal-assisted topological power splitter based on coupled valley photonic crystal waveguides. From the perspective of functional units and ordered architectures, the device used petal-shaped VPC unit cells as the functional units and utilized zigzag topological interfaces together with backward-coupled waveguides as the ordered splitter architecture, thereby enabling continuously tunable power distribution through external-field-controlled liquid-crystal molecular reorientation, while preserving topological robustness.

Methods A petal-shaped VPC unit cell was designed as a functional unit of the device. The spatial inversion symmetry was broken and a topological bandgap was opened under transverse-magnetic (TM) polarization *via* changing the rotation angle from α of 0° to α of $\pm 30^\circ$. Two topologically distinct domains (denoted as VPCA and VPCB) were then arranged into zigzag AB and BA interfaces, forming an ordered architecture that could support valley-locked edge states. On this basis, a topological power splitter consisting of two parallel topological waveguides and one rectangular coupling region was constructed. The coupling distance (d) was $4a$ and the coupling length (L) was $170a$. A nematic liquid crystal (LC) was introduced into the air holes in the boundary waveguide and coupling regions. A line source polarized along the out-of-plane direction was placed at Port 1 to excite the edge state in WG1. The numerical simulations were conducted to calculate band structures, projected interface bands, transmission spectra, power-flow

distributions, and electric-field distributions. In the numerical model, the liquid crystal was treated as a uniaxial anisotropic medium, and its optical response was described by an orientation-dependent permittivity tensor associated with director rotation in the XZ plane. The ordinary and extraordinary refractive indices were taken as n_o of 1.45 and n_e of 1.75, respectively. The LC-controlled section length was denoted by w , and its influence on the output power ratio was investigated at a fixed operating frequency of 193.4 THz. To evaluate topological robustness, six defects belonging to three representative defect types were introduced into the structure.

Results and discussion Based on this mechanism, effective backward coupling is realized between two adjacent topological waveguides in opposite propagation directions, and the simulated power-flow distribution shows a coupling loop consisting of forward transport in WG1, backward transport in WG2, and local vortex-mediated energy flow. To verify whether the coupling effect can be still preserved after introducing liquid crystal (LC), the transmission spectra of the two cases without and with LC filling in the boundary-waveguide and coupling regions are compared. The results show that effective coupling maintains in both cases, while the operating frequency range shifts after introducing LC. In the LC-filled case, nearly complete power transfer from WG1 to WG2 is achieved at 193.1–193.6 THz, and the total transmission efficiency reaches 93% as $L=170a$. When the LC orientation changes from θ of 90° to θ of 0° , the coupling band shifts from 192.5–194.1 THz to 185.8–187.2 THz. At a fixed operating frequency of 193.4 THz, increasing the LC-controlled length w continuously reduces the effective coupling region, decreases the output power from WG2, and increases the transmitted power in WG1, thereby enabling continuously tunable power splitting in a fixed structure. In addition, the transmission spectra and output power ratios remain nearly unchanged under the representative defect types, defect numbers, and defect distributions, indicating that the proposed device maintains a good robustness against structural perturbations.

Conclusions An LC-assisted topological power splitter based on coupled valley photonic crystal waveguides was proposed and numerically demonstrated from the perspective of functional-unit engineering and ordered-architecture design. The device could achieve robust edge-state transport, effective inter-waveguide coupling, and continuously tunable power distribution within a fixed structure *via* combining petal-shaped valley photonic crystal unit cells, zigzag topological interfaces, the ordered architecture of backward-coupled waveguides, and external-field-controlled molecular reorientation of nematic liquid crystal. The results showed that the proposed splitter could reach a total transmission efficiency of 93%, realize continuously tunable power splitting *via* adjusting the LC-controlled length, and maintain stable transmission and power-distribution performance under the representative defect conditions. This work could provide a feasible strategy for reconfigurable on-chip power routing, dynamic optical interconnection, and actively tunable topological photonic devices.

Keywords valley photonic crystal; power splitter; liquid crystal tuning; on-chip photonic device