光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.20250304001

基于能谷光子晶体的中红外高Q值缺陷容忍谐振腔

康 晨[1]，俞金玲[1,2]，陈 灿[1]，赖云锋[2]，程树英[2]，陈涌海[3,4]，李 远[3,4]*

（1. 福州大学 先进制造学院，福建 泉州 362251；2. 福州大学 物理与信息工程学院微纳器件与太阳能电池研究所，福州 350108；3. 中国科学院半导体研究所 固态光电信息技术实验室，北京 100083；4. 中国科学院大学 材料科学与光电技术学院，北京 100049）

摘 要： 基于蜂窝状晶格能谷光子晶体结构，通过调控能谷自由度实现了一种中红外波段谐振腔结构。该结构的拓扑波导展现出优异的单向传输特性，在工作频段内前向传输效率接近1，同时有效抑制了背向散射。在此基础上构建的谐振腔在目标频段内品质因子达到5.59×10^4。相较于常规光子晶体谐振腔，其逆参与比显著降低，最低值可达1.6，且在目标频段内均低于2，模式场分布均匀性显著提升。此外，在引入结构缺陷的情况下，谐振腔的模式分布依然保持稳定，展现出优异的缺陷容忍特性。

关键词： 能谷光子晶体；拓扑边缘态；中红外波段；缺陷容忍

中图分类号： TN256 **文章编号：** 1001－5868(2025)03－0444－05

Defect-Tolerant High-Q Mid-infrared Cavity Based on Valley Photonic Crystals

KANG Chen[1], YU Jinling[1,2], CHEN Can[1], LAI Yunfeng[2], CHENG Shuying[2], CHEN Yonghai[3,4], LI Yuan[3,4]

(1. School of Advanced Manufacturing, Fuzhou University, Quanzhou 362251, CHN; 2. Institute of Micro/Nano Devices and Solar Cells, School of Physics and Information Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, CHN; 3. Laboratory of Solid-State Optoelectronics Information Technology, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, CHN; 4. Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, CHN)

Abstract: A mid-infrared cavity is implemented herein on a valley photonic crystal structure with a honeycomb lattice via manipulation of the valley degrees of freedom. The resulting topological waveguide designed considering this structure exhibits remarkable unidirectional transmission characteristics, achieving near-unity forward transmission efficiency within the operating frequency range while effectively suppressing backward scattering. The cavity constructed on the basis of this design achieves a quality factor of 5.59×10^4 within the target frequency range. When compared to conventional photonic crystal cavities, this mid-infrared cavity exhibits a significantly lower inverse participation ratio that reaches as low as 1.6 and consistently remains below 2 within the target frequency range. This results in significant mode field distribution uniformity. Moreover, the mode distribution of the cavity remains stable even when structural defects are introduced.

Key words: valley photonic crystals; topological edge state; mid-infrared range; defect-tolerant

收稿日期：2025－03－04.

基金项目：国家自然科学基金项目(12393832,62327813,62235019,62235016,61991431).

* **通信作者：**李 远

0　引言

能谷拓扑光子学是拓扑光子学领域中的一个重要分支，近年来在光操纵能力方面展现出巨大的研究潜力[1-5]。这种独特的光操纵能力主要源于能谷自由度的存在，其在光子系统中具有新颖的拓扑特性[6-9]。其中，拓扑边缘态（Topological Edge States，TES）是该领域研究的重点之一。TES存在于不同拓扑结构之间的界面上[10]，主要特征是单向传播和高缺陷容忍度[11-12]，这使其在光子器件设计中具有重要的应用价值，目前已被广泛应用于稳健光学传输[13]、拓扑激光器[14]以及其他光子器件等领域[15-17]。

在众多光谱范围中，中红外（IR）波段因其独特的重要性而受到广泛关注。该波段包含众多分子“指纹”谱线，可用于高灵敏度的气体检测，如甲烷、二氧化碳和一氧化碳等。同时，中红外光源在工业过程监测、自由空间光通信、生物医疗成像、红外探测以及环境监测等领域均具有重要应用[18-20]。因此，发展高效稳定的中红外光子器件对于推动相关技术的进步至关重要。能谷光子晶体（Valley Photonic Crystals，VPC）作为拓扑光子学的重要研究方向，为拓扑光子器件提供了一种有效的实现方式。然而，与可见光和近红外波段相比，目前针对中红外范围内的能谷光子晶体谐振腔研究仍然较少，限制了其应用范围[21-22]。

因此在本研究中，提出了一种中红外波段能谷光子晶体谐振腔设计。该结构基于蜂窝状晶格的能谷光子晶体，利用能谷自由度实现了高Q值拓扑边缘态谐振腔，仿真结果展现出了优异的缺陷容忍能力和模式均匀性，同时证实了能量在界面附近的高度局域化特性。此设计不仅增强了中红外光源的稳定性和可靠性，还为拓扑光子器件在高精度传感、自由空间光通信和非线性光学等领域的应用提供了新的思路。

1　能谷光子晶体设计

本研究所提出的能谷光子结构基于三角形空气孔组成的蜂窝状晶格。因传统的中红外带间级联激光器设计大多建立在InAs/GaSb/AlSb基板上，预估介质折射率为3.7，晶格周期为a=810 nm，每个空气孔的边长d=566 nm。考虑到实际工艺误差，为了降低刻蚀误差敏感性，对空气孔角部进行半径为100 nm倒圆角处理。如图1左侧所示的原胞，蓝色部分为介质，白色部分为空气。

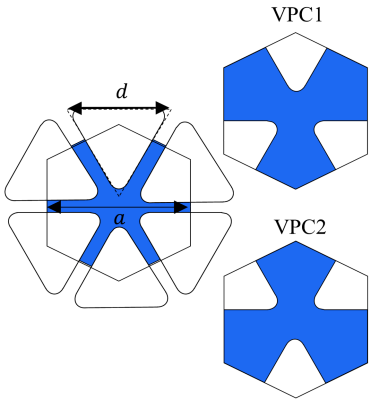


图1　原胞结构图

使用COMSOL Multiphysics进行数值模拟，表征了横电（Transverse Electric，TE）模式下能谷光子晶体的能带结构。原始晶胞的能带图如图2所示。结果显示，在能带中K（K′）点附近存在受到空间反演对称性保护的狄拉克锥。

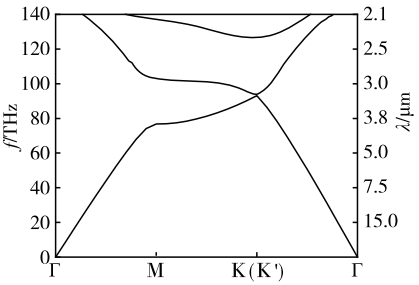


图2　原始晶胞能带图

当选择性去除三个三角形空气孔时，可产生如图1右侧所示的能谷光子晶体1（VPC1）和能谷光子晶体2（VPC2），它们的空间反演对称性被破坏，从而打开狄拉克锥进而出现光子晶体带隙。所得到的带隙在70.496～84.519 THz（3.549～4.256 μm）之间，在图3中用灰色区域表示。其拓扑结构由带隙下方体带的能谷陈数决定。使用$k\cdot p$微扰法[23-24]带隙下方的能带的Berry曲率可以表示为：

$$\Omega(\delta\boldsymbol{k})=\frac{m_i v_{\mathrm{D}i}}{\left[2\left(\delta\boldsymbol{k}^2+m_i^2+v_{\mathrm{D}i}^2\right)^{3/2}\right]} \tag{1}$$

式中，$v_{\mathrm{D}i}$为原始晶胞狄拉克锥色散速度，$\delta\boldsymbol{k}$为布里渊区K点处的动量偏移，m_i为有效质量，$m_i=\left(\omega_{q+}^i-\omega_{q-}^i\right)/\left(2v_{\mathrm{D}i}^2\right)$，与两个本征态$\boldsymbol{\phi}_{q+}^i$和$\boldsymbol{\phi}_{q+}^i$的频率差成正比。其中$\omega_{q+}^i$（或$\omega_{q-}^i$）为逆时针（或顺时针）能流状态下的边缘态频率。能谷陈数可通过对能谷附近的Berry曲率进行数值积分得到：

$$C_{\mathrm{K}}^i=(1/2\pi)\iint\Omega(\boldsymbol{k})\mathrm{d}_k^2=(1/2)\mathrm{sgn}(m_i) \tag{2}$$

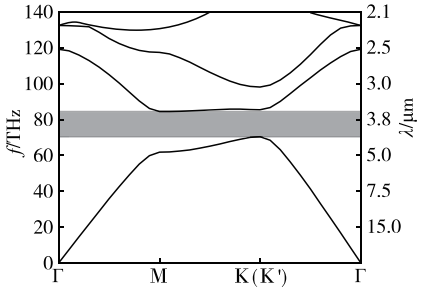
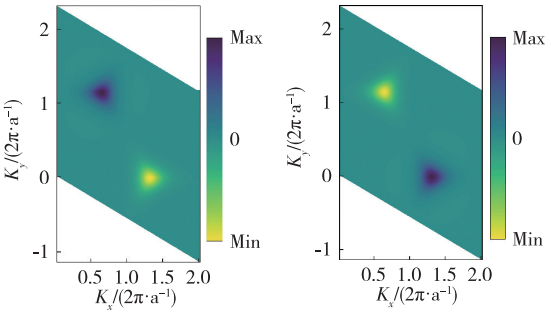


图3 VPC1和VPC2能带图

对于VPC1和VPC2，带隙中K和K′附近的Berry曲率相反，如图4所示。因此，对应的能谷陈数符号相反，这两种不同拓扑性质的光子晶体可以在带隙范围内形成边缘态。



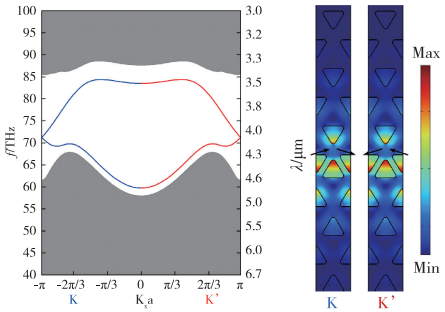
（a）VPC1 （b）VPC2

图4 Berry曲率示意图

2 能谷边缘态特性

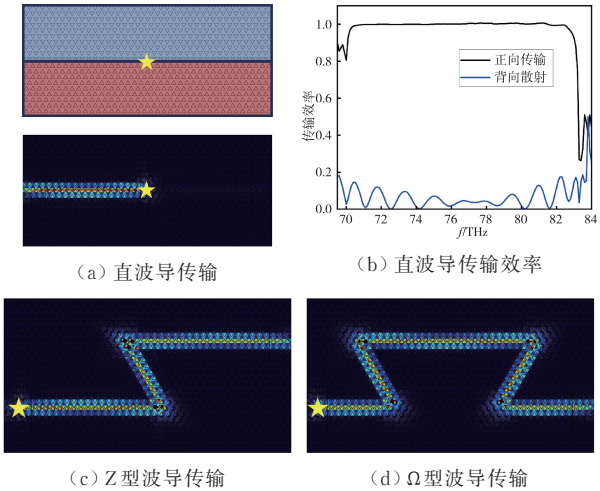
基于VPC1和VPC2，拼接两个结构（上半部为VPC1，下半部为VPC2）可以构造受拓扑保护的边缘态。当计算所构造的边缘态超晶胞能带时，左右两侧施加周期性边界条件，上下两侧施加散射边界条件。两个VPC在拓扑上是不同的，边缘态预计会出现在它们之间的畴壁上。图5(a)显示了超晶胞边缘模式的色散关系。灰色区域代表体态，蓝线（红线）表示K(K′)点处的能谷边缘模式，因较低频率边缘态大部分与体态重叠，因此只考虑较高频率的边缘态。从图中可以看出，K点附近的边缘态群速度为正，K′点附近的边缘态群速度为负。同时图5(b)中的电场图证明了边缘态强烈局域在畴壁附近，即两个具有相反能谷陈数区域之间的界面，并且从坡印廷矢量即箭头的方向可以看出点K和K′点附近的能流方向相反。

能谷光子晶体能够选择性地激发相位涡旋，在界面处产生单向耦合。对于本研究来说，上部区域中的涡旋场与下部区域中的涡旋场相互作用，会形成手性流边缘态。因此，可以使用手性源实现能谷相关边缘态的单向耦合。利用能谷边缘态构建的能谷光子晶体波导的二维平面结构如图6(a)所示，其中上部区域为VPC1，下部区域为VPC2。使用右旋圆偏振（Right Circularly Polarized，RCP）手性源激发拓扑边缘态，手性源的位置用星号表示。结果显示，能量主要集中在空间域边界，并且沿着单侧方向传输。模拟计算了直波导结构的单向传输率和背向散射率，从图6(b)中可以看出其具有优秀的单向传输能力，在工作频段的正向传输率接近1，背向散射率在0.2以下。还设计了Z形波导结构（界面处有两个急弯）和Ω形波导结构（界面处有四个急弯）检验边缘态的抗散射能力，从图6(c)和(d)中可以看出，即使边缘态遇到急弯，也能保持稳健的传输。



（a）边缘态投影能带图 （b）边缘态电场分布

图5 能谷边缘态示意图



（a）直波导传输 （b）直波导传输效率

（c）Z型波导传输 （d）Ω型波导传输

图6 能谷边缘态传输

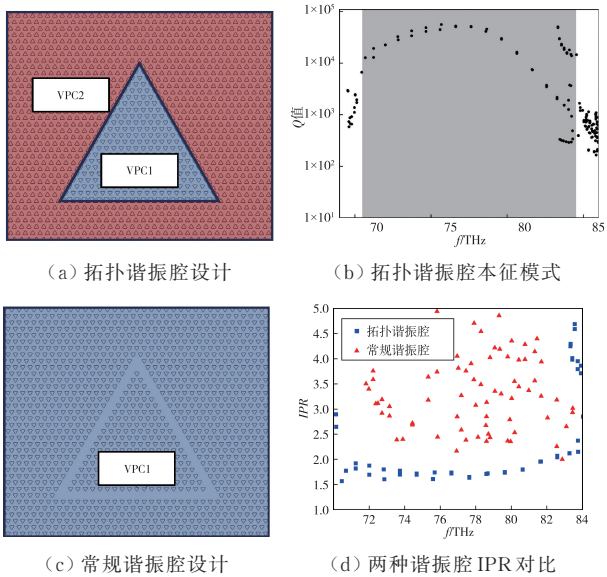
3 能谷光子晶体谐振腔设计

基于能谷边缘态的拓扑特性，本研究提出了一种光子晶体三角形谐振腔设计。该谐振腔由VPC1与

VPC2构建而成，其核心结构为环绕拓扑畴壁边长为21a的三角形闭环。如图7(a)所示，通过将VPC1嵌入VPC2中，构建利用能谷边缘态的光子晶体谐振腔。对谐振腔本征模式的定量分析表明，腔体表现出具有规则间距的高品质因子(Quality Factor)，即Q因子的本征模式分布，在工作频段内大都保持在1×10^4以上，最高可达5.59×10^4。拓扑谐振的主要特征是它能够支持类似于环形谐振腔的行波模式，即使在存在尖角的情况下也是如此。相比之下，传统腔体由于角落处有明显的背向散射而无法维持这种模式，电磁场在腔体的各个部分局部化，这种不均匀的能量分布导致谐振腔内的损耗增加，从而降低激光器的输出功率和效率。可以通过计算沿表示三角环一维曲线的逆参与比(Inverse Participation Ratio, IPR)来定量分析这一现象。IPR是评估模式局部化的公认指标，定义式如下：

$$IPR(\omega)=\frac{\int_L\left|Hz(\omega,\xi)\right|^4\mathrm{d}\xi}{\left[\int_L\left|H_z(\omega,\xi)\right|^2\mathrm{d}\xi\right]^2}L \tag{3}$$

式中，ξ是参数化长度为L的一维曲线的坐标。对于完全非局域化的模式$IPR\approx1$，随着局域化程度的增加，IPR会逐渐增加。同时为了与拓扑谐振腔进行对比，本研究设计了如图7(c)的基于缺陷的普通光子晶体谐振腔，其参数与拓扑腔相同，但整体由VPC1构成，同时在拓扑腔的产生边缘态的位置去除三角形气孔形成缺陷。IPR的计算结果如图7(d)所示，与普通光子晶体谐振腔相比，拓扑模式表现出明显较低的IPR，在工作频段数值几乎都在2以下，表明能量沿三角环均匀分布。

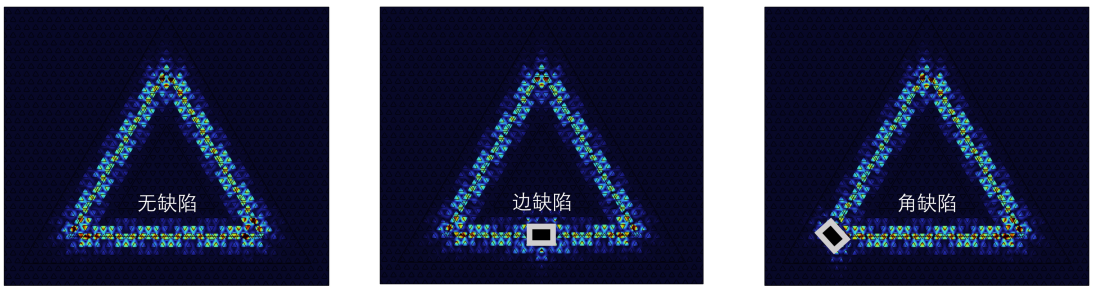


(a) 拓扑谐振腔设计　(b) 拓扑谐振腔本征模式

(c) 常规谐振腔设计　(d) 两种谐振腔 IPR 对比

图7　谐振腔设计

此外，为了对比拓扑腔和普通腔的拓扑保护能力将缺陷应用于拓扑腔。如图8所示，缺陷为长1 620 nm宽1 170 nm的矩形，缺陷内设置为空气。从图中可以看出，在77 THz附近的电场模式无缺陷时沿三角环分布均匀，而在有边缺陷和角缺陷的情况下和无缺陷时相比也几乎相同，表明拓扑腔对边和角缺陷均提供了出色的保护，尽管存在施加的缺陷，能量分布仍保持稳定，与施加缺陷前相比几乎不变。



(a) 无缺陷谐振腔　(b) 边缺陷谐振腔　(c) 角缺陷谐振腔

图8　能谷光子晶体谐振腔设计和特性

4　结论

本研究通过蜂窝状晶格能谷光子晶体的拓扑态调控，实现了中红外波段高Q值谐振腔的设计。仿真结果表明，该谐振腔在工作频段内品质因子达5.59×10^4，IPR最低值为1.6，且目标频段均低于2。当引入结构缺陷时，谐振腔模式场分布保持稳定，验证了其强缺陷容忍特性。该工作将能谷自由度与拓扑波导设计结合，为中红外波段光子集成系统提供了兼具高Q值和鲁棒性的谐振腔解决方案。

参考文献：

[1] Du L, Liu Y, Li M, et al. Dual-band large-area topological edge states and higher-order corner states in a valley Hall photonic crystal[J]. Physical Review B, 2024, 110(15): 155415.

[2] Guo P Y, Li W, Hu J, et al. Dual-band topological large-area waveguide transport in photonic heterostructures[J]. Physical Review B, 2024, 110(3): 035115.

[3] Lu L, Joannopoulos J D, Soljačić M. Topological photonics[J]. Nature Photonics, 2014, 8(11): 821-829.

[4] Khanikaev A B, Shvets G. Two-dimensional topological photonics[J]. Nature Photonics, 2017, 11(12): 763-773.

[5] Ozawa T, Price H M, Amo A, et al. Topological photonics[J]. Reviews of Modern Physics, 2019, 91(1): 015006.

[6] Dong J W, Chen X D, Zhu H, et al. Valley photonic crystals for control of spin and topology[J]. Nature Materials, 2017, 16(3): 298-302.

[7] Yang Y, Yamagami Y, Yu X, et al. Terahertz topological photonics for on-chip communication[J]. Nature Photonics, 2020, 14(7): 446-451.

[8] Zeng Y, Chattopadhyay U, Zhu B, et al. Electrically pumped topological laser with valley edge modes[J]. Nature, 2020, 578(7794): 246-250.

[9] Liu X, Zhao L, Zhang D, et al. Topological cavity laser with valley edge states[J]. Optics Express, 2022, 30(4): 4965-4977.

[10] Hasan M Z, Kane C L. Colloquium: Topological insulators[J]. Reviews of Modern Physics, 2010, 82(4): 3045-3067.

[11] Yang J K, Hwang Y, Oh S S. Evolution of topological edge modes from honeycomb photonic crystals to triangular-lattice photonic crystals[J]. Physical Review Research, 2021, 3(2): L022025.

[12] He X T, Liang E T, Yuan J J, et al. A silicon-on-insulator slab for topological valley transport[J]. Nature Communications, 2019, 10(1): 872.

[13] 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.

[14] Peano V, Houde M, Marquardt F, et al. Topological quantum fluctuations and traveling wave amplifiers[J]. Physical Review X, 2016, 6(4): 041026.

[15] Zhou X, Wang Y, Leykam D, et al. Optical isolation with nonlinear topological photonics[J]. New Journal of Physics, 2017, 19(9): 095002.

[16] Barik S, Karasahin A, Flower C, et al. A topological quantum optics interface[J]. Science, 2018, 359(6376): 666-668.

[17] 吴 蓉, 赵春齐, 何中潇. 光子晶体全光逻辑或非门和非门的设计优化[J]. 半导体光电, 2017, 38(1): 45-48.
Wu Rong, Zhao Chunqi, He Zhongxiao. Design and optimization of all-optical NOR and NOT logic gates[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2017, 38(1): 45-48.

[18] Hu J, Meyer J, Richardson K, et al. Feature issue introduction: Mid-IR photonic materials[J]. Optical Materials Express, 2013, 3(9): 1571-1575.

[19] Soref R. Mid-infrared photonics in silicon and germanium[J]. Nature Photonics, 2010, 4(8): 495-497.

[20] 宁 静, 许盛之, 龚友康, 等. 电站中光伏组件的人工智能热红外检测技术进展[J]. 半导体光电, 2023, 44(2): 161-167.
Ning Jing, Xu Shengzhi, Gong Youkang, et al. Progress in artificial intelligence thermal infrared detection technology for photovoltaic modules in power plant[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2023, 44(2): 161-167.

[21] Yi F, Liu M Q, Wang N N, et al. Near-field observation of mid-infrared edge modes in topological photonic crystals[J]. Applied Physics Letters, 2023, 123(8): 081110.

[22] Qiu P, Liang R, Qiu W, et al. Topologically protected edge states in graphene plasmonic crystals[J]. Optics Express, 2017, 25(19): 22587-22594.

[23] Lu J, Qiu C, Ye L, et al. Observation of topological valley transport of sound in sonic crystals[J]. Nature Physics, 2016, 13(4): 369-374.

[24] Jia D, Ge Y, Xue H, et al. Topological refraction in dual-band valley sonic crystals[J]. Physical Review B, 2021, 103(14): 144309.

作者简介：

康 晨(1997—),男,河南省周口市人,硕士,主要研究方向为半导体光电器件;

李 远(1988—),男,北京市人,博士,研究员,主要研究方向为半导体光电器件。