

激光与光电子学进展

一种基于 Kagome 晶格的少模波导结构

要焱宏¹, 吕且妮^{1*}, 陈小鹏², 张明娣¹, 张淼淼¹¹天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072;²中国航空工业集团公司洛阳电光设备研究所工艺技术部, 河南 洛阳 471009

摘要 提出了一种少模波导概念,并基于平面波展开法和时域有限差分法,在 Kagome 晶格线缺陷结构上验证了这种概念。通过改变缺陷介质柱参数(半径、位置)和在原缺陷介质柱中央插入新的介质柱的方法,得到了带宽为 $0.08888\omega a/2\pi c$ 的双模式的 Kagome 晶格波导结构。这种少模波导结构为光子晶体平板波导的设计提供了一种新的思路,在光子集成等领域将具有重要的应用价值。

关键词 材料; 光子晶体; Kagome 晶格; 平面波展开法; 时域有限差分法; 超元胞技术

中图分类号 O482.3

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0316001

A Few-Mode Waveguide Structure Based on Kagome Lattice

Yao Yanhong¹, Lü Qieni^{1*}, Chen Xiaopeng², Zhang Mingdi¹, Zhang Miaomiao¹¹School of Precision Instrument & Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;²Process Technology Department, Luoyang Institute of Electro-Optical Equipment, Aviation Industry Corporation of China, Luoyang, Henan 471009, China

Abstract In this paper, a new concept of few-mode waveguide is proposed. Based on the plane-wave expansion method and the finite-difference time-domain method, this concept is demonstrated in the Kagome lattice line defect structure. By changing the parameters of defective dielectric columns (radius, location) and inserting new defective columns between original medium columns, a two-mode Kagome lattice waveguide structure with a bandwidth of $0.08888\omega a/2\pi c$ is obtained. This few-mode waveguide structure provides a new idea for the design of photonic crystal planar waveguide and will have important application value in photonic integration and other fields.

Key words materials; photonic crystals; Kagome lattice; plane wave expansion method; finite-difference time domain method; supercell method

1 引言

Kagome 晶格是由交错排列的三角形组成,且每个顶点连接了两个相邻六角形的人工光学微结构,即光子晶格。由于具有拓扑平坦能带、Dirac 点等特性^[1-3],Kagome 晶格在量子霍尔效应^[4]、量子自旋液体^[5]、凝聚态物理^[6]、全光集成电路^[7]、激光器^[8]

等领域均具有重要的应用前景。光子晶格在光子学方面的应用主要依赖于其带隙和缺陷特性^[9-10],相比于有同样构造参数的三角和四方晶格,Kagome 晶格有更大的横向磁性(TM)带隙^[11-12],基于此设计了各种结构的功能器件,如 Kagome 型光格子缺陷孤子^[13]、Kagome 晶格波导^[14-17]等。在 Kagome 晶格波导方面,Schulz 等^[15]通过去除 Kagome 晶格“完

收稿日期: 2021-03-16; 修回日期: 2021-05-07; 录用日期: 2021-05-13

基金项目: 天津市自然科学基金重点项目(18JJCZDJC31700)

通信作者: *qienil@tju.edu.cn

全”行介质柱,得到了Kagome晶格线缺陷,揭示了Kagome晶格在慢光波导方面具有的本质上的潜力。Perez等^[16]研究了Kagome晶格的结构自相似性对空心Kagome包层光纤的缺陷模式和波导特性的影响,提出了减少Kagome包层光纤损耗的设计。Pilehvar等^[17]提出了一种具有锥形拓扑结构的Kagome晶格的TM模60°弯曲波导,通过在波导内引入半径逐渐增大的介质柱,有效减少了波导弯曲处的反射光,提高了波导的传输效率,大大增加了其传输距离。

大容量、远距离的信息传输一直是人们追求的目标,研究人员们已提出了基于不同原理和技术的多种方案,如基于光孤子思想可以实现远距离传输^[18-19]。采用少模光纤作为传输介质,避免了信息传输时的模态色散,同时宽带宽可容纳大容量的信息传播^[20]。最近,张函等^[21]将传统阶跃型光纤与光子晶体光纤结构相结合,提出并研究了复合型7芯光子晶体光纤,在有效降低芯间串扰的同时增大光纤的纤芯密度,为实现大容量、长距离的光纤空分复用技术提供了新思路。本文提出了一种少模波导概念,在获得低色散的同时,解决以往单模波导有限的传输容量的问题,将成为未来波导主要的传输方式。本文基于Kagome晶格,利用平面波展开法(PWE)和时域有限差分法(FDTD),研究了Kagome波导的能带及传输特性,并对其结构进行优化,得到了宽带宽的双模波导。

2 Kagome晶格线缺陷的计算

图1为空气背景中锗介质圆柱构成的Kagome晶格W₁型波导结构,该W₁型波导是通过移除Kagome晶格中较稀疏的一排介质柱构成,其中 $a=1\ \mu\text{m}$ 为相距最近的两个介质柱的距离, $r_c=0.2a$ 为

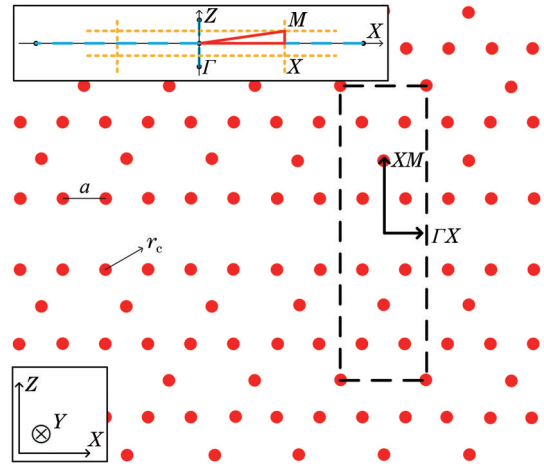


图1 Kagome晶格线缺陷,黑色点框为超元胞示意图,左上角插图为布里渊区

Fig. 1 Line defect in Kagome lattice, black dot frame is the supercell schematic and inset in the upper left is the Brillouin region

介质柱半径, $\epsilon_a=16$ 为介电常数。锗材料由于其较大的介电常数,有利于得到更宽的带隙^[22]。线缺陷的能带计算通常采用超元胞方法和平面波展开法^[23-25],图1中黑色点框为计算缺陷模式时采用的超元胞示意图,其尺寸为 $2a \times 4\sqrt{3}a$ (ΓX 方向为 $2a$),实际计算中用的尺寸为 $2a \times 8\sqrt{3}a$ (左上角插图为其对应的布里渊区),其与尺寸为 $2a \times 10\sqrt{3}a$ 的超元胞计算的频率差小于0.1%。本文研究的二维光子晶体建模在X-Z平面,在Y方向无限延展,计算的缺陷模式均为TM模式,即平面外(out-of-plane)模式。

图2(a)为图1线缺陷的缺陷模式(椭圆虚线),其频率随横向波矢向X点移动而增大,所以其带宽等于X、 Γ 点的频率差。带隙和波导模式对应的频率范围分别为0.23015~0.36376和0.31673~

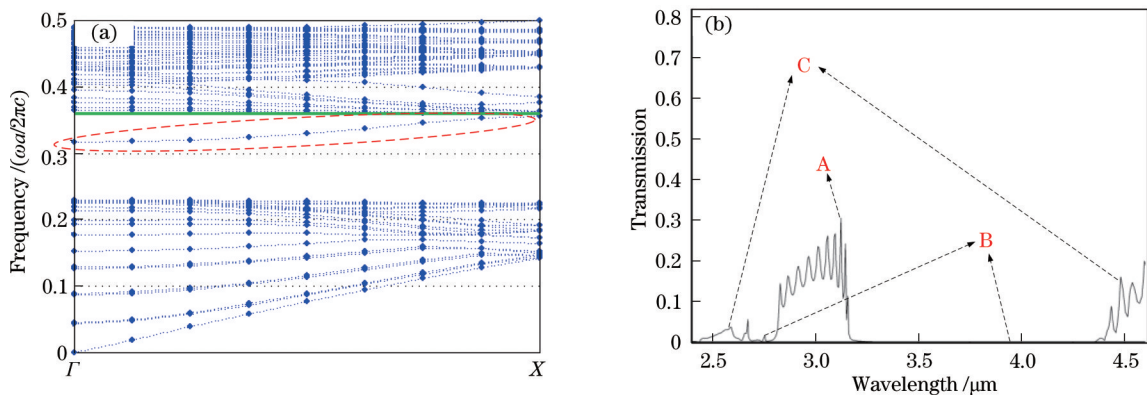


图2 Kagome晶格线缺陷仿真结果。(a) TM能带结构;(b)透射谱

Fig. 2 Simulation results of the line defect in Kagome lattice. (a) TM energy band structure; (b) transmission spectrum

0.35576, 单位为归一化频率 $\omega a / 2\pi c = a / \lambda$ (ω 为角频率, c 为真空中的光速, λ 为光波长)。当 $a = 1 \mu\text{m}$ 时, 对应波段分别为 $2.7491 \sim 4.3445 \mu\text{m}$ 和 $2.8109 \sim 3.1573 \mu\text{m}$ 。

图 2(b) 为利用基于 FDTD 方法的 Fullwave 模块, 对出射光强值在 2^{16} 个时间步长内的时域变化进行快速傅里叶变换 (FFT) 得到的透射谱, 为了覆盖整个带隙, 将入射的高斯脉冲中心波长设为 $3.9 \mu\text{m}$ 。可以看出, 禁带和波导模式范围与图 2(a) PWE 方法计算的结果吻合。其中 A 区域对应波导模式, 该波段的光由于禁带效应只能沿波导传输。B 区域也处于禁带内, 但没有波导模式, 该波段的光被全部反射, 即既不能沿波导传输也不能在 Kagome 晶格内部传输, 其左侧的凸起对应图 2(a) 中位于带隙上侧的绿色部分, 此处禁带宽度仅为 $0.0618 \mu\text{m}$, 受通

带和波导模式的影响, 该部分出现微弱的探测值。C 区域对应通带模式, 该波段的光不受禁带影响, 可以在 Kagome 晶格内向各方向散射。

图 3 为不同波长的光源入射 Kagome 波导后的稳态分布, 其中左图为 E_y 场在 Kagome 晶格波导内的分布 ($E_y > 0$ 表示其方向沿 y 轴正方向, 即垂直纸面向里, $E_y < 0$ 则相反), 右图为波导出口处探测到的光强随时间的变化, 横坐标 C_T 是一个正比于时间步长的值。为了消除波导端口和晶格边界的反射, 采用完美匹配层边界条件。对图 3(a), 波导模式在晶格内传输的整个过程中, 能量被局域在波导内, 几乎没有发生损耗。图 3(b) 中的光无法进入 Kagome 晶格, 被完全反射回来, 出口处探测到的光强始终为零。这验证了光子晶格的带隙特性。图 3(c) 中的光处于通带内, 可在 Kagome 晶格内无限制地向各个方向传输。

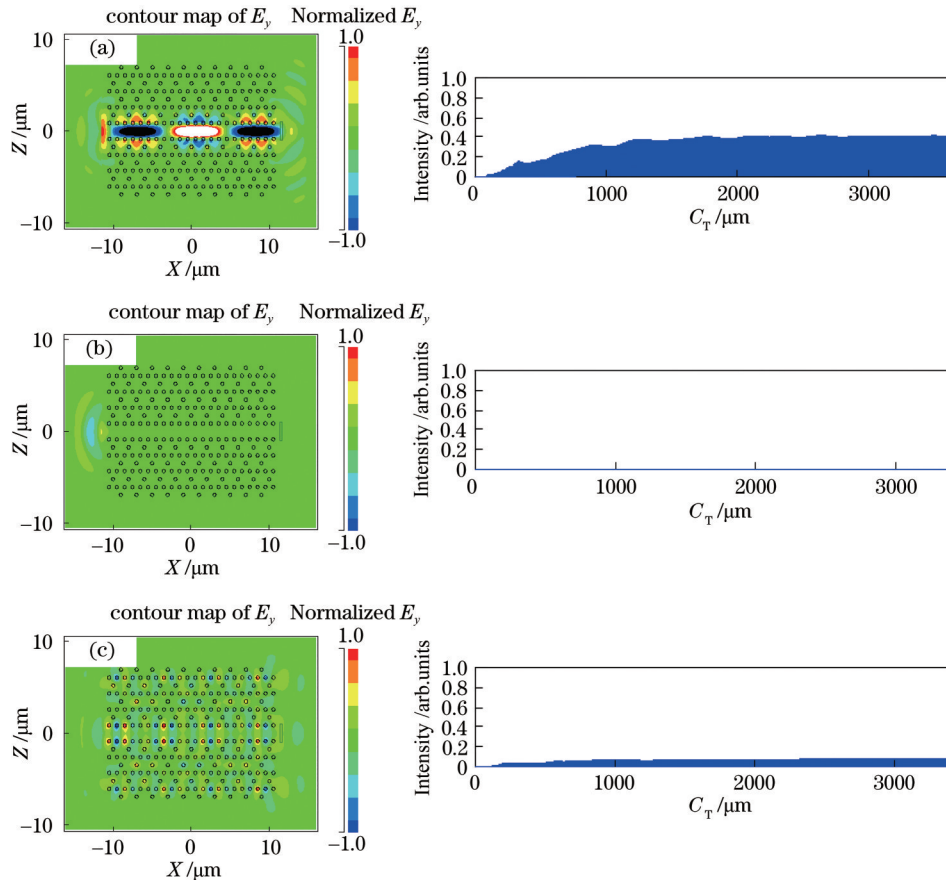


图 3 不同波段光束的稳态场分布及光强值随时间的变化。(a) $\lambda = 3.124 \mu\text{m}$; (b) $\lambda = 3.75 \mu\text{m}$; (c) $\lambda = 4.597 \mu\text{m}$
 Fig. 3 Steady-state field distribution of beams of different wavelengths and variation of light intensity value with time.

(a) $\lambda = 3.124 \mu\text{m}$; (b) $\lambda = 3.75 \mu\text{m}$; (c) $\lambda = 4.597 \mu\text{m}$

3 Kagome 晶格线缺陷结构优化及少模波导

图 4(a) 为基于 Kagome 晶格的波导结构示意图,

其中 r_c 决定了带隙的宽度和位置, r_d 为缺陷介质柱 (黑点) 的半径, 决定了缺陷模式的性质, 如模式数量、带宽等, r_1 为线缺陷两侧介质柱的半径。较大的晶格带隙是得到宽带宽波导的先决条件, 先调整 r_c 以

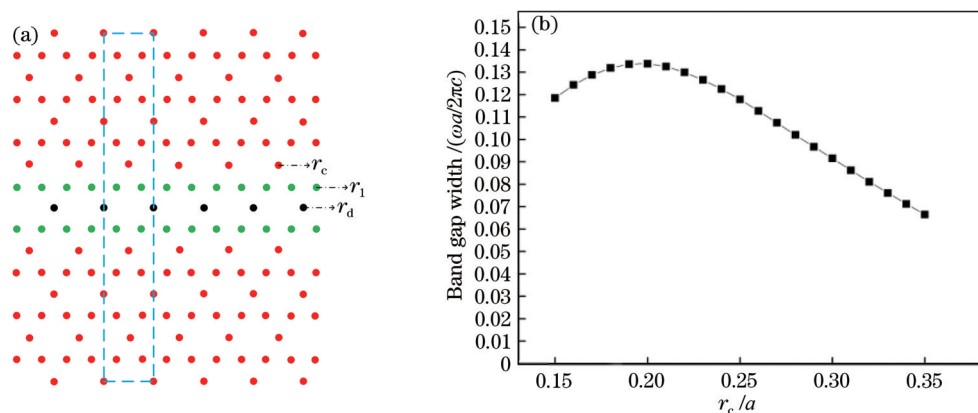


图 4 基于 Kagome 晶格的波导。(a)波导结构参数;(b)第一带隙宽度与 r_c 的关系

Fig. 4 Waveguide based on Kagome lattice. (a) Waveguide structure parameters; (b) relationship between the first band gap width and r_c

获得最大的带隙。考虑到构造问题,介质柱半径不应过小(以高于当前光子晶体制造技术的分辨率极限),不应过大(以远离闭环条件)。设 r_c 在 $0.15a \sim 0.35a$ 范围变化 ($r_d=r_1=0.2a$)。图 4(b)为 Kagome 晶格 TM 模式第一带隙宽度随 r_c 的变化,带宽先略有增大然后迅速减小,当 r_c 在 $0.16a \sim 0.24a$ 范围内时,带隙宽度均超过了 $0.12\omega a/2\pi c$,最大带隙宽度在 $r_c=0.2a$ 时,为 $0.1338\omega a/2\pi c$,所以取 $r_c=0.2a$ 。

接下来优化线缺陷结构。设 $r_1=0.2a$,研究 r_d 对缺陷模式的影响。图 5 为不同横向波矢对应的频率随 r_d 的变化曲线, $r_d=0$ 时对应图 1 中的线缺陷,这里计算能带时沿 ΓX 方向采样了 9 个点,所以带隙内的一个波导模式对应 9 条曲线,均称其为缺陷模式频率。由图 5 可知,当 $r_d < r_c$ 时,相当于引入了受主杂质,带隙下侧的价带模式上移,进入带隙成为受主缺陷模式。随 r_d 增大,带隙内始终有一个缺陷模式,且向带隙下侧移动,带宽开始变化不大然后迅速减小;当 $r_d > r_c$ 时,相当于引入了施主杂质,带隙上侧的导带模式下移,进入带隙成为施主缺陷模式,

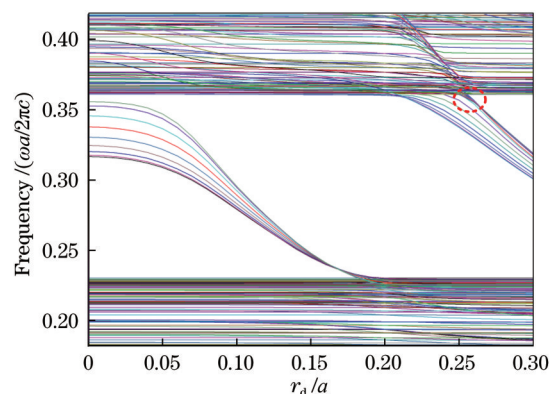


图 5 波导模式的横向波矢量频率与 r_d 的变化关系

Fig. 5 Relationship between transverse wave vector frequencies of waveguide mode and r_d

且一般情况下有多个施主缺陷模式。在 $r_d=0.25a$ 附近(椭圆虚线),波导模式成为多模,由于其带宽很小,这里不做过多考虑。

由图 5 可见,仅改变 r_d 无益于缺陷模式带宽的改善。为了得到更大带宽,本文在图 4(a)原缺陷介质柱中央加入与其半径相等的介质柱,如图 6(a)所

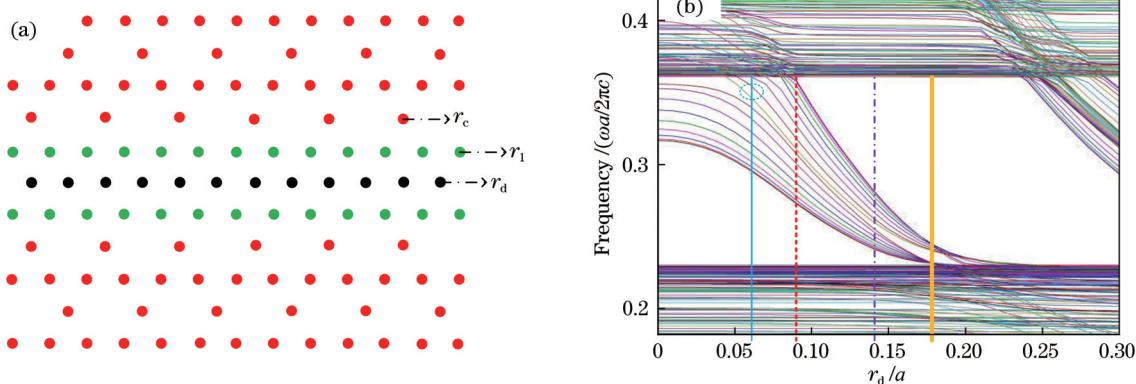


图 6 新设计的 Kagome 晶格波导。(a)新的缺陷结构;(b)其缺陷模式频率与 r_d 的关系

Fig. 6 Newly designed Kagome lattice waveguide. (a) New defect structure; (b) relationship between its defect mode frequency and r_d

示。图 6(b)为图 6(a)结构的缺陷模式频率随 r_d 的变化曲线。由于更多缺陷介质柱的引入,在 $0 < r_d < 0.2a$ 的范围内出现了两个缺陷模式,且两个缺陷模式均随 r_d 增大逐渐向下移动。其中四条不同线型表示四个特定节点,细实线为 $r_d=0.06a$,此时第二个缺陷模式的两个采样点频率刚刚进入带隙(椭圆虚线)。虚线为 $r_d=0.09a$,对应第二个缺陷模式完全进入带隙,且两组曲线互不交叉,带宽之和最大。点划线为 $r_d=0.14a$,此时两组模式开始分离。粗实线为 $r_d=0.18a$,最初的缺陷模式移出带隙进入通

带,只剩下窄带宽的第二个缺陷模式。当 $r_d > 0.2a$ 时,更多的缺陷模式出现,并且彼此相距非常近,带来很强的模间色散,而此时的带宽也较小。

图 7 为图 6(b)中各节点的 TM 能带结构,其中图 7(b)和图 7(c)中均有两个缺陷模式(椭圆虚线),图 7(b)两个缺陷模式在 X 点的频率几乎相同,带宽和为 $0.08568\omega a/2\pi c$,是图 2(a)初始结构带宽的 2.195 倍,这时图 7(b)实际上得到了少模波导,其相对于单模波导有更大的传输容量,相对于多模波导有更远的传输距离。

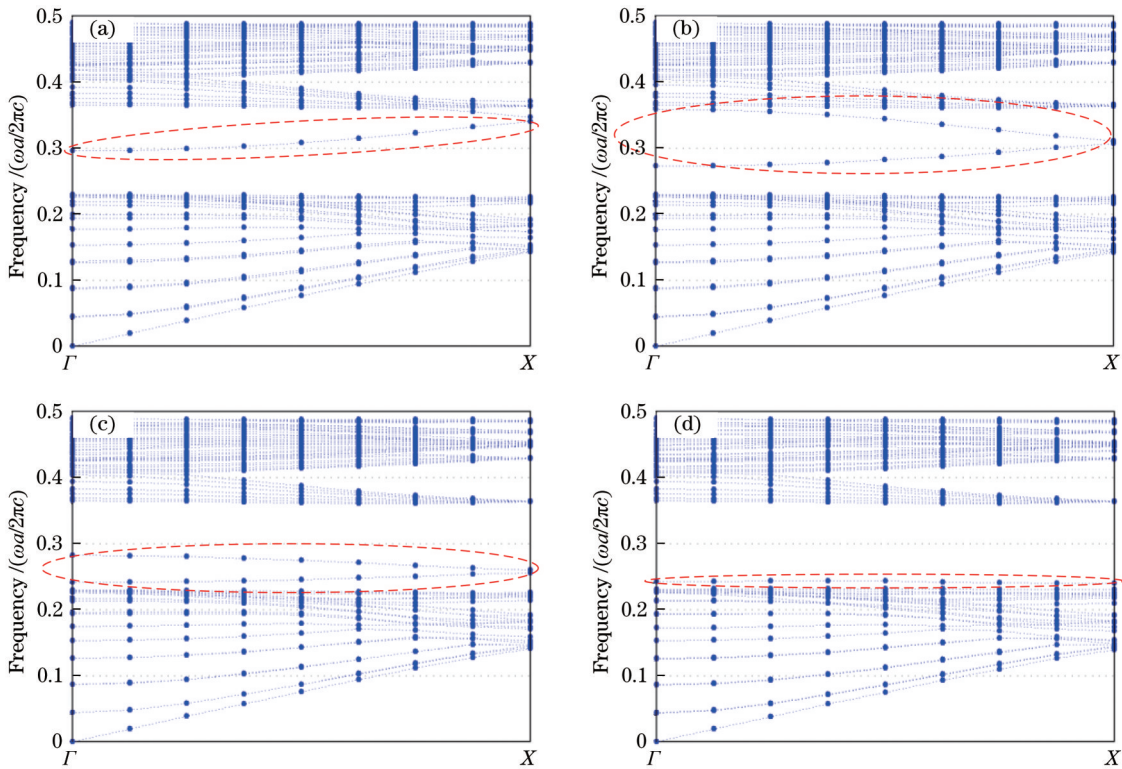


图 7 图 6(b)中各节点的 TM 能带结构。(a) $r_d=0.06a$; (b) $r_d=0.09a$; (c) $r_d=0.14a$; (d) $r_d=0.18a$

在图 6(a)中,对 $r_d=0.1a$,向左水平移动缺陷介质柱进一步破坏 Kagome 晶格的对称性。图 8 给出了此时缺陷模式频率随移动距离 l 的变化曲线,根据 Kagome 晶格对称性,将其移动 $0.5a$ 即可遍历所有情况。选取 $r_d=0.1a$,是因为此时缺陷模式在保持大带宽($0.07574\omega a/2\pi c$)的同时距离通带较远,受通带模式影响小,如图 6(b)所示。图 9(a)和(b)分别为 $r_d=0.1a$ 时,缺陷移动前以及移动距离 $l=0.5a$ 的 TM 能带。可见移动后缺陷模式下边缘频率几乎不变,上边缘频率向上移动,带宽有效增大,为 $0.08622\omega a/2\pi c$ 。值得指出的是,图 8 中 $l=0.5a$ 并不是带宽最大的情况,但考虑到构造的方便,取 l

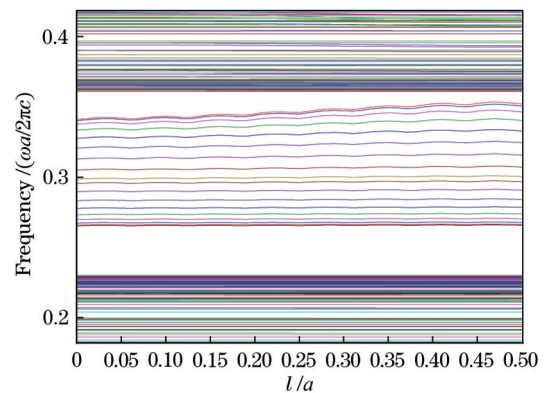


图 8 $r_d=0.1a$ 时,缺陷模式频率与 l 的关系

Fig. 8 When $r_d=0.1a$, relationship between defect mode frequency and l

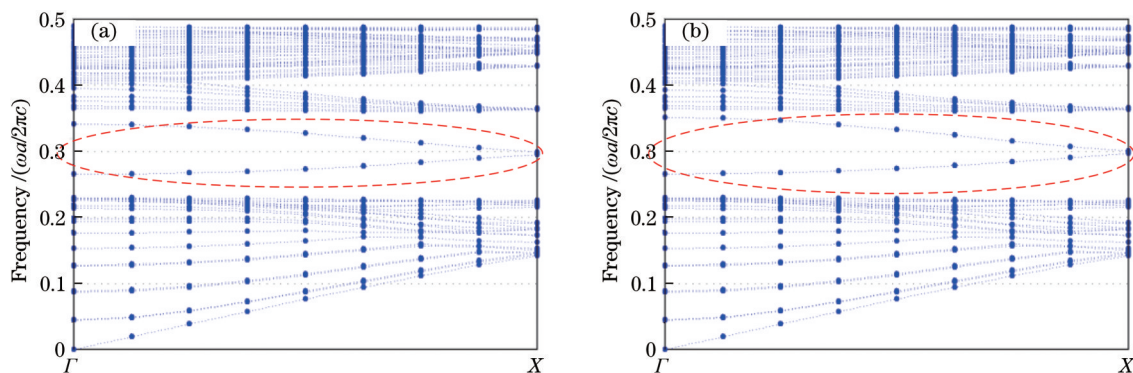


图 9 线缺陷 TM 能带结构。(a)移动前;(b)移动后($l=0.5a$)

Fig. 9 TM band structures of the line defect. (a) Before the movement; (b) after the movement ($l=0.5a$)

为 $0.5a$ 。

现分析波导两侧介质柱半径 r_1 对波导模式的影响,图 10 为缺陷模式频率随 r_1 的变化曲线。研究表明大部分情况下带隙内出现了新的、窄带宽的波导模式,但虚线之间的部分($0.2a < r_1 < 0.22a$)仍为少模。在该范围内,波导模式频率随着 r_1 的增大略有下移,带宽也有所增大, $r_1=0.22a$ 时有最大带宽为 $0.08888\omega a/2\pi c$ 。

图 11(a)和(b)分别为优化的 Kagome 晶格线缺陷结构及其透射谱,其参数与图 2(b)相同(光源、探测器、计算时间等),该透射谱给出的缺陷模式波段范围与图 10 中用 PWE 方法计算的结果吻合,在整个带宽范围内,两个缺陷模式耦合(椭圆虚线)成为连续的波导模式。通过对缺陷结构的优化,窄带宽的单模波导变为带宽大大增加的少模波导,并且透射谱的探测值相对于图 2(b)也有很大提高,波导的传输特性得到有效改善。

需要指出的是,本文是在二维情况下对 Kagome 晶格中的线缺陷进行模拟的,在实际中操

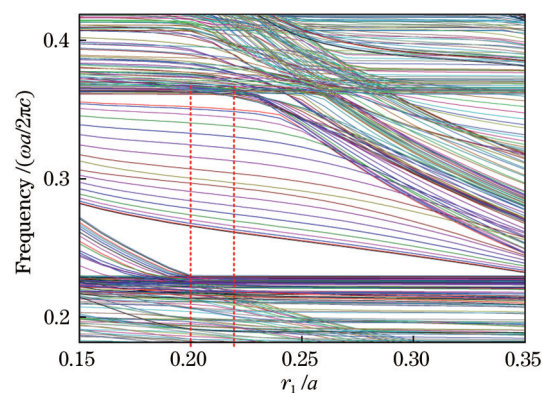


图 10 缺陷模式频率与 r_1 的关系

作中往往需借助光子晶体平板结构,即在二维平面利用带隙效应导光,在第三个方向一般利用折射率进行限制。二维光子晶体线缺陷和光子晶体平板波导的研究结果是互相联系的,利用有效折射率的方法^[26-27],可以将光子晶体平板波导结构作为二维光子晶体波导处理,或者用另一种经验结论,即二维光子晶体波导与同样线缺陷结构的光子晶体平

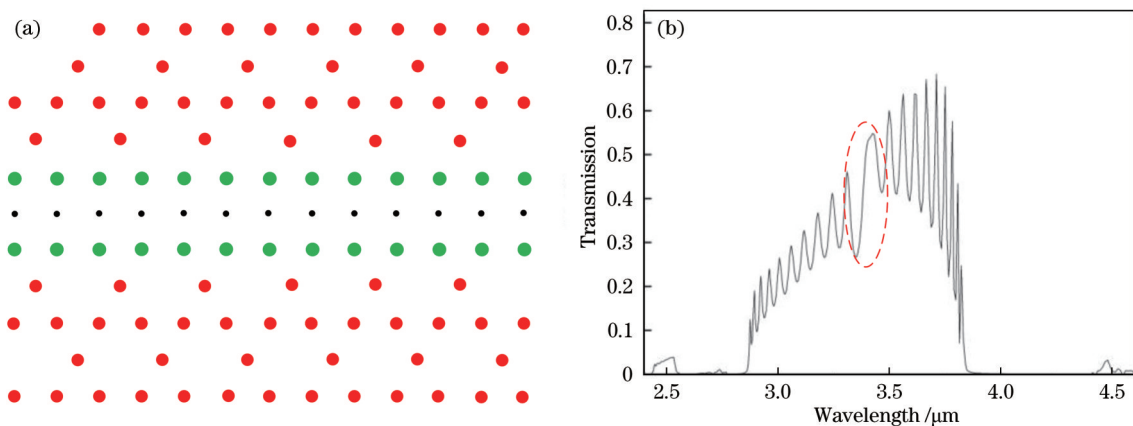


图 11 优化的 Kagome 晶格。(a)优化的 Kagome 线缺陷结构;(b)透射谱

Fig. 11 Optimized Kagome lattice. (a) Optimized Kagome line defect structure; (b) transmission spectrum

板有同样形状的透射光谱,只是前者相对后者有 15% 的红移^[28]。在今后的工作中就可以从这两种方法入手,将本文已优化的线缺陷结构应用到光子晶体平板的设计中。

4 结 论

本文基于 PWE 和 FDTD 方法计算和优化了 Kagome 晶格波导结构,分析了线缺陷的透射谱。研究发现,在 $r_c=0.2a$, $r_d=0.1a$ 和 $r_1=0.22a$ 时,通过引入新的缺陷介质柱和平移波导结构,可以得到双模式、带宽为 $0.08888\omega a/2\pi c$ 的 Kagome 晶格波导,相应的归一化频率和波长范围分别为 $0.26107\sim 0.34995\omega a/2\pi c$ 和 $2.85755\sim 3.83039\ \mu\text{m}$ ($a=1\ \mu\text{m}$)。这实际上是一种少模波导结构,在光子集成领域具有重要的应用价值。本文完善了基于 Kagome 晶格的线缺陷研究,并为光子晶体平板波导的设计提供了一种新的思路。

参 考 文 献

- [1] Zong Y, Xia S, Tang L, et al. Observation of localized flat-band states in Kagome photonic lattices [J]. *Optics Express*, 2016, 24(8): 8877-8885.
- [2] Lin Z Y, Choi J H, Zhang Q, et al. Flatbands and emergent ferromagnetic ordering in Fe_3Sn_2 Kagome lattices[J]. *Physical Review Letters*, 2018, 121(9): 096401.
- [3] Yang Y B, Wang Y C, Li X J, et al. Numerical simulation of the photonic bandgap of two-dimensional photonic crystals with kagome lattice[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, 35(5): 724-728.
杨毅彪,王云才,李秀杰,等. 二维 Kagome 格子光子晶体禁带的数值模拟[J]. *光子学报*, 2006, 35(5): 724-728.
- [4] Wang Z G, Zhang P. Quantum spin hall effect and spin-charge separation in a Kagomé lattice[J]. *New Journal of Physics*, 2010, 12(4): 043055.
- [5] Kurečić I, Vanderstraeten L, Schuch N. Gapped SU(3) spin liquid with Z3 topological order[J]. *Physical Review B*, 2019, 99(4): 045116.
- [6] Jiang W, Kang M, Huang H Q, et al. Topological band evolution between Lieb and Kagome lattices[J]. *Physical Review B*, 2019, 99(12): 125131.
- [7] Yang J, Zhao J, Gong C, et al. 3D printed low-loss THz waveguide based on Kagome photonic crystal structure[J]. *Optics Express*, 2016, 24(20): 22454-22460.
- [8] Gebhardt M, Gaida C, Hädrich S, et al. Nonlinear compression of an ultrashort-pulse thulium-based fiber laser to sub-70 fs in Kagome photonic crystal fiber[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(12): 2770-2773.
- [9] Xu G Y, Chen Y, Li P L. Three-input all-optical and gate based on two-dimensional photonic crystal [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(10): 1013002.
徐光跃,陈莹,李培丽. 基于二维光子晶体的三输入全光逻辑与门[J]. *中国激光*, 2020, 47(10): 1013002.
- [10] Wu R, Ma Y Y, Li L F. Slow light transmission of photonic crystal waveguide with wide bandwidth and large normalized delay bandwidth product[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(7): 0723002.
吴蓉,马岩岩,李龙飞. 具有宽带宽和高归一化延迟带宽积的光子晶体波导慢光传输[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(7): 0723002.
- [11] Ma P, Strasser P, Kaspar P, et al. Compact and integrated TM-pass photonic crystal waveguide polarizer in InGaAsP-InP[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2010, 22(24): 1808-1810.
- [12] Ma P, Jäckel H. Low crosstalk waveguide intersections in honeycomb lattice photonic crystals for TM-polarized light[J]. *Journal of Optics*, 2011, 13(9): 095501.
- [13] Zhang B J, Lu K Q, Zhao C, et al. Research on defect solitons in Kagome photonic lattices in centrosymmetric photorefractive crystals[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(12): 1208001.
张宝菊,卢克清,赵冲,等. 中心对称光折变晶体中 Kagome 型光格子内缺陷孤子的研究[J]. *中国激光*, 2016, 43(12): 1208001.
- [14] Pilehvar E, Kaatuzian H, Danaie M. Improved transmission for 60 degree waveguide bend in Kagome photonic crystal lattice[C]//2014 22nd Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE), May 20-22, 2014, Tehran, Iran. New York: IEEE Press, 2014: 7-9.
- [15] Schulz S A, Upham J, O'Faolain L, et al. Photonic crystal slow light waveguides in a Kagome lattice[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(16): 3243-3246.
- [16] Perez H, Zheltikov A M. Defect guidance in Kagome-clad fibers: the role of photonic band gaps and self-similarity of the lattice[J]. *Laser Physics Letters*, 2017, 14(1): 015402.
- [17] Pilehvar E, Kaatuzian H, Danaie M. Design of a high-transmission waveguide bend for Kagome photonic crystal lattice[J]. *Optik*, 2015, 126(19): 1914-1917.
- [18] Emplit P, Hamaide J P, Reynaud F, et al.

- Picosecond steps and dark pulses through nonlinear single mode fibers[J]. *Optics Communications*, 1987, 62(6): 374-379.
- [19] Yang X F, Huo D X, Hong X K. Periodic transmission and control of optical solitons in optical fibers[J]. *Optik*, 2020, 216: 164752.
- [20] Ryf R, Randel S, Gnauck A H, et al. Mode-division multiplexing over 96 km of few-mode fiber using coherent 6×6 MIMO processing[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, 30(4): 521-531.
- [21] Zhang H, Wang G R, Zhang J W, et al. Theoretical study on low crosstalk high-density composite multi-core photonic crystal fiber[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(7): 0706005.
张函, 汪国瑞, 张继伟, 等. 低串扰高密度复合型多芯光子晶体的光纤理论研究[J]. *中国激光*, 2021, 48(7): 0706005.
- [22] Plihal M, Maradudin A A. Photonic band structure of two-dimensional systems: the triangular lattice[J]. *Physical Review. B, Condensed Matter*, 1991, 44(16): 8565-8571.
- [23] Mohammad D, Attari A R, Mirsalehi M M, et al. Optimization of two-dimensional photonic crystal waveguides for TE and TM polarizations[J]. *Optica Applicata*, 2008, 38(4): 1218-1222.
- [24] Zhao Y C, Zhao F, Yuan L B. Sonic waveguide characteristics of heterostructures line defect of in 2D phononic crystal[J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2006, 35(6): 1190-1194.
赵言诚, 赵芳, 苑立波. 二维声子晶体异质线缺陷的声波导特性[J]. *人工晶体学报*, 2006, 35(6): 1190-1194.
- [25] Ge D H, Zhang J H, Zhang L Q, et al. Effect of point and linear defects on band-gap properties in triangular-honeycomb structure photonic crystals[J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, 170: 012005.
- [26] Ma P, Kaspar P, Jäckel H. Low-loss photonic crystal defect waveguides and taper designs in InP/InGaAsP for transverse magnetic polarized light[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2010, 49(6): 06GG06.
- [27] Ivanova O V, Stoffer R, Kauppinen L J, et al. Variational effective index method for 3D vectorial scattering problems in photonics: TE polarization [C]//*Proceedings of the Progress in Electromagnetics Research Symposium PIERS*, August, 2009, Moscow. [S.l.: s.n.], 2009: 1038-1042.
- [28] Lavrinenko A, Borel P I, Frandsen L H, et al. Comprehensive FDTD modelling of photonic crystal waveguide components[J]. *Optics Express*, 2004, 12(2): 234-248.