

基于环形微腔的多频段三角晶格光子晶体耦合腔波导光学传输特性

刘幸 郭红梅 付饶 范浩然 冯帅 陈笑 李传波 王义全

Optical transmission characteristics of multi-band triangular-lattice photonic crystal coupling cavity waveguide based on annular microcavity

Liu Xing Guo Hong-Mei Fu Rao Fan Hao-Ran Feng Shuai Chen Xiao Li Chuan-Bo Wang Yi-Quan

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 67, 234201 (2018) DOI: 10.7498/aps.67.20181579

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20181579>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I23>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[类声子晶体结构对超声塑料焊接工具横向振动的抑制](#)

Suppression of lateral vibration in rectangular ultrasonic plastic welding tool based on phononic crystal structure

物理学报.2018, 67(22): 224207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20181150>

[等效零折射率材料微腔中均匀化腔场作用下的简正模劈裂现象](#)

Normal-mode splitting induced by homogeneous electromagnetic fields in cavities filled with effective zero-index metamaterials

物理学报.2018, 67(2): 024210 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20171880>

[蜂巢光子晶格中光波的无衍射和反常折射](#)

Non-diffraction propagation and anomalous refraction of light wave in honeycomb photonic lattices

物理学报.2017, 66(23): 234207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.234207>

[人工带隙材料的拓扑性质](#)

Topological properties of artificial bandgap materials

物理学报.2017, 66(22): 224203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.224203>

[厚金属 Ag 膜的磁光法拉第旋转效应的增强](#)

Magneto-optical Faraday rotation effect enhancement of a thick metal Ag

物理学报.2012, 61(16): 164210 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.164210>

基于环形微腔的多频段三角晶格光子晶体 耦合腔波导光学传输特性*

刘幸 郭红梅 付饶 范浩然 冯帅[†] 陈笑 李传波 王义全

(中央民族大学理学院, 北京 100081)

(2018年8月22日收到; 2018年9月4日收到修改稿)

本文理论研究了近红外波段硅基三角晶格光子晶体环形微腔的光场局域特性, 通过将微腔在空间周期性排列组成耦合腔光波导, 研究了多个导带区域内光束传输时的群速度, 最大和最小值分别为 $0.0028c$ 和 $0.00028c$. 将环形微腔在垂直于光传输方向上进行交错排列, 通过改变相邻微腔之间的耦合区域, 可以大幅降低多频段范围内光束在耦合腔波导中传输时群速度之间的差异, 并提高部分频段的透过率数值. 在不改变介质柱半径条件下, 通过去掉三角晶格光子晶体中距中心介质柱距离分别为 $2a$ 和 $\sqrt{3}a$ 的六个介质柱构成了两种微腔, 研究了两种微腔所支持的谐振波长之间的差异, 在此基础上构造了两种耦合腔波导, 进而将这两种耦合腔光波导与W1型输入/输出波导相连, 最终实现了在多个不同频率范围内降低群速度的同时实现频段选择和频段分束功能, 其导模群速度可降低到 $0.00047c$.

关键词: 光子晶体, 耦合腔波导, 群速度

PACS: 42.70.Qs, 78.20.Ci, 42.25.Fx

DOI: 10.7498/aps.67.20181579

1 引言

为实现全光通信网络, 研究和开发合适的光子器件成为核心问题之一. 其中, 光延迟和光缓存技术是全光通信中信号处理领域的两个重要学术问题. 在这两项技术中, 近年的许多工作都围绕着选取合适的传输介质以提高其缓存性能来开展. 其中, 光子晶体 (photonic crystals, PCs) [1,2] 因其周期性结构带来的光子带隙特性引起了研究人员的广泛关注. 通过灵活控制光子晶体的结构尺寸、位置以及介质折射率等因素, 可以实现对电磁波的操纵性, 并由此研发了许多相应的光学功能器件, 如: 光子晶体滤波器 [3–6]、光子晶体分束器 [7–10]、光子晶体波导 [11–14] 等. 将光子晶体作为延迟介质引入到光延迟的设计中, 以电磁波为外界射频信号的载体, 再加以对结构本身带缺陷的周期性

设计, 光子晶体耦合腔波导 (coupled-resonant optical waveguides, CROW) [15–18] 已然问世. 2011年, Feng等 [19] 通过改变耦合腔内椭圆介质柱的倾斜度, 实现了低群速度的慢光传输.

慢光是指折射率对比比较明显时, 群速度远小于相速度的光. 光子晶体是由两种或两种以上不同折射率材料在空间周期性排列而构成的人工结构, 光在其中传输会因受到散射、反射、衍射等原因而变“慢” [20]. 在光子晶体中周期性引入缺陷构造耦合腔波导后, 由折射率不同引起的单位晶胞内的前向和后向散射光之间会出现相互干涉现象, 导致在布里渊区边界处的光波群速度为0; 而在结构中发生的全反射会增加光波在材料中的光程. 光速慢要求导模频率范围非常窄, 由此也会带来高色散畸变的信号传输.

本文在硅基二维三角晶格光子晶体结构的基

* 国家自然科学基金 (批准号: 61775244, 61675238, 11374378) 和大学生创新训练计划 (批准号: URTP2018110002, URTP2018110009) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: fengshuai75@163.com

基础上, 提出了一种由六边形微腔周期性排列构成的耦合腔波导, 实现了五个波段内的慢光传输, 其中最窄波段所对应的群速度最大值为 $2.8 \times 10^{-4}c$. 在此基础上, 通过交错排列环形腔, 可获得七个波段内的高透过率光传输并且降低了各个波段内最大群速度之间的差异. 最后, 通过在环形腔内添加不同角度的六个介质柱, 设计了两种结构的耦合腔并将其与 W1 型分支波导相连, 通过计算透射谱得出其在宽波段范围内具有丰富的波段选择传输特性, 并可以在特定波段内实现能量的分束.

2 二维光子晶体环形腔耦合腔波导的设计与仿真

本文以二维光子晶体为研究对象, 将圆形硅 (Si) 材料按三角晶格周期性均匀地排列在空气背景中. 在完整的光子晶体中去掉离中心圆柱距离为 $2a$ 和 $\sqrt{3}a$ 的 12 个硅柱, 构成了如图 1 (a) 所示的环形微腔, 结构参数如下: 介质柱折射率 $n = 3.45$, 晶格常数 $a = 540$ nm, 介质柱半径 $r = 0.25a$, 在理论计算中选取横磁 (transverse magnetic, TM) 模

式的电磁波, 其电场强度方向沿着硅柱的中心轴, 而磁场强度方向则限制在介电常数周期性分布的平面内. 理论计算表明, 图 1 (a) 所示微腔结构能够支持五个不同波长的谐振模式. 将一个偶极子点光源放在微腔附近, 当光子能量与微腔所支持的模式能量相匹配时, 相应谐振频率的光场便会局域在微腔中. 不同谐振波长所对应的模场空间分布大有不同, 图 1 (b)—图 1 (f) 给出了五个谐振波长的模场空间分布特性, 其中红色区域表示电场强度正值, 蓝色区域表示电场强度负值. 当入射电磁波的波长为 1478.3, 1574.1, 1661.9 和 1678.1 nm 时, 其模场关于水平中心轴呈偶对称分布, 而波长为 1550.0 nm 时模场关于水平中心轴呈现奇对称分布. 波长为 1550.0, 1574.1 和 1678.1 nm 时模场关于竖直中心轴呈现偶对称分布, 而 1478.3 和 1661.9 nm 的模场关于竖直中心轴为奇对称分布. 对比图 1 (b) 和图 1 (c) 可以看出, 模场的空间对称性是相反的, 而图 1 (b) 和图 1 (e) 所示模场的空间对称性是相同的, 图 1 (d) 和图 1 (f) 也具有相同的模场空间对称性.

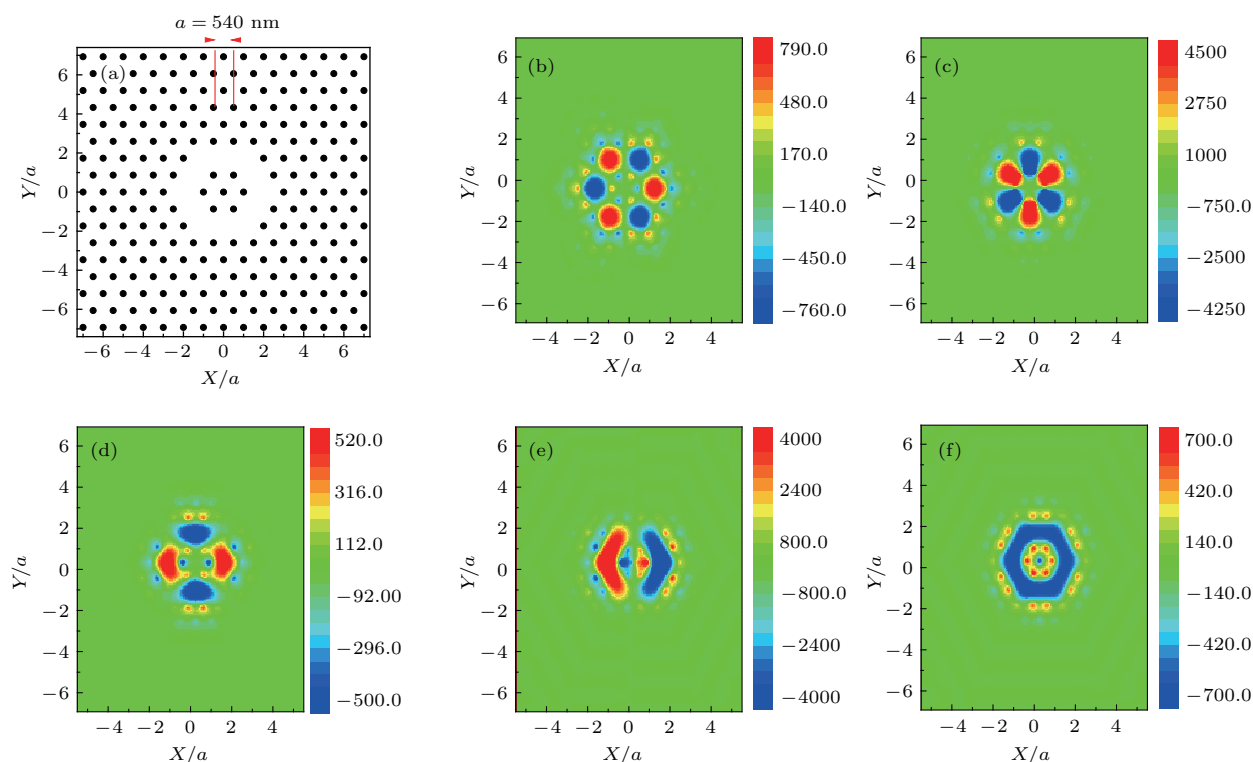


图 1 六边形环形腔的结构示意图 (a) 以及多个波长位置的稳态电场幅值空间分布: (b) $\lambda = 1478.3$ nm; (c) $\lambda = 1550.0$ nm; (d) $\lambda = 1574.1$ nm; (e) $\lambda = 1661.9$ nm; (f) $\lambda = 1678.1$ nm

Fig. 1. Sketch map of the hexagonal annular cavity (a); the steady electric field's amplitude profiles of the localized modes at the different wavelengths: (b) $\lambda = 1478.34$ nm; (c) $\lambda = 1550.0$ nm; (d) $\lambda = 1574.1$ nm; (e) $\lambda = 1661.9$ nm; (f) $\lambda = 1678.1$ nm.

在上述环形微腔的基础上, 沿着三角晶格光子晶体的 Γ - K 方向以 $7a$ 为周期将该环形腔等间距排列, 构成耦合腔光波导. 为了使光波更高效地耦合进微腔从而提高透过率, 并激发出尽可能多的谐振模式, 在入射端和输出端口设置 W1 型波导与中间区域耦合腔波导相连, 并且将 W1 型波导横向偏移耦合腔波导中心两排介质柱, 具体结构如图 2(a) 所示. 利用时域有限差分方法 (finite difference time domain method, FDTD) 并结合完全匹配层吸收边界条件 (perfect matched layers, PML) [21,22] 可以计算该波导结构的透射谱, 结果如图 2(b) 所示, 从中可以看出该环形腔耦合波导支持的导带有 5 个, 左侧三个透过率较高, 导带也较宽, 右侧两个则透过率较低. 利用基于超元胞结构的平面波展开方法 (plane wave expansion method, PWE) 可得耦合腔波导的能带色散曲线, 获得 CROW 的具体导带范围. 图 2(a) 的红色实线部分是一个超胞的大小, 沿着 X 轴方向选取周期为 $7a$, Y 轴上选取整个结构的宽度, 原本完整晶体中的最小布里渊区被矩形超原胞取代. 光具有波动性, 由各个单色波组成的波包的前进速度定义为群速度, 根据能带和群速度的公式 $v_g = d f_0 / d k$ (v_g 表示群速度, f_0 表示导模的归一化频率, k 表示沿波包传播方向的波矢量), 群速度数值即为导模斜率. 从图 2(c) 可

得, 该结构的导模曲线斜率很小, 满足理想慢光传输所要求的数值平稳条件. 第一导带的归一化频率在 $(0.32173-0.32181)c/a$ 的范围内, 导带宽度为 $8 \times 10^{-5}c/a$. 在与第一个导带间隔 $0.003c/a$ 的地方出现了第二导模, 范围为 $(0.32486-0.32502)c/a$. 而在 $0.345c/a$ 频率附近有两个导带, 所支持的频率范围分别是 $(0.34319-0.34359)c/a$ 和 $(0.34808-0.34888)c/a$. 第五个导带则在 $(0.36513-0.36585)c/a$ 之间.

为更加精确地描述所求的群速度大小, 利用紧束缚近似法对 CROW 所支持的导模群速度进行计算. 只考虑最近邻耦合, 波导模式的色散关系可以表示为

$$\omega(k) = \Omega[1 + \kappa \cos(kR)], \quad (1)$$

其中, ω 表示角频率, Ω 表示一个微腔的本征角频率, κ 为相邻微腔之间的耦合效率, R 是指相邻微腔的间距. 结构是超胞沿 X 轴方向周期性排列而成的, 波矢的范围取 $[0, \pi/R]$, 故导模的最小带宽可表示为

$$\Delta\omega = 2|\kappa|\Omega, \quad (2)$$

根据 (1) 式和 (2) 式可推算出:

$$|v_g(k)| = \Omega R \kappa \sin(kR) = \frac{\Delta\omega}{2|\kappa|} \sin(kR).$$

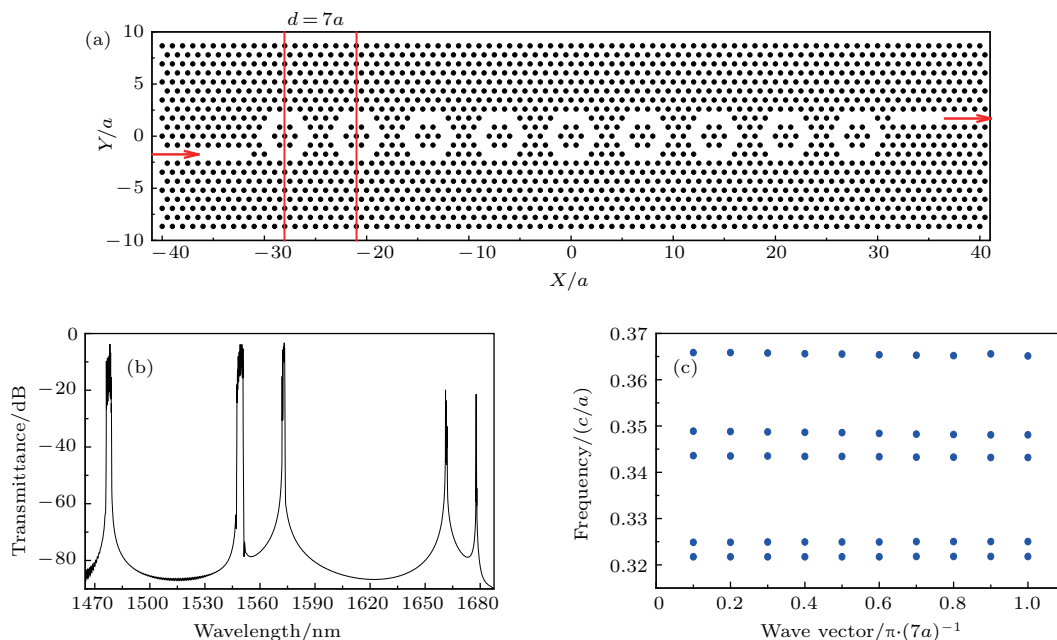


图 2 (a) 耦合腔波导结构示意图; (b) 透过率曲线; (c) 波导的色散曲线

Fig. 2. (a) Schematic diagram of the coupled-cavity waveguide structure; (b) the corresponding light transmission spectrum through the structure; (c) the dispersion curve of waveguide modes.

图3所示的五条曲线分别对应图2结构支持的五个导模, 图中的 f 表示每条导带的中心频率. 该结构第四个导带中心频率为 $0.34848c/a$, 从图3中的曲线d可以看出其群速度最大值为 $0.0028c$. 曲线a表征的是中心频率位于 $0.32177c/a$ 处的导带群速度, 最大值为 $0.00028c$ (是曲线d最大群速度的 $1/10$). 图3中的曲线e, c, b分别是第五, 三, 二条导带的群速度曲线, 所对应的群速度最大值分别为 $0.00252c$, $0.0014c$, $0.00056c$.

在左侧W1型波导中心位置, 入射一束TM偏振的空间高斯分布的单一频率正弦波作为激励源,

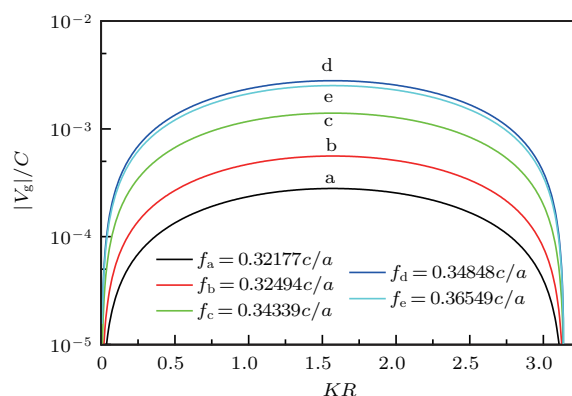


图3 图2(a)中耦合腔波导结构所对应的导模群速度曲线
Fig. 3. Group velocities of the corresponding guiding modes through the structure displayed in Fig. 2(a).

通过相邻环形腔之间的弱耦合效应, 实现光波自左向右的稳定传输. 在图4中可以观察到不同导带中心位置对应的单一波长光束通过谐振耦合腔波导的稳态空间光场振幅分布情况. 该结构沿光传播方向长度为 $80a$, y 方向长度为 $12\sqrt{3}a$, 以保证光不从上下两边散射出去且满足慢光传输条件. 从图4(a)—图4(d)可以看出, 耦合波导所支持的五个波长的场分布分别对应着该微腔所支持的模式分布, 并且光能够很好地局域在环形腔内进行传播. 但从图4(e)可以看出该波长的光波没有耦合到达出射端口, 从图2(b)的透射谱中同样可以发现, 波长在 1677.8 nm 的导模透过率为 0.724% . 在实际慢光应用系统中, 良好的慢光波导结构至少要满足两个基本要求: 1) 波导有恰当的归一化延迟带宽积值($\text{NDBP} = (n_g \times \Delta f)/f_0$, 其中 n_g 表示群折射率, Δf 表示归一化的慢光带宽); 2) 导模在结构中能够高效率传输.

为实现高效率的光传输, 调整相邻环形腔的相对位置. 将相邻的环形腔位置沿 Y 轴方向交错四排柱(即在图2(a)的基础上, 沿 Y 轴方向交错 $2\sqrt{3}a$), 此时的结构空间周期变为 $14a$, 如图5(a)所示. 图5(b)是通过FDTD方法计算得出的该结构对应的透射谱, 可以看出在 1573 nm 和 1660 nm

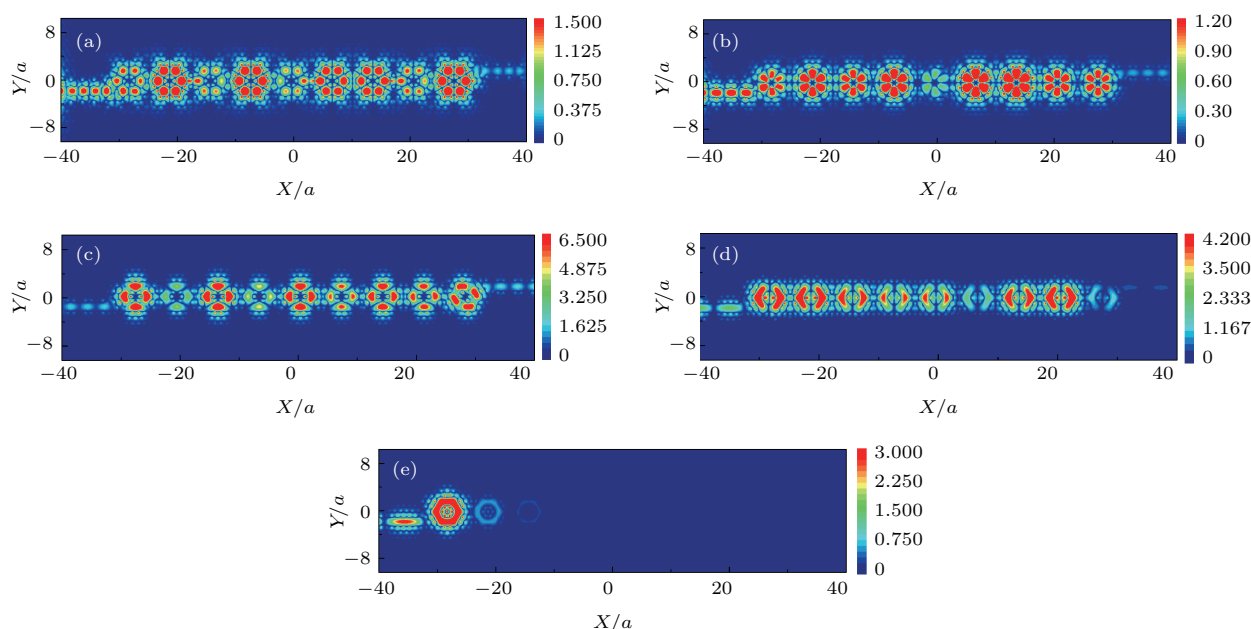


图4 不同波长处的稳态电场强度振幅空间分布 (a) $\lambda = 1477.7\text{ nm}$; (b) $\lambda = 1550.1\text{ nm}$; (c) $\lambda = 1573.0\text{ nm}$; (d) $\lambda = 1661.9\text{ nm}$; (e) $\lambda = 1678.6\text{ nm}$

Fig. 4. The steady electric field's amplitude profiles of the localized modes at the different wavelengths: (a) $\lambda = 1477.7\text{ nm}$; (b) $\lambda = 1550.1\text{ nm}$; (c) $\lambda = 1573.0\text{ nm}$; (d) $\lambda = 1661.9\text{ nm}$; (e) $\lambda = 1678.6\text{ nm}$.

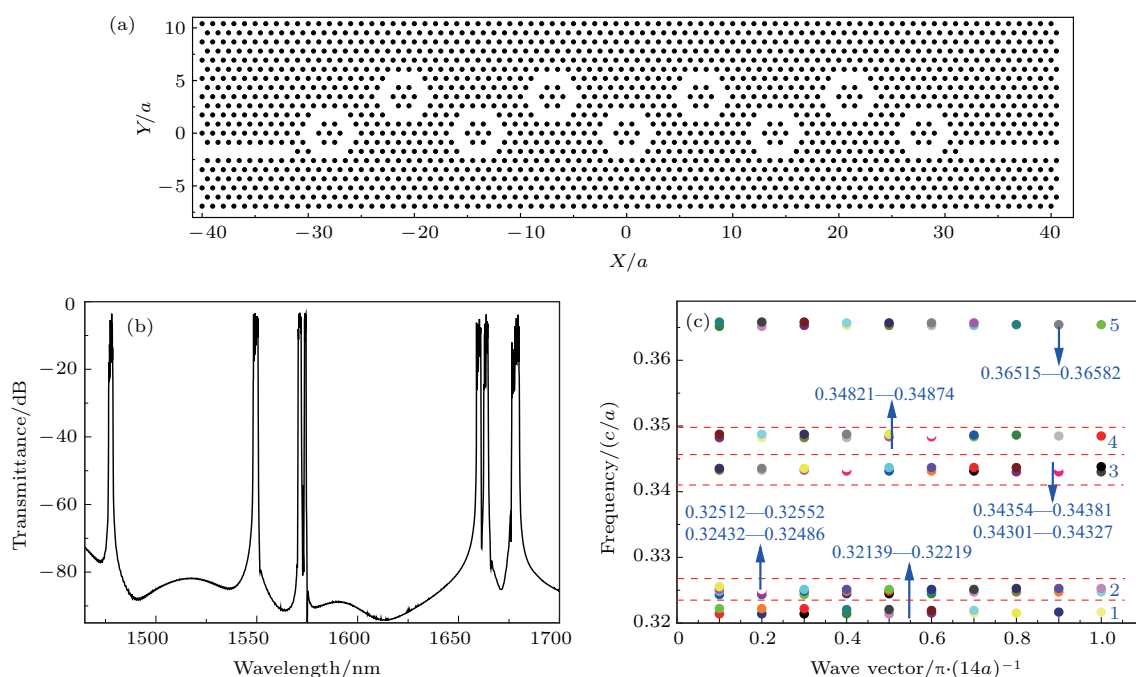


图5 (a) 交错排列耦合腔波导结构示意图; (b) 透过率曲线; (c) 导模的色散曲线

Fig. 5. (a) Schematic diagram of the coupled cavity waveguide structure by staggering the microcavities; (b) the corresponding light transmission spectrum through the structure; (c) the dispersion curves of guiding modes.

附近存在两个透射峰, 分别劈裂成两个峰. 通过调整环形腔的位置使得CROW支持的模式个数增多, 同时提高了导模的透过率. 打破原晶体结构的高对称性, 原高对称点的能带简并度得到提升, 导模的范围得以展宽. 慢光区域带宽的增加, 使得群折射率在布里渊区边界的变化相对缓慢, 可以抑制二阶色散的增大, 同时宽导带也能携带更多有效信息进行传输. 图5(c)色散曲线中的7个导模分别对应着透射谱的谐振波长, 在导模波长范围变宽的同时, 模式的频率范围也相应增大. 同一模式的色散曲线, 由于周期长度的增加而出现了能带折叠的情况. 为加以区分用红色虚线标注出五个区域, 其中2和3两个区域同时对应两个独立的导模, 导模归一化频率范围分别是 $(0.32432-0.32486)c/a$, $(0.32512-0.32552)c/a$, $(0.34301-0.34327)c/a$ 和 $(0.34354-0.34381)c/a$ (已用蓝色字体在图5(c)中加以标注). 每个导模的归一化频率范围都在 $(10^{-4}-10^{-3})c/a$ 之间. $(0.32139-0.32219)c/a$, $(0.34821-0.34874)c/a$, $(0.36516-0.36582)c/a$ 分别是1, 4, 5区域对应的导模归一化频率.

通过紧束缚近似计算得到交错波导群速度曲线, 如图6所示. 导带频宽增加同时伴随着的导模群速度数值的增加. 各导模中群速度最小的是曲线d对应的第四导模, 其群速度最大值为

$0.00091c$, 中心频率在 $0.34314c/a$ 处, 是图2(a)结构中最小导模群速度的3倍. 最大群速度是中心频率在 $0.32179c/a$ 处的第一导模(曲线a)的群速度, 为 $0.0028c$. 其他导模对应的群速度分别为: g, $0.00231c$; b, $0.00189c$; f, $0.00185c$; c, $0.0014c$; e, $0.000945c$. 计算得到该交错波导各导模中单一波长的稳态光场分布如图7所示, 从中可以看出光场在耦合腔中传输时的局域特性. 图7(c)和图7(d)中, 波长为 1572.5 nm 和 1574.8 nm 的局域

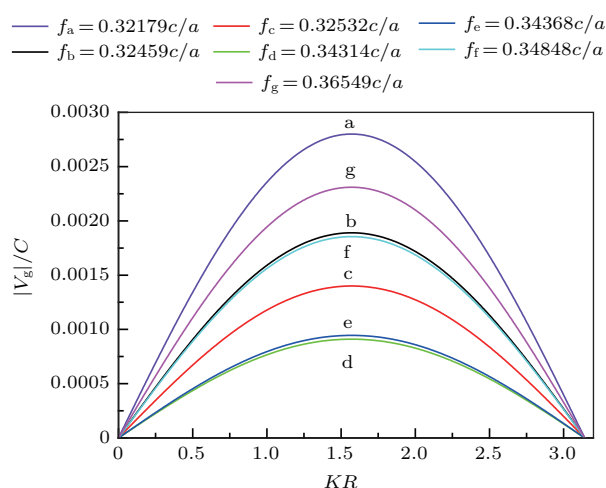


图6 图5中结构对应的不同导模的群速度特性曲线

Fig. 6. Group velocities of different guiding modes through the CROW, whose schematic maps are displayed in Fig. 5.

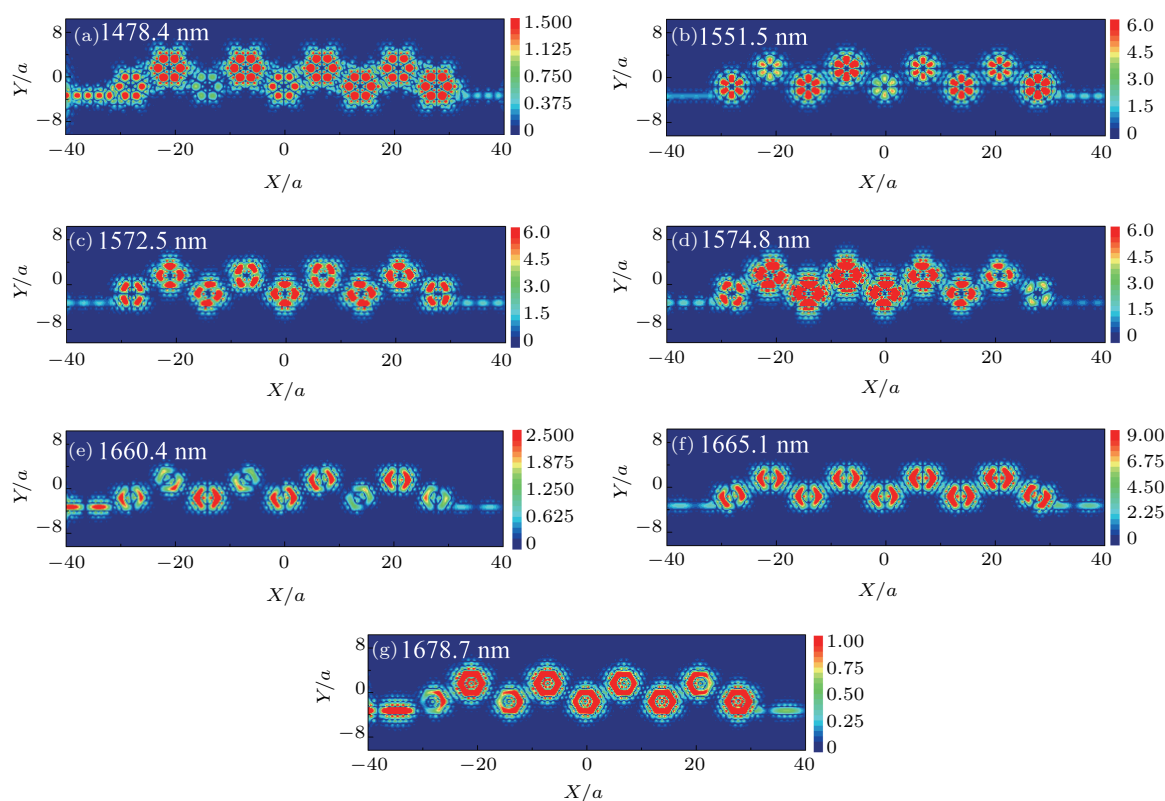


图7 不同波长处的稳态电场强度振幅空间分布 (a) $\lambda = 1478.4$ nm; (b) $\lambda = 1551.5$ nm; (c) $\lambda = 1572.5$ nm; (d) $\lambda = 1574.8$ nm; (e) $\lambda = 1660.4$ nm; (f) $\lambda = 1665.1$ nm; (g) $\lambda = 1678.7$ nm

Fig. 7. The steady electric field's amplitude profiles of the localized modes at the different wavelengths distribution of the electric field intensity: (a) $\lambda = 1478.4$ nm; (b) $\lambda = 1551.5$ nm; (c) $\lambda = 1572.5$ nm; (d) $\lambda = 1574.8$ nm; (e) $\lambda = 1660.4$ nm; (f) $\lambda = 1665.1$ nm; (g) $\lambda = 1678.7$ nm.

场空间分布是相似的, 图7(e)和图7(f)中的1660.4和1665.1 nm也具有相似的局域场空间分布. 1, 4, 5区域的1678.7, 1551.5, 1478.4 nm波长的稳态场分布分别在图7(g), 图7(b)和图7(a)中. 通过交错相邻环形腔的位置, 使得谐振模式的个数得以增加, 同时改善了耦合腔波导慢光传输时的宽带色散特性.

3 基于不同环形微腔的耦合腔波导的频段选择以及分束特性

在上述微腔结构的基础上, 在圆环处增加六个介质柱形成如图8(a)所示的新型微腔. 为了描述方便, 该结构被定义为“一号”谐振腔, 它是由在三角晶格光子晶体中去掉距中心介质柱距离为 $2a$ 的六个介质柱组成的. 数值计算表明, “一号”微腔所支持的谐振模式一共有四个, 图8(b)给出了该四个谐振波长的位置, 分别为1474.2, 1501.3, 1529.3和1537.7 nm, 其模场空间分布分别如图8(c)—(f)

所示. 可以看出, 图8(c)和图8(e)中的电场分布相对于水平和竖直中心轴都是偶对称的, 对应的波长分别为1474.2 nm和1529.3 nm. 当 $\lambda = 1501.3$ nm和1537.7 nm时, 模场分布沿着水平方向都是呈奇对称, 竖直方向是偶对称的. 在完整三角晶格光子晶体中去掉距中心介质柱距离为 $\sqrt{3}a$ 的六个介质柱构造出另一种类型的谐振腔, 其结构示意图如图9(a)所示. 该结构定义为“二号”微腔, “二号”微腔支持的4个模式的电场空间分布如图9(b)—图9(e)所示, 对应的波长分别为1464.3, 1482.9, 1531.9 nm和1589.4 nm. 与“一号”谐振腔相比, “二号”微腔中图9(b)和图9(c)的谐振波长有所蓝移, 而图9(d)和图9(e)对应的波长出现一定程度的红移.

利用两种微腔结构所支持谐振波长之间的差异, 构造了如图10(a)所示的复合CROW结构. 为增强CROW与光源之间的耦合效率从而提高整体结构的透过率, 采用W1型波导与CROW相连接, 如图10(a)中的区域A所示. 在A区域电磁波首先

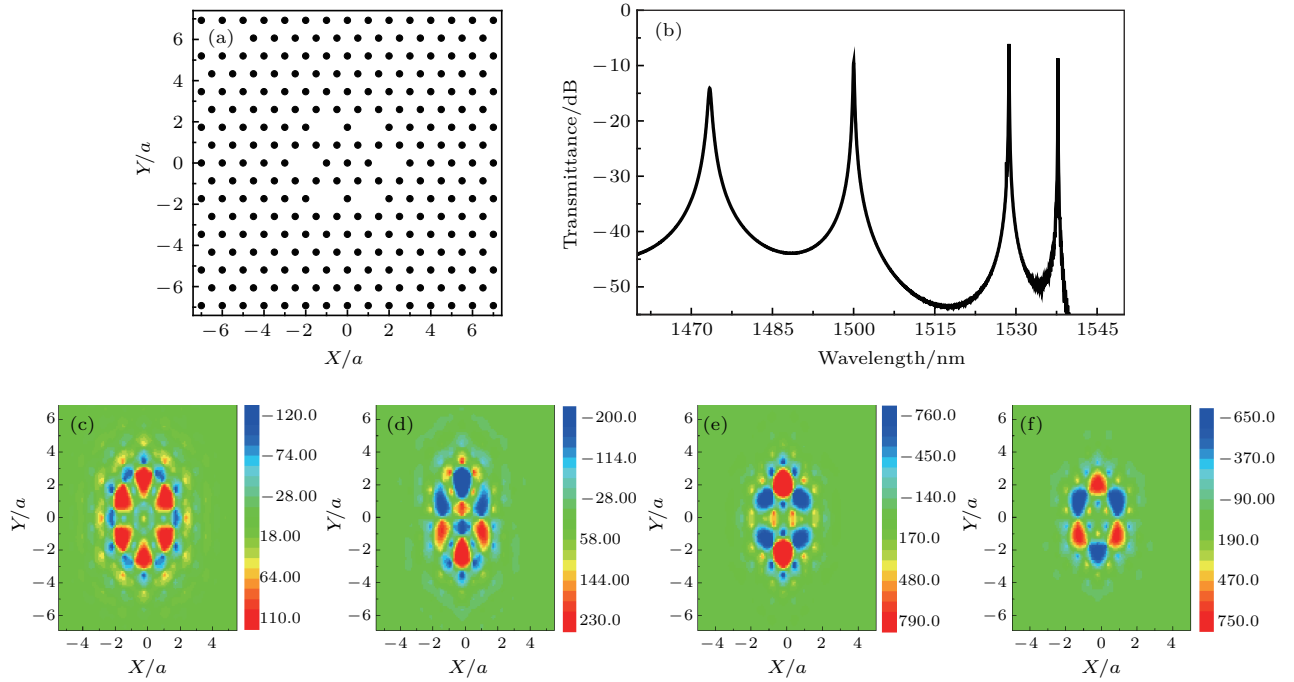


图8 (a) “一号”微腔的结构示意图; (b) 对应的透过率曲线; (c)—(f) 稳定的电场幅值分布: (c) $\lambda = 1474.2$ nm; (d) $\lambda = 1501.3$ nm; (e) $\lambda = 1529.3$ nm; (f) $\lambda = 1537.7$ nm

Fig. 8. (a) Sketch map of the “No. 1” microcavity; (b) the corresponding light transmission spectrum through the structure; (c)–(f) the steady electric field’s amplitude profiles of the localized modes at the different wavelengths: (c) $\lambda = 1474.2$ nm; (d) $\lambda = 1501.3$ nm; (e) $\lambda = 1529.3$ nm; (f) $\lambda = 1537.7$ nm.

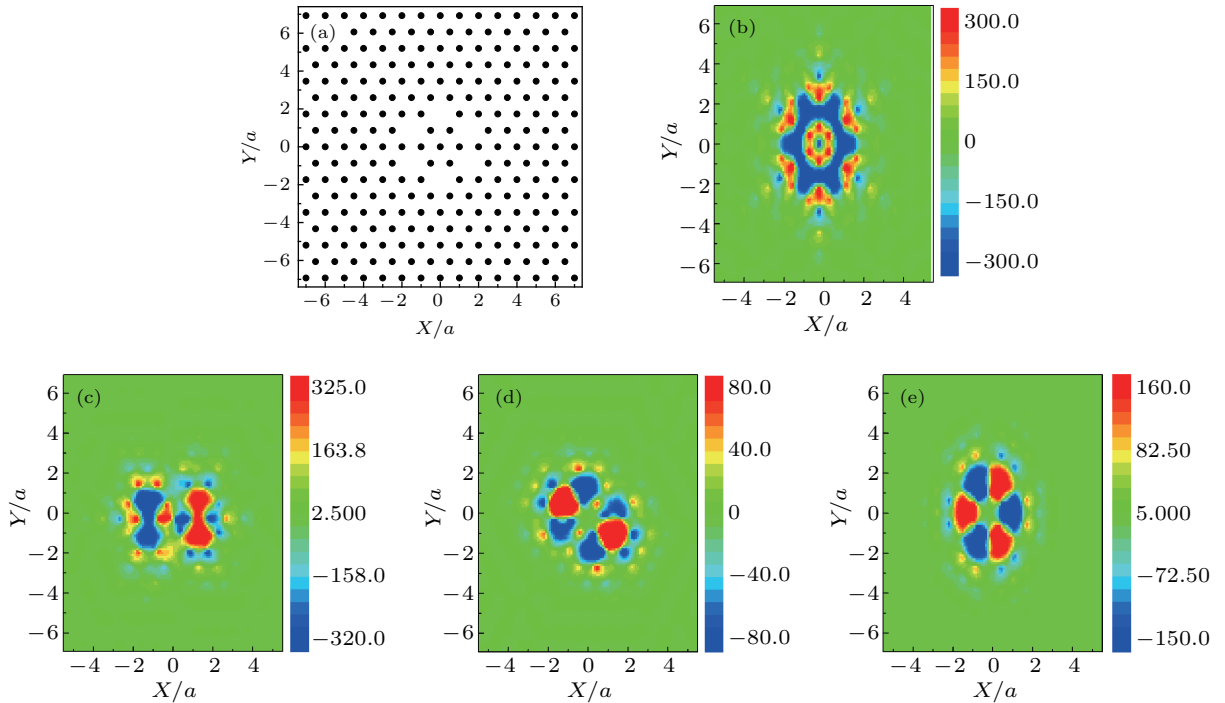


图9 (a) “二号”微腔的结构示意图; (b)—(e) 稳定的电场幅值分布: (b) $\lambda = 1464.3$ nm; (c) $\lambda = 1482.9$ nm; (d) $\lambda = 1531.9$ nm; (e) $\lambda = 1589.4$ nm

Fig. 9. (a) Sketch map of the “No. 2” microcavity; (b)–(e) the steady electric field’s amplitude profiles of the localized modes at the different wavelengths: (b) $\lambda = 1464.3$ nm; (c) $\lambda = 1482.9$ nm; (d) $\lambda = 1531.9$ nm; (e) $\lambda = 1589.4$ nm.

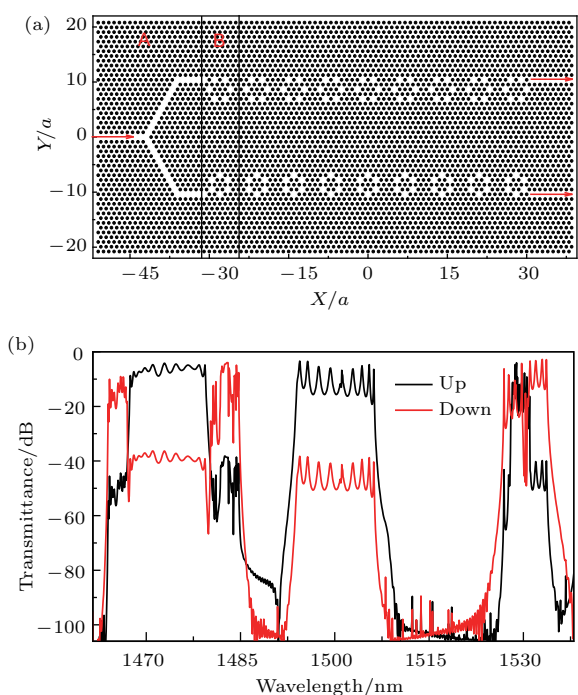


图10 (a) 耦合腔波导分束器结构示意图; (b) 输出耦合腔波导对应的透射率曲线

Fig. 10. (a) Schematic diagram of the coupled-cavity waveguide beam splitting device; (b) the corresponding light transmission spectra through the output coupled-cavity waveguides.

沿着长度为 $10a$ 的W1型波导自左向右传输, 然后通过Y型分支波导分成两束, 上下两个W1波导分别与“一号”和“二号”CROW相连接. 以B区域大小作为一个周期单元, 沿着结构的 Γ -K方向依次排列, 周期长度为 $7a$. 在两种CROW的最右端再连接W1型波导, 进行输出. 为确保两CROW之间没有耦合以及光束能够很好地被局域在CROW中传输, 两类型波导之间间隔20排介质柱, 距离上下边界12排圆形硅柱, 以控制光的散射. 以“一号”微腔构成的周期为 $7a$ 的CROW, 在带隙范围内共支持四个导模, 分别是1463.3—1466.5 nm, 1479.4—1484.3 nm, 1526.2—1533.7 nm, 1587.9—1590.4 nm. 图11是利用紧束缚近似法计算的群速度随波矢的变化曲线, a, b, c, d对应的群速度分别为 $0.000466c$, $0.000469c$, $0.01075c$, $0.0112c$, 归一化中心频率分别为 $0.35108c/a$, $0.35322c/a$, $0.36002c/a$, $0.36662c/a$. 同样, 计算得出的以“二号”微腔构成的周期为 $7a$ 的CROW也支持四个导带, 对应波长范围分别为1466.5—1479.4 nm, 1493.6—1506.4 nm, 1528.5—

1529.1 nm, 1537.8—1538.4 nm. 图12中a, b, c, d对应的群速度分别为 $0.001855c$, $0.006055c$, $0.0042c$, $0.006055c$. 由“二号”微腔构成的CROW, 其四个导模的归一化中心频率分别是 $0.33981c/a$, $0.35295c/a$, $0.36442c/a$, $0.36863c/a$, 数值上与“一号”微腔支持的中心频率相近. 图10给出了从两个输出端口测量得到的透射率曲线, 其中黑色曲线表示的是从1号输出端口测量得到的透射谱, 红色曲线则表示2号端口记录的透射谱. 可以看出, 在1463—1485 nm波段可以实现不同波段的通道选择, 而当波长在1526—1535 nm范围内时, 除了具有滤波功能还可实现通道信息共享的作用; 波长1530 nm和1500 nm所在导带存在着明显的透射率

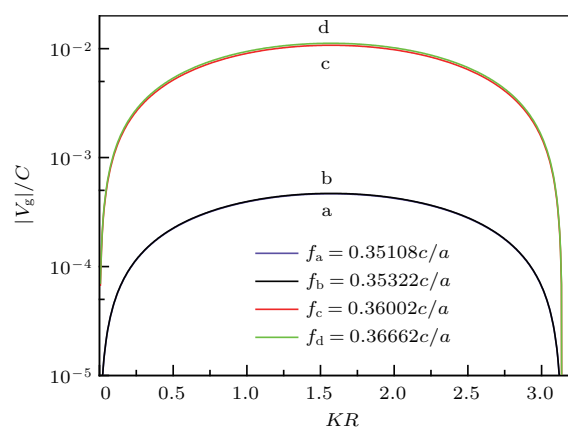


图11 图10结构中的“一号”微腔耦合波导对应的不同导模的群速度特性曲线

Fig. 11. Group velocity characteristics of different of guided modes corresponding to the No. 1 microcavity coupled waveguide of structure in Fig. 10.

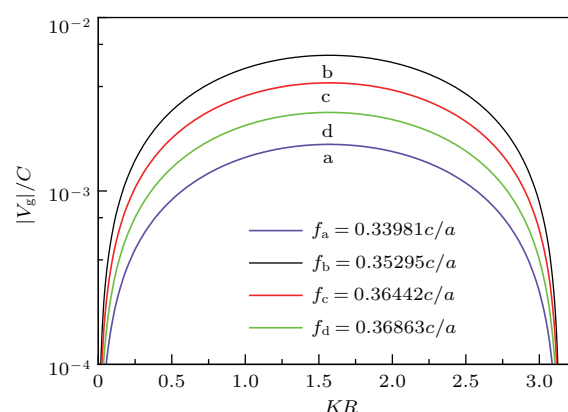


图12 图10中结构的“二号”微腔耦合波导对应的不同导模的群速度特性曲线

Fig. 12. Group velocity characteristics of different of guiding modes corresponding to the No. 2 microcavity coupled waveguide of structure in Fig. 10.

数值震荡现象, 而波长 1475 nm 所属导带则无明显的振荡行为, 这种导带范围内透过率数值的振荡是由于有限个微腔所支持的局域模相互之间的耦合效应引起的模式分裂造成的, 其振荡的剧烈程度与组成有限大小 CROW 的单元微腔数量、微腔缺陷模之间的耦合强度以及缺陷模的空间模场分布等因素有关.

图 13 给出了多个波长的入射光束经过图 10 (a) 所示 CROW 结构后的空间稳态电场强度振幅分布, 每段导模取其范围内的一个波长加以验证. 当处于 W1 波导的导模范围内光子能量与环形腔所支持的导模能量相匹配时, 将会被局域在耦合腔中传输, 在远离微腔的位置电磁场呈指数形式衰减. 从图 13 (a) 和图 13 (c) 可以看出, 波长为 1465.7 nm 和 1483.1 nm 的光束沿着 W1 型波导入射, 光场分布主要局域在“二号”微腔的缺陷位置, 通过微腔之间的弱耦合效应可以实现慢光传输功能, 其群速度数值约为 $0.00047c$. 从两个输出通道的透射谱曲线上能看出, 两个通道的透过率

数值相差 1000 倍左右, 达到了很高的对比度. 当入射光波长为 1479.5 nm 时, 该复合型 CROW 中的“一号”波导可支持它通过, 电场强度振幅分布图如图 13 (b) 所示, 其群速度数值约为 $0.0112c$. 综上, 在波长 1463—1484 nm 总宽度约为 21 nm 的范围内, 实现了三个波段输出通道选择性慢光传输的功能. 在图 13 (d) 中, 波长为 1527.3 nm 的入射光能从“二号”波导出射, 而在波长增加 1.3 nm 后, 即波长为 1528.6 nm 的入射光可以从两个波导同时输出, 如图 13 (e) 所示, 该器件具有双通道分束的功能. 图 13 (f) 给出了波长为 1533.1 nm 的入射光传输情况, 可以看出光场主要局域在下方耦合腔波导中传输. 在 7 nm 的波长范围内, 连续实现了三种不同的功能: 上方通道传输、双通道传输和下方通道传输. 综上所述, 本文所提出的长宽尺寸为 $50 \mu\text{m} \times 24 \mu\text{m}$ 的 CROW 结构, 可在慢光传输的同时, 实现频段的选择和分束作用, 这为光缓存和光延迟器件的设计和制作提供了新的思路.

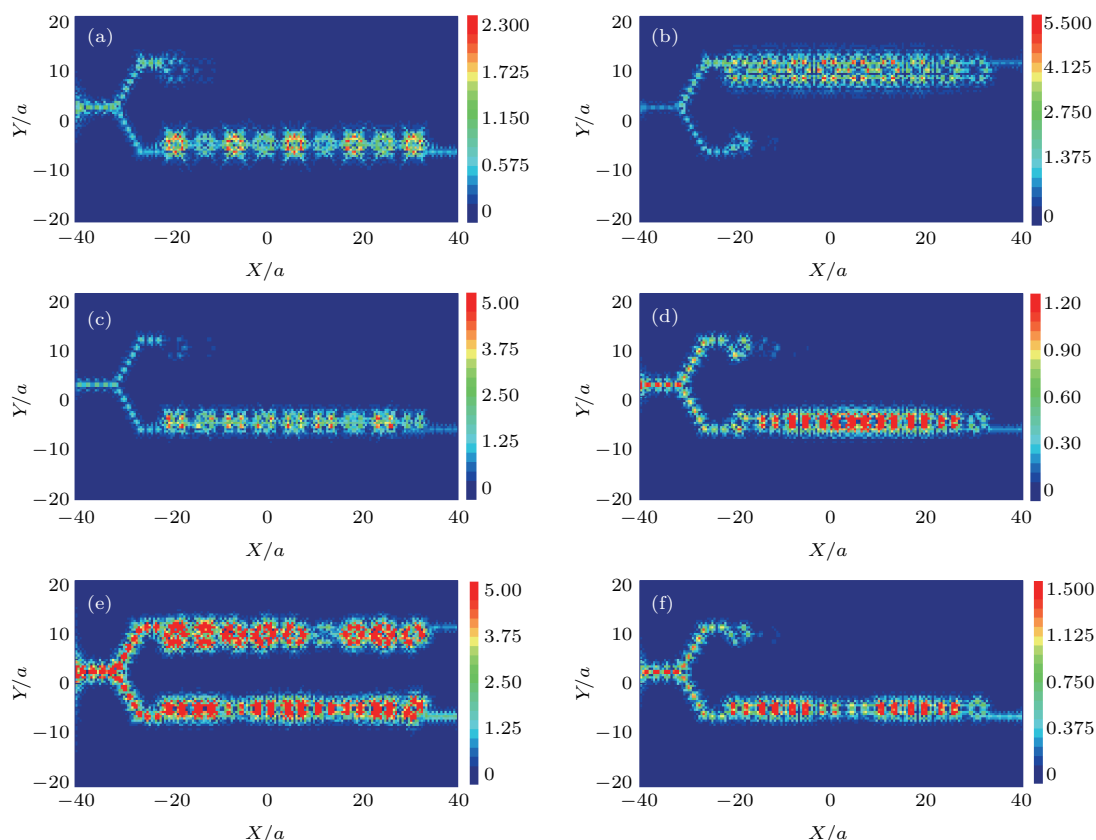


图 13 不同谐振波长位置的稳态电场振幅空间分布 (a) $\lambda = 1465.7 \text{ nm}$; (b) $\lambda = 1479.5 \text{ nm}$; (c) $\lambda = 1483.1 \text{ nm}$; (d) $\lambda = 1527.3 \text{ nm}$; (e) $\lambda = 1528.6 \text{ nm}$; (f) $\lambda = 1533.1 \text{ nm}$

Fig. 13. The steady electric field's amplitude profiles of the localized modes at the different wavelengths (a) $\lambda = 1465.7 \text{ nm}$; (b) $\lambda = 1479.5 \text{ nm}$; (c) $\lambda = 1483.1 \text{ nm}$; (d) $\lambda = 1527.3 \text{ nm}$; (e) $\lambda = 1528.6 \text{ nm}$; (f) $\lambda = 1533.1 \text{ nm}$.

4 结 论

本文系统地研究了光束在耦合腔波导中的慢光传输特性, 所提出的六边形环形腔耦合波导可以实现五个导带范围内的低群速度光传输. 通过将相邻微腔在垂直于光传输方向上交错排列, 增加了沿着光传输方向上的超元胞长度, 使得导模个数增加到7个, 透过率也有明显提升. 通过打破耦合腔波导结构的对称性改变了导模的个数及其相应的波长范围, 便于调节光束的低群速度传输. 最后, 通过将两种不同结构的微腔组成耦合腔分支波导, 可以在降低光束传输群速度的同时实现对不同频率段光束的通道选择与能量分束. 本文所提出的结构和得出的研究结果可以为光延迟与缓存技术在复杂全光集成回路中的具体应用提供指导.

参考文献

- [1] Yablonovitch E 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 2059
- [2] John S 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 2486
- [3] Fu Y, Zhang J, Hu X, Gong Q 2010 *J. Opt.* **12** 075202
- [4] Djavid M, Monifi F, Ghaffari A, Abrishamian M S 2008 *Opt. Commun.* **281** 4028
- [5] Bahrami P M, Abrishamian M S, Mirtaheri S A 2011 *J. Opt.* **13** 015103
- [6] Chen H M, Meng Q 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 014202 (in Chinese) [陈鹤鸣, 孟晴 2011 物理学报 **60** 014202]
- [7] Zhao X, Liu C, Ma H L, Feng S 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 114208 (in Chinese) [赵绚, 刘晨, 马会丽, 冯帅 2017 物理学报 **66** 114208]
- [8] Danaie M, Far R N, Dideban A 2018 *IJOP* **2** 1
- [9] Zhao T, Lou S, Wang X, Zhou M, Lian Z 2016 *Appl. Opt.* **55** 6428
- [10] Wang H, Yan X, Li S, An G, Zhang X 2017 *J. Mod. Opt.* **64** 445
- [11] Feng S, Wang Y, Wang W 2013 *Optik* **124** 331
- [12] Zhou H, Gu T, Mcmillan J F, Yu M, Lo G, Kwong D L, Feng G, Zhou S, Wong C W 2016 *Appl. Phys. Lett.* **108** 111106
- [13] Yan S, Zhu X, Frandsen L H, Xiao S, Mortensen N A, Dong J, Ding Y 2017 *Nat. Commun.* **8** 14411
- [14] Söllner I, Prindal Nielsen K, Lodahl P, Mahmoodian S, Stobbe S 2017 *Opt. Mater. Express* **7** 43
- [15] Yariv A, Xu Y, Lee R K, Scherer A 1999 *Opt. Lett.* **24** 711
- [16] Olivier S, Smith C, Rattier M, Benisty H, Weisbuch C, Krauss T, Houdré R, Oesterlé U 2001 *Opt. Lett.* **26** 1019
- [17] Feng S, Chen X, Yang D, Yang Y, Wang Y 2010 *J. Opt.* **13** 015705
- [18] Feng S, Yang G, Li Y, Chen X, Yang D, Yang Y, Wang Y, Wang W 2012 *Sci. China Phys. Mech.* **55** 1769
- [19] Feng S, Wang Y Q 2011 *Chin. Phys. B* **20** 289
- [20] Baba T 2008 *Nat. Photonics* **2** 465
- [21] Yee K S 1966 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **14** 302
- [22] Berenger J P 1996 *J. Comput. Phys.* **127** 363

Optical transmission characteristics of multi-band triangular-lattice photonic crystal coupling cavity waveguide based on annular microcavity*

Liu Xing Guo Hong-Mei Fu Rao Fan Hao-Ran Feng Shuai[†] Chen Xiao
Li Chuan-Bo Wang Yi-Quan

(School of Science, Minzu University of China, Beijing 100081, China)

(Received 22 August 2018; revised manuscript received 4 September 2018)

Abstract

The light localization characteristics of the near-infrared triangular-lattice photonic crystal annular microcavity are studied theoretically in this paper. The photonic crystal has a lattice constant of $a = 540$ and it is composed of silicon rods each with a radius of $r = 135$ immersed in air background. The two kinds of annular microcavities are obtained by removing 12 silicon rods which are located respectively at a distance of $2a$ and at a distance of $\sqrt{3}a$ to the central rod. Five resonant wavelengths and the corresponding eigen mode profiles of the microcavity are studied. A coupled resonant optical waveguide is formed by integrating the microcavities with a periodic length of $7a$ in space. The group velocity of light beam propagation within multiple guiding bands are analyzed by the tight-binding approximation method. The maximum and minimum velocity of $0.0028c$ and $0.00082c$ are obtained, where c is the light velocity in vacuum. The light transmittance values and spatial steady distributions of the electric field's amplitude through the structure at several wavelengths within the guiding bands are studied by the finite-difference time-domain method. The results are consistent with that calculated by the plane wave expand method. Interleaving circular microcavities perpendicular to the direction of optical transmission at a lateral distance of $2\sqrt{3}a$, the coupling region between the adjacent microcavities is changed, the difference in group velocity between guiding bands apparently decreases and the transmittance values of two frequency bands are enhanced.

Keeping the size of silicon rods unchanged, two kinds of microcavities are constructed by removing the six rods with the distances of $2a$ and $\sqrt{3}a$ from the center of the central silicon rod, respectively. The resonant wavelengths supported by the above two microcavities are studied. Two coupled-resonant optical waveguides with a periodic length of $7a$ are proposed. Connecting these two coupled cavity optical waveguides with the W1-typed input/output waveguides, the selecting and sharing function of guiding band are finally achieved for wavelengths within different frequency bands. Keeping the group velocity slowing down, a maximum value of one guiding band reaches $0.00047c$.

Keywords: photonic crystal, coupled-resonator optical waveguide, group velocity

PACS: 42.70.Qs, 78.20.Ci, 42.25.Fx

DOI: 10.7498/aps.67.20181579

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61775244, 61675238, 11374378) and the Undergraduate Innovative Test Program of China (Grant Nos. URTP2018110002, URTP2018110009).

[†] Corresponding author. E-mail: fengshuai75@163.com