

微腔旋转对耦合腔光波导群速度的影响*

张建心¹⁾ 屈道宽²⁾ 冯 帅³⁾ 王义全³⁾† 王传奎¹⁾

1) 山东大学物理与电子科学学院, 济南 250014)

2) 中国矿业大学理学院, 北京 100083)

3) 中央民族大学理学院, 北京 100081)

(2009 年 1 月 6 日收到, 2009 年 3 月 3 日收到修改稿)

本文利用多重散射方法和时域有限差分方法, 理论研究了微腔旋转对二维正方晶格光子晶体耦合腔光波导群速度的影响. 研究表明, 通过旋转微腔可以造成传播模的模式分裂, 从而实现群速度的降低. 当微腔旋转角度为 45° 时, 传播模的群速度最小, 两个传播模的群速度分别达到了 0.0016 倍和 0.0009 倍于真空光速, 与微腔未旋转时相比降低了一个数量级. 上述两种传播模群速度的差别是由传播模的空间对称性决定的.

关键词: 二维光子晶体, 耦合腔光波导, 群速度

PACC: 4270Q, 4280L

1. 引 言

光子晶体^[1,2]是由两种或者两种以上折射率不同的介质在空间周期性排列而形成的一种人工结构. 光子晶体的特征是具有光子禁带, 即特定频率范围的电磁波不能够在光子晶体中传播. 这一重要特性使我们能够像半导体中控制电子的运动一样控制电磁波在光子晶体中的传播^[3,4]. 通过在光子晶体中引入不同的缺陷, 能够制成共振腔^[5,6]、滤波器^[7]、光波导^[8,9]和超快光开关^[10,11]等许多新颖的光子器件.

基于周期结构光子晶体的光波导可以分为两种, 一种是由在完整光子晶体中引入线缺陷构成, 另一种是由相距一定距离的具有强局域特性的光学微腔排列构成. 第二种光波导又称为耦合腔光波导^[12,13], 与第一种光波导相比, 该种光波导有许多独特的光学特性, 比如具有较低的群速度, 这为光子晶体在光通信中的实际应用提供了新的可能. 另外耦合腔光波导能够同时实现低的群速度和强的光场强度, 因此可以在脉冲压缩^[14]、随波长强烈变化的延迟线^[15]、增强自发辐射^[16]等应用中发挥独特作用^[17].

目前人们已经广泛研究了电磁波在基于周期结

构光子晶体的耦合腔光波导中的传输特性. 研究表明, 可以实现光在周期结构光子晶体耦合腔光波导中传播时, 其群速度数值与真空中光速相比降低两个数量级^[18]. 但是该群速度的大小还不能满足某些光子器件的要求, 因此, 如何进一步降低电磁波在光子晶体耦合腔光波导中的群速度成为了该领域的一个重要问题. 我们知道, 群速度的大小与相邻紧束缚缺陷模之间的耦合强度存在着非常紧密的关系. 本文通过有间隔地旋转由点缺陷构成的微腔, 减弱了相邻两个点缺陷之间的耦合强度, 实现了耦合腔光波导中的传播模发生模式分裂, 获得了更低的群速度. 当旋转角度达到 45° 时, 传播模的群速度最小.

2. 理论计算和数值分析

我们首先研究了如图 1 所示的耦合腔光波导. 其中介质柱的介电常数 $\epsilon = 8.6$, 背景为空气, 晶格常数 $a = 10.0$ mm, 介质柱的半径 $r = 3.0$ mm. 沿着光的传播方向每隔两个介质柱去掉一根介质柱, 从而形成耦合腔光波导. 我们利用多重散射方法, 理论计算了该种耦合腔光波导的能量传输特性, 结果如图 2(a) 所示. 为了方便比较, 我们利用同样的方法模拟计算了光通过完整光子晶体的能量传输特性, 如图 2(a) 中的虚线所示. 从图 2(a) 中可以清楚地看

* 国家自然科学基金(批准号: 30674185, 10904176)和国家重点基础研究发展计划(批准号: 2006CB921702)资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: yiquanwang@gmail.com

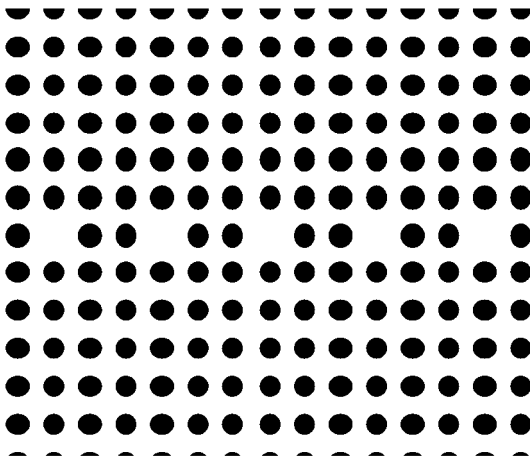


图1 基于正方晶格光子晶体的耦合腔光波导

到,对于我们所设计的耦合腔光波导,在完整光子晶体的光子禁带中出现了一条非常窄的通带.耦合腔光波导的传播模是由这些微腔的局域模式之间发生耦合实现的.这种耦合方式类似于固体物理中的紧束缚近似^[19].如果我们只考虑临近微腔之间的耦合^[13,14],则无限长耦合腔光波导的色散关系可以表示为

$$\omega(K) = \Omega[1 + \kappa \cos(KR)], \quad (1)$$

其中 ω 是传播模的角频率, K 是沿波导方向传播的传播模的波矢, Ω 为单个微腔局域模式的本征角频率, κ 为耦合强度系数, R 为两个相邻微腔之间的距离.从(1)式我们可以得到群速度

$$v_g(K) = -\Omega R \kappa \sin(KR), \quad (2)$$

对于我们所讨论的问题,重要的是群速度的大小,因此在下面的计算过程中对其取绝对值.

我们利用时域有限差分方法,理论计算了上述结构耦合腔光波导的色散关系,结果如图2(b)所示.图2(c)是该种传播模的群速度,从中可以看出群速度数值比真空中光速降低了两数量级.

由(2)式可知,传播模的群速度与相邻微腔中的局域模之间的耦合强度成正比,而相邻微腔中局域模的耦合强度与局域模的场分布有关^[13].为进一步降低耦合腔光波导中传播模的群速度,我们模拟计算了光子晶体单个点缺陷的场分布,结果如图3所示.图3(a)为微腔未旋转时局域模的场分布,这时场分布是关于通过缺陷中心的水平轴对称的.图3(b)为微腔旋转 5° 后局域模的场分布,从中我们可以看出,这时场分布相对于过微腔中心的水平轴不再呈对称分布了.图3(c)为微腔旋转 20° 后局域模的

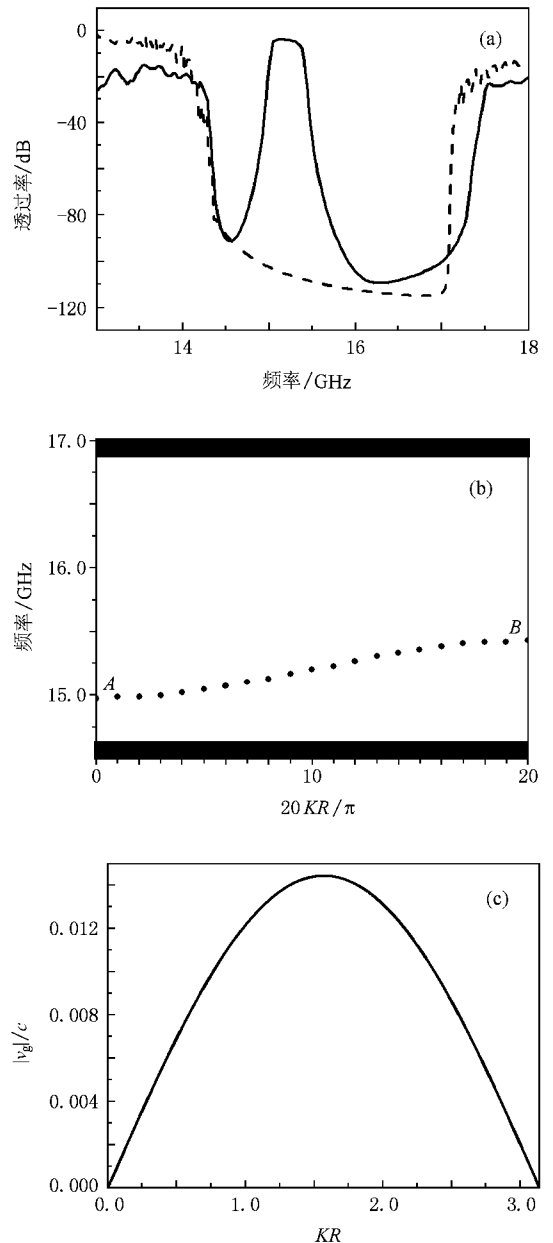


图2 微腔未旋转时耦合腔光波导的透过谱(a),色散关系(b)以及传播模的群速度(c).图中 K , R 分别为波矢及两相邻点缺陷的之间的距离

场分布,从中可以看出场分布随着微腔旋转角度的增加而发生了更大的变化.如果让未旋转的微腔和旋转后的微腔交替排列而发生耦合,由于它们之间场的重叠积分与微腔未旋转时场的重叠积分相比会变小,这样就可能降低相邻微腔的耦合强度,从而实现传播模群速度进一步的降低.

根据上述的理论分析,我们设计了如图4(a)所示的耦合腔光波导结构.从左到右的第偶数个微腔与图1中对应位置的微腔相比旋转了 5° .光通过该

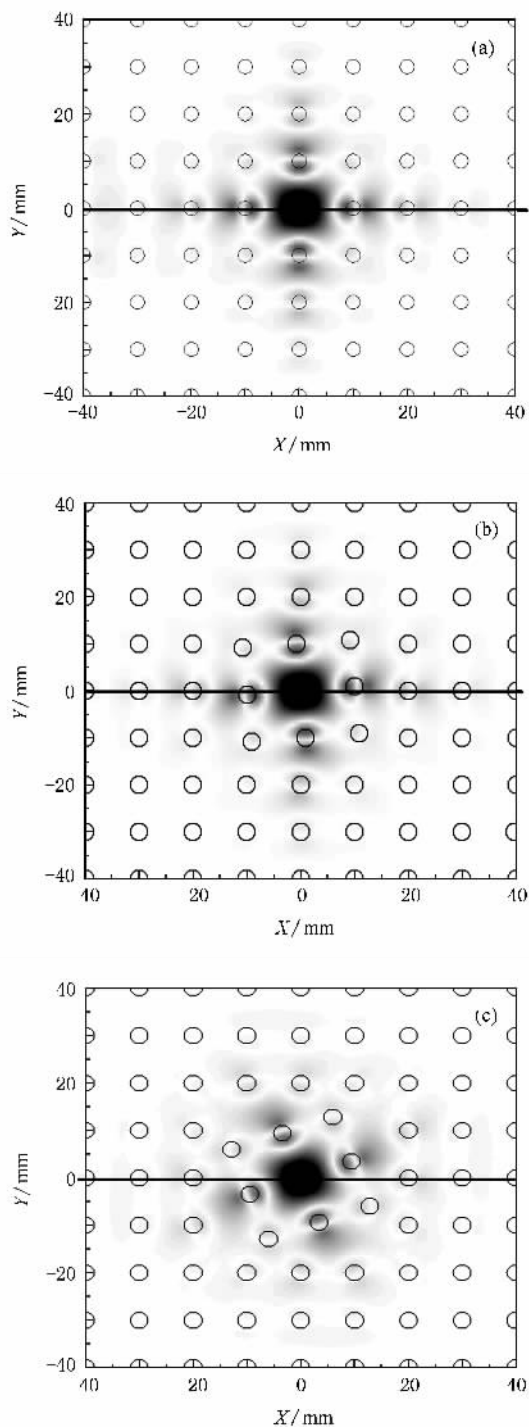


图3 微腔旋转不同角度时局域模的场分布 (a) 0° (b) 5° (c) 20°

种耦合腔光波导的透过谱如图 4(b) 中虚线所示, 其中用实线给出了图 1 所示耦合腔光波导的透过谱. 从图 4(b) 中可以看出, 微腔旋转后传播模的微带变窄, 说明相邻微腔的耦合强度得到了降低. 为了精确

地计算出传播模的群速度, 我们用时域有限差分方法计算了该种耦合腔光波导的传播模式. 图 4(c) 中空点组成的曲线 AB , CD 表示了调整后耦合腔光波导的传播模, 实心圆点组成的曲线是图 1 所示耦合腔光波导的传播模式. 对比两者可以看出, 耦合腔光波导中部分微腔的旋转造成了传播模式的分裂. 图 4(d) 给出了相应的群速度, 可以看出, 通过有选择地旋转耦合腔光波导中的微腔, 可以使耦合腔光波导中传播模的群速度进一步降低.

两个传播模式在图 4(b) 所示微带位置应该有两个峰值构成, 但在图 4(b) 中却看不出这一点. 图 4(d) 中两个传播模式也只对应一条群速度曲线. 之所以出现这种状况可能是因为旋转角度较小, 耦合强度仍然较强, 从而使得两个传播模式叠加在一起. 为了证实这一点, 我们增大了微腔的旋转角度, 由 5° 变为 20° , 形成如图 5(a) 所示的耦合腔光波导. 从图 5(b) 所示的透过谱曲线看出, 此时微带变成了两个, 并且每个微带的宽度都很小. 说明相邻微腔的耦合强度得到了进一步的降低. 群速度曲线也变为两条, 传播模式 AB 、 CD 所对应的群速度的峰值分别为 $0.0028c$ 、 $0.0024c$, 如图 5(d) 所示.

两个传播模的差别可以从传播模式的对称性来理解. 图 5(a) 所示的耦合腔光波导可以看成是包含两个微腔的单元周期排列而成, 每个单元中的两个局域模首先耦合, 形成如图 6 所示的对称模和反对称模. 不同单元的对称模和反对称模分别耦合, 形成两个传播模.

比较图 4 和图 5 可以看出, 传播模的群速度和微腔的旋转角度存在着密切的关系. 为系统地研究旋转微腔对群速度的影响, 我们计算了多种旋转角度下耦合腔光波导中的群速度, 结果如图 7 所示. 可以看出, 当旋转角度为 45° 时, 传播模的群速度最低, 两个传播模所对应的群速度分别为 $0.0016c$ 和 $0.0009c$. 通过微腔中局域模的场分布可以解释这一结果. 从图 3(a) 看出, 微腔中局域模的电场是四重对称的, 微腔未旋转时, 两局域模完全耦合, 微腔旋转时, 只有部分耦合, 且耦合强度随旋转角度的增大而减小. 当旋转角度达到 45° 时, 两相邻微腔之间的耦合强度最小. 当旋转角度大于 45° 时, 分布在另一方向的电场参与耦合, 增加了耦合强度. 故当旋转角度为 45° 时, 传播模的群速度为极小值.



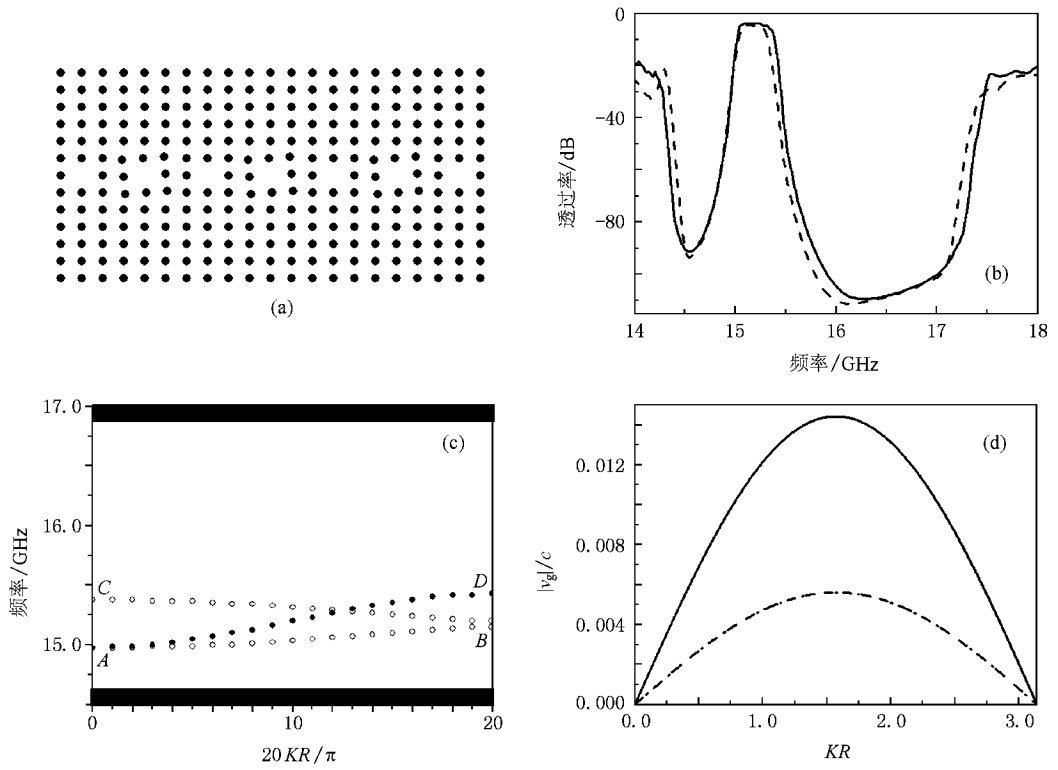


图 4 微腔旋转 5° 时的耦合腔光波导 (a) 及其透过谱 (b), 传播模式 (c) 群速度 (d)

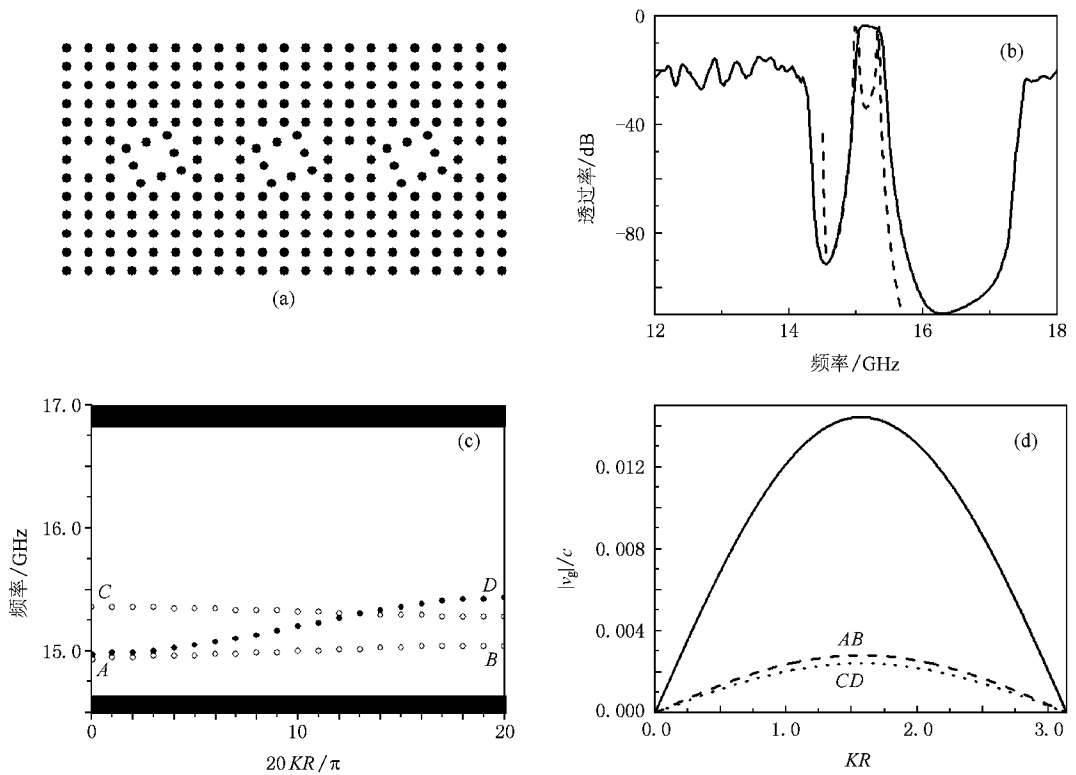


图 5 微腔旋转 20° 时的耦合腔光波导 (a) 及其透过谱 (b), 两种传播模式 (c) 群速度 (d)

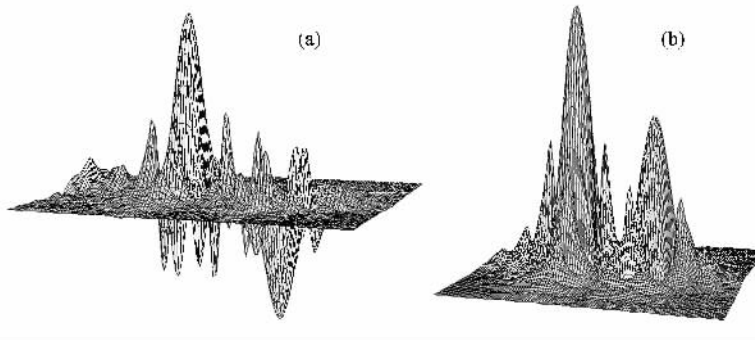


图6 微腔旋转 20° 时耦合腔光波导的两种传播模式 (a)反对称模 (b)对称模

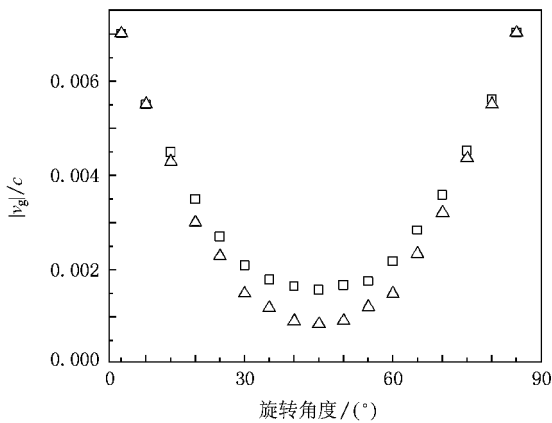


图7 群速度与旋转角度的关系

3. 结 论

我们利用多重散射方法和时域有限差分方法,系统研究了光在二维正方晶格光子晶体耦合腔光波导中的传输特性.通过有选择地旋转微腔,实现了群速度的进一步降低.微腔旋转降低了相邻微腔之间的耦合特性,使得耦合腔光波导的传播模式发生分裂,实现了传播模式群速度的降低.当选定微腔的旋转角度为 45° 时,群速度降低到最小值,两个传播模式所对应的群速度分别为 $0.0016c$ 和 $0.0009c$,与未旋转前相比降低了一个数量级.这为降低光子晶体耦合腔光波导的群速度并实现光延迟器件提供了一个新的思路和方法.

- [1] Yablonovitch E 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 2059
- [2] John S 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 2486
- [3] Joannopoulos J D, Meade R D, Winn J N 1995 *Photonic Crystals* (Princeton: Princeton University Press) p4
- [4] Krauss T F, de La Rue R M 1999 *Prog. Quantum Electron.* **23** 51
- [5] Meade R D, Devenyi A, Joannopoulos J D, Alerhand O L, Smith D A, Kash K 1994 *J. Appl. Phys.* **75** 4753
- [6] Okano M, Kako S, Noda S 2003 *Phys. Rev. B* **68** 235110
- [7] Krauss T F, Labilloy D, Scherer A, de La Rue R M 1998 *Proc. SPIE* **3278** 306
- [8] Sigalas M M, Biswas R, Li Q, Crouch D, Leung W, Jacobs-Woodbury R, Laogh B, Nielsen S, McCalmont S, Tuttle G, Ho K M 1997 *Microwave Opt. Technol. Lett.* **15** 153
- [9] Mekis A, Chen J C, Kurland I, Fan S, Villeneuve P R, Joannopoulos J D 1996 *Phys. Rev. Lett.* **77** 3787
- [10] Villeneuve P R, Abrams D S, Fan S, Joannopoulos J D 1996 *Opt. Lett.* **21** 2017
- [11] Hu X Y, Liu Y H, Tie J, Cheng B Y, Zhang D Z 2005 *Appl. Phys. Lett.* **86** 121102
- [12] Olivier S, Smith C, Rattier M, Benisty H, Weisbuch C, Krauss T, Houdre R, Oesterle U 2001 *Opt. Lett.* **26** 1019
- [13] Yariv A, Xu Y, Lee R K, Scherer A 1999 *Opt. Lett.* **24** 711
- [14] Martinez A, Garcia A, Sanchis P, Marti J 2003 *J. Opt. Soc. Am. A* **20** 147
- [15] Bayindir M, Ozbay E 2002 *Opt. Express* **10** 1279
- [16] Dowling J P, Scalora M, Bloemer M J, Bowden C M 1994 *J. Appl. Phys.* **75** 1896
- [17] Wang Y Q 2006 *Europhys. Lett.* **74** 261
- [18] Wang Y Q, Liu J, Zhang B, Feng S, Li Z Y 2006 *Phys. Rev. B* **73** 155107
- [19] Ashcroft N W, Mermin N D 1976 *Solid State Physics* (Philadelphia: Holt Saunders) p176

Effect of rotating cavities on the group velocities of the coupled-resonator optical waveguides^{*}

Zhang Jian-Xin¹⁾ Qu Dao-Kuan²⁾ Feng Shuai³⁾ Wang Yi-Quan^{3)†} Wang Chuan-Kui¹⁾

1 *College of Physics and Electronics, Shandong Normal University, Jinan 250014, China*

2 *College of Science, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China*

3 *College of Science, Minzu University of China, Beijing 100081, China*

(Received 6 January 2009; revised manuscript received 3 March 2009)

Abstract

In this article, the influence of cavity rotation on the group velocities of the coupled-resonator optical waveguides, which consists of the two-dimensional square-lattice photonic crystal, is studied theoretically by the multiple-scattering method and the finite-difference time-domain method. Simulation results show that the original single propagation mode becomes two modes when the cavities within the waveguide are rotated alternately, and the group velocities of the modes is reduced greatly. When the rotated angle of the selected cavities is 45° , the group velocities of the propagating modes can be reduced by one order of magnitude. Compared with that of the coupled-resonator optical waveguide without rotation of selected cavities, the two velocities get their minimum value, which are $0.0016c$ and $0.0009c$ respectively. The difference between them is determined by the symmetry of the propagating modes.

Keywords : 2D photonic crystal, coupled-resonator optical waveguide (CROW), group velocity

PACC : 4270Q, 4280L

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10674185, 10904176) and the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant No. 2006CB921702).

[†] Corresponding author. E-mail: yiquanwang@gmail.com