

文章编号:1004-4213(2010)04-0648-5

金属嵌入对三角晶格耦合腔光波导群速度的影响*

屈道宽¹, 张建心^{2,3}, 冯帅³, 王义全^{3,†}, 李英骏¹

(1 中国矿业大学 理学院, 北京 100083)

(2 山东师范大学 物理与电子科学学院, 济南 250014)

(3 中央民族大学 理学院, 北京 100081)

摘 要:利用多重散射法和时域有限差分法理论,研究了二维三角晶格光子晶体耦合腔光波导的传输特性.理论模拟结果表明,在耦合腔光波导中嵌入半径很小的理想金属丝,能有效地减弱相邻点缺陷之间的耦合强度,实现了比真空中光速小三个数量级的群速度.

关键词:二维光子晶体;耦合腔波导;时域有限差分方法;群速度

中图分类号:0436

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20103904.0648

0 引言

由于光子晶体具有许多崭新的性质和广阔的应用前景,目前光子晶体已经成为应用物理领域的研究热点.与此同时光子晶体也打开了许多令人振奋的可能性,如电磁波在光子晶体中传输时的自准直现象、负折射现象^[1],以及能够实现较强的光子局域^[2-3].另外还可以用来制作多种性能优良的新型光无源和有源器件,如光子晶体滤波器^[4-5]、光子晶体激光器^[6]、光子晶体波导和超高速光开关^[7-8]等,进一步加速了光子晶体的研究.

有两种基于光子晶体的光波导:一种是在完整的光子晶体中引进线缺陷;另一种是由一系列的受限限制的点缺陷或微腔构成,通常叫做耦合光波导^[9].在第二种光波导中,光信号在微腔中有局域的趋势,微腔之间的弱耦合使光信号沿光波导在微腔之间共振隧穿.和传统的依靠全反射以及布喇格反射传输光信号的介质光波导不同,光信号在耦合腔光波导中跳跃式传播,由于其特殊的传输方式,光信号在这种光波导中的群速度比传统光波导中光信号的群速度低许多.

目前人们广泛研究了基于周期结构光子晶体的耦合腔光波导.研究发现,群速度和相邻的紧束缚缺陷模之间的耦合强度有非常紧密的关系.一般来说,在周期结构光子晶体耦合腔光波导中,群速度的最大值可以比真空中光速低两个数量级^[10].但是该群

速度还不能满足某些光子器件的要求,因此,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.通常降低耦合腔光波导群速度的方法有:利用耦合缺陷模的分组、改变微腔之间散射体的特性以及改变微腔的方位等.本文通过改变微腔之间的散射体的材料,从而减弱了相邻两个点缺陷之间的耦合强度,实现了比真空中光速小三个数量级的群速度.

1 结果和分析

作为对比,本文首先研究了如图 1 的耦合腔光波导.

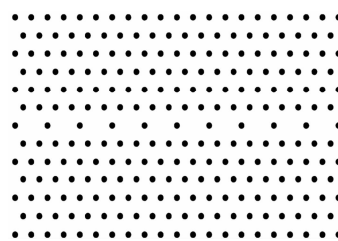


图 1 基于二维三角晶格光子晶体的耦合腔光波导
Fig.1 Coupled-resonator waveguides based on the two-dimensional triangular-lattice photonic crystal

图中介质柱的介电常量 $\epsilon = 8.6$,背景为空气,晶格常量 $a = 10.0$ mm,介质柱的半径 $r = 3.0$ mm.沿着光传播方向每隔一个介质柱去掉一根介质柱,构成一系列点缺陷,形成耦合腔光波导.为了对比,本文改变介质柱的半径,并利用多重散射方法^[11]模拟了多种耦合腔光波导的能量传输特性,结果如图 2.图 2(a)、(b)中的实线为相邻微腔之间为普通介质柱时的能量传输曲线.图 2(a)中的虚线 A、B 分别是将微腔之间的介质柱改变为半径 0.1 mm 和 0.2 mm 理想金属丝(对电磁波无吸收)时的能量传输曲

* 国家自然科学基金(10674185、10904176)和国家重点基础研究发展计划(2006CB921702、2007CB310403)资助

† Tel:010-68932422 Email:yiquanwang@gmail.com
收稿日期:2009-09-07 修回日期:2009-11-25

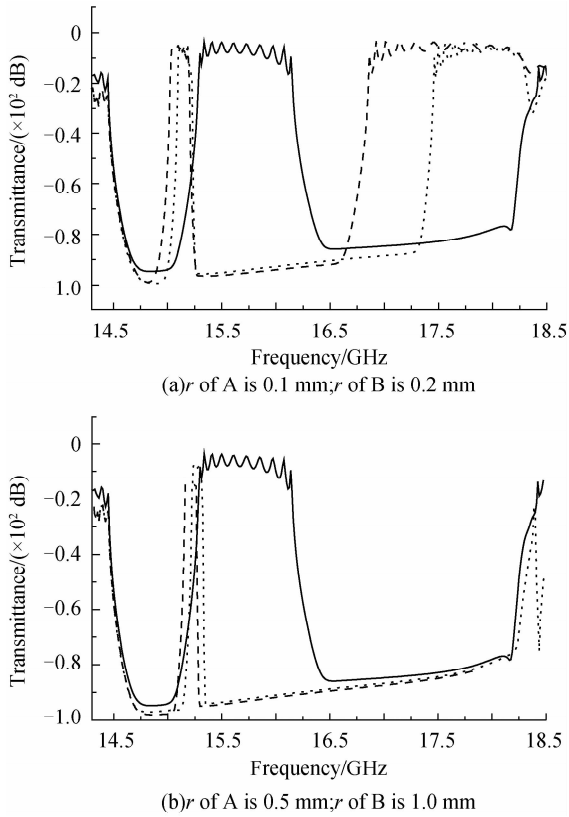


图2 耦合腔光波导的能量传输曲线
Fig. 2 The energy transmission curve of coupled-resonator waveguide

线. 图2(b)中的虚线 A、B 表示金属丝的半径 r 分别为 0.5 mm 和 1.0 mm 时的能量传输曲线.

从图中可以清楚地看到,对于本文所设计的耦

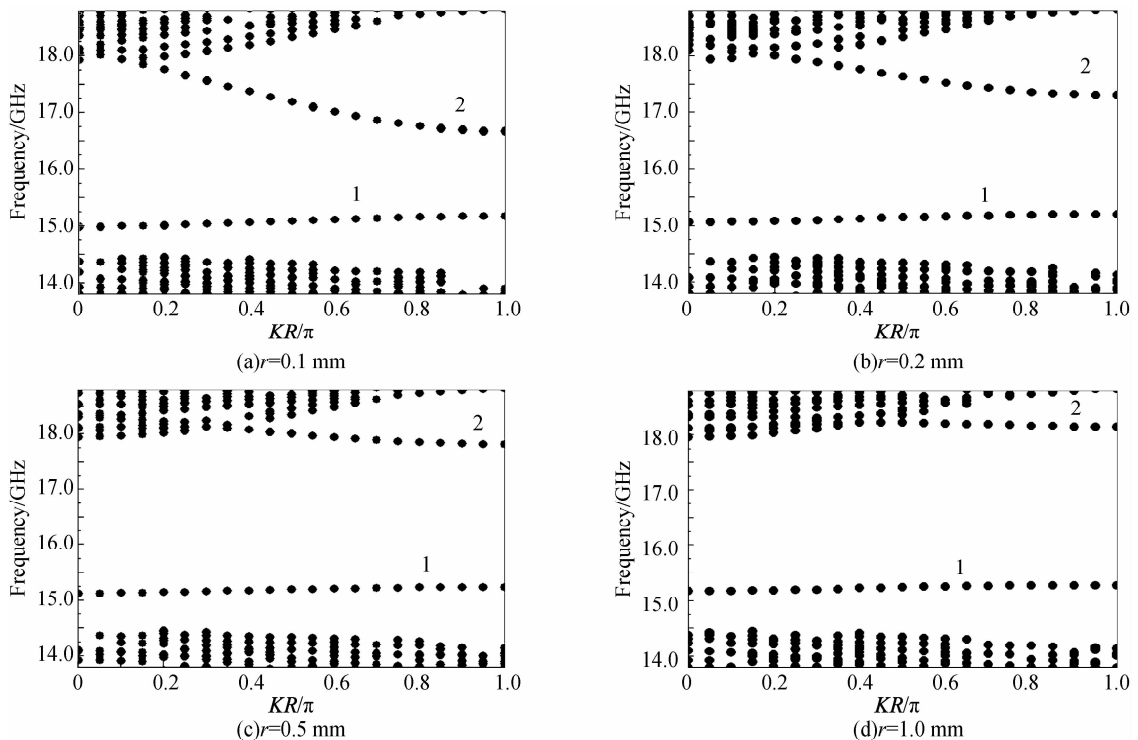


图3 不同金属半径时耦合腔光波导的色散关系

Fig. 3 The dispersion relations of coupled-resonator waveguides for different metal radius

合腔光波导,在光子禁带中存在一条微带.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.这种耦合类似于固体物理中的紧束缚近似.如果只考虑临近微腔之间的耦合^[12],则无限长耦合腔光波导的色散关系表示为

$$\omega(\mathbf{K}) = \Omega [1 + \kappa \cos(\mathbf{K}\mathbf{R})] \quad (1)$$

式中 ω 是传播模的角频率, \mathbf{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,为两个相邻微腔之间的距离, κ 为耦合强度系数,可以表示为

$$\kappa = \int d^3r [\epsilon_0(r - \mathbf{R}e_z) - \epsilon(r - \mathbf{R}e_z)] \times E_{\Omega}(r) \cdot E_{\Omega}(r - \mathbf{R}e_z)$$

式中 e_z 沿着波导中微腔周期性排列的方向.

本文利用时域有限差分方法^[13]计算此耦合腔光波导沿着 $\Gamma\mathbf{R}$ 方向的色散关系,在计算程序中,满足金属表面切线电场为零这一边界条件.计算结果如图3.图3中(a)~(d)是微腔之间的金属丝半径 r 分别为 0.1 mm、0.2 mm、0.5 mm 和 1.0 mm 时的色散关系.

从图3可以看出电磁波在本文的模拟频率范围内,随着金属半径的增加,传播模1所对应的微带的频率范围变小,同时使得禁带的频率范围变大,与图2的结果一致.

由于沿着波导方向具有周期性结构,波矢可以在 $[0, \pi/R]$ 范围内取值.传播模的频率宽度为

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

从式(2)可以看出 $\Delta\omega$ 随耦合强度而变化. 由图 3 还可以看出, 增加金属丝的半径对传播模 2 的耦合强度影响比传播模式 1 的大, 因此传播模 2 的频率范围变化也比较大.

由式(1)和(2)可以得到群速度

$$v_g(K) = -\Omega R \kappa \sin(KR) = -\frac{\Delta\omega \kappa R}{2|\kappa|} \sin(KR) \quad (3)$$

当微腔之间的介质柱替换为金属丝时, 利用式(3)模拟计算得出传播模的群速度如图 4. 图 4(a)、(b)中实线是普通介质柱时传播模的群速度. 图 4(a)中虚线 A、B 表示金属丝半径 r 分别为 0.1 mm 和 0.2 mm, (b)中虚线 A、B 表示金属丝半径 r 分别为 0.5 mm 和 1.0 mm.

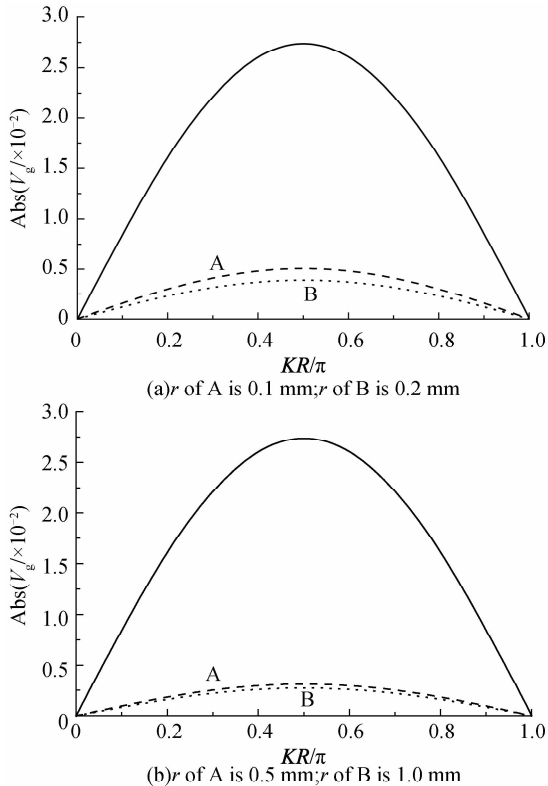


图 4 耦合腔光波导传播模的群速度

Fig. 4 Group velocity of transmission mode of coupled-resonator waveguide

图 4 结果显示该传播模群速度绝对值的峰值在微腔之间是普通介质柱时为 $0.0274c$, 比真空中光速降低了两个数量级. 而将微腔之间的介质柱替换为较细的金属丝时, 传播模的群速度被进一步降低, 当金属丝的半径分别为 0.1 mm、0.2 mm、0.5 mm 和 1.0 mm 时所对应的群速度绝对值的峰值分别为 $0.0050c$ 、 $0.0039c$ 、 $0.0031c$ 和 $0.0027c$, 比真空中光速降低了三个数量级.

由式(2)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. 因此, 为进一

步对比分析耦合腔光波导中传播模的群速度, 本文又模拟了第二种如图 5 的耦合腔光波导.

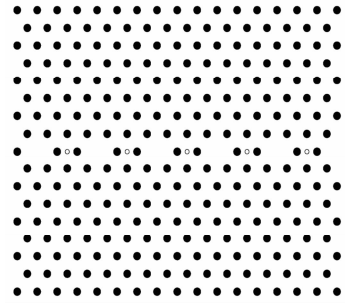


图 5 基于二维三角晶格光子晶体的耦合腔光波导

Fig. 5 The coupled-resonator waveguides based on the two-dimensional triangular-lattice photonic crystal

其中介质柱的介电常量 $\epsilon = 8.6$, 背景为空气, 晶格常量 $a = 10.0$ mm, 介质柱的半径 $r = 3.0$ mm. 沿着光传播方向每隔两个介质柱去掉一根介质柱, 并且在紧挨着的两个介质柱之间嵌入一根半径很小的金属丝, 进一步降低微腔之间的耦合. 由于相邻的两个耦合腔的间距增大, 它们之间场的重叠积分与第一种结构相比变小, 这样就可以降低相邻微腔的耦合强度和传播模的群速度.

按照本文分析过程, 模拟出这种耦合腔光波导的能量传输特性和传播模的群速度, 结果如图 6. 图 6(a)为能量传输曲线, (b)为传播群速度. 其中图 6(a)、(b)的实线为没有嵌入金属丝时的曲线, 虚线

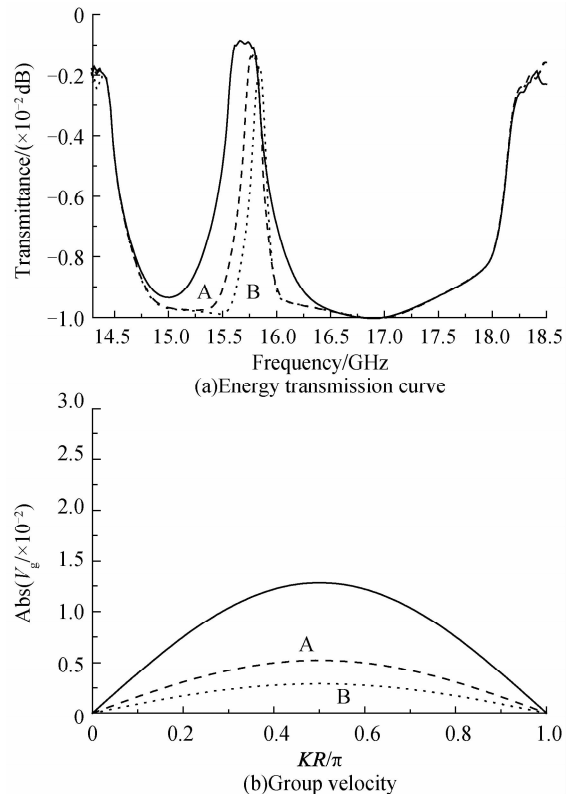


图 6 耦合腔光波导的能量传输及传播模的群速度

Fig. 6 The energy transmission curve and Group velocity of transmission mode of coupled-resonator waveguide

A、B 是嵌入半径 r 分别为 0.2 mm 和 0.5 mm 细金属丝时的曲线。

从图 6(a)中可以清楚地看到,对于所设计的第二种耦合腔光波导,在光子禁带中也存在一条微带.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.图 6(b)结果显示该传播模群速度绝对值的峰值在没有嵌入细金属丝时为 $0.0128c$.而随着嵌入金属丝的半径的增加,该传播模的群速度逐渐减小.当嵌入金属丝的半径分别为 0.2 mm 和 0.5 mm 时所对应群速度绝对值的峰值分别为 $0.0052c$ 和 $0.0029c$.

2 结论

本文利用多重散射方法和时域有限差分方法,研究了二维三角晶格光子晶体耦合腔光波导的传输特性.通过有选择地在两个相邻微腔中间嵌入不同半径的细金属丝,实现了传播模群速度的降低.本文实现了比真空中的光速小三个数量级的群速度.这种研究为如何降低光子晶体耦合腔波导的群速度提供了一个新的思路和方法.

参考文献

- [1] ZHANG Shi-chang, TANG Zhi-xiang, WEN Shuang-xi. Anomalous propagation in photonic crystals with square rods [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(7):1717-1721.
张世昌,唐志祥,文双喜. 正方介质柱光子晶体中异常传输现象研究[J]. 光子学报, 2009, **38**(7):1717-1721.
- [2] LIU Zheng-dong, LIN Yu. Quantum interference between virtual and real photons of the spontaneous emission in an atom embedded in photonic band gap structure[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2001, **28**(11):991-993.
刘正东,林宇. 嵌于光子晶体中原子自发辐射的虚实光子量子干涉[J]. 中国激光, 2001, **28**(11):991-993.
- [3] XU Xing-sheng, CHEN Hong-da, ZHANG Dao-zhong. Photon localization in amorphous photonic crystal[J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(12):6430-6434.
许兴胜,陈弘达,张道中. 非晶光子晶体中的光子局域化[J]. 物理学报, 2006, **55**(12):6430-6434.
- [4] WANG Hai-song, LI Kang, KONG Fan-min, et al. Design and simulation of high effective multi-channel photonic crystal filters[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(6):1122-1125.
王海松,李康,孔凡敏,等. 高效多信道光子晶体滤波器的设计与仿真[J]. 光子学报, 2008, **37**(6):1122-1155.
- [5] LIU Qi-neng. Theoretical study of multi-channel polarization tunable filter of photonic crystal[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(2):305-309.
刘启能. 光子晶体多通道可调谐偏振滤波器的理论研究[J]. 光子学报, 2008, **37**(2):305-309.
- [6] LI Lu, SHAO Ye, LIU Jun-qi, et al. One-dimensional INP-based photonic crystal quantum cascade laser emitting at 5.36 μm [J]. *Journal of Semiconductors*, 2008, **29**(7):1278-1280.
李路,邵烨,刘俊岐,等. 5.36 μm InP 基一维光子晶体量子级联激光器[J]. 半导体学报, 2008, **29**(7):1278-1280.
- [7] HU Xiao-yong, LIU Yuan-hao, TIAN Jie, et al. Ultrafast all-optical switching in two-dimensional organic photonic crystal [J]. *Appl Phys Lett*, 2005, **86**(12):1102.
- [8] LIU Yuan-hao, HU Xiao-yong, ZHANG Dong-xiang, et al. Subpicosecond optical switching in polystyrene opal[J]. *Appl Phys Lett*, 2005, **86**(15):1102.
- [9] OLIVIER S, SMITH C, RATTIER M, et al. Miniband transmission in a photonic crystal coupled-resonator optical waveguide[J]. *Opt Lett*, 2001, **26**(13):1019-1021.
- [10] WANG Yi-quan, LIU Juan, ZHANG Bo, et al. Simulations of defect-free coupled-resonator waveguides constructed in 12-fold quasiperiodic photonic crystals[J]. *Phys Rev B*, 2006, **73**(15):5107.
- [11] FENG Shuai. Theoretical and experimental photonic crystal preparation[M]. Beijing: Press of the Central University for Nationalities, 2008:105-114.
冯帅. 光子晶体理论计算与实验制备[M]. 北京:中央民族大学出版社, 2008:105-114.
- [12] MARTINEZ A, GARCIA A, SANCHIS P, et al. Group velocity and dispersion model of coupled-cavity waveguides in photonic crystals[J]. *JOSA A*, 2003(1):147-150.
- [13] GE De-biao. Finite-difference time-domain electromagnetic method[M]. Xian: Xidian University Press, 2002.
葛德彪. 电磁波时域有限差分方法[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2002.

Influence on the Group Velocities of Triangular Lattice Coupled-resonator Optical Waveguides by Inserting Metal Wire

QU Dao-kuan¹, ZHANG Jian-xin^{2,3}, FENG Shuai³, WANG Yi-quan³, LI Ying-jun¹

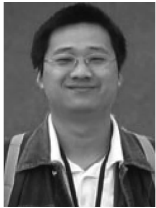
(1 College of Science, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China)

(2 College of Physics and Electronics, Shandong Normal University, Jinan 250014, China)

(3 College of Science, Minzu University of China, Beijing 100081, China)

Abstract: The transmission characteristics of the coupled-resonator optical waveguides based on the two-dimensional triangular-lattice photonic crystal are studied by the multiple-scattering methods and the finite-difference time-domain method. Through selective inserting the rods with different radius between two adjacent microcavities, the coupling intensity between the two adjacent point defects is weakened, and the group velocity can be further reduced by three orders of magnitude.

Key words: Two dimensional photonic crystal; Coupled-resonator waveguides; Finite-difference time-domain method; Group velocity



QU Dao-kuan was born in 1983. Now he is a graduate student at China University of Mining and Technology, and his main research interests focus on coupled-resonator waveguides of photonic crystal.



LI Ying-jun was born in 1961. He works as a professor with the Ph. D. degree, and his research interests focus on optic and laser plasma.