

# 二维光子晶体耦合腔阵列的慢波效应研究\*

杜晓宇 郑婉华<sup>†</sup> 任 刚 王 科 邢名欣 陈良惠

(中国科学院半导体研究所纳米光电子实验室, 北京 100083)

(2007 年 3 月 7 日收到 2007 年 5 月 10 日收到修改稿)

设计了一种六角晶格二维光子晶体耦合腔阵列, 平面波展开法计算能带表明, 处于禁带中的耦合缺陷腔模的色散曲线在光子晶体平面内所有  $k$  矢量方向更加平坦. 模拟了横电波沿  $\Gamma K$  方向的透射谱. 与光子晶体单缺陷腔相比, 耦合腔阵列结构的缺陷腔模透射率提高三个量级以上, 而群速度降低一个量级, 得到  $0.007c$  的结果. 该慢波效应在构造微型可调谐光延迟器和低阈值光子晶体激光器等方面具有潜在的应用前景.

关键词: 光子晶体, 耦合腔阵列, 慢波, 透射率

PACC: 7820P, 4282

## 1. 引 言

低群速度的获得在光延迟器和低阈值激光器等多种器件应用中都是极其重要的<sup>[1,2]</sup>. 光子晶体作为一种介质折射率周期分布的材料, 可以有效地调制光子态密度和色散曲线, 一经提出便受到了广泛的关注<sup>[3-8]</sup>. 目前国际上采用在二维光子晶体结构中引入线缺陷波导的方法, 依靠禁带中导引模的平坦带边获得低群速度<sup>[9,10]</sup>. 但是, 这种低群速度仅局限于某一个特定方向的很窄的波矢范围内. 另外, 由于群速度随波矢剧烈变化带来的群速度色散(GVD)效应, 使得入射光脉冲波容易失真<sup>[11]</sup>. 最近, 一种新型的四方晶格二维光子晶体耦合腔阵列结构的提出, 在获得低群速度的同时, 较好地解决了上面两个问题<sup>[12]</sup>. 但是, 由于四方晶格孔结构对于 TE 模带隙很窄, 导致损耗很大, 不利于光的传输. 本文设计了一种六角晶格二维光子晶体耦合共振腔阵列(coupled photonic crystal resonator arrays, CPCRA)的结构. 我们首先通过平面波展开法(PWE)分析了该结构的光子态分布, 再结合二维时域有限差分法(2D-FDTD)模拟了共振腔模  $\Gamma K$  方向的光传输特性, 给出禁带频域附近的透射谱. 与单缺陷腔结构相比, CPCRA 的透射率明显提高. 通过计算透射谱的

振荡周期, 得到群速度低至  $0.007c$  ( $c$  为真空光速)的良好结果.

## 2. 模拟与分析

CPCRA 是在完整六角晶格光子晶体空气孔中等间隔填充孔形成的, 如图 1(a)所示. 利用平面波展开法计算能带时, 需要先确定一个既满足空间平移对称性, 又能反映晶格结构旋转对称性的计算元胞. 因此, 我们选择的超元胞的对称性要等于或高于六角晶格的对称性. 在模拟计算中, 我们选取理想二维介质板的折射率为 3.5, 对应于 Si 或 GaAs 材料在光波频段的折射率. 晶格周期  $a = 0.4 \mu\text{m}$ , 圆孔半径  $r = 0.4a$ . 在这一填充因子下, 电磁场 TE 模的偶极, 四极, 单极和六极的缺陷模式都可以在禁带中被激发. 通过平面波展开法计算的光子能带结构如图 1(b)所示, 归一化频率定义为  $\omega a/2\pi c = a/\lambda$ ,  $\omega$  为光波频率,  $c$  为真空光速,  $\lambda$  为光波长, 可以看到光子禁带位于归一化频率从 0.240 到 0.415 的区域. 光子禁带中的四种缺陷模式的场分布如图 1(c)所示.

CPCRA 能带结构最显著的特征是处于禁带频域内的缺陷模式在任意波矢方向都非常平坦. 意味着在这些频率位置光子态密度很高, 群速度非常低. 与单缺陷腔的能带结构相比, CPCRA 的缺陷模位置

\* 国家自然科学基金重点项目(批准号:10634080)和国家自然科学基金(批准号:10677046)资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: whzheng@semi.ac.cn

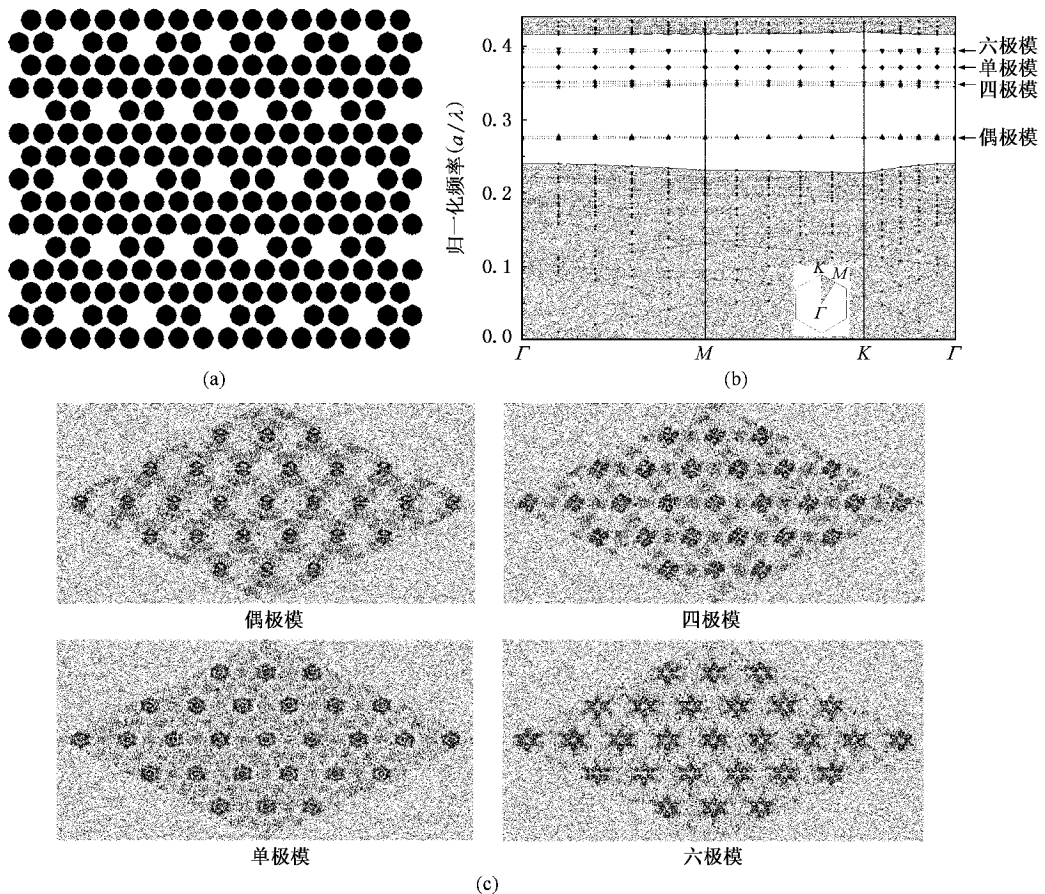


图1 (a)六角晶格光子晶体缺陷阵列示意图(黑色代表空气孔,白色区域为理想无限厚介质板,  $r/a = 0.4$ ) (b) TE 模光子能带结构图(禁带中四条平坦的微带自下而上依次是偶极,四极,单极和六极模.小插图显示为该周期结构的  $k$  空间第一布里渊区) (c) 禁带中四种耦合缺陷模式的场分布图

变化很小,但微腔之间的耦合作用使得原来的模式简并被解除,单缺陷态扩展成为沿各个方向更加平坦的微带.这种效应与半导体超晶格中电子能级分裂的情形类似<sup>[13]</sup>.另外,由于缺陷的增加形成缺陷腔阵列,光子能量可以在缺陷腔之间耦合传递.这样,光子便同时受到局域与导引的双重作用,因此可以在保证一定透射率的条件下获得极低群速度.

利用 2D-FDTD 方法,我们模拟研究了禁带频段附近的单缺陷腔沿  $\Gamma M$  与 CPCRA 结构沿  $\Gamma K$  方向(二者在实空间对应于同一方向)的透射谱,如图 2 所示.图中透射率急剧下降的区域对应于禁带.禁带中的小尖峰与能带图中缺陷模的频率位置吻合,同时也印证了单缺陷腔的模式在耦合腔的相互作用下扩展成为微带的特征.比较单缺陷腔模与耦合腔模的透射峰发现,透射率增大三个数量级以上,表明耦合共振腔阵列结构具有良好的传输特性.

通过对四种缺陷模附近的极窄频段作更为细致

的傅里叶分析,可以得到图 3 所示的类似 FP 腔的透射振荡曲线.将慢波光场近似为 FP 腔的驻波场,则光子群速度可以用下面的表达式计算得到<sup>[14]</sup>:

$$n_g = \lambda^2 (2l_d \Delta \lambda) = 1 (2l_d \delta \nu), \quad (1)$$

$$\nu_g = c/n_g,$$

式中  $\delta \nu$  代表振荡曲线的频率周期,  $l_d$  为驻波光场的距离,  $c$  为真空光速.在我们的理论模拟中,  $l_d$  等于结构尺寸  $17 \mu\text{m}$ .从(1)式中显见群速度与频率周期成正比,通过比较 CPCRA 的四种耦合缺陷腔模,发现单极模的振荡周期最短,因此单极模具有最低的光波群速度.

图 4 给出了单极模频段的  $\Gamma K$  方向能带曲线和透射率曲线.标号 1,2 同时对应于能带的平坦带边和 FP 振荡加剧的频率位置,说明当 PWE 方法中平面波选取的数量足够多, FDTD 方法中差分单元的尺寸选取足够小时,两种模拟方法给出的光波频率和低群速度特征具有很好的一致性.标号 3 的频率

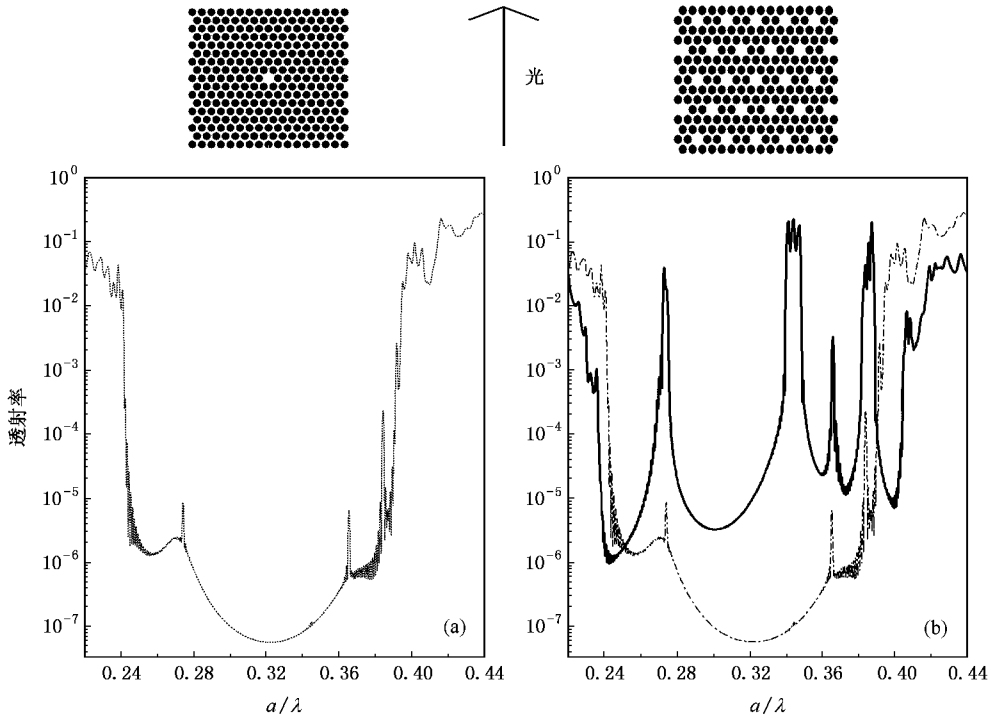


图 2 (a) PC 单缺陷腔 TE 模光子沿  $\Gamma M$  方向的透射谱(透射率明显下降的区域对应于禁带,禁带中的小尖峰对应于缺陷腔模式)(b) CPCRA 结构 TE 模光子沿  $\Gamma K$  方向的透射谱(实线  $\chi$  为方便比较将(a)中单缺陷腔的透射谱也一并给出(点线),可见对应缺陷模扩展成微带,透射率增大三个量级以上.需要注意的是,前者的  $\Gamma M$  与后者的  $\Gamma K$  方向在实空间对应于同一方向(箭头所示))

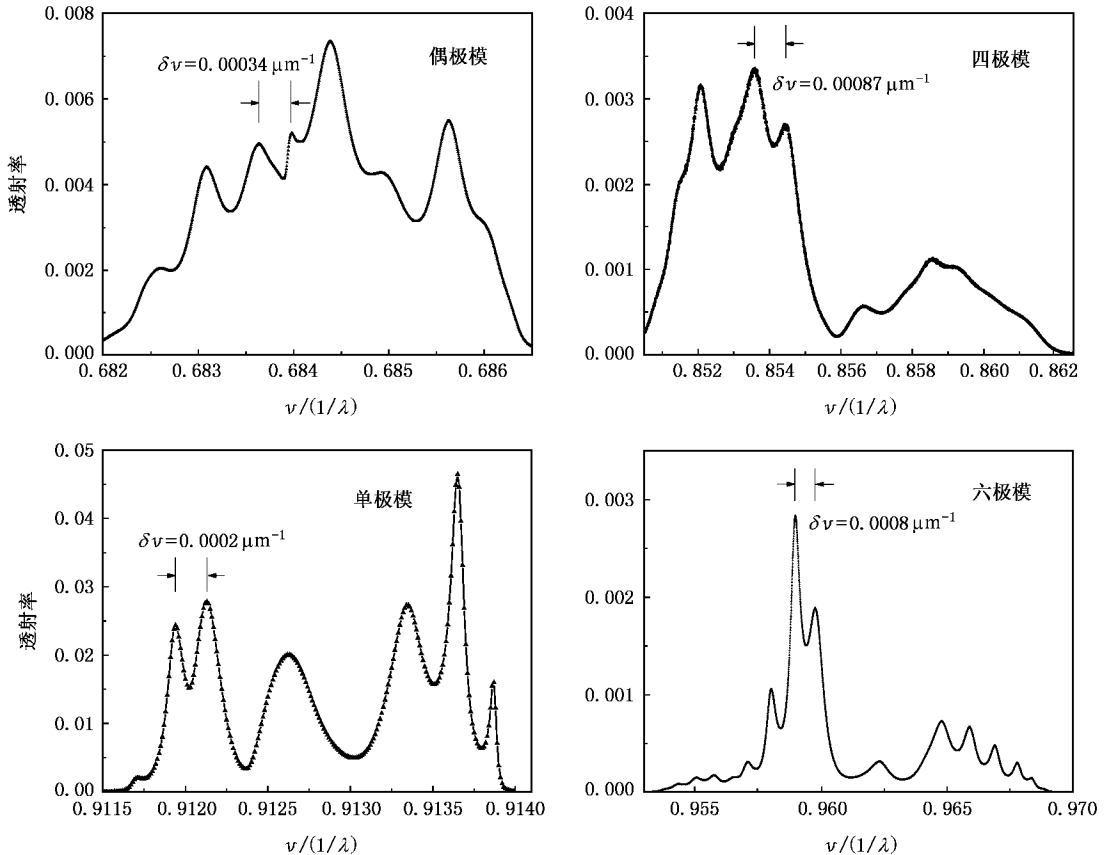


图 3 CPCRA 结构中四种耦合缺陷模式沿  $\Gamma K$  方向的透射振荡谱(振荡曲线的频率间隔与群速度成正比)

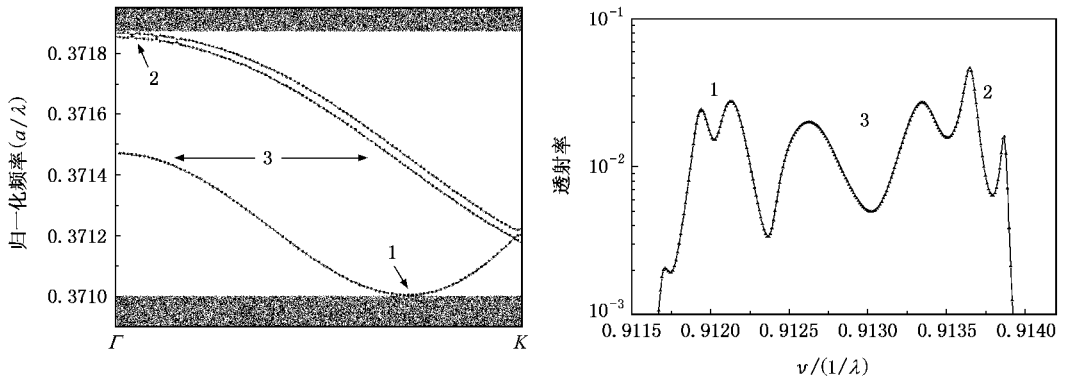


图4 CPCRA 结构单极模的精细能带结构和透射谱(两图中标号 1 2 3 对应于相同频率)

位置由于包含群速度和模式场分布不同的两个模式,故透射振荡峰表现出明显的展宽,这是多模叠加的结果.这一点在连续波入射激发的稳态模式场分布图中也得到了验证.需要指出的是,这些透射率的峰值频率均为满足 FP 腔振荡驻波条件的模式,随着腔长的改变峰值频率随之改变,并且随着腔长的增大透射峰的数量会增多.由图可知,透射率曲线的最小振荡周期  $\delta\nu$  为  $0.0002 \mu\text{m}^{-1}$ ,代入计算可得单极模的群速度  $v_g = 0.007c$ .该结果优于一般的二维光子晶体波导的慢波效应<sup>[10,14]</sup>,且能带全方向平坦的特性使其群速度色散(GVD)远低于导波模在带边的慢波机理.我们认为,耦合腔阵列减慢光速的作用主要体现在微腔阵列之间的耦合形成稳定的驻波场,使光子被有效局域在结构中.光子依靠耦合腔之间的能量振荡来传播,走过两腔间距需要经历一个耦合振荡周期,因此与光子晶体介质波导相比传播速度更慢.

### 3. 结 论

我们设计了一种六角晶格二维光子晶体耦合共振腔阵列的结构,其色散曲线在全方向更为平坦.通过对其传输特性的模拟,我们发现该结构在透射率大为改善的同时,具有显著的慢波效应.在未对结构进行优化的条件下,可以减慢光速达两个量级以上.由于本文的模拟计算建立在理想二维结构的基础上,未对垂直方向的损耗进行讨论.为了研究器件的实际工作性能,我们将利用三维时域有限差分法(3D-FDTD)对六角晶格光子晶体耦合共振腔阵列的二维薄板结构进行研究,并对填充因子、缺陷结构等参数进行优化,有望获得更为优良的慢波和传输特性,从而有可能应用在微型可调谐光延迟器和低阈值光子晶体激光器上.

- [1] Gersen H, Karle T J, Engelen R J P, Bogaerts W, Korterik J P, van Hulst N F, Krauss T F, Kuipers L 2005 *Phys. Rev. Lett.* **94** 073903
- [2] Sauvan C, Lalanne P, Hugonin J P 2005 *Phys. Rev. B* **71** 165118
- [3] Yablonovitch E 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 205
- [4] Joannopoulos D J, Villeneuve P R, Fan S H 1997 *Nature* **386** 14
- [5] Painter O, Lee R K, Scherer A, Yariv A, O'Brien J D, Dapkus P D, Kim I 1999 *Science* **284** 1819
- [6] Yu T B, Liu N H 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 3049 (in Chinese) [于天宝、刘念华 2004 物理学报 **53** 3049]
- [7] Cai X H, Zheng W H, Ma X T, Ren G, Xia J B 2005 *Chin. Phys.* **14** 2507
- [8] Feng L J, Jiang H T, Li H Q, Zheng Y W, Chen H 2005 *Acta*

*Phys. Sin.* **54** 2102 (in Chinese) [冯立娟、江海涛、李宏强、张治文、陈 鸿 2005 物理学报 **54** 2102]

- [9] Inoue K, Ohtaka K 2004 *Photonic Crystals: physics, fabrication and applications* (New York: Springer-Verlag) p215
- [10] Asano T, Kiyota K, Kumamoto D, Song B S, Noda S 2004 *Appl. Phys. Lett.* **84** 4690
- [11] Imhof A, Vos W L, Sprink V R, Lagendijk A 1999 *Phys. Rev. Lett.* **83** 2942
- [12] Altug H, Vuckovic J 2004 *Appl. Phys. Lett.* **84** 161
- [13] Kaliteevski M A, Manzanares J M, Cassagne D, Albert J P, Brand S, Abram R A 2003 *J. Phys-Condens. Mat.* **15** 785
- [14] Notomi M, Yamad K, Shinya A, Takahashi J, Takahashi C, Yokohama I 2001 *Phys. Rev. Lett.* **87** 253902

# Slow wave effect of 2-D photonic crystal coupled cavity array<sup>\*</sup>

Du Xiao-Yu Zheng Wan-Hua<sup>†</sup> Ren Gang Wang Ke

Xing Ming-Xin Chen Liang-Hui

( *Laboratory of Nano-Optoelectronics , Institute of Semiconductors , Chinese Academy of Sciences , Beijing 100083 , China* )

( Received 7 March 2007 ; revised manuscript received 10 May 2007 )

## Abstract

We designed a two-dimensional coupled photonic crystal resonator array with hexagonal lattice. The calculation by plane-wave-expansion method shows that the dispersion curve of coupled cavity modes in the bandgap are much flattened in all directions in the reciprocal space. We simulated the transmission spectra of transverse electric( TE ) wave along the  $\Gamma K$  direction. Compared with the PC single cavity structure , the transmission ratio of the coupled cavity array increases more than three orders of magnitude , while the group velocity decreases to below  $1/10$  , reaching  $0.007c$ . The slow wave effect has potential application in the field of miniaturized tunable optical delay components and low-threshold photonic crystal lasers.

**Keywords** : photonic crystal , coupled cavity arrays , slow wave , transmission ratio

**PACC** : 7820P , 4282

---

<sup>\*</sup> Project supported by the State Key Program of National Natural Science Foundation of China( Grant No. 10634080 ) and the National Natural Science Foundation of China( Grant No. 60677046 ).

<sup>†</sup> E-mail : whzheng@semi.ac.cn