

文章编号: 0258-7025(2010)Supplement 1-0186-05

二维介质柱光子晶体耦合腔波导慢光特性研究

曲连杰 杨跃德 黄永箴

(中国科学院半导体研究所集成光电子学国家重点实验室, 北京 100083)

摘要 以二维三角晶格介质柱光子晶体双缺陷耦合腔波导为研究对象, 设计慢光性质较好的波导结构, 并利用平面波展开法对光在波导中传输时的慢光特性进行了仿真分析。研究表明, 对特定几何参数下的光子晶体双缺陷耦合腔波导, 通过调整缺陷柱的尺寸, 可以有效地将禁带外的模式移动到禁带内成为导模, 并且得到了导模群速度为 $0.0055c$ 的波导结构(c 为真空中的光速), 对应带宽为 135 GHz。当群速度为 $0.01c$ 左右时, 带宽可以达到 260 GHz 左右, 可以满足实际的应用需要。此外, 该波导结构具有结构简单, 群速度调节范围大等优点, 可以应用于光学延时线, 光缓存等慢光器件中。

关键词 光通信; 光子晶体耦合腔波导; 平面波展开法; 慢光; 零色散

中图分类号 0734 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201037s1.0186

Research of Slow Light in the Two-Dimensional Rods Photonic Crystal Coupled-Cavity Waveguides

Qu Lianjie Yang Yuede Huang Yongzhen

(State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, Institute of Semiconductors,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract Based on the 2D triangular rods photonic crystal two-defect coupled-cavity waveguides, the new structure of slow-light waveguide is designed with better characteristics. The slow-light characteristic is simulated analyzed using plane wave expansion method. It is found that the mode outside the band will move into the band to form a guide mode by adjusting the radius of the defect rods. The waveguide structure with group velocity $0.0055c$ is obtained and the bandwidth is 135 GHz when c is the light velocity in vacuum. When the group velocity is about $0.01c$, the bandwidth of up to 260 GHz is about to meet the needs of practical application. In addition, the waveguide structure is simple and tunable, and it can be applied to optical delay lines, all-optical buffer and other slow light devise.

Key words optical communications; photonic crystal coupled-cavity waveguides; plane wave expansion method; slow light; zero-dispersion

1 引 言

光子晶体由于具有调控光子流的独特性质, 受到人们的广泛关注。而光子晶体慢光^[1~3] 由于具有大的时间延迟^[4,5]、增加相移^[6]、大色散或者零色散^[7,8] 和增强非线性效应^[8~10] 等作用, 在光学延时线、光缓存和光可调谐开关等领域引起了科研人员的极大兴趣^[11]。理论上在带边可以实现群速度为零的慢光, 但是在带边

随着群速度的降低, 带宽变得很窄, 对应着高色散, 引起信号畸变。为了减少色散对光信号的影响, 各种光子晶体零色散结构被提出来^[12~14]。目前光子晶体产生慢光的结构有很多, 主要基于两种: 二维光子晶体线缺陷波导或者耦合腔波导。在光子晶体线缺陷波导中传输的光波群速度仍然较大, 所以相对慢光效应较弱, 而对于光子晶体耦合腔波导, 可以较容易地减小传输

收稿日期: 2010-04-16; 收到修改稿日期: 2010-06-10

基金项目: 国家自然科学基金(60777028, 60723002, 60838003)和国家 973 计划(2006CB302804)资助课题。

作者简介: 曲连杰(1982—), 男, 硕士研究生, 主要从事光子晶体方面的研究。E-mail: qulianjie@semi.ac.cn

导师简介: 黄永箴(1963—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事微腔激光器, 光电子器件及光互连等方面的研究。

E-mail: yzhuang@semi.ac.cn(通信联系人)

光的群速度,从而实现很强的慢光。光子晶体耦合腔波导是由周期(或非周期)分布的光学微腔形成的,通过在完整光子晶体中周期地引入缺陷,光子晶体中将出现杂质带,可以通过控制缺陷的大小和相邻缺陷间的距离来调节杂质带的位置和大小^[3]。光子晶体耦合腔波导可以产生群速度为 $0.15c$ 的(c 为真空中的光速)慢光^[15],另一种变形的光子晶体耦合腔波导有更优越的慢光特性,在 2.6 nm 波长范围内可以实现群折射率 105 ± 20 的慢光^[16]。在只考虑减群速度的情况下,利用三角晶格介质柱光子晶体耦合腔波导可以实现群速度 $5.89 \times 10^{-4}c$ 的慢光^[17]。

本文以二维三角晶格介质柱光子晶体耦合腔波导为研究对象,通过平面波展开(PWE)法对光在波导中传输时的慢光特性进行了仿真分析,对特定几何参数下的光子晶体双缺陷耦合腔波导在不同缺陷柱尺寸下的慢光特性进行了研究。

2 光子晶体双缺陷耦合腔波导慢光特性研究

对于完整的二维三角晶格介质柱光子晶体,介质柱材料为 Si,折射率为 3.59,背景介质为空气,折射率为 1。当介质柱半径 $r=0.16a$ 时,该结构对于横磁模(电场平行于介质柱)存在较大的带隙,其中 a 为晶格常数。在归一化频率 a/λ 从 0.302 到 0.505 之间存在一光子禁带, λ 为真空中的波长。

如图 1 所示,单个双缺陷耦合腔通过在 x 方向上去除两个介质柱形成,将双缺陷耦合腔沿 x 方向周期

性地排列,就形成了光子晶体双缺陷耦合腔波导。光子晶体波导的慢光特性可以通过群速度和群速度色散两个参数来描述。群速度可以通过色散曲线获得, $v_g = c/n_g = c \times (d\beta/d\omega)^{-1}$,其中 ω 为波导中光波的角频率, β 为沿波导方向上的波数, n_g 为色散材料的群折射率。通过 PWE 方法可以获得光子晶体波导的色散关系 $\omega(\beta)$,对色散关系直接进行微分获得群速度,利用 PWE 计算的光子晶体双缺陷耦合腔波导的超原胞结构为图 1 中虚线包围区域,大小为 $3a \times 9b$,其中 b 为在 $X \rightarrow M$ 方向上的周期, $b = \sqrt{3}a$ 。群速度色散强烈影响着传输中的光脉冲,定量描述群速度色散(GVD), $D_g = \partial^2 \beta / \partial \omega \partial \lambda$,用来计算零色散点位置和色散程度。如图 2 所示为光子晶体双缺陷耦合腔波导的色散曲线,群速度曲线以及 GVD 曲线。

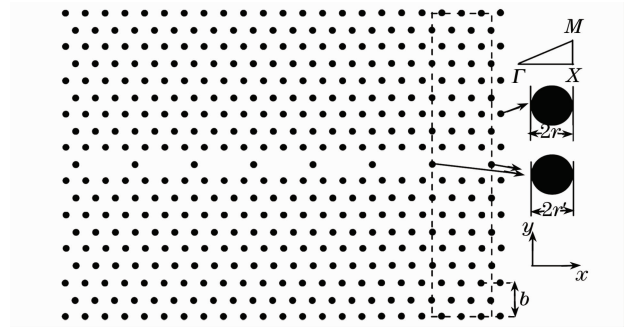


图 1 二维三角晶格介质柱光子晶体双缺陷耦合腔波导结构图

Fig. 1 Structure of 2D triangular rods photonic crystal two-defect coupled cavity waveguides

从图 2(a)可见,在禁带内存在两个能带,能带 I

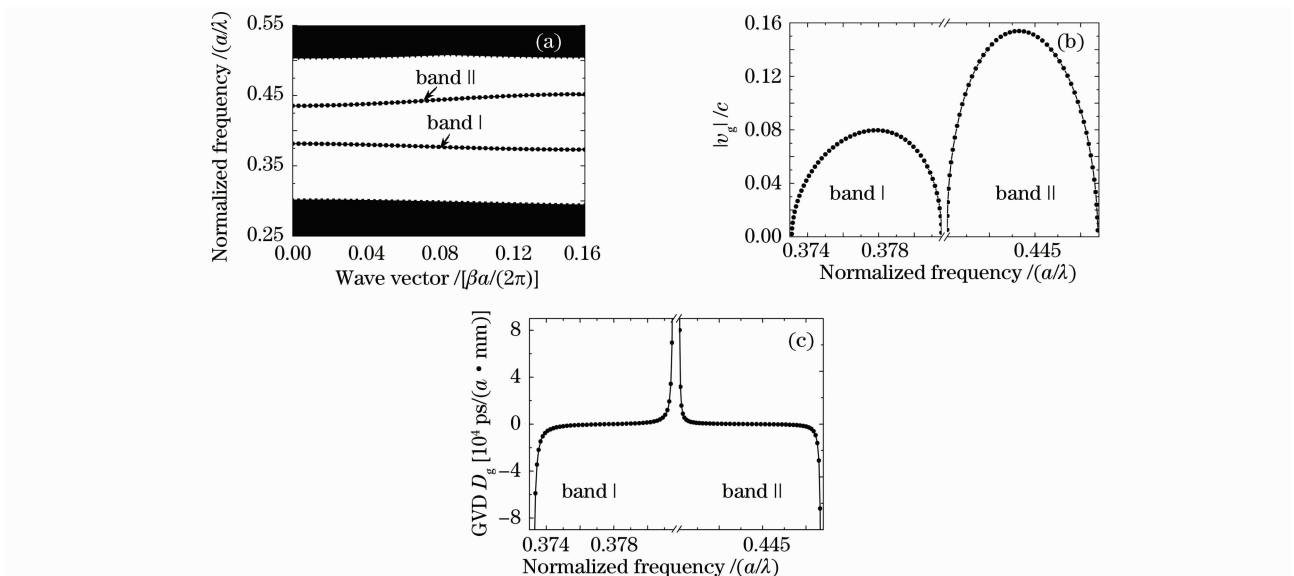


图 2 色散曲线(a),群速度曲线(b),GVD 曲线(c)

Fig. 2 Theoretical dispersion curves(a),plots of group velocity(b),plots of GVD(c)

相对于能带 II 较平滑,具有更小的群速度,如图 2(b)所示,二者对应的群速度最大值相差 2 倍左右。由图 2(c)可以得到能带 I 和能带 II 的零色散点的位置,同时可以看出对于能带 II,其色散程度要大于能带 I,反映了群速度与色散之间的矛盾关系。带宽,定义为群速度改变 10% 所对应的频率范围。对于能带 I,零色散点位于归一化频率 $0.3777a/\lambda$ 处,对应的群速度为 $0.0796c$, $1.55 \mu\text{m}$ 波长处对应带宽为 1.96 THz。对于能带 II,零色散点位于归一化频率 $0.4433a/\lambda$ 处,对应的群速度为 $0.1538c$, $1.55 \mu\text{m}$ 波长处的带宽为 3.24 THz。对于这两个单一导模,群速度相对较大,为了获得更小的群速度,通过适当地改变几何参数来实现对禁带内导模慢光特性的调节。

考虑两种方法实现对能带的调节,一种是增大耦合腔之间缺陷柱的尺寸,缺陷柱半径为 r' ,如图 1 所示,这将导致能带下移,将禁带上方的能带移动到禁带内成为导模,以期获得较好的慢光模式。另一种方法正好相反,通过减小缺陷柱的尺寸,使得禁带下方的能带上移并获得较好的慢光模式。为此,以下讨论通过调整缺陷柱半径 r' 大小的方式来寻找较好的慢光模式。

2.1 增大缺陷柱尺寸对慢光特性的影响

增大缺陷柱尺寸,由于增大了光子晶体的整体折射率,因此会导致能带的整体下移,使得禁带上方的能带进入禁带而成为导模。定义 $m=r'/r$,通过调整 m 值的大小,研究不同缺陷柱尺寸对慢光特性的影响。

如图 3 所示 m 别为 1.1, 1.2, 1.3 时,对应的能带结构。当 $m=1.2$ 时,禁带上方的能带下移成为导模,但是该导模并不是单模的,实用价值不大,在此不做过多讨论。随着 m 值增大,能带 I 和能带 II 变宽,对应的群速度增大,同时能带 II 与禁带上方下移的导模之间相互交叉耦合,但是并没有期望中的群速度较小且单模的能带出现。此外,通过计算 $m=1.4, 1.5$ 时的色散曲线,可以发现禁带上方的能带下移并开始与能带 II 交叉耦合得很严重。在此亦不做深入讨论。

2.2 减小缺陷柱尺寸对慢光特性的影响

接下来讨论当 m 减少时慢光特性的变化。选

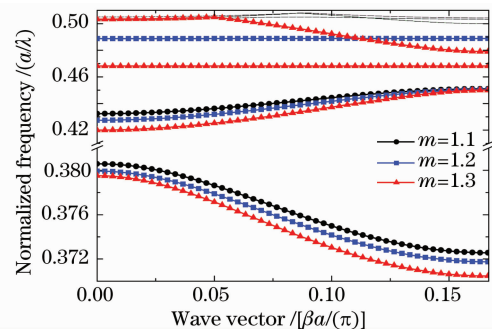


图 3 不同缺陷柱尺寸所对应的导模色散曲线
Fig. 3 Theoretical dispersion curves of the structure with m varying from 1.1 to 1.3

取 m 值从 0.1 到 0.9, 间隔 0.1。可以得到不同 m 值下的能带结构。随着 m 的减少,能带 I 和能带 II 上移并且变宽,对应的群速度变大,在此不再讨论。但是当 $m=0.8$ 时,禁带下方的能带进入禁带,形成导模,但是该导模并不是单模的,当 $m=0.7$ 时,该导模上移形成单模导模。其最大群速度约为 $0.02c$,更精细的研究中又选取 $m=0.75, 0.76, 0.77, 0.78, 0.79$, 并计算对应的色散曲线,如图 4(a) 所示。

从图 4(a), (b) 可以看出当 $0.7 < m < 0.8$, 随着 m 的增大,该能带下移,并且逐渐变得平滑,对应的最大群速度变小。通过对不同 m 值下的 GVD 的计算[图 4(c)], 可以看到在此情形下的色散并不是很严重,同时可以得出零色散点对应的归一化频率。表 1 是根据图 4 得到的不同缺陷柱尺寸下对应的零色散点处的归一化频率,在零色散点处对应的群速度,零色散点位于通信波段 $1.55 \mu\text{m}$ 处的带宽以及时间带宽积。

当 $m=0.76$ 时,对应零色散点处的群速度已经小于 $0.01c$, 并且其带宽能达到 261 GHz, 这个带宽还是比较理想的。另外,随着 m 值的增大,零色散点处的群速度减小很快,对应的带宽也相应减少。当 $m=0.79$ 时,群速度已经减少到 $0.0055c$, 对应的带宽为 135 GHz。当 $m=0.80$ 时,群速度进一步减少到 $0.0033c$, 但是由于其不是单调的能带,在实际中应用不大。为了从带宽和群速度两方面来衡量上面几个参数下的慢光性能,计算不同 m 值下的时间带宽积,可以发现,随着 m 值的增大,时间带宽积逐渐减小,因此在实际的考虑中,应在满足要求的情况下,尽量选择 m 值较小的结构来设计波导结构。

表 1 不同缺陷柱尺寸对应能带的慢光特性
Table1 Characteristics of slow light with different radii of defect rods

The size of defect rods m	Zero-dispersion point $/(a/\lambda)$	Group velocity $/c$	Bandwidth $/\text{GHz}$	Delay-bandwidth product
0.75	0.3100	0.0115	325	94200
0.76	0.3090	0.0099	261	87878
0.77	0.3082	0.0084	221	87698
0.78	0.3074	0.0069	176	85024
0.79	0.3066	0.0055	135	81818

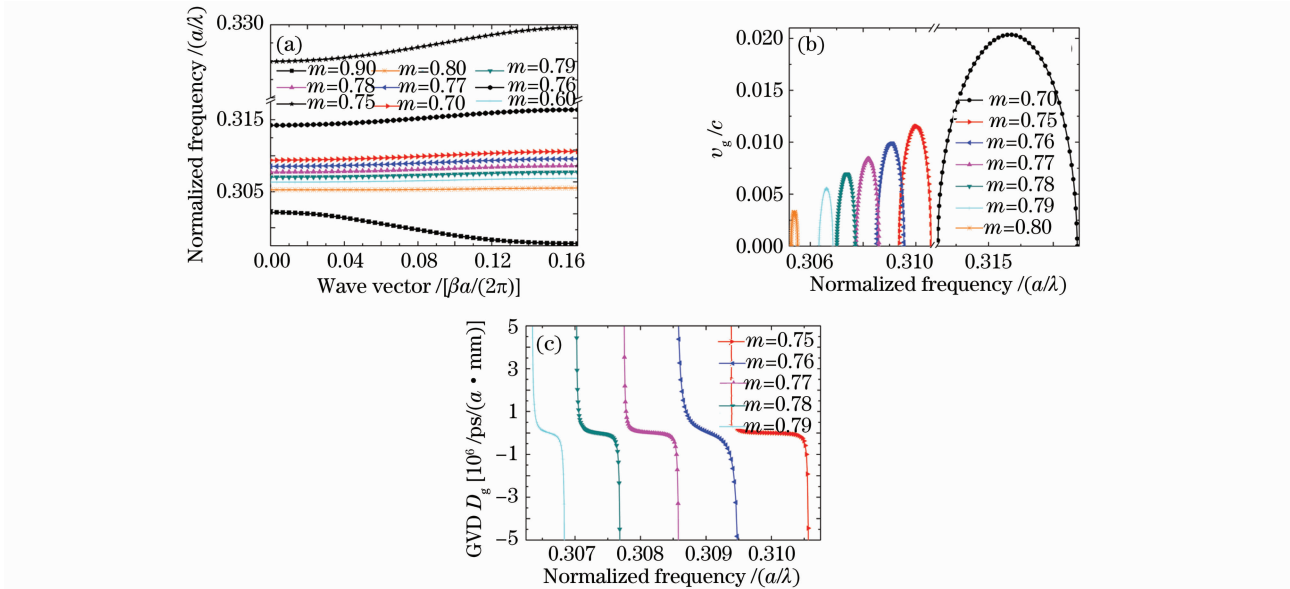


图 4 不同缺陷柱尺寸所对应的导模色散曲线(a),群速度曲线(b),GVD曲线(c)
Fig.4 Theoretical dispersion curves(a),plot of group velocity(b),plot of GVD(c) of the structure with m varying from 0.6 to 0.9

3 结 论

通过对二维三角晶格介质柱光子晶体双缺陷耦合腔波导的研究,得到缺陷柱的尺寸对波导内的导模的慢光性质影响很大的结论,无论是增大还是减小缺陷柱的尺寸,原来存在于禁带内的导模和群速度都有增大的趋势。同时通过对缺陷柱尺寸的调节,可以使禁带外的能带移动到禁带内形成导模,并获得导模群速度小于 $0.01c$ 的波导结构,可以在很大的范围内对群速度进行调节。

参 考 文 献

- 1 T. Baba. Slow light in photonic crystals[J]. *Nature Photonics*, 2008, **2**: 465~473
- 2 Wang Xueying, Tian Huiping, Li Changhong *et al.*. Tunable slow light by electro-optic effect in polymer photonic crystal waveguide[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(5): 1374~1378
王雪莹 田慧平, 李长红 等. 聚合物光子晶体波导中慢光传输的电光动态调制[J]. *光学学报*, 2009, **29**(5): 1374~1378
- 3 Zhang Man, Pan Wei, Yan Lianshan *et al.*. Research of slow light in the two-dimensional triangular rods photonic crystal line

- defected waveguide [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36** (4): 857~861
张 曼, 潘 炜, 闫连山 等. 二维三角晶格介质柱光子晶体线缺陷波导慢光研究[J]. *中国激光*, 2009, **36**(4): 857~861
- 4 J. B. Khurgin. Optical buffers based on slow light in electromagnetically induced transparent media and coupled resonator structures: comparative analysis[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2005, **22**(5): 1062~1074
- 5 T. Baba, T. Kawaaski, H. Sasaki. *et al.*. Large delay-band width product and tuning of slow light pulse in photonic crystal coupled waveguide [J]. *Opt. Express*, 2008, **16** (12): 9245~9253
- 6 J. M. Brosi, C. Koos, L. C. Andreani *et al.*. High-speed low-voltage electro-optic modulator with a polymer-infiltrated silicon photonic crystal waveguide [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(6): 4177~4191
- 7 S. Kubo, D. Mori, T. Baba. Low-group-velocity and low-dispersion slow light in photonic crystal waveguides[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(20): 2981~2983
- 8 J. Li, T. P. White, L. O. Faolain. *et al.*. Systematic design of flat band slow light in photonic crystal waveguides [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(6): 6227~6232
- 9 C. Monat, B. Corcoran, M. Ebnali-Heidari *et al.*. Slow light enhancement of nonlinear effects in silicon engineered photonic crystal waveguides[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(4): 2944~2953

- 10 M. Soljačić, J. D. Joannopoulos. Enhancement of nonlinear effects using photonic crystals [J]. *Nature Materials*, 2004, **3**: 211~219
- 11 Li Zhenghua, Xue Yanling, Shen Tinggen. Slow light in photonic crystals and its applications[J]. *Laser & Infrared*, 2008, **31**(1): 3~6
李正华, 薛燕陵, 沈廷根. 光子晶体内的慢光及其应用[J]. *激光与红外*, 2008, **31**(1): 3~6
- 12 A. Y. Petrov, M. Eich. Zero dispersion at small group velocities in photonic crystal waveguides[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **85**(21): 4866~4868
- 13 X. Y. Mao, G. Y. Zhang, Y. D. Huang *et al.*. Zero-dispersion slow light with wide bandwidth in photonic crystal coupled waveguides[J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2008, **25**(12): 4311~4313
- 14 F. C. Leng, W. Y. Liang, B. Liu. *et al.*. Wideband slow light and dispersion control in oblique lattice photonic crystal waveguides[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(6): 5707~5712
- 15 W. J. Kim, W. Kuang, J. D. O' Brien. Dispersion characteristics of photonic crystal coupled resonator optical waveguides[J]. *Optics Express*, 2003, **11**(25): 3431~3437
- 16 J. Jágerská, N. L. Thomas, V. Zabelin. *et al.*. Experimental observation of slow mode dispersion in photonic crystal coupled-cavity waveguides [J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(3): 359~361
- 17 Lu Hui, Tian Huiping, Li Changhong *et al.*. Research on new type of slow light structure based on 2D photonic crystal coupled cavity waveguide [J]. *Acta physica Sinica.*, 2009, **58**(3): 2049~2055
鲁 辉, 田慧平, 李长红 等. 基于二维光子晶体耦合腔波导的新型慢光结构研究[J]. *物理学报*, 2009, **58**(3): 2049~2055