

慢光在光子晶体弯折波导中的高透射传播^{*}

杜晓宇 郑婉华[†] 张冶金 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)

(2008 年 2 月 26 日收到, 2008 年 4 月 22 日收到修改稿)

研究了慢光模式在 SOI (silicon-on-insulator) 材料光子晶体线缺陷弯折波导中的传输特性. 通过优化波导弯折处的结构参数, 慢光模式在光子晶体 60° 与 120° 弯折波导中的透射率提高 10 倍以上, 归一化透射率分别达到 80% 和 60% 以上. 为了进一步减慢光速, 设计了新颖的高 Q 值耦合腔弯折波导结构, 在归一化透射率达到 75% 的基础上, 光波群速度低至 $c/170$ (c 为真空光速). 研究结果对于增强光子晶体的慢光效应, 提高光子晶体慢光器件的微细化 and 集成化都有一定的积极意义.

关键词: 光子晶体, 慢光, 弯折波导, 透射率

PACC: 4270Q, 4282, 4280L

1. 引 言

光子晶体材料具有良好的调制光子态密度和光场分布的特性, 有望作为光子集成芯片的基础平台, 一经提出就受到了广泛而持续的关注^[1-5]. 早期的研究工作主要利用光子晶体的禁带特性抑制光波的自发辐射. 随着理论研究的深入, 研究者发现在光子晶体结构中引入各种点或线的缺陷, 在光子禁带中就会产生各种缺陷模式, 利用这些模式的空间局域性和奇异的色散特性, 可以制作光子晶体激光器^[3]、波导^[6,7]、滤波器^[8]、波分复用^[9]等微型功能器件, 极大地拓展了光子晶体的应用范围.

在空气孔型的二维平板光子晶体中填充一列空气孔就形成了一个简单的光子晶体线缺陷波导结构 (W1), 同时在光子禁带中也引入了两条导波模的色散曲线 (如图 1(b) 所示). 在光子能带图中, 色散曲线反映了光波频率与倒空间波矢之间的依赖关系. 根据光波群速度 $V_g = d\omega/dk$ 可知, 光波群速度正比于色散曲线的斜率. 我们看到, 在导波模趋近于布里渊区边界的带边频率附近时 (下箭头所指), 色散曲线非常平坦, 斜率很小, 因此光波群速度远低于真空光速, 这称为光子晶体的慢光效应. 该效应已经

广泛应用于非线性光学、微纳光学缓存器、延迟器和低阈值激光器等多种理论和器件的研究中^[10,11]. 此类带边慢光的群速度只能低至几十到百分之一的真空光速, 若想获得 1 ns 以上的光学延迟, 通常需要毫米尺度的波导尺寸, 不利于实现光子集成芯片的微细化. 如果将波导 60° 或 120° 弯折, 不仅缩小了器件尺寸, 而且有望在波导弯折处形成开放腔, 通过耦合振荡方式进一步减慢光速. 但是, 普通光子晶体弯折波导的高透射频带很窄, 且不包括带边的慢光频率区域^[12-14]. 为此, 国际上已有研究者提出一些理论计算模型和优化方法来增加弯折波导的高透射带宽, 例如有能带结构调整方法^[12,13], 一维势阱散射模型^[15,16], 拓扑方法^[17,18], 但是针对提高慢光频域透射率的研究还比较少.

本文从计算线缺陷弯折波导的能带结构出发, 指出弯折波导的慢光模式透射率低的原因. 通过调整波导弯折处的一些结构参数, 使导波模色散曲线发生频率移动, 从而获得了慢光在光子晶体 60° 与 120° 弯折波导中的高透射传播性能. 为了进一步降低光波群速度, 我们随后研究了耦合腔与弯折波导结合的光子晶体延迟结构, 在保证较高透射率的情况下获得了光波群速度低至 $c/170$ 的结果. 本文的研究方法主要基于有效折射率近似的超元胞法^[19]

^{*} 国家自然科学基金重点项目 (批准号: 10634080), 国家自然科学基金 (批准号: 60677046), 国家重点基础研究发展计划 (973) (批准号: 2006CB921700), 国家高技术研究发展计划 (863) (批准号: 2006AA03Z403) 资助的课题.

[†] E-mail: whzheng@semi.ac.cn

和二维时域有限差分法(2D-FDTD). 前者首先根据三层平板波导近似, 将三维问题简化为快速的二维计算. 再通过模拟光子的能带结构, 理论预测和解释了弯折波导的透射特性; 后者模拟了光波在结构中的模式场分布、透射谱和延迟特性. 本文的研究结果对于增强光子晶体的慢光效应, 提高光子晶体慢光器件的微型化和集成化都有一定的积极意义.

2. 线缺陷弯折波导的模拟和分析

我们模拟的光子晶体波导器件计划在 SOI 材料上实现. SOI 材料是一种在 SiO_2 平板上附着薄层 Si 的结构, 这样空气层、Si 层和 SiO_2 层自上而下形成三层平板结构, 并以高折射率的 Si 层作为波导的芯层. Si 层厚为 340 nm, 折射率 $n = 3.5$; SiO_2 层厚为 2 μm , 折射率 $n = 1.5$. 根据空气和 SiO_2 材料上下覆盖的三层平板波导的有效折射率近似方法可得, 中心波长 $\lambda = 1550 \text{ nm}$ 附近的二维等效光子晶体的有效

折射率 $N_{\text{eff}} = 3.1$. 该有效折射率的二维近似方法已经得到理论验证, 与三维计算结果非常符合^[19]. 因此, 接下来我们将使用二维超元胞法和 2D-FDTD 对光子晶体弯折波导结构进行模拟计算. 我们取晶格周期 $a = 380 \text{ nm}$, 空气孔半径 $r = 0.33a$, 模拟得到 W1 波导偶极模的带边慢光归一化频率为 $0.245(a/\lambda)$, 对应光波长为 1550 nm(图 1(b)).

2.1. 60° 弯折波导

我们计算能带的超元胞单元是一个包括四个弯折的波导结构(图 1(a)), 该单元沿 ΓK 方向周期重复. Moll 等的研究表明^[12], 超元胞的尺寸取 $20a \times 7\sqrt{3}a$ 时计算结果是收敛的. 另外, 我们利用 2D-FDTD 方法, 以 1500 nm 为中心波长的高斯脉冲激励, 模拟了四弯折波导的透射谱. 两种模拟方法给出的结果如图 1(c)所示. 可见光子禁带与低透射率的频域比较符合, 说明了该计算方法的可靠性. 我们关心的慢光归一化频率为 $0.245(a/\lambda)$, 正好处于

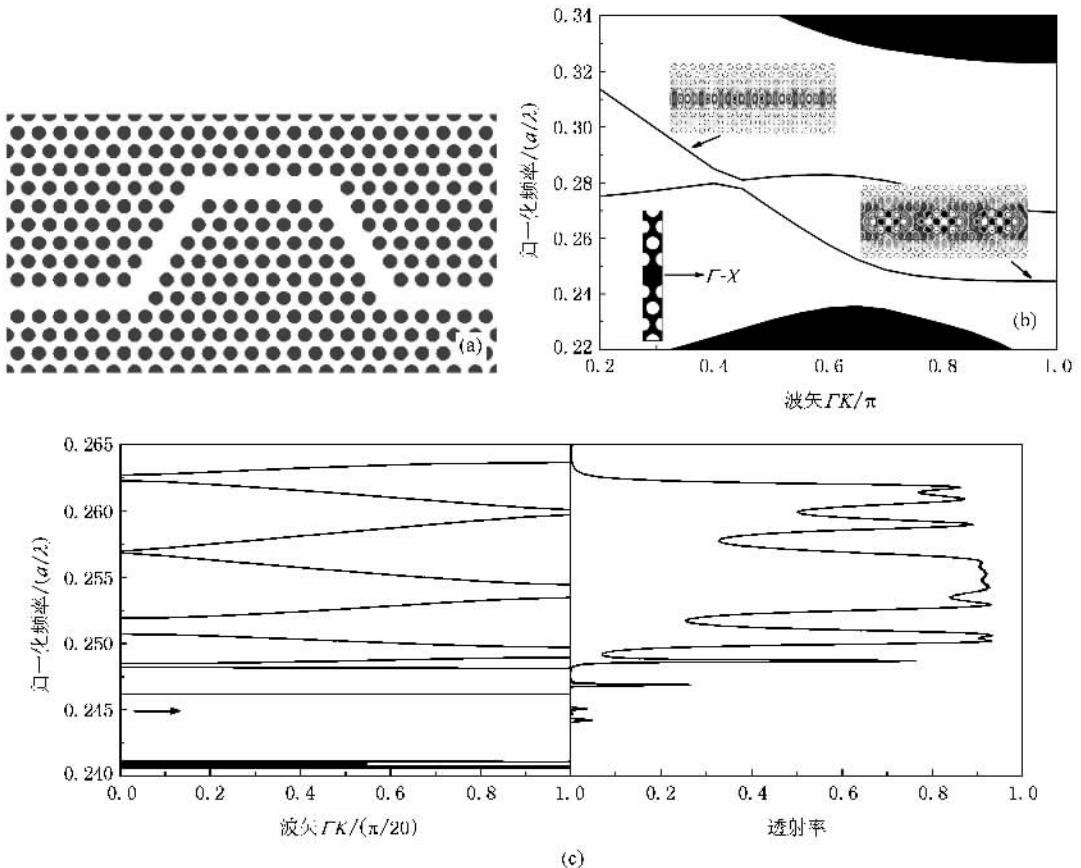


图 1 (a)光子晶体 60° 弯折波导能带计算的超元胞结构 (b)光子晶体 W1 直波导的能带结构, 导波模带边位于归一化频率 $0.245(a/\lambda)$ 处 (c)光子晶体 60° 弯折波导的能带结构和对应的透射谱

光子禁带中(如图 1(c)中箭头所示),这正是普通 60°弯折波导中慢光透射率非常低的原因。

为了提高慢光模式的透射率,我们需要将禁带上边的色散曲线“下拉”至禁带中,使归一化频率为 0.245 附近存在一定的导波模式。色散曲线的下拉需要增加结构的平均折射率,即增加高折射率材料的比重。具体的实现方法很多,这里采用的优化方法是缩小弯折处邻近空气孔的半径。考虑到慢光与正常群速度的光在模式场分布上有很大的不同(图 2),即慢光的模式场通常能够扩展到光子晶体波导的第三排邻近孔处,我们对弯折结构的优化区域也包含了邻近三排空气孔。另外,基于使弯折处形成开放腔的设计思想,我们把空气孔半径参数由内而

外进行由小到大的渐变调整(如图 3(a)所示),最终获得了一个慢光透射率较高的 60°弯折波导结构。该结构共调整了 17 个邻近孔的半径,标号 1、2、3 代表三种不同的半径,分别是 $0.8r$ 、 $0.85r$ 和 $0.9r$ 。从优化后的能带结构和透射谱可见(图 3(b)),慢光频率进入导波模区域,对应的透射谱向低频偏移。1550 nm 慢光在优化的 60°四弯折波导中的整体透射率达到 55% 以上。由于慢光模式具有显著的模式场扩展和多次振荡特性,因此它在光子晶体 W1 波导中的透射率本身只能达到 65% 左右。如果我们定义弯折波导中的透射率与 W1 直波导的比值作为归一化透射率,则这种优化的 60°弯折结构的归一化透射率可达 82% 以上。

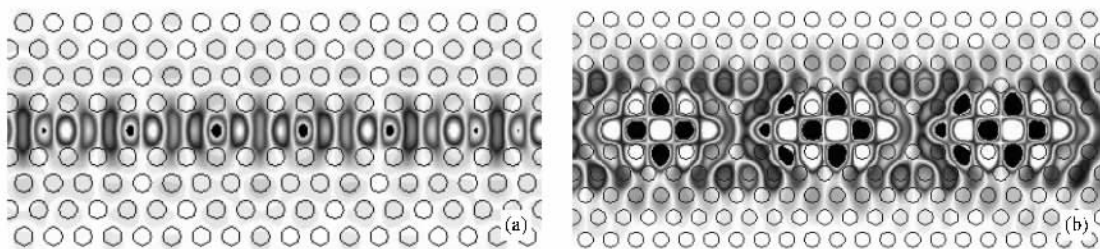


图 2 不同群速度的光场模式分布 (a)正常群速度的光 (b)低群速度慢光

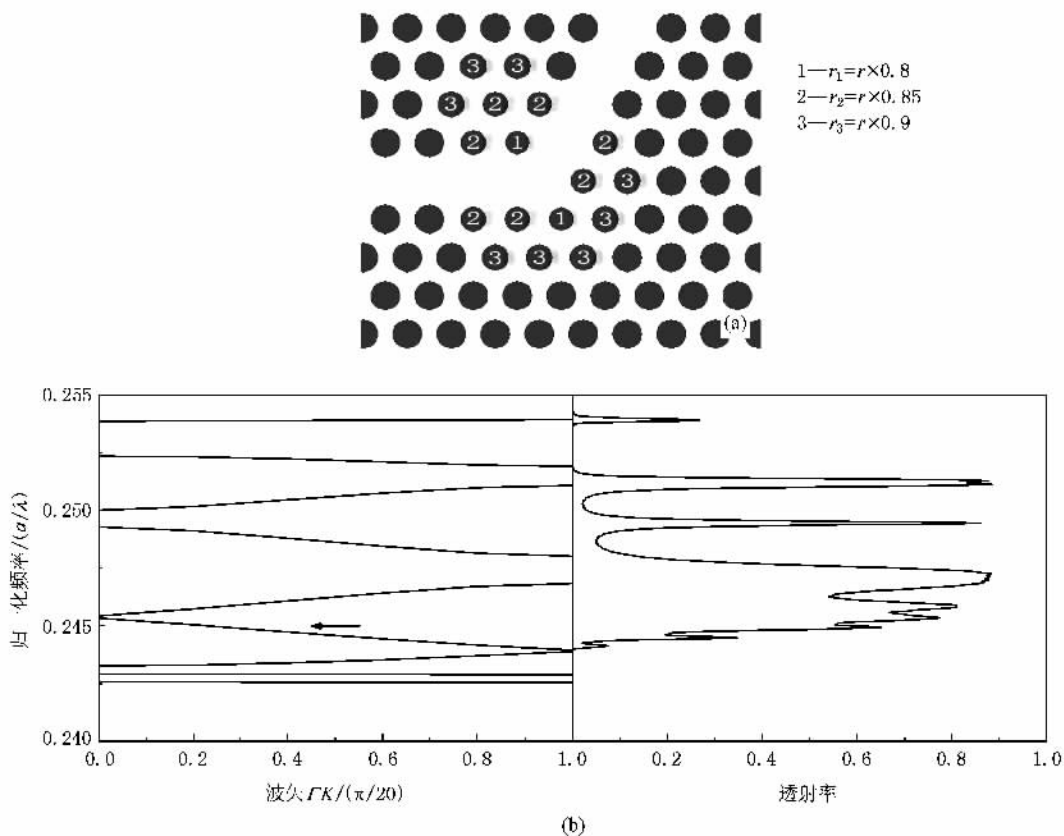


图 3 (a)优化后的光子晶体 60°弯折波导结构 (b)优化结构对应的能带结构和透射谱

2.2. 120°弯折波导

我们对光子晶体 120°弯折波导采用与 60°弯折波导相同的研究方法. 能带计算的超元胞和优化的弯折结构如图 4 所示. 该结构共调整了 12 个邻近空气孔的半径, 由内而外依次是 $0.85r$ 和 $0.9r$. 模拟的能带结构和透射谱如图 4(c)所示, 1550 nm 慢光在优化的 120°四弯折波导中的整体透射率达到 40%, 因此该弯折结构的归一化透射率达到 60% 以上. 通过对比光传播的模式场分布容易发现(图 5),

由于 120°弯折波导对光波的散射作用更加强烈, 增大了光波的反射损耗, 因此它比经过优化的 60°弯折波导的透射率低一些. 我们在研究中比较发现, 多次弯折结构的总透射率并不是单弯折透射率的简单乘积. 例如, 对于优化的 60°弯折波导结构, 经过单个弯折和四个弯折结构的透射率分别为 60% 和 55%, 这表明增加弯折个数在显著提高光延迟能力的情况下仍然可以保持比较好的透射性能, 这有利于实际器件的制作和应用.

从前文的模拟结果中不难看出, 我们通过优化

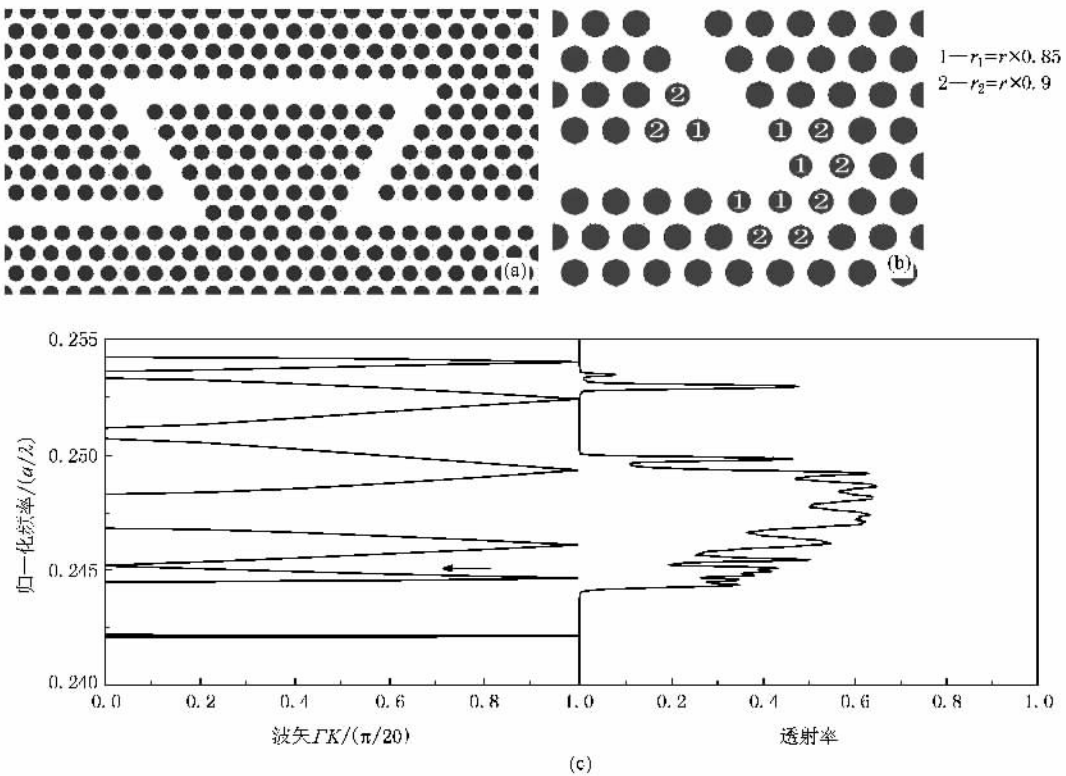


图 4 (a)光子晶体 120°弯折波导能带计算的超元胞结构 (b)优化后的光子晶体 120°弯折波导结构 (c)优化结构对应的能带结构和透射谱

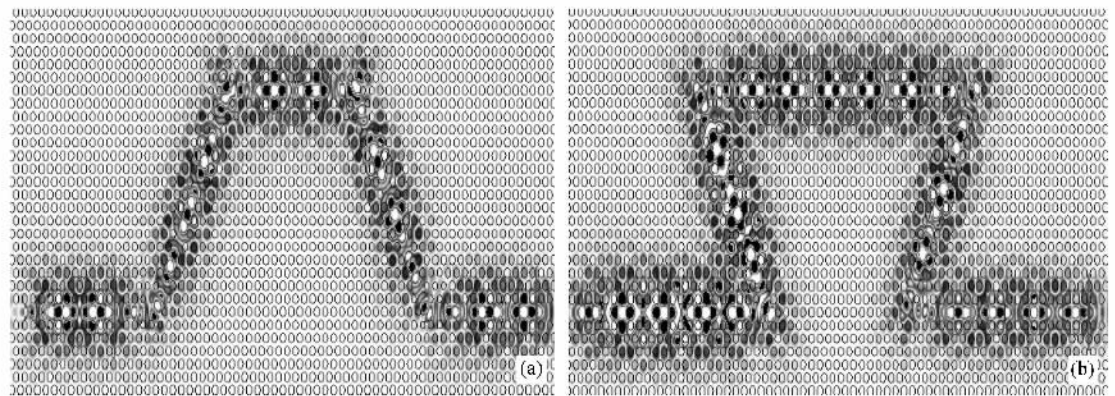


图 5 1550 nm 窄带脉冲在优化的 60°弯折波导 (a) 和 120°弯折波导 (b) 中的模式场分布

波导弯折处邻近孔半径的办法显著提高了慢光频域的透射率。但是,这种方法对于慢光的延迟能力的改善却相对有限,群速度仍然处在十分之一真空光速的水平。我们认为,这是由于波导弯折处所形成的开放腔的品质因子(Q 值)太低,没有发挥出对光的局域作用所致。因此,接下来我们将在波导弯折处设计高 Q 值微腔的高透射延迟结构。

3. 耦合腔弯折波导

在设计波导弯折处高 Q 值微腔的时候,我们借鉴了国际上已有的研究^[20-22]和本小组前期的研究成果^[23],认为耦合共振腔结构是一种非常好的光学延迟单元。如果将它与弯折波导结合,通过巧妙的设计就可以极大地减慢光速。我们认为,波导弯折处的耦合共振腔的设计要综合考虑三个方面的问题:1)耦合共振腔的共振频率应与W1波导带边的慢光频率一致。2)耦合共振腔的 Q 值越高,光学存储与延迟性能越强,光速减慢效果越好;但是,由于

微腔 Q 值与耦合系数本身存在一定的制约关系^[22],因此需要在波导透射性能和延迟性能之间折中考虑。3)由前文分析可知,波导弯折处的设计应降低材料的有效折射率,使色散曲线下拉至禁带中。

综合以上考虑,我们设计了图6(a)所示的耦合腔弯折波导结构。其中耦合腔部分是由三个光子晶体微腔(H3腔)级联组成,微腔边缘的空气孔尺寸减小为 $0.93r$ 。这种H3微腔最初是由Noda小组提出并研究的^[24],具有很高的 Q 值。他们的研究表明,将微腔两端的两个空气孔适当向外移动,可以平滑微腔内电场模式的空间分布,从而进一步提高微腔的 Q 值。在这里,我们对中心微腔的两端孔进行了微调研究,当空气孔的移动距离为 $0.18a$ 时,微腔的 Q 值提高并正好将共振波长调整到 1550 nm 附近。利用2D-FDTD方法,以宽谱高斯脉冲入射,得到经过一个耦合腔弯折的透射谱如图6(b)所示。可以明显看到在 1550 nm 附近有个共振透射峰,归一化透射率达到75%以上。我们将中心波长为 1550 nm 的极窄高斯脉冲源设在监测点1和3之间,1用来监

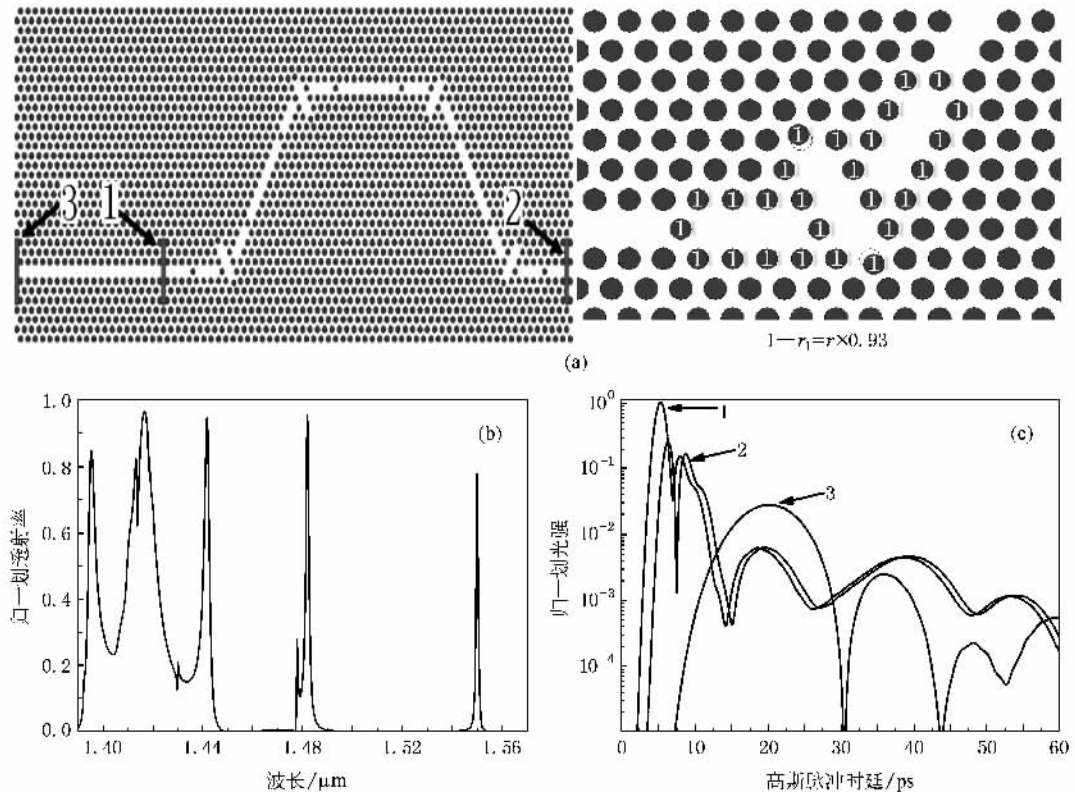


图6 (a)光子晶体耦合腔弯折波导结构(左图为四级联弯折波导结构,标号1,2,3代表三个光波功率监测点。右图为弯折处的耦合腔结构,邻近空气孔缩小为 $0.93r$,中心微腔的两端孔向外移动 $0.18a$ 。虚线圆表示孔未移动时的位置)(b)耦合腔弯折波导的透射谱(c) 1550 nm 窄带脉冲经过四级联耦合腔弯折波导的时间延迟谱,呈现出明显的脉冲展宽和多次振荡现象

测经过弯折结构之前的光波功率, 3 监测结构的反射功率, 2 用来监测经过四弯折结构后的光波功率. 模拟得到的脉冲时域延迟谱如图 6(c) 所示. 从图中可以明显看到群速度色散引起的脉冲展宽和多腔结构引起的光波多次振荡现象. 我们以高斯脉冲第一次经过检测器 1 和 2 的时间差作为该结构的延迟时间, 可得光波经过 70 个光子晶体周期的距离所需的时间为 15 ps, 对应的光波群速度为 $c/170$. 该结果优于一般光子晶体线缺陷波导的延迟能力, 表明这种耦合腔弯折波导结构可以作为一种优良的慢光延迟单元. 如果增加光子晶体波导的弯折次数, 还可以进一步增强光子晶体波导的延迟能力.

4. 结 论

利用光子晶体慢光效应制作的光学延迟器件是光子集成芯片的重要部件. 如果要实现纳秒量级

的延迟性能, 采用光子晶体 W1 波导通常需要毫米量级的尺寸, 不利于实现光子芯片的集成化和小型化. 为此, 我们研究了光子晶体 60° 和 120° 的弯折波导结构, 发现了普通弯折波导在慢光频域透射率低的原因, 并结合光子能带分析进行优化, 设计出了归一化透射率达到 80% 以上的弯折波导结构. 为了进一步提高器件的延迟性能, 我们采用了耦合腔与弯折波导结合的结构设计, 利用慢光模式在高 Q 值耦合腔中的共振透射来实现高透射率和低群速度的传播, 获得了归一化透射率达到 75% 以上, 四级联耦合腔弯折波导结构的群速度低至 $c/170$ 的良好结果. 本文对慢光模式在光子晶体弯折波导中高透射传播的优化, 和对耦合腔弯折波导结构获得极低群速度的研究进行了有益的尝试, 接下来我们将进一步优化一些结构参数, 以期获得更好的慢光传输特性.

- [1] Yablonovitch E 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 205
- [2] Joannopoulos D J, Villeneuve P R, Fan S H 1997 *Nature* **386** 14
- [3] Painter O, Lee R K, Scherer A, Yariv A, O'Brien J D, Dapkus P D, Kim I 1999 *Science* **284** 1819
- [4] Yu T B, Wang M H, Jiang X Q, Yang J Y 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1851 (in Chinese) [于天宝、王明华、江晓清、杨建义 2006 物理学报 **55** 1851]
- [5] Feng L J, Jiang H T, Li H Q, Zhang 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]
- [6] Johnson S G, Villeneuve P R, Fan S H 2000 *Phys. Rev. B* **62** 8212
- [7] Mori D, Baba T 2004 *Appl. Phys. Lett.* **85** 1101
- [8] Noda S, Chutinan A, Imada M 2000 *Nature* **407** 608
- [9] Shinya A, Mitsugi S, Kuramochi E, Notomi M 2005 *Opt. Express* **13** 4202
- [10] Sauvan C, Lalanne P, Hugonin J P 2005 *Phys. Rev. B* **71** 165118
- [11] Notomi M, Yamad K, Shinya A, Takahashi J, Takahashi C, Yokohama I 2001 *Phys. Rev. Lett.* **87** 253902
- [12] Moll N, Bona L G 2004 *Appl. Phys. Lett.* **85** 4322
- [13] Chutinan A, Okano M, Noda S 2002 *Appl. Phys. Lett.* **80** 1698
- [14] Ntakis I, Pottier P, De La Rue M R 2004 *J. Appl. Phys.* **96** 12
- [15] Mekis A, Chen C J, Kurland I, Fan S H, Villeneuve R P, Joannopoulos D J 1996 *Phys. Rev. Lett.* **77** 3787
- [16] Zhang Y, Li B J 2006 *Opt. Express* **14** 5723
- [17] Watanabe Y, Ikeda N, Sugimoto Y 2007 *J. Appl. Phys.* **101** 113108
- [18] Borel I P, Harpøth A, Frandsen H L, Kristensen M 2004 *Opt. Express* **12** 1996
- [19] Qiu M 2002 *Appl. Phys. Lett.* **81** 1163
- [20] Olivier S, Benisty H, Rattier M, Weisbuch C 2001 *Appl. Phys. Lett.* **79** 2514
- [21] Povinellia L M, Fan S H 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 191114
- [22] Faraon A, Waks E, Englund D, Fushman I, Vučković J 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 073102
- [23] Du X Y, Zheng W H, Ren G, Wang K, Xing M X, Chen L H 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 571 (in Chinese) [杜晓宇、郑婉华、任刚、王 科、邢名欣、陈良惠 2008 物理学报 **57** 571]
- [24] Akahane Y, Asano T, Song B S, Noda S 2003 *Nature* **425** 944

High transmission of slow light in the photonic crystal waveguide bends^{*}

Du Xiao-Yu Zheng Wan-Hua[†] Zhang Ye-Jin 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 26 February 2008 ; revised manuscript received 22 April 2008)

Abstract

We present the research on the transmission characteristic of slow-light-mode in the photonic crystal line-defect waveguide bends on SOI. After optimizing the structure parameters in the vicinity of the bends , the normalized transmission efficiency of slow-light-mode through the photonic crystal 60 degree and 120 degree waveguide bends are as high as 80% and 60% respectively , which are 10 times higher than that in the undeformed case. To slow down light further , we design novel coupled cavity waveguide bend structures with high quality-factor. High normalized transmission efficiency of 75% and low group velocity of $c/170$ (c is the light velocity in vacuum) are realized. These results are beneficial to enhance the slow light effect of photonic crystal structures and improve the miniaturization and integration of photonic crystal slow light devices.

Keywords : photonic crystal , slow light , waveguide bends , transmission efficiency

PACC : 4270Q , 4282 , 4280L

^{*} Project supported by the State Key Program of National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10634080) , the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60677046) , the Chinese National Key Basic Research Special Fund (Grant No. 2006CB921700) , the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2006AA03Z403).

[†] E-mail : whzheng@semi.ac.cn