

Archimedes $3^2, 4, 3, 4$ 结构光子晶体中与偏振无关的自准直分束器^{*}

钟 琪 韩 奎[†] 沈晓鹏 童 星 吴琼华 李明雪 吴玉喜

(中国矿业大学理学院物理系, 徐州 221116)

(2009 年 7 月 17 日收到; 2010 年 1 月 29 日收到修改稿)

通过等频图分析并结合时域有限差分法模拟, 在 Archimedes $3^2, 4, 3, 4$ 结构排列的二维光子晶体中同一频率下同时实现了电磁波两种偏振态的自准直. 研究发现, 在该结构光子晶体中引入缺陷, 当线缺陷宽度改变时, TE 和 TM 两种偏振态光束的分束效果将会随之变化. 由此通过控制缺陷宽度, 分别实现了两种偏振态光束的 50% : 50% 分束以及 90° 大角度光折弯, 分束和折弯的效率都较为理想, 为未来设计基于光子晶体的新型光子学器件提供了一种新的思路.

关键词: 光子晶体, Archimedes 结构, 自准直

PACC: 4270Q, 4280H, 4280J

1. 引 言

自从 1987 年 Yablonovitch 和 John 提出光子晶体的概念以来, 因其可以控制光子的流动而引起学术界的广泛关注. 光子晶体中复杂的色散特性, 使得在其中传播的电磁波可表现出非同寻常的物理效应, 如超折射^[1]、自准直^[2-7]以及负折射^[8-12]等现象. 利用光子晶体的自准直效应引导光束, 因其可实现几乎无损失的传播^[13-15], 以及可使光子器件尺寸足够小的特点, 期望在未来高密度集成光路中发挥重要作用, 吸引了大批研究者进行理论和实验研究. 关于二维光子晶体自准直现象的研究, 目前在理论和应用方面都有了不少进展^[16, 17], 通过适当调整晶体结构参数还实现了与电磁波偏振无关的自准直传播^[6]. 但大量关于自准直的研究工作都集中在以正方排列的二维光子晶体上^[2-7, 16, 17]. 本文则研究了 Archimedes $3^2, 4, 3, 4$ 结构的二维光子晶体, 利用平面波展开法 (PWE) 和时域有限差分法 (FDTD) 分析了其能带和色散特性, 在其中实现了与电磁波偏振无关的自准直传播. 通过引入宽度不同的缺陷, 分别实现了两种不同偏振模式电磁波的分束和大角度光折弯, 理论上设计了一种新型的无

偏振依赖性的光束折弯和分束器. 与以往以正方格子排列为主的光子晶体中的自准直研究相比较, 本文的研究结果表明, 在 Archimedes $3^2, 4, 3, 4$ 中也能较好的实现自准直, 从而为该方向的研究提供了一种新思路.

2. Archimedes $3^2, 4, 3, 4$ 结构中的自准直

很早以前, Archimedes 结构就已被人们熟知, 1619 年, 德国科学家 Kepler 在他的《宇宙和谐论》中对 Archimedes 结构进行了系统描述, 并归纳出理论存在的总共 11 种结构模型. 每种 Archimedes 结构, 都由若干正多边形边对边连接而成, 并能够以此无缝隙的铺满整个平面, 对于每种结构中的各个顶点, 它四周多边形的形状和数目都完全一样. 围绕顶点, 从最小边数的多边形开始计数, 沿顺时针方向旋转, 以多边形的形状和数目命名各种不同的 Archimedes 结构类型^[18], 如图 1 所示. 在图中不难发现, (a), (b) 和 (c) 其实就是我们研究中常见的三角格子、正方格子以及蜂窝状格子, 它们均属于 Archimedes 结构的一种, 分别被命名为 $4^4, 3^6, 6^3$, 这些结构的光子晶体已进行了广泛的研究. 其他几种

^{*} 中国矿业大学科技基金 (批准号: OK061064, OK080263) 资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: han6409@263.net

Archimedes 结构的光子晶体, 最近也有对其能带和色散特性的相关研究^[19-23], 但对其自准直特性则

一直未见报道.

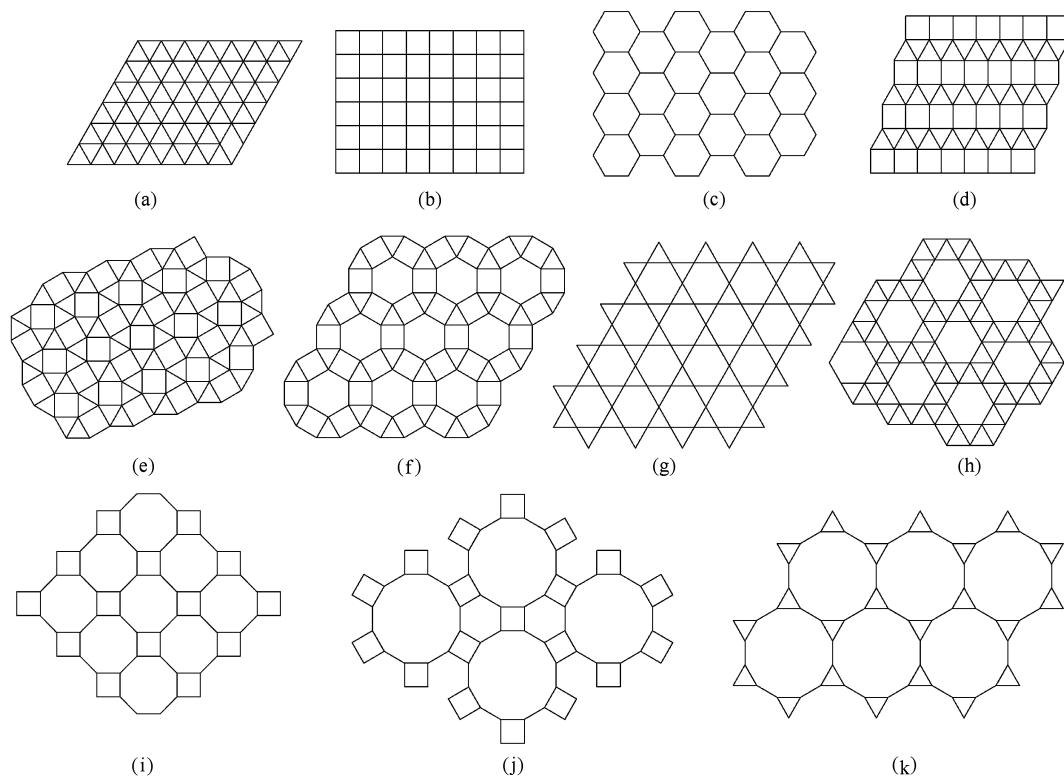


图1 11种 Archimedes 结构类型 (a) 3^6 ; (b) 4^4 ; (c) 6^3 ; (d) $3^3, 4^2$; (e) $3^2, 4, 3, 4$; (f) $3, 4, 6, 4$; (g) $3, 6, 3, 6$; (h) $3^4, 6$; (i) $4, 8^2$; (j) $4, 6, 12$; (k) $3, 12^2$

本文在这 11 种结构模型中选取了图 1(e), 即对 Archimedes $3^2, 4, 3, 4$ 结构的硅基底空气孔光子晶体进行自准直性质的研究. 如图 2 所示, 对于该 Archimedes $3^2, 4, 3, 4$ 结构光子晶体来说, 它每个顶点周围依次由两个三角形、一个正方形、一个三角形和一个正方形组成, 并以此规律排满整个平面, 黑色顶点即代表垂直于平面的无限长空气柱.

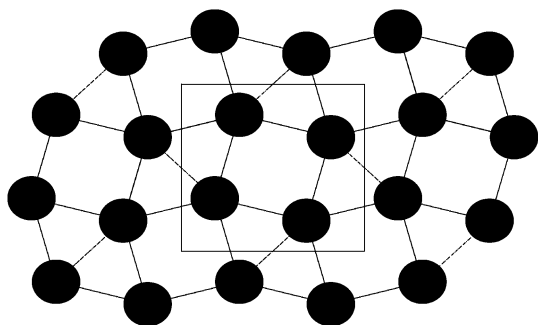


图2 Archimedes $3^2, 4, 3, 4$ 结构 (中间方框表示选取的单元)

按图 2 中的正方框选取四个圆柱格子, 发现 Archimedes $3^2, 4, 3, 4$ 结构刚好能以方框做周期性排列, 用 PWE 法计算该结构光子晶体的能带和等频图, 进而分析电磁波在其中的传输特性, 如自准直、负折射等. 为了同时实现电场分量方向平行于空气孔 (TE) 和磁场分量方向平行于空气孔 (TM) 模式的自准直, 我们的结构参数选定为空气柱和硅介质背景 (折射率 $n = 3.5$), 其中空气孔半径为 $r = 0.35a$ (a 为晶格常数, 即相邻空气孔间的距离), 分别计算了 TE 和 TM 模式的等频图, 如图 3 所示 (图中 Γ, M, X 表示简约第一 Brillouin 区三个顶点, K_x, K_y 为第一 Brillouin 区 x, y 方向的波矢量, π/a 为单位).

图 3(a) 中实线表示的是第三能带, 虚线表示处在第二能带的频率. 通过图 3 不难发现, 当归一化频率处在 $f = (0.185-0.192) c/a$ (c 为真空中光速) 之间时, 对 TM 光来说其第三能带等频线均为圆角正方形, 当该区域频率的光束沿图中阴影区域方向入射时, 光将在 ΓM 方向实现无发散的准直传播. 而对于 TE 光, 考虑到第二能带的影响, 在较窄的入射

波矢范围内也能实现 ΓM 方向上的自准直. 为了检验能实现自准直光束的频率宽度及其自准直传输效率, 我们扩大频率范围, 用 FDTD 法模拟了频率 f 在 $(0.175-0.195) c/a$ 之间变化时两种偏振模式的传播情况. 在光源及离入射处距离分别为 $10a, 20a$,

$30a$ 和 $40a$ 的地方各放置一光强探测器, 记录各个位置不同频率光束的光强. 入射光源为束腰为 $6a$ 的连续 Gauss 光束, 并以离光源 $2a$ 处光强为基准, 其他各处光强跟它比较, 得到各处的归一化光强, 如图 4 所示.

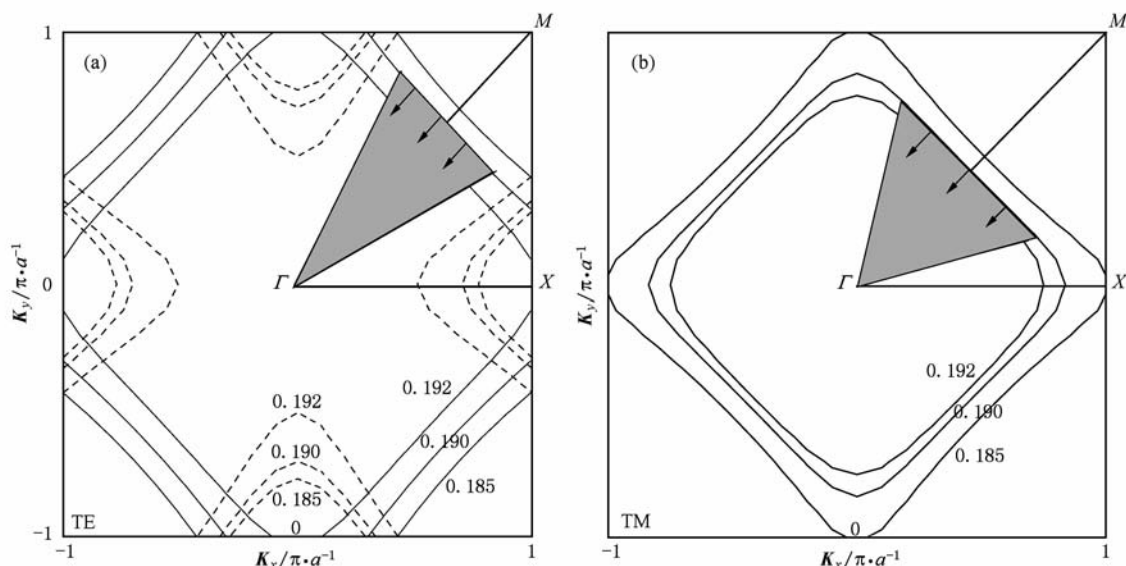


图 3 归一化频率处于 $f = (0.185-0.192) c/a$ 间时在第一 Brillouin 区的等频图 (阴影部分表示能实现自准直の入射波矢范围, 黑色箭头表示群速度的方向) (a) TE, (b) TM

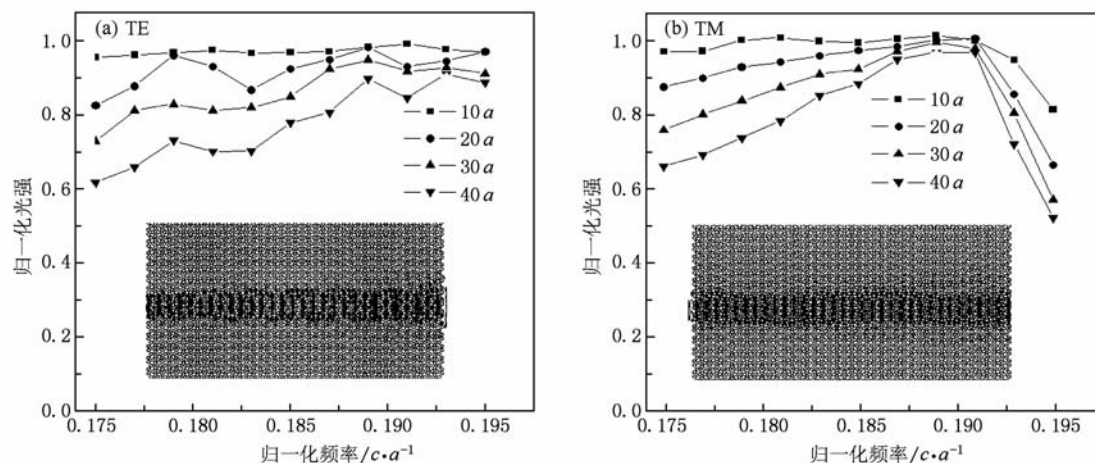


图 4 在分别离光源 $10a, 20a, 30a, 40a$ 处时不同频率的归一化光强 (插图为 $f = 0.189 c/a$ 时 TE 和 TM 光束的 FDTD 模拟情况图) (a) TE 模, (b) TM 模

图中纵坐标表示与入射处光源比较后的归一化光强, 横坐标表示归一化频率. 各条曲线分别表示不同距离处的归一化光强. 从图 4 不难发现, 当归一化频率在 $f = (0.188-0.192) c/a$ 之间变化时, TE 和 TM 模式的光强在不同距离时都能保持在 80% 以上的传输效率, 其中 $f = 0.189 c/a$ 时在 $40a$

距离处 TM 模式透过率都在 94% 以上, 而 TE 模式也能达到 90% 左右, 该频率下的 FDTD 模拟图见图 4 中插图所示. 下面我们在设计跟偏振无关的自准直分束器和反射镜时, 统一采用归一化频率为 $f = 0.189 c/a$ 的光束, 以保持较高的传输效率.

3. 光束折弯和光分束器

光束的折弯和分束是高密度集成光器件中最基本的光学性能. 在光子晶体中, 通过传播的介质波导、线缺陷波导以及利用光子晶体本身自准直效应的方法均可以引导光束来进行分束和折弯. 而通过光子晶体自准直效应引导光束, 可以实现光强近乎无损失的传播, 因此引起人们的广泛关注^[13-15]. 现在各种不同的自准直光束折弯及分束器, 其方法基本都是引入线缺陷, 即改变某一排空气孔或介质柱子的半径来实现光折弯或分束, 并且大多只是针对一种偏振模式而言. 不久前也有理论研究实现了与偏振无关自准直光束的折弯和分束^[24]. 本文在

Archimedes 结构 $3^2, 4, 3, 4$ 排列的二维光子晶体中, 通过引入不同宽度空气狭缝缺陷的方法实现了 TE, TM 自准直光束的分束和折弯.

在 Archimedes 结构 $3^2, 4, 3, 4$ 中, 沿 45° 角插入一个空气狭缝缺陷. 一个束腰为 $6a$, 归一化频率为 $f = 0.189 c/a$ 的 Gauss 型光束从右方入射到光子晶体中, 在光源及空气缺陷右方和下方距离相同处各放一光强探测器, 探测器宽度稍大于 $6a$, 通过光学快速 Fourier 变换方法 (FFT) 计算探测处的光强. 研究发现, 线缺陷空气带的宽度变化时, 自准直光束通过空气缺陷后反射和透射的光强分布将会随之变化. 结合 FDTD 方法模拟, 扫描了空气缺陷宽度分别对 TE 和 TM 模式光强分束的影响, 结果如图 5 所示.

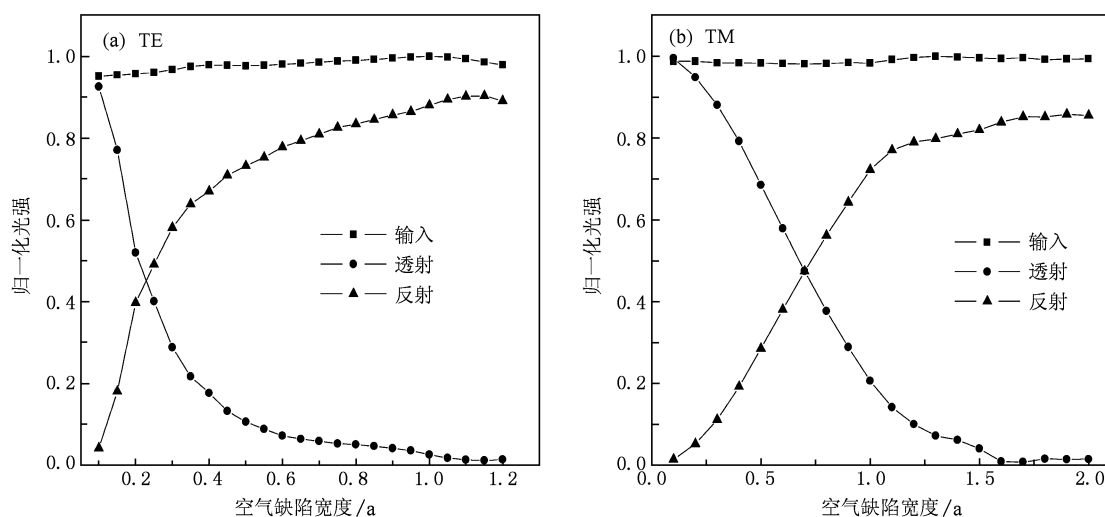


图5 空气缺陷宽度变化时, 光束的分束情况 (其中, 输入曲线表示入射光强, 透射曲线表示与入射处相比透射光束的归一化光强, 反射曲线表示与入射处相比反射光束的归一化光强) (a) TE 和 (b) TM 模式

从图中不难发现, 尽管插入的都是空气缺陷带, 但对于不同偏振模式的光来说, 空气缺陷带宽度一样时, 分束情况并不相同. 对于 TE 模式光束, 当空气缺陷宽度为 $0.23a$ 时, 刚好实现反射跟透射光的 1:1 分束, 而当缺陷宽度为 $0.7a$ 时, TM 模式的反射光跟透射光相等. 这可能是不同的偏振模式对空气缝隙的响应不同而导致的. 多次仿真表明, 虽然实现 TE 和 TM 模式的等比分束, 但很难实现在同一缺陷宽度的同时等比分束. 继续增大空气缺陷宽度, 当宽度达到 $1a$ 及以上时, TE 自准直光束在缺陷带处透射的光强趋近于零, 而反射光强达到 88%. 对 TM 模式, 当缺陷宽度大于 $1.6a$ 时, 透射光强趋近于零, 反射光强为 84%. 虽然光束在缺陷处有损

失, 但这两种情况下绝大部分的光束仍被空气缺陷反射, 基本上实现了两种模式光束的 90° 折弯. 图 6 和 7 分别为用 FDTD 方法模拟的 TE 和 TM 模分束分别为 1:1 以及 90° 光折弯的效果图.

4. 结 论

结合能带图分析和 FDTD 方法模拟, 在 Archimedes $3^2, 4, 3, 4$ 结构光子晶体中实现了电磁波与偏振无关的自准直, 并利用该效应产生的虚拟波导控制光束的直线传播. 引入线缺陷, 模拟发现光束的分束效果可以通过控制缺陷的宽度来进行调节, 在此基础上实现了两种偏振模式 TE 和 TM

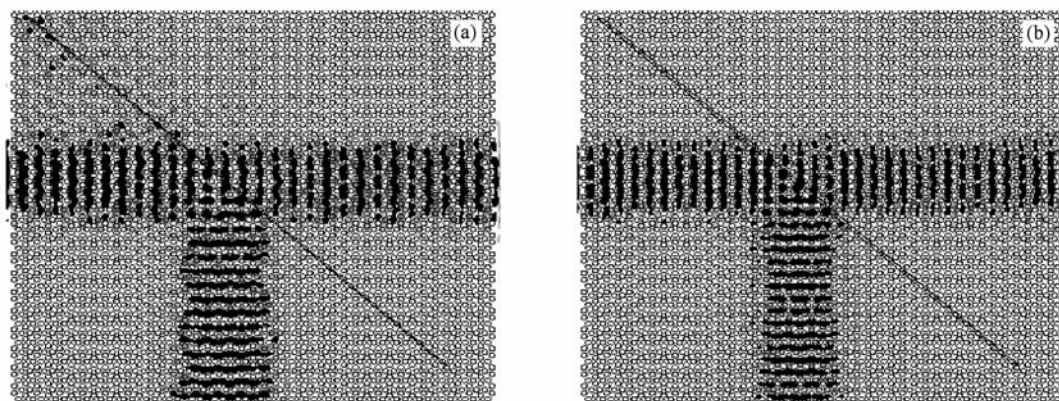


图6 (a)TE 和(b)TM 模式 1:1 分束情况

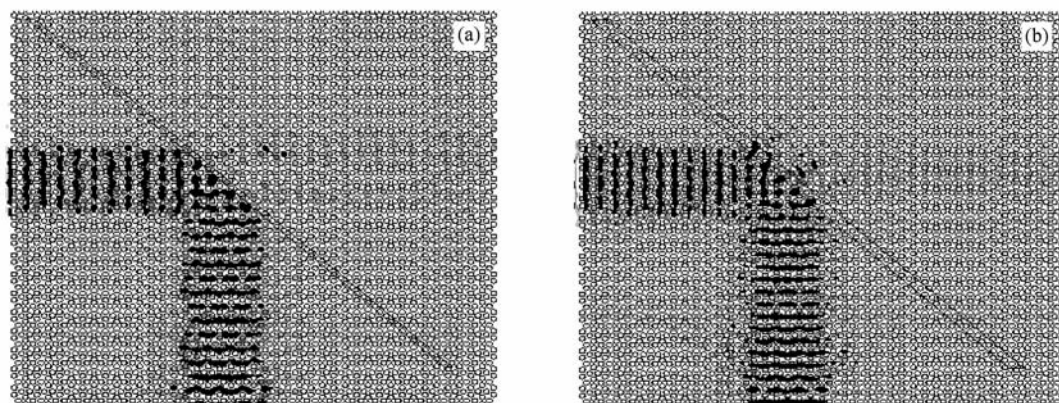


图7 (a)TE 和(b)TM 模式光发生 90° 的折弯

光的 1:1 分束,以及能保持 85% 以上高效率 90° 光折弯. 这种 Archimedes $3^2, 4, 3, 4$ 结构的全光自准直传

输及分束、折弯为设计基于光子晶体的新型光子器件提供了一种新的方案.

-
- [1] Kasaka H, Kawashima T, Tomita A, Notomi M, Tamamura T, Sato T, Kawakami S 1998 *Phys. Rev. B* **58** R10096
- [2] Kasaka H, Kawashima T, Tomita A, Notomi M, Tamamura T, Sato T, Kawakami S 1999 *Appl. Phys. Lett.* **74** 1212
- [3] Rakich P T, Dahlem M S, Tandon S, Ibanescu M, Soljačić M, Petrich G S, Joannopoulos J D, Kolodziejski L A, Ippen E P 2006 *Nat. Mater.* **5** 93
- [4] Li Y Y, Gu P F, Li M Y, Zhang J L, Liu X 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 2596 (in Chinese) [厉以宇、顾培夫、李明宇、张锦龙、刘旭 2006 物理学报 **55** 2596]
- [5] Yu X F, Fan S H 2003 *Appl. Phys. Lett.* **83** 3251
- [6] Shen X P, Han K, Shen Y F, Li H P, Xiao Z W, Zhen J 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 2760 (in Chinese) [沈晓鹏、韩奎、沈义峰、李海鹏、肖正伟、郑健 2006 物理学报 **55** 2760]
- [7] Shen X P, Han K, Li H P, Shen Y F, Wang Z Y 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 1737 (in Chinese) [沈晓鹏、韩奎、李海鹏、沈义峰、王子煜 2008 物理学报 **57** 1737]
- [8] Zhang B, Wang Z 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 1404 (in Chinese) [张波、王智 2007 物理学报 **56** 1404]
- [9] Li Y Y, Gu P F, Zhang J L, Li M Y, Liu X 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 4918 (in Chinese) [厉以宇、顾培夫、张锦龙、李明宇、刘旭 2006 物理学报 **55** 4918]
- [10] Li G J, Kang X L, Li Y P 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 6403 (in Chinese) [李国俊、康学亮、李永平 2007 物理学报 **56** 6403]
- [11] Chen Y Y, Huang Z H, Shi J L, Li C H, Wang Q 2007 *Chin. Phys.* **16** 173
- [12] Dong J W, Hu X H, Wang H Z 2007 *Chin. Phys.* **16** 1057
- [13] Iew R, Etrich C, Peschel U, Lederer F, Augustin M, Fuchs H J, Schelle D, Kley E B, Nolte S, Tünnermann A 2004 *Appl. Phys. Lett.* **85** 5854

- [14] Li Z, Chen H, Song Z, Yang F, Feng S 2004 *Appl. Phys. Lett.* **85** 4834
- [15] Li Y Y, Gu P F, Zhang J L, Li M Y, Liu X 2006 *Appl. Phys. Lett.* **88** 151911
- [16] Ni B, Li H, Qiu Y S, Jiang J Z, Wang Y F, Lin G M, Bai J B, Hong H L, Chen X Y 2008 *Proc. SPIE* **7135** 71353
- [17] Wang Y F, Qiu Y S, Chen X Y, Lin G M, Hong H L, Ni B 2007 *Proc. SPIE* **6838** 683804
- [18] Grünbaum B, Shephar G 1987 *Tilings and Patterns* (New York: Freeman)
- [19] Gajić R, Meisels R, Kuchar F, Jovanović D J, Hingerl K 2007 *Mater. Sci. Forum* **555** 83
- [20] Gajić R, Jovanović D, Hingerl K, Meisels R, Kuchar F 2008 *Opt. Mater.* **30** 1065
- [21] David S, Chelnokov A, Lourtioz J M 2000 *Opt. Lett.* **25** 1001
- [22] David A, Fujii T, Matioli E, Sharma R, Nakamura S, Benisty H 2006 *Appl. Phys. Lett.* **88** 073510
- [23] Ueda K, Dotera T, Gemma T 2007 *Phys. Rev. B* **75** 195122
- [24] Shen X P, Han K, Yang X Q, Shen Y F, Li H P, Tang G, Guo Z T 2007 *Chin. Opt. Lett.* **5** 11

Polarization-independent self-collimation bends and beam splitters in $3^2, 4, 3, 4$ Archimedean photonic crystals *

Zhong Qi Han Kui[†] Shen Xiao-Peng Tong Xing Wu Qiong-Hua Li Ming-Xue Wu Yu-Xi

(College of Science, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

(Received 17 July 2009; revised manuscript received 29 January 2010)

Abstract

By using equi-frequency contour analysis and finite-difference time-domain simulation, self-collimation for TE- and TM-polarizations are achieved at the same frequency in two dimensional $3^2, 4, 3, 4$ Archimedean photonic crystals. The bends and beam splitters are realized by truncating an air block in the photonic crystals. It is observed that the line defect can produce a tunable one-to-two beam splitter by controlling the width of the air block. A bend and a 1:1 beam splitter for the TE- and TM- polarization are designed respectively, both have high efficiency. This study proposes a new design method for optical devices based on photonic crystals.

Keywords: photonic crystals, Archimedean lattices, self-collimation

PACC: 4270Q, 4280H, 4280J

* Project supported by the Science Foundation of China University of Mining and Technology, China (Grant Nos. OK061064, OK080263).

[†] Corresponding author. E-mail: han6409@263.net