

# 基于光子晶体自准直环形谐振腔的全光均分束器\*

童星 韩奎<sup>†</sup> 沈晓鹏 吴琼华 周菲 葛阳 胡晓娟

(中国矿业大学理学院, 徐州 221116)

(2010年9月14日收到;2010年10月12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,在一个与偏振态无关的自准直光子晶体环形谐振腔中,研究发现当环形谐振腔内的光传输距离改变时,横电波(TE)和横磁波(TM)两种偏振态的光在通过环形谐振腔之后的输出将会随之变化并呈现出不同的周期性.通过选择适合的传输距离,实现了TE,TM自准直的情况下同时分束50%的结果,构成了一种基于光子晶体自准直环形谐振腔的全光均分束器.全光均分束器扩大了分束器的运用范围,也会在高密度集成光路中发挥重要的作用.

**关键词:** 光子晶体, 环形谐振腔, 自准直, 分束器

**PACS:** 42.70.Qs, 42.79.Fm

## 1. 引言

自从1987年美国物理学家Yablonovich<sup>[1]</sup>和John<sup>[2]</sup>各自独立地提出光子晶体的概念以来,有关光子晶体的研究在光学物理、凝聚态物理、电磁波、信息技术等领域引起了广泛关注.光子晶体不仅是一种新型的人工结构功能材料,也是为高科技技术突破带来新机遇的关键性基础材料<sup>[3-5]</sup>.其特点是人们可以利用这种材料来控制光子的运动.近年来有关光子晶体自准直效应的研究已逐渐成为了热点.因为自准直光束可以克服光束的发散或衍射加宽效应而显示出几乎完全准直的传播特性<sup>[6]</sup>,所以在光子晶体中无须引入常用的波导结构,这样可以使高密度的集成光路变的更灵活更简洁更方便.现在关于自准直效应的理论和实验研究<sup>[7-13]</sup>有很多,如单一偏振的自准直效应<sup>[14]</sup>,偏振无关的自准直效应<sup>[15]</sup>,大角度范围内实现自准直效应<sup>[16]</sup>,还有基于自准直效应的偏振态分束器<sup>[17]</sup>和光强分束器<sup>[18]</sup>等.由此可见,自准直效应必然会在高密度集成光路中发挥重要的作用.

从现有的研究成果<sup>[19,20]</sup>来看,基于自准直效应的光强分束器还有不够完善的地方.在文献[20]中,作者已经实现了横电波(TE),横磁波(TM)模式

同时自准直,但是在进行分束器研究时发现TE,TM的光虽然能够同时自准直但是两种模式的分束效果不一样.那么到底能否在TE,TM同时自准直的情况下达到同时50%分束呢?基于此,本文设计了一种新型的谐振腔实现了TE,TM同时分束50%的方法并运用有限时域差分法(FDTD)进行模拟,达到了预期的效果.

## 2. 基于自准直环形谐振腔全光均分束器的设计

### 2.1. 环形谐振腔的结构

本文设计的环形谐振腔是嵌在二维正方格子排列空气孔型光子晶体中的,空气孔半径为 $0.33a$ ( $a$ 为晶格常数),背景为折射率 $n = \sqrt{12}$ 的硅介质.我们采用平面波展开法(PWE)计算了TE波和TM波第一能带的等频图,如图1(a)和(b)所示,图中可以看出,无论是TE波还是TM波,从归一化频率 $0.17(a/\lambda)$ 到 $0.19(a/\lambda)$ 的等频线基本是平直的并且它们的群速度 $v_g = \nabla_k w$ 保持相同的传播方向,因此在这个频宽内沿着 $\Gamma M$ 方向是可以实现偏振态无关的自准直.这样我们就可以用虚拟波导代替传统的缺陷波导,从而大大增加了光子晶体中光

\* 中国矿业大学科技基金和中央高校基本科研业务费专项资金(批准号:2010LKWL05)资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯联系人. E-mail: han6409@263.net

路设计的灵活性.

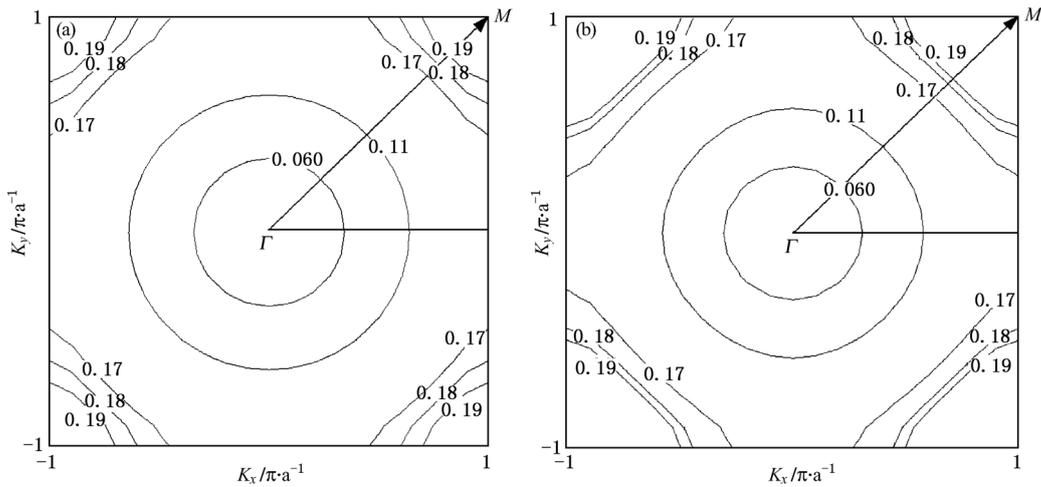


图1 第一能带等频图 (a)TE,(b)TM

以上面的二维光子晶体为背景,设计一个基于自准直效应的环形谐振腔<sup>[21]</sup>,其结构如图2(a)所示,它是由2个完全相同的分束器BS1和BS2和2个完全相同的反射镜M1和M2组成的.其中分束器

BS是通过改变一排空气孔半径 $r_s$ 来实现,如图2(b)所示.而反射镜M是用矩形的空气缺陷来制作,缺陷宽度是 $W$ ,如图2(c)所示.

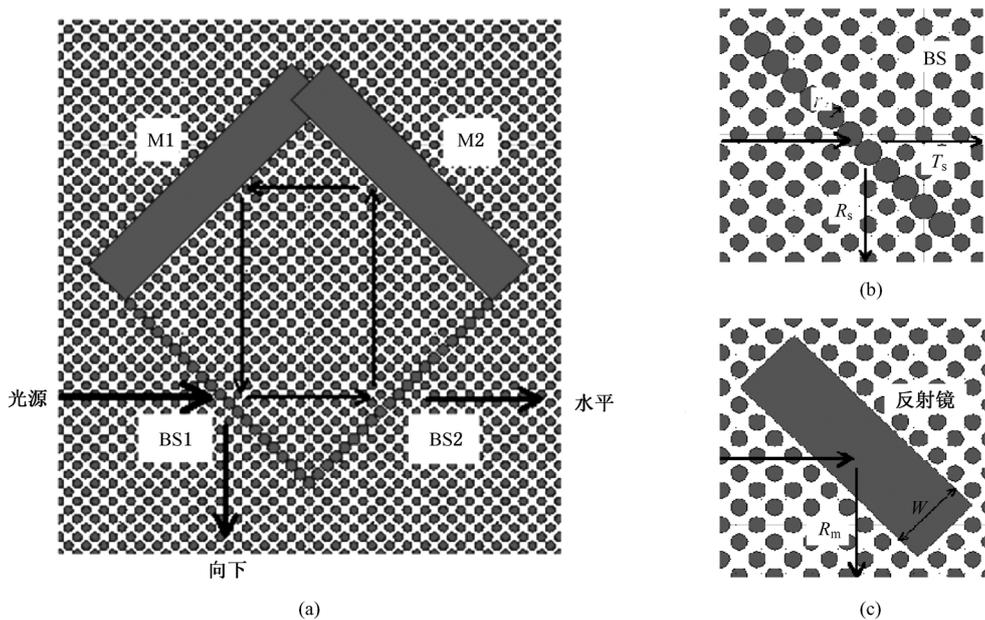


图2 环形谐振腔的结构图

### 2.2. 全光均分束器的 FDTD 模拟

由图1(a)和(b)等频图分析可知,在频率 $0.17(a/\lambda)$ 到 $0.19(a/\lambda)$ 内都可以实现光无偏振态自准直传输.因为在 $f = 0.175(a/\lambda)$ 时 TE, TM 的自准直效果都相对较好,所以选择 $f = 0.175(a/\lambda)$ 作为全光均分束器 FDTD 模拟的工作

频率.

在光子晶体中插入一个倾斜 $45^\circ$ 的空气缺陷,自准直光束从左端入射到光子晶体并通过空气缺陷,在空气缺陷的左,右,下3处放置3个光强探测器.研究发现当空气缺陷的宽度发生改变时,自准直光束通过空气缺陷后的分束情况也随之改变.通过扫描空气缺陷宽度,我们得到了 TE, TM 不同模式

下缺陷宽度  $W$  对反射镜 M 光强分布的影响,如图 3 所示.从图中可以看出,当宽度  $W > 2a$  时,对于不同

偏振模式的光在反射镜处的透射率都接近于零,为此我们取  $W = 3a$  为缺陷宽度.

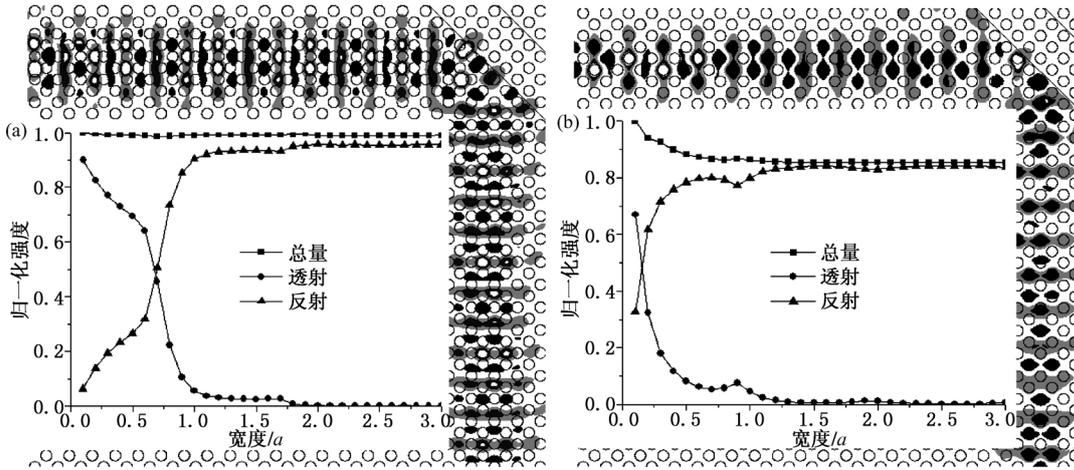


图3 空气缺陷宽度变化时,TE 模式和 TM 模式光束的分束情况及  $f = 0.175(c/a)$  时 TE, TM 光束的 FDTD 模拟情况图 (a)TE 模式;(b)TM 模式

运用类似于确定反射镜缺陷宽度的方法,我们扫描了分束器半径  $r_s$  在 TE, TM 不同模式下对光强分布的影响,如图 4 所示.从中不难发现,对于不同偏振模式的光来说,当半径  $r_s$  一样时,分束的情况并不是相同的,这与文献[20]中的结果是一致的.从环形谐振腔的结构来看,向下输出口的光强主要

由入射光  $I$  从 BS1 反射的光强和腔内光从 BS1 透射的光强组成.为了能使  $I_0/I_1 = 1:1$ ,分束器的透射率就必须大于反射率,所以我们选择  $r_s = 0.45a$ .当  $r_s = 0.45a$  时, TE 模式的透射率:反射率为 0.74:0.24 = 3.08, TM 模式的透射率:反射率为 0.61:0.33 = 1.85.

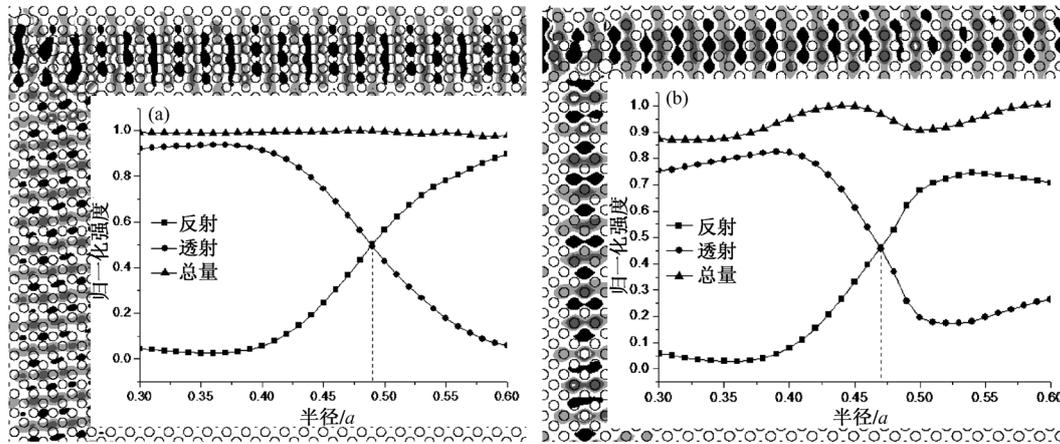


图4 半径  $r_s$  变化时,不同光束的分束情况及  $f = 0.175(c/a)$  时 TE, TM 光束的 FDTD 模拟情况图 (a)TE 模式;(b)TM 模式

在分束器 BS 的半径  $r_s$  和反射镜的缺陷宽度  $W$  确定之后,研究发现,对于不同偏振模式的光,环形谐振腔内的传输距离  $L$  对其输出口向下和水平处的光强分布有不同的影响.我们发现扫描  $L$  从  $40\sqrt{2}a$  变化到  $60\sqrt{2}a$  时,得出了向下和水平处的光强  $I$  与  $\Delta L$  的关系图,分别如图 5 和 6 所示.

从图中可以明显看出,对于不同偏振模式的光

向下和水平处的光强都随传播距离  $L$  成周期性变化,TE 模式下周期  $T_{TE} = 4\sqrt{2}a$ , TM 模式下周期  $T_{TM} = 6\sqrt{2}a$ ,显然在一个周期内,无论何种模式,向下和水平处的光强为 1:1 的点不止一个.比如在 TE 模式下,在点  $\Delta L = 1.6\sqrt{2}a$  时,光强为 1:1. 而 TM 模式下,在点  $\Delta L = 5.6\sqrt{2}a$  时,光强为 1:1. 因为 TE

模式的周期  $T_{TE} = 4\sqrt{2}a$ , 所以 TE 模式在点  $\Delta L = 5.6\sqrt{2}a = 1.6\sqrt{2}a + T_{TE}$  时, 光强也应该为 1:1. 这样我们就在  $\Delta L = 5.6\sqrt{2}a$  处实现了 TE, TM 同时自准直分束 50%. 下面我们仿真了  $L = 45.6\sqrt{2}a$  时 TE

和 TM 的传播情况, 结果如图 7(a) 和 (b) 所示. TE 模式时, 水平和向下出口处的光强比  $I_h : I_d = 1.03 : 1$ , TM 模式时则为  $I_h : I_d = 1.05 : 1$ . 并且光在通过谐振腔以后自准直效果依然很好.

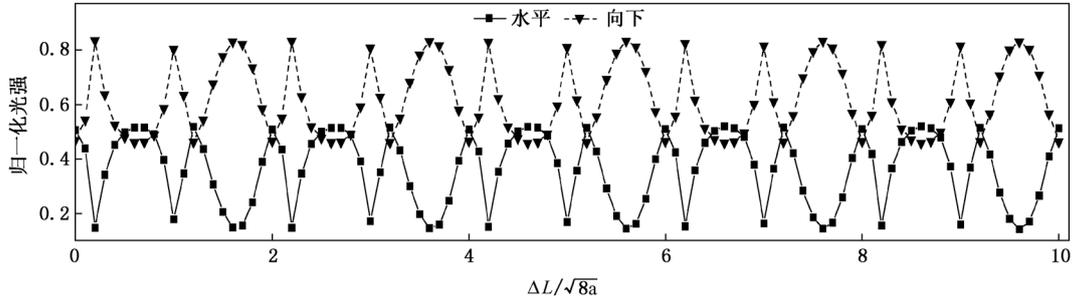


图 5 TE 模式及  $f = 0.175(c/a)$  下向下和水平处的光强与  $\Delta L$  的关系图

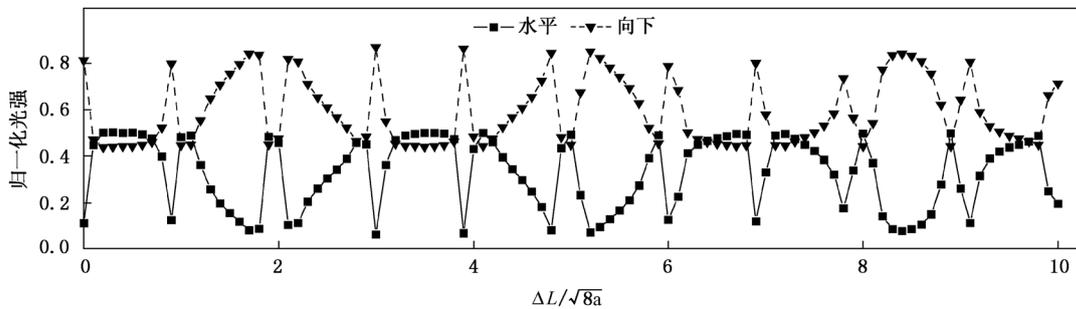


图 6 TM 模式及  $f = 0.175(c/a)$  下向下和水平处的光强与  $\Delta L$  的关系图

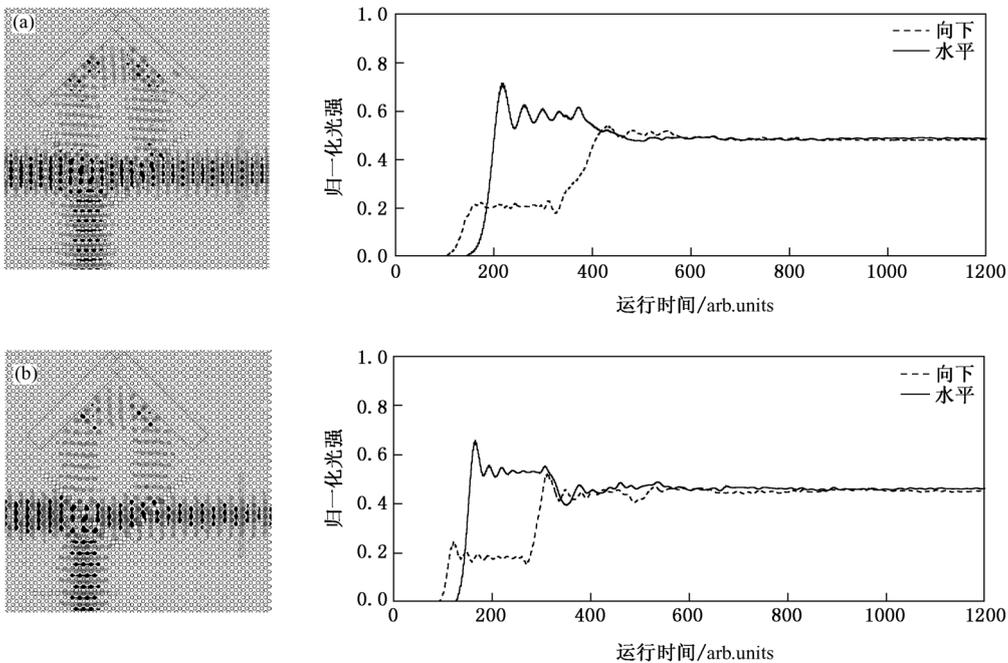


图 7 TE 模式(a)和 TM 模式(b) 及  $f = 0.175(c/a)$  下 1:1 分束模拟情况图

### 3. 全光分束器的理论分析

环形谐振腔主要是由分束器 BS 和反射镜 M 构成. 其中分束器 BS 的透射率为  $T_s$ , 反射率为  $R_s$ . 反射镜 M 的宽度是  $W$ , 反射率是  $R_m$ . 设光在环形谐振腔里的传输距离为  $L$ , 由多重散射理论可知, 谐振腔向下输出口处的光强  $I_d$  与入射光的光强  $I$  存在关系<sup>[22,23]</sup>

$$\frac{I_d}{I} = \frac{T_s^2}{(1 - R_s R_m)} \times \frac{1}{1 + [4R_s R_m / (1 - R_s R_m)^2] \cdot \sin^2(\phi/2)}, \quad (1)$$

其中  $\phi$  为光在环形谐振腔里传播一周引起的相位改变且  $\phi = KL + \theta$ ,  $\theta$  为光在通过反射镜 M 和分束器 BS 时所有的相位改变量. 因为  $R_m = 100\%$ ,  $R_s = 1 - T_s$ ,  $I = I_d + I_t$  上式可以简化为

$$\frac{I_d}{I_t} = \frac{(1 - R_s)^2}{8R_s} \cdot (1 - \cos\phi). \quad (2)$$

设  $A = \frac{(1 - R_s)^2}{8R_s}$ , 则

$$\frac{I_d}{I_t} = A \cdot [1 - \cos(KL + \theta)]. \quad (3)$$

从(3)式看出环形谐振腔的  $I_d/I_t$  与光程  $L$  有关, 并且呈周期性变化. 因为  $K$  与谐振腔结构和光的偏振有关, 所以不同的偏振周期  $K$  值也不一样. 假设 TE

模式的周期为  $T_{TE}$ ,  $T_{TE}$  内光强 1:1 的光程为  $L_{OTE}$ . TM 模式的周期为  $T_{TM}$ ,  $T_{TM}$  内光强 1:1 的光程为  $L_{OTM}$ . 现在要求无论是 TE 还是 TM 模式, 向下和水平处的光强都相等. 换言之  $I_d/I_t = 1:1$ , 当  $I_d/I_t = 1:1$  时, 对于 TE 模式, 谐振腔内的光传输距离可以是  $L_{TE} = L_{OTE} + nT_{TE}$  ( $n$  为整数), 而对于 TM 模式, 谐振腔内的光传输距离可以是  $L_{TM} = L_{OTM} + mT_{TM}$  ( $m$  为整数), 只要找到合适  $m, n$  使  $L_{TM} = L_{TE}$ , 这样就可以实现全光分束.

### 4. 结 论

结合能带分析, 在二维正方格子排列空气孔型光子晶体上实现了与偏振无关的自准直, 利用该效应产生的虚拟波导控制光束的直线传播. 再在这种光子晶体内插入 2 个分束器和 2 个反射镜来组成一个环形谐振腔, 通过时域有限差分法研究环形谐振腔的传输特性, 发现环形谐振腔内的光传输距离  $L$  与其输出光强分布存在着周期性的关系. 通过选择适合的  $L$  可以使 TE, TM 同时分束 50%, 并且与模拟的结果一致. 通过理论分析, 从理论上证明了这种环形谐振腔是可以实现 TE, TM 同时分束 50% 的. 首次给出了一种实现 TE, TM 同时自准直时再同时分束 50% 的方法, 扩大了自准直分束器的运用范围.

- [1] Yablonovich E 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 2059
- [2] John S 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 2486
- [3] Gu P F, Chen H X, Qin X Y, Liu X 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 773 (in Chinese) [顾培夫、陈海星、秦小芸、刘 旭 2005 物理学报 **54** 773]
- [4] Dai Q F, Feng T H, Lan S, Liu Z Q, Wu L J 2009 *Chin. Phys. B* **18** 2383
- [5] Ni P G 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 340 (in Chinese) [倪培根 2010 物理学报 **59** 340]
- [6] Kosaka H 1999 *Appl. Phys. Lett.* **74** 1212
- [7] Aaron F 2009 *Opt. Commun.* **282** 1789
- [8] Lee S G, Oh S S, Kim J E, Parka H Y 2005 *Appl. Phys. Lett.* **87** 181106
- [9] Xu Y, Chen X J, Lan S, Dai Q F, Guo Q, Wu L J 2009 *Opt. Express* **17** 4903
- [10] Zabelin V, Dunbar L A, Thomas N L, Houdré R 2007 *Opt. Lett.* **32** 530
- [11] Mocella V, Cabrini S, Chang A S, Dardano P, Moretti L, Rendina I, Olynick D, Harteneck B, Dhuey S 2009 *Phys. Rev. Lett.* **102** 133902
- [12] 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]
- [13] Li Y Y, Gu P F, Li M Y, Zhang J L, Liu X 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 2596 (in Chinese) [历以宇、顾培夫、李明宇、张锦龙、刘 旭 2006 物理学报 **55** 2596]
- [14] Chutinan A 2003 *Opt. Express* **11** 1203
- [15] 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]
- [16] Xu Y, Chen X J, Lan S, Guo Q, Hu W, Wu L J 2008 *J. Opt. A: Pure. Appl.* **10** 1464
- [17] Zhang Y, Jiang Y, Xue W, He S L 2007 *Opt. Express* **15** 14363
- [18] Lorenzo R, Federica P, Matteo F, Annamaria C, Stefano S 2006 *Opt. Lett.* **31** 441

- [19] Ao X Y, He S L 2005 *Opt. Lett.* **30** 2152
- [20] Shen X P, Han K, Yang X Q, Shen Y F, Li H P, Tang G, Guo Z T 2007 *Chin. Opt. Lett.* **5** 662
- [21] Shen X P, Han K, Yuan F, Li H P, Wang Z Y, Zhong Q 2008 *Chin. Phys. Lett.* **25** 4288
- [22] Bahaa E, Malvin C T 1991 *Fundamentals of Photonics* (New York: John Wiley & Sons, Inc) p312
- [23] Chen X Y, Qiang Z X, Zhao D Y, Li H, Qiu Y S, Yang W Q, Zhou W D 2009 *Opt. Express* **17** 19808

## Equal intensity polarization-independent beam splitter based on photonic crystal self-collimation ring resonator\*

Tong Xing Han Kui<sup>†</sup> Shen Xiao-Peng Wu Qiong-Hua Zhou Fei Ge Yang Hu Xiao-Juan

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

(Received 14 September 2010; revised manuscript received 12 October 2010)

### Abstract

By the equi-frequency contour analysis and the finite-difference time-domain simulation, it is observed that the distance of one loop in a photonic crystal self-collimation ring resonator can cause different periodic outputs of the ring resonator for TE and TM polarizations. Equal intensity polarization-independent beam splitter can be achieved by choosing a suitable propagation distance. It expands the range of application of beam splitter and will play a great role in integrated optical circuits.

**Keywords:** photonic crystals, ring resonator, self-collimation, beam splitter

**PACS:** 42.70.Qs, 42.79.Fm

---

\* Project Supported by the Scientific Research Foundation of China University of Mining and Technology and the Fundamental Research Funds for the Central Universities, China (Grant No. 2010LKWL05).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: han6409@263.net