

光子晶体自准直光束偏振分束器^{*}

沈晓鹏[†] 韩 奎 李海鹏 沈义峰 王子煜

(中国矿业大学理学院物理系, 徐州 221008)

(2007 年 5 月 15 日收到, 2007 年 6 月 14 日收到修改稿)

结合能带图和等频图分析, 基于光子晶体自准直效应和光子带隙, 设计了一种紧凑、高效的偏振分束器. 时域有限差分法(FDTD)模拟表明, 该设计可以在一个较大的频率范围 $f = 0.268 - 0.278(c/a)$ 内实现 TE 模和 TM 模的高效(85%)、大角度(90°)分离. 在光通讯波长 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$, 该设计尺寸仅为 $9 \mu\text{m} \times 9 \mu\text{m}$. 这些特性使其在光通讯领域中具有重要的应用前景.

关键词: 光子晶体, 偏振分束器, 自准直

PACC: 4270Q, 4255J, 4280H

1. 引 言

偏振分束器(polarization beam splitter)能够把电磁波相互正交的两种偏振模式分开, 并沿不同的方向传播, 它在光通信、光存储、集成光路中都有重要的应用价值. 传统的偏振分束器一般基于多层膜结构或晶体的双折射特性, 其尺寸一般在毫米量级, 不适用微细加工技术, 在高密度集成光路中缺乏竞争优势. 为了设计出高效、超紧凑的光子学器件, 人们开始更多的关注光子晶体——一类人工设计的新型功能材料, 它利用介电材料的周期排列可以在电磁波波长的尺度范围内调控光波的流动^[1]. 近来, 研究人员相继报道了几种基于光子晶体的偏振分束器^[2-9]. 他们利用 TE 模和 TM 模在光子晶体中具有不同的色散特性, 使一种偏振模式处于正折射而另一种偏振模式处于负折射^[2,3], 或利用光子禁带, 使一种偏振模式处在禁带被反射, 另一种偏振模式处在导带能够通过来实现 TE 模和 TM 模的分离^[5,6]. 这些研究关注了偏振模式的分离结构, 如果应用到集成光路中, 尚须在输入和输出端添加波导来导光, 这无疑会带来器件尺寸增大、效率降低、制作复杂性增加等问题. Kim 等人提出了一种传统介质波导和光子晶体相结合的复合结构, 利用介质波导和光子晶体结构实现光的传导和分束^[7]. 最近, 研究人员还

提出一种引入线缺陷的全光子晶体偏振分束器设计, 利用线缺陷波导实现偏振模的传输和分离, 但是分束距离较小, 或者由于一种偏振模被原路反射而只能利用透射的偏振模^[8,9].

光子晶体复杂的能带结构使其显现出很强的色散和各向异性, 并带来很多有趣的现象, 如超棱镜效应^[10]、自准直效应^[11-14]、负折射效应^[15]等. 无需引入线缺陷或非线性材料, 自准直效应能有效地限制光子晶体中传输光波的空间展宽, 使其无衍射的准直传播. 基于自准直效应容易实现光波的低损耗传输^[16]、大角度折弯和任意分束比的光分束^[14,17], 因而引起了研究人员理论和实验上的广泛关注. 本文设计了一种新型、紧凑的复合全光子晶体分束器, 它由两部分构成: 与偏振无关的自准直结构^[18]和分束结构. 与偏振无关的自准直结构用作虚拟波导可以同时传导 TE 模和 TM 模, 分束结构用于相互正交的偏振模式的分离. 我们用时域有限差分法(FDTD)分析了该偏振分束器的分束特性, 结果表明, 该设计具有很多优点, 如高的分束比、小尺寸、大的分束角等.

2. 偏振分束器设计

为了实现 TE 模和 TM 模的传输与分离, 我们设计了一种复合结构的偏振分束器, 如图 1 所示. 它与偏振无关的自准直结构和偏振分离结构两部分构

^{*} 中国矿业大学科研基金(批准号 2006B025)资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: sxpcumt@163.com

成,都是在高折射率介质($n = 3.5, \text{Si}$)中引入正方格子的空气孔体系,但具有不同的空气孔半径.无偏自准直结构的空气孔半径 $R = \frac{1}{3}a$, a 是晶格常数.该结构能使 TE 模和 TM 模同时保持准直传输而不发散.分束结构由六排沿 Γ 方向较大半径的空气孔排列而成,其半径 $R' = 1.2R$.TE 模和 TM 模(TM 模,电场分量垂直于空气孔轴,TE 模,磁场分量垂直于空气孔轴)经无偏自准直结构的虚拟波导以 45° 入射到两种介质的分界面时,两种偏振模式将被分开:TM 模穿过分束结构后依然保持与入射方向相同的方向传播,而 TE 模将产生 90° 的折弯,被反射后沿与入射方向垂直的方向传播.

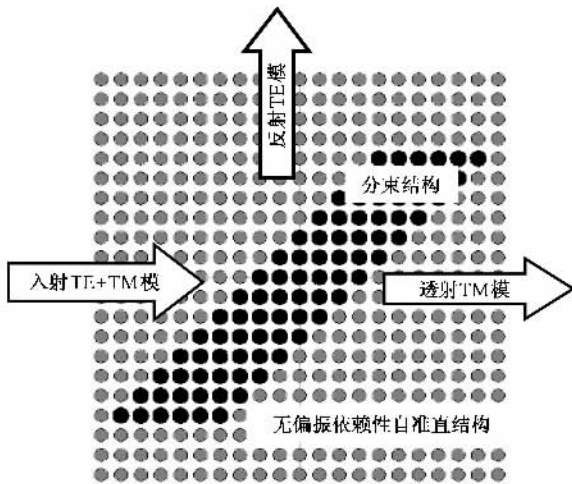


图 1 偏振分束器结构.浅色和黑色区域分别为与偏振无关的自准直区域和偏振分束区域(图中箭头标注了 TE 模和 TM 模的传播方向)

我们结合能带图和等频图分析说明 TE 模和 TM 模在该偏振分束结构中的传播.利用平面波展开法计算与偏振无关自准直结构的等频图,如图 2 所示.在光子晶体中,群速度的定义为 $V_g = \nabla_k \omega(k)$, k 为布洛赫波矢.从该定义可知,群速度矢量垂直与等频图并指向频率增加的方向.可以证明,能流矢量 $V_e = V_g$,光子晶体中折射波的传播方向也即群速度的方向^[19].图 2(a)和(b)分别为 TE 模和 TM 模在频率 $f = 0.2\alpha(c/a)$ 时的等频图,它们都是环绕 Γ 点的圆角正方形.平坦的等频图表明 TE 模和 TM 模都可以在该结构中沿 Γ 方向无发散的准直传输,或称之为与偏振无关的自准直传播.进一步地分析表明,在一个较大的频率范围 $f = 0.258 - 0.281(c/a)$ 内,都可以实现与偏振无关的自准直传播.因此,该结构可以作为无通道的虚拟波导,无需引入介质波导或线缺陷就可以约束两种偏振模无发散的准直传输.

为了实现相互正交的两种偏振模式的分离,如前所述,在无偏自准直结构内部引入分束结构,即改变 Γ 方向六排空气孔的半径.由于空气孔半径的增加,TE 模的带隙变大并上移.当半径增大到 $R' = 1.2R$,TE 模在频率 $f = 0.258 - 0.283(c/a)$ 内表现为光子带隙,完全覆盖原先的自准直频率范围.TM 模受空气孔半径改变的影响较小,仍然表现为导带.如图 3 所示.当入射光束经自准直结构到达分束结构时,TE 模因处在禁带不能通过而被反射到与入射方向垂直的方向,TM 模则在穿过该结构后依然保持原先的方向传播.通过这样一种复合的全光子晶体设计,实现了电磁波两种偏振模式的分离,且分束角达 90° ,远大于前面几篇文章报道的结果.

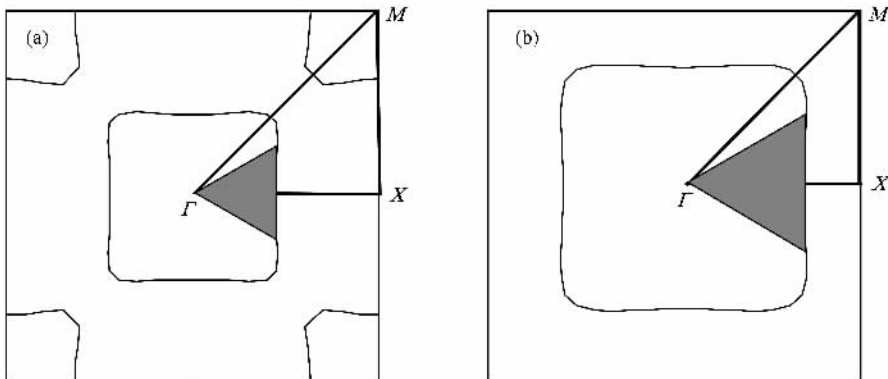


图 2 与偏振无关的自准直区域中 TM 模(a)和 TE 模(b)在频率 $f = 0.2\alpha(c/a)$ 时的等频图(图中环绕 Γ 点的圆角正方形处在第二能带(a)中环绕 M 点的曲线处在第三能带.阴影标注了能够实现自准直的折射波矢的角度范围)

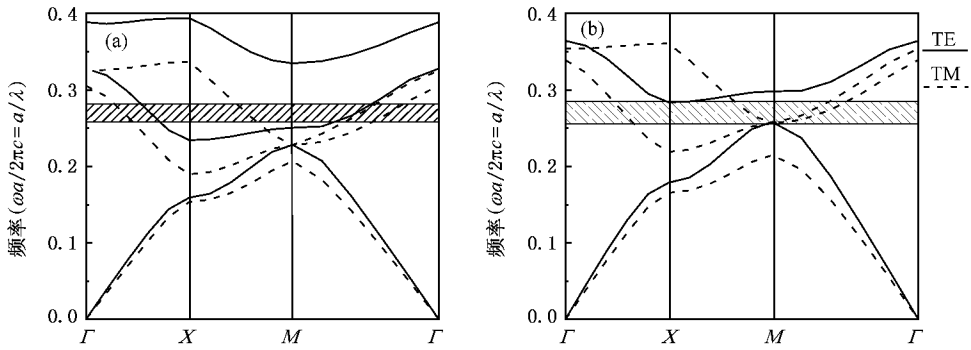


图3 与偏振无关的自准直结构(a)和偏振分束结构(b)的能带图(实线和虚线分别表示TE模和TM模的能带)(a)中的阴影区域标注了与偏振无关的自准直频率范围 $f = 0.258-0.281(c/a)$ (b)中的阴影区域标注了偏振分束结构TE模的禁带频率范围 $f = 0.258-0.283(c/a)$

3. 分析与模拟

利用时域有限差分法对TE模和TM模在偏振分束器中的传播和分束进行了模拟.在偏振分束器结构四周采用完美匹配边界条件,一个束腰为 $6a$ 的

连续高斯光束自左侧沿 10° 方向垂直入射到偏振分束器,入射光的频率为 $f = 0.27(c/a)$.图4(a)(b)分别为稳态下TE模的电场分量和TM模的磁场分量在偏振分束器中的场分布.自准直传输和分束效果非常明显.

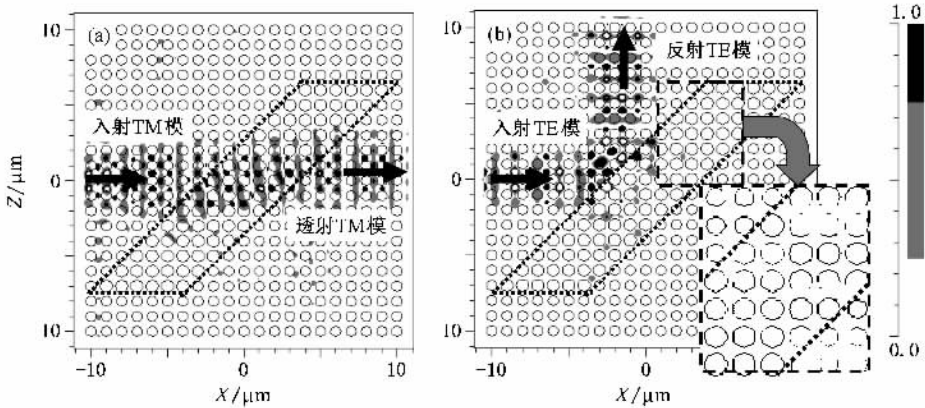


图4 FDTD方法模拟的在频率 $f = 0.27(c/a)$ 时的稳态电场(TM模,图(a))和稳态磁场(TE模,图(b))分布.(b)中插图表示了放大的偏振分束结构

为了定量研究TE模的反射率和TM模的透射率及它们的偏振消光比(polarization extinction ratios),我们用有限时域差分法分析了电磁波在一个尺寸为 $21a \times 21a$ 的偏振分束器结构中的传输行为.该尺寸足以实现TE模和TM模的传输与分离,同时又足够小以用于高密度集成光路中.在入射端和出射端分别放置了一个完全相同的探测器,用以记录入射和出射强度,并用出射光波强度与入射光波强度的比值得到归一化的透射率和反射率.FDTD分析结果如图5所示.可以看出,在较大的频率范围 $f = 0.268-0.273(c/a)$ 内,TE模的反射率和TM模的透

射率都保持在85%以上.同时,值得指出的是,在频率 $f = 0.28(c/a)$ 时,TE模的反射率达到99%,反射率非常高.此外,在频率 $f = 0.27(c/a)$ 时,透射光和反射光的偏振消光比分别达到23.03 dB和15.54 dB.其中透射光和反射光的偏振消光比分别定义为 $-10\log(T_{TE}/T_{TM})$ 和 $-10\log(R_{TM}/R_{TE})$, T_{TE} , T_{TM} 分别为透射的TE模和TM模的强度, R_{TM} , R_{TE} 分别为反射的TM模和TE模的强度.

数值分析表明,该偏振分束器可以在一个较小的尺寸上实现TE模和TM模的传输与分束,并能在较大的频率范围内保持较高的效率和偏振分束比.

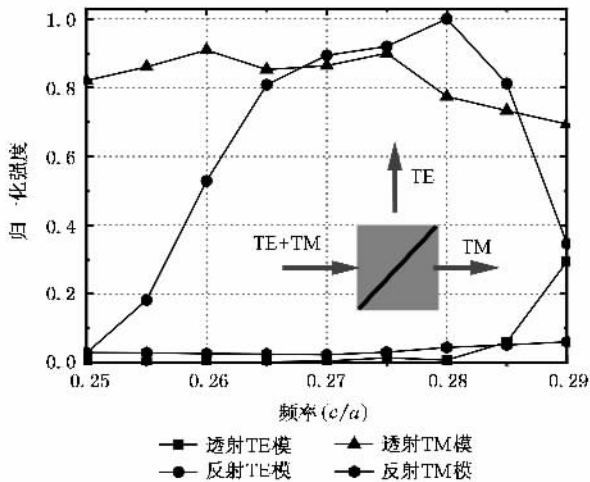


图5 TE模的反射系数(三角形)与TM模的透射系数(正方形)
(插图为偏振分离示意图)

这些优良特性表明该设计可以在光通讯领域中发挥

重要作用,如在集成光路、光存储中.为了使该器件工作在光通讯波长 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$,根据麦克斯韦方程组的标度不变性,相应的尺寸分别为 $a = 405 \text{ nm}$, $R = 135 \text{ nm}$, $R' = 1.2R = 162 \text{ nm}$,该偏振分束器的面积仅为 $9 \mu\text{m} \times 9 \mu\text{m}$.这些利用现有的半导体微细加工技术都是可以做到的.

4. 结 论

基于光子晶体的色散特性,结合平面波展开法和有限时域差分法,我们提出并讨论了一种新型的超紧凑的全光子晶体偏振分束器.它同时具有传导和分束结构,传导区域利用自准直效应,在不引入缺陷或波导的情况下就可以约束光波的准直传播,具有较大的分束角、较高的分束率和偏振消光比.在高密度集成光路和光通讯领域可能会发挥重要作用.

- [1] Joannopoulos J D, Meade R D, Winn J N 1995 *Photonic Crystals: Molding the Flow of Light* (Princeton University Press, Princeton)
- [2] Ao X Y, Liu L, Wosinski L, He S L 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 171115
- [3] Lu Z H, Tang Y F, Shen Y F, Liu X H, Zi J 2005 *Phys. Lett. A* **346** 243
- [4] Zhen Y and Li L M 2005 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **38** 3351
- [5] Li M Y, Gu P F 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 2358 (in Chinese) [李明宇、顾培夫 2005 物理学报 **54** 2358]
- [6] Li Y Y, Gu P F, Li M Y 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 3889 (in Chinese) [厉以宇、顾培夫、李明宇 2005 物理学报 **54** 3889]
- [7] Kim S, Nordin G P, Cai J, Jiang J 2003 *Opt. Lett.* **28** 2384
- [8] Kalra Y, Sinha R K 2005 *Opt. Quantum Electron* **37** 889
- [9] Sinha R K, Kalra Y 2006 *Opt. Express*. **14** 10790
- [10] Kosaka H, Kawashima T, Tomita A, Notomi M, Tamamura T, Sato T, Kawakami S 1998 *Phys. Rev. B* **58** R10096
- [11] Kasaka H, Kawashima T, Tomita A, Notomi M, Tamamura T, Sato T, Kawakami S 1999 *Appl. Phys. Lett.* **74** 1212
- [12] Rakich P T, Dahlem M S, Tandon S, Ibanescu M, Soljačić M, Petrich G S, Joannopoulos J D, Kolodziejski L A 2006 *Nat. Mater.* **5** 93
- [13] 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]
- [14] Yu X F, Fan S H, 2003 *Appl. Phys. Lett.* **83** 3251
- [15] Zhang B, Wang Z 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 1404 (in Chinese) [张波、王智 2007 物理学报 **56** 1404]
- [16] Prather D W, Chen C H, Shi S Y, Miao B L, PusTai D M, Venkataraman S, Sharkawy A S, Schneider G J, Murakowski J A 2004 *Proc. SPIE*. **5360** 175
- [17] Lee S G, Oh S S, Kim J E, Park H Y 2005 *Appl. Phys. Lett.* **87** 181106
- [18] Shen X P, Han K, Shen Y F, Li H P, Xiao Z W, Zheng 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]
- [19] Sakoda K 2001 *Optical Properties of Photonic Crystals* (Springer, New York)

Polarization beam splitter for self-collimated beams in photonic crystals^{*}

Shen Xiao-Peng[†] Han Kui Li Hai-Peng Shen Yi-Feng Wang Zi-Yu

(*Department of Physics , China University of Mining and Technology , Xuzhou 221008 , China*)

(Received 15 May 2007 ; revised manuscript received 14 June 2007)

Abstract

We present the design and simulation of an ultra-compact high-efficiency polarization beam splitter (PBS) based on self-collimation effect and photonic crystal band gap in two dimensional photonic crystals. The splitting properties of the PBS have been numerically studied using the finite difference time domain (FDTD) method. It was shown that a 90° separating angle and efficiency of greater than 85% for TE- and TM- modes over a wide frequency range 0.268—0.278 (c/a) can be obtained. The size of PBS is only $9\ \mu\text{m} \times 9\ \mu\text{m}$ at optical communication wavelength $\lambda = 1.55\ \mu\text{m}$. These features of the proposed PBS make it a promising candidate in optical communications application.

Keywords : photonic crystals , polarization beam splitter , self-collimation

PACC : 4270Q , 4255J , 4280H

^{*} Project supported by the Science Foundation of China University of Mining and Technology (Grant No.2006B025).

[†] E-mail : sxpcumt@163.com