

文章编号 1004-924X(2016)02-0286-06

空气孔硅光子晶体偏振无关 3 dB 分光器

陈曦曜^{1*}, 林媛媛², 林贵敏¹, 傅平¹

- (1. 闽江学院 物理学与电子信息工程系, 福建 福州 350108;
2. 福建师范大学 光电与信息工程学院, 福建 福州 350007)

摘要:提出并成功设计了基于自准直马赫-曾德尔干涉仪(SMZI)的空气孔硅光子晶体偏振无关 3 dB 分光器。介绍了采用偏振透射谱匹配的方法, SMZI 可以实现偏振无关分束的基础理论。通过连续改变 SMZI 两臂的光程差, 基于匹配两个偏振的透射谱, 成功实现了在归一化频率下将 TE 偏振和 TM 偏振的入射自准直光束进行 1:1 分光。最后, 利用时域有限差分数值模拟软件计算出来的 TE 偏振瞬时磁场分布图和 TM 偏振瞬时电场分布图验证了自准直光束的分光情况。结果显示: 如果将工作波长定在 1 550 nm, 该偏振无关 3 dB 分光器大小仅为 $16.7 \mu\text{m} \times 16.7 \mu\text{m}$ 。由于具有尺寸微小、结构简单并使用单一硅材料等特性, 该分光器有望应用于集成光路中。

关键词:光子晶体; 自准直效应; 马赫-曾德尔干涉仪; 偏振无关; 分光器

中图分类号: TN256 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162402.0286

Polarization-independent 3 dB beam splitter in hole-type silicon photonic crystal

CHEN Xi-yao^{1*}, LIN Yuan-yuan², LIN Gui-min¹, FU Ping¹

- (1. *Department of Physics and Electronic Information Engineering, Minjiang University, Fuzhou 350108, China;*
 2. *College of Photonic and Electronic Engineering, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China)*
- * *Corresponding author, E-mail: chenxy2628@aliyun.com*

Abstract: A Polarization-independent 3 dB Beam Splitter (PIBS) based on a self-collimation Mach-Zehnder Interferometer (SMZI) in a hole-type silicon photonic crystal (PhC) is proposed and successfully designed. According to theoretical analysis, it shows that the SMZI can implement the polarization-independent beam splitting by utilizing polarization transmission matching method. Then, by changing the path length difference of the SMZI continuously, the same splitting ratio 1:1 of self-collimation beams for both transverse-electric (TE) modes and transverse-magnetic (TM) modes is obtained at the operating frequency of $0.1774c/a$ based on matching two polarization transmission spectra. This behavior of the PIBS is also numerically demonstrated with the magnetic-field distribution for TE polarization and the electric-field distribution for TM polarization calculated by the time domain finite difference numerical simulation software. The results show that the dimension of the 3 dB PIBS is on-

收稿日期: 2015-09-21; 修订日期: 2015-11-10.

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(No. 51277091); 福建省自然科学基金面上项目(No. 2011J01219); 福建省中青年教育科研基金项目(No. JA14246)

ly $16.7 \mu\text{m} \times 16.7 \mu\text{m}$ when its working wavelength is at 1550 nm . With its small dimensions, simple structure and single silicon material, this 3dB PIBS may have practical applications in future photonic integrated circuits.

Key words: photonic crystal; self-collimation; Mach-Zehnder interferometer; polarization-independent; beam splitter

1 引言

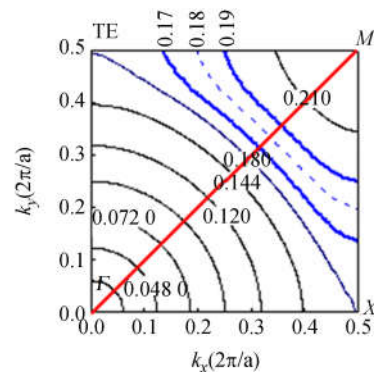
光子晶体中存在独特的自准直效应,该效应能够使窄光束(即光束宽度与工作波长可比拟)在无缺陷的光子晶体中保持直线传输,而不发生衍射现象^[1-2]。另外,两个传播方向互相垂直的自准直光束,可以在光子晶体中互相交叉却不会互相干扰,就像在自由空间中两个宽光束可以无干扰地相互交叉一样。由于这两个独特的优点,近年来基于自准直效应的新型光子晶体滤波器成为一个研究热点。国际上许多研究小组通过数值模拟方法或实验方法,成功设计出了多种自准直滤波器^[3-16]。其中,自准直马赫-曾德尔干涉仪(Self-collimation Mach-Zehnder Interferometer, SMZI)可以用来做波分复用器或光分束器^[6,8,11-14],不过它们只能在单偏振条件下工作。由于在空气孔硅光子晶体中存在一定的双偏振共同自准直频率范围,本课题组曾经利用两个偏振透射峰匹配的方法,在国际上首次成功设计出了偏振无关的光下路滤波器^[11]。

由于结构的各向异性,一般来说光子晶体具有很大的双折射,因此可以预见当相同频率、不同偏振的自准直光束通过 SMZI 时,它们的透射谱是不同的。本课题组根据干涉的偏振依赖性,利用两种偏振透射谱的透射峰匹配的方法,在国际上首次成功设计出了基于 SMZI 的偏振分光器(Polarization Beam Splitter, PBS),它的工作原理完全不同于传统的偏振分光器。在这个基础上,本文再次利用透射峰匹配的方法,通过扫描、筛选多种结构参数,成功设计出空气孔硅光子晶体偏振无关的 3 dB 分光器。

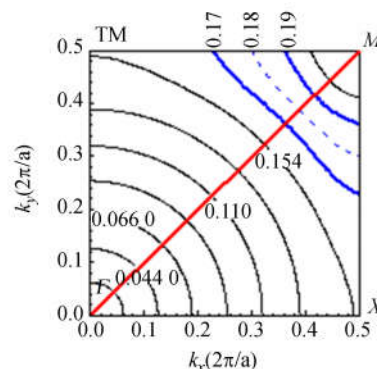
2 偏振无关的自准直频率范围

由于硅材料的微加工技术已经比较成熟,因此本文选择空气孔、硅材料的二维光子晶体作为

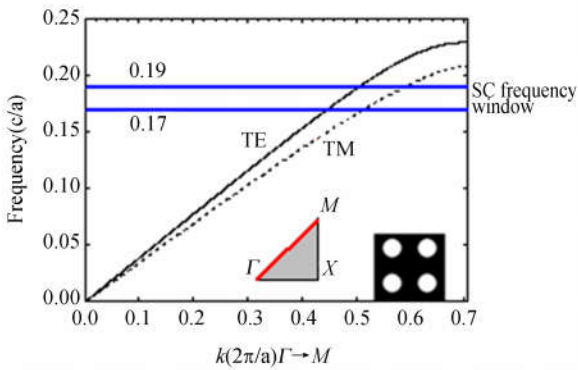
背景结构。这里取硅材料的介电常数 $\epsilon=12$,空气孔半径 $r=0.33a$,其中 a 是光子晶体的晶格常数。利用平面波展开法数值软件 MPB,分别画出了 TE 和 TM 两个不同偏振下,波矢空间四分之一第一布里渊区中的等频图,如图 1(a)和 1(b)所示。图 1(c)画出了两个偏振下,沿着 GM 方向的色散关系曲线。从图中可见,在频率为 $0.176 \sim 0.190c/a$ 时,等频线近似于直线。由于光能量的传播方向总是垂直于等频线,因此在这个频率范围的光将沿着同一个方向传播,即使光束宽度窄到跟波长可比拟。这就是光子晶体中特有的自准直效应。图 1 表明,TE 和 TM 两个偏振具有共



(a) TE 模式
(a) TE modes



(b) TM 模式
(b) TM modes



(c)沿 GM 方向两个偏振的色散关系

(c)Dispersion curves for two polarizations along GM direction

图 1 空气孔正方晶格硅光子晶体中,第一能带 TE 偏振和 TM 偏振等频图及其色散关系,两条实线之间对应于自准直频率范围,插图表示光子晶体的结构

Fig. 1 Equal frequency contours (EFCs) of the first band for TE modes and TM modes in a silicon photonic crystal consisting of a square lattice of air holes and dispersion curves for two polarizations along GM direction. The regions between two solid lines correspond to SC frequency window. Inset: structure of photonic crystal.

同的自准直频率 $0.176 \sim 0.190 c/a$, 这一点非常重要,它是设计偏振无关滤波器的前提。

从图 1(c)可以看出,两个偏振的色散关系是不相同的,这是因为光子晶体中存在双折射。由于在共同自准直频率 $0.176 \sim 0.190 c/a$ 内,色散关系近似于直线,因此可以进行如下线性拟合:

$$f = (c/2\pi n_e)k + f_0, \quad (1)$$

其中: n_e 是自准直光束的有效折射率, k 是布洛赫波矢, f_0 为拟合参数。对 TE 偏振进行线性拟合,最佳拟合参数为 $n_{e,TE} = 2.8739$, $f_{0,TE} = 0.00761c/a$; 对 TM 偏振进行线性拟合,最佳拟合参数为 $n_{e,TM} = 3.8794$, $f_{0,TM} = 0.03795c/a$ 。由此可知,该光子晶体的双折射是比较大的,两个偏振的有效折射率之比大约为 $n_{e,TE} : n_{e,TM} \approx 3 : 4$ 。

3 基于 SMZI 的偏振无关 3 dB 分光器

双偏振共同自准直频率范围的存在为偏振无关的自准直滤波器设计提供了前提条件。在前述

的空气孔硅光子晶体中,所研究的 SMZI 由两个相同的反射镜 (M_1, M_2) 和两个相同的分束镜 (S_1, S_2) 构成,如图 2(a)所示。在自准直频率范围内,窄光束可以依赖自准直效应在光子晶体中无衍射传输。每个反射镜由一个沿着 Γ_C 方向的长方形空气区域构成,其宽度等于 5 排空气孔的占宽。每个分束镜由沿着 Γ_C 方向的一个线缺陷构成,该线缺陷的空气孔半径为 $r = 0.45a$ 。在 SMZI 中,从左边入射的自准直光束首先被第一个分束镜 S_1 分成两路光束,其中较长的一路为 S_1 的反射光,向上传输后经过两个反射镜的全反射之后,又回到第二个分束镜 S_2 ; 较短的一路为 S_1 的透射光,向右传输后也到达 S_2 。这两路光的

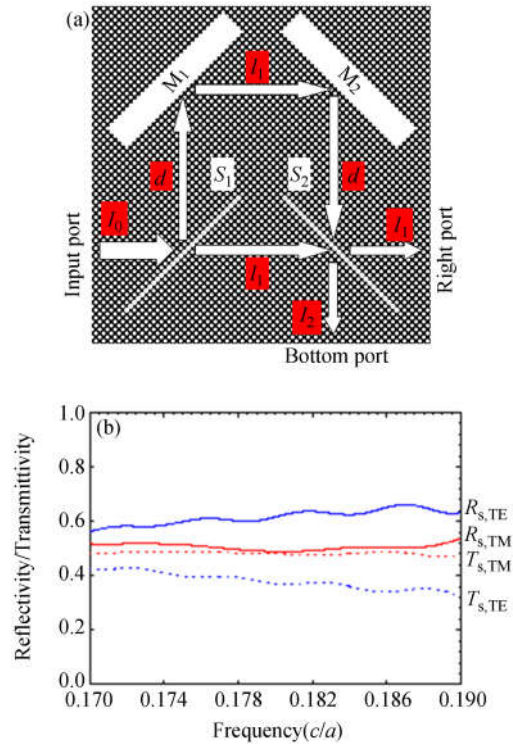


图 2 (a)光子晶体自准直马赫-曾德尔干涉仪结构,箭头表示自准直光束的传播方向;(b)在双偏振自准直频率范围内,分束镜的反射率 R_s 和透射率 T_s 随频率的变化情况

Fig. 2 (a) Structure of SMZI consisting of two beam splitters (S_1, S_2) and two mirrors (M_1, M_2). The arrows indicate propagation directions of SC light beams. (b) Polarization-dependent reflectivity (R_s) and transmittivity (T_s) of one beam splitter in common SC frequency range.

传输距离分别 l_2 和 l_1 , 它们之间的距离差为 $2d$ 。从图中可见, d 等于 S_1 到 M_1 之间的距离。两路自准直光束到达 S_2 后分别被反射和透射, 在右出口(Right port)和下出口(Bottom port)分别产生干涉效应, 干涉之后两个出口的光强分别以 I_1 和 I_2 来表示。

首先利用时域有限差分法(Finite Differential Time Domain, FDTD)数值模拟软件 MEEP, 计算出分束镜的反射率和透射率。如图 2(b)所示, 在共同自准直频率范围内, 反射率 R_s 和透射率 T_s 几乎都不随频率变化。对于 TM 偏振, 透射率和反射率几乎都等于 50%; 对于 TE 偏振, 反射率大约等于 60%, 透射率大约等于 40%。无论是哪种偏振, 反射率和透射率之和均接近 1, 说明该分束镜基本没有插入损耗。

根据双光束干涉理论, 两个出口的透射谱互补, 即有 $I_1 + I_2 = 1$ 。对于 TM 偏振, 由于两个分束镜的反射率均为 50%, 根据双光束干涉理论, 两个出口的透射谱将等高且都落在 $[0, 1]$; 而对于 TE 偏振, 由于两个分束镜的反射率均为 60%, 根据双光束干涉理论可知, 两个出口的透射谱将一高一低, 右出口的透射谱落在 $[0, 0.36]$, 下出口的透射谱落在 $[0.64, 1]$ 。

再次利用 FDTD 数值模拟软件分别计算两个出口的透射谱。计算时, 用可以覆盖自准直频率范围的高斯光脉冲从左向右入射到分束镜 S_1 , 并在两个出口分别放置两个 Monitors 以测量出射光强。图 3(a)画出了当 $d=19\sqrt{2}a$ 时, 两个出口的透射谱。从图中可见, 两个偏振透射谱的数值模拟结果很好地符合了理论预期。从图 3(a)可见, TE 的相邻透射峰间距要大于 TM 的相邻透射峰间距, 两者比例约为 4 : 3, 这个结果与两个偏振的有效折射率比 $n_{e,TE} : n_{e,TM} \approx 3 : 4$ 相符合。

对于某个偏振来说, 在两个出口透射谱具有许多相交点, 每个交点都意味着该频率在两个出口的光强是相等的。但由于双折射现象的存在, 一般来说两个偏振的交点互相不重合, 如图 3(a)所示。因此这里再次利用双偏振透射峰匹配的方法, 通过扫描结构参数找到两个偏振的透射谱交点互相重合的时刻。

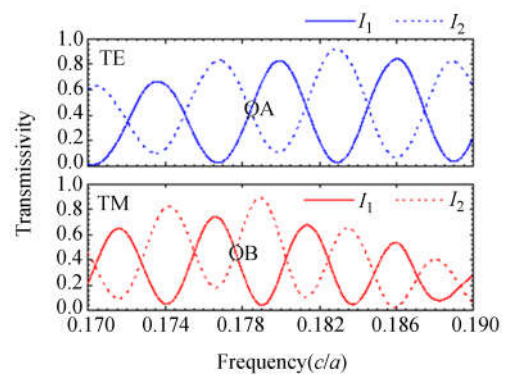
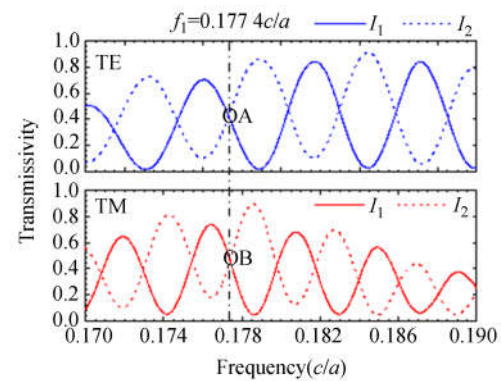
(a) $d=19\sqrt{2}a$ (b) $d=21\sqrt{2}a$

图 3 在 TE 和 TM 两个偏振下, SMZI 在两个出口的透射谱

Fig. 3 FDTD simulated transmission spectra of SMZI for TE and TM modes at the right (solid lines) and bottom (dash lines) output ports

根据双光束干涉理论, TE 和 TM 的透射峰间距和透射峰频率都会随着 SMZI 两个光路的光程差 ($2d$) 而改变。通过同步移动两个反射镜 M_1 和 M_2 , 连续改变 d (每次改变 $\sqrt{2}a$), 分别计算两个偏振的透射谱。从 $d=10\sqrt{2}a$ 扫描计算到 $d=25\sqrt{2}a$, 发现当 $d=21\sqrt{2}a$ 时, TE 和 TM 两种偏振透射谱的一对交点的频率互相重合, 如图 3(b)所示。此时, 对于这个交点频率 $f_1=0.1774c/a$ 来说, SMZI 就成了偏振无关的 3 dB 分光器。再一次利用 FDTD 数值模拟软件分别计算了在该频率下, TE 偏振的瞬时磁场分布图, 以及 TM 偏振的瞬时电场分布图, 分别如图 4(a) 和 4(b) 所示。从图中可见, 具有相同频率 f_1 的 TE 和 TM 入射自准直光束经过 SMZI 之后, 均被分为两个

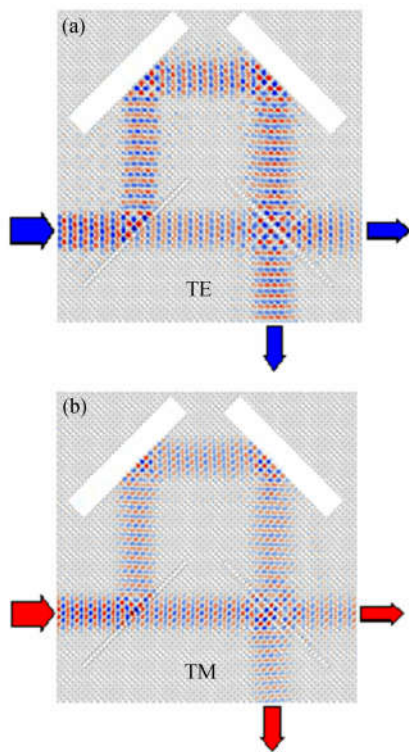


图 4 当入射光频率为 $f_1 = 0.177 4c/a$ 时,用 FDTD 软件模拟的 TE 偏振下瞬时磁场分布图(a)和 TM 偏振下瞬时电场分布图(b)

Fig. 4 FDTD simulated magnetic-field distribution for TE polarization (a) and electric-field distribution for TM polarization (b) for input light at $f_1 = 0.177 4c/a$.

参考文献:

- [1] KOSAKA H, KAWASHIMA T, TOMITA A, *et al.*. Self-collimating phenomena in photonic crystals[J]. *Applied Physics Letter*, 1999, 74(9): 1212-1214.
- [2] WITZENS J, LONCAR M, SCHERER A. Self-collimation in planar photonic crystals[J]. *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.*, 2002, 8(6): 1246-1257.
- [3] WU L, MAZILU M. Beam steering in planar-photonic crystals: from superprism to supercollimator[J]. *Lightwave Technology*, 2003, 21: 561-566.
- [4] YU X, FAN S. Bends and splitters for self-collimated beams in photonic crystals[J]. *Applied Physics Letter*, 2003, 83(16): 3251-3253.
- [5] PAKICH P T, DAHLEMM S. Achieving centimetre-scale supercollimation in a large-area two-dimensional photonic crystal[J]. *Nature Materials*, 2006, 5(31): 93-96.
- [6] PRATHER D W, SHI S. Self-collimation in photonic crystal structures: a new paradigm for applications and device development[J]. *Physics*, 2007, 40(9): 2635-2651.
- [7] ZHAO D Y, CHEN X Y. Photonic crystal Mach-Zehnder interferometer based on self-collimation[J]. *Applied Physics Letter*, 2007, 90(23): 231114.
- [8] ZABELIN V. Self-collimating photonic crystal polarization beam splitter[J]. *Optics Letter*, 2007, 32(5): 530-532.
- [9] WANG Y F, QIU Y S, CHEN X Y, *et al.*. Transmission spectrum of beam splitter based on photonic crystal[J]. *SPIE*, 2007, 6838: 683804.
- [10] ILIEW R, ETRICH C, PERTSCH T, *et al.*. Sub-diffractive all-photonic crystal Fabry-Perot resonators

等光强的自准直光束。如果把工作波长设定在 $\lambda_1 = 1\ 550\ \text{nm}$, 根据 $f_1 = c/\lambda_1 = 0.177\ 4c/a$, 可以算出 $a = 274.97\ \text{nm}$ 。此时, 整个 SMZI 的尺寸仅为 $16.7\ \mu\text{m} \times 16.7\ \mu\text{m}$, 有望应用于高密度的集成光路中。

4 结 论

本文利用基于空气孔硅光子晶体的 SMZI, 通过匹配两个偏振的透射谱, 在归一化频率 $f_1 = 0.177\ 4c/a$ 下, 成功将 TE 偏振和 TM 偏振的入射自准直光束进行 3 dB 分光。利用 FDTD 数值模拟软件计算得到两个偏振入射光在该频率下的瞬时电磁场分布图, 从而验证了自准直光束的分光情况。

由于二维光子晶体与三维光子晶体 slab 具有相似的性质, 所以本文结果可以推广到三维光子晶体的结构中。此外, 可以通过选择合适的晶格常数, 使归一化频率对应于任意的实际工作频率, 所以本文的结果具有普适性。如果将工作波长定在光通信的中心波长 $1\ 550\ \text{nm}$, 则该偏振无关的 3 dB 分光器尺寸仅为 $16.7\ \mu\text{m} \times 16.7\ \mu\text{m}$ 。该分光器尺寸微小、结构简单且由单一的硅材料组成, 有望应用于集成光路中。

- [J]. *Optics Letter*, 2008,33:2695-2697.
- [11] CHEN X Y, QIANG Z X, ZHAO D Y, *et al.*. Polarization-independent drop filters based on photonic crystal self-collimation ring resonators[J]. *Optics Express*, 2009,17(22):19808-19813.
- [12] KIM T T, LEE S G, PARK H Y, *et al.*. Asymmetric Mach-Zehnder filter based on self-collimation phenomenon in two-dimensional photonic crystals[J]. *Optics Express*, 2010,18(6):5384-5389.
- [13] ZHUANG D X, CHEN X Y. The 1×4 optical splitters based on silicon photonic crystal self-collimation ring resonators[J]. *Chinese Physics Letter*, 2012,29(12):124201.
- [14] LIN G M, CHEN X Y. 1×4 optical multiplexer based on the self-collimation effect of 2D photonic crystal [J]. *Optik*, 2014, 125(16):4322-4326.
- [15] CHEN X Y, ZHAO D Y, QIANG Z X, *et al.*. Polarization-independent Fabry-Perot interferometer in a hole-type silicon photonic crystal[J]. *Applied Optics*, 2010,49(30):5878-5881.
- [16] LI J, WU F G, ZHONG H L, *et al.*. Acoustic beam splitting in two-dimensional photonic crystals using self-collimation effect [J]. *Journal of Applied Physics*, 2015,118:144903.

作者简介:



陈曦曜(1964—),男,福建福州人,教授,1987年,2004年于中国科技大学分别获得学士、博士学位,1987~2001年任教福建师范大学,主要研究领域为纳米光学。E-mail: chenxy2628@aliyun.com



林媛媛(1991—),女,福建漳州人,硕士研究生,2009年于闽江学院获得学士学位,主要从事光子晶体方面的研究。E-mail: 258026635@qq.com

(版权所有 未经许可 不得转载)