新型高效偏振光分束器的设计*

 张 旋 廖清华[†] 陈淑文 胡 萍 于天宝 刘念华 (南昌大学物理系,南昌 330031)
 (2010年11月15日收到;2010年12月4日收到修改稿)

研究及分析了光波在分束结构中的传播行为和特性,发现当增大波导邻近两侧空气孔半径时,能形成完全光 子禁带范围内某一频率光波单一偏振态的传播,基于此原理提出了一种全新结构的偏振光分束器,计算与模拟结 构表明,该结构可以实现 TE 模与 TM 模高效大角度分离.器件尺寸不超过 17.6 μm×9.8 μm,在集成光回路中无 疑有着很大的应用潜力.

关键词:光子晶体,偏振光分束器,时域有限差分法,平面波展开法 PACS: 42.70. Qs, 42.25. Bs

1. 引 言

在现代光学测试和光学应用中,偏振光作为信息的载体得到了广泛地应用,随着光纤通信及光纤传感测量技术的迅猛发展,偏振光分束器(polarization beam splitter, PBS)也变得越来越重要,尤其体现在偏光导航、光纤通信、光电检测及光传感技术等领域.基于光子晶体构建的偏振光分束器无论在效率还是器件尺寸等方面都是传统偏振光分束器无法比拟的,值得指出的是,大角度、高消光比和高透射率的偏振分束器件有着更大的应用潜力,因此也是人们一直关注和研究的对象.

光子晶体^[1,2] (photonic crystal, PhC) 是一种在 光波波长量级上介电常数呈现周期性变化的人工 微结构材料.光在其中衍射和干涉的结果使这种结 构产生了光子禁带(photonic band gap, PBG),频率 落在光子带隙内的光则被禁止传播,因此人为地制 造缺陷可以使光在光子晶体内被局限在缺陷内,从 而也为灵活控制光子流动提供了可能.正是基于这 些崭新的物理性质,光子晶体可以用来设计和制造 许多高性能光学元器件:例如全光开关^[3,4]、光分束 器^[5,6]、波分复用/解复用器^[7,8]、偏振光分束器^[9,10] 等.相比于传统的光电器件而言,具有体积小,且便 于与激光器、探测器等有源器件集成等特点.因此 在一小片光子晶体上能制造很多不同功能的光子 晶体器件(类似于电子集成电路),这种集成光回 路(photonic integrated circuit, PIC)使得光子晶体 在光通信和光信息处理领域有着非常诱人的应用 前景.

偏振光分束器是一种非常重要的操控光束的 器件,而实现偏振光分束器的方法有多种,其中基 于光子晶体来实现高效偏振分束是一种比较新的 方法. 而利用光子晶体来实现偏振分束器又存在多 种机理,其中包括自准直[11]、调控能带和模式色 散^[12-14]、各向异性^[15]、多模干涉^[16]和负折射^[17,18] 等机理. 在这些前期工作的基础上,本文提出了一 种通过调控二维光子晶体波导模的色散特性来得 到高效偏振分束器的新方法,也就是基于二维光子 晶体构建了一种新型特定频率下单偏振态波导结 构的超微偏振光分束器. 通过增大波导邻近两侧空 气孔的半径来构建完全光子禁带范围内的单一偏 振模式下的波导结构,进而达到分离两种偏振模式 的目的.并且通过引入额外的缺陷孔及输出波导结 构来高效导出 TE 模光波. 计算及模拟结果表明,该 结构具有体积小、结构简单、分束角大(120°分离)、 偏振消光比高,透射率高等特点,有望在未来集成 光回路中发挥重要的作用.

*集成光电子国家重点实验室(半导体研究所)开放课题、江西省教育厅科学研究基金(批准号:2007-59,GJJ08066)和江西省自然科学基金(批准号:2008GZW0006,2007GQW2057)资助的课题.

[†]通讯联系人. E-mail:lqhua@ncu.edu.cn

^{©2011} 中国物理学会 Chinese Physical Society

2. 结构及原理分析

众所周知,电磁波在二维光子晶体中传播存在 两种独立的偏振态:横电场模(TE)和横磁场模 (TM),其中横电场模为磁场方向平行于空气孔的 轴方向,横磁场模为电场方向平行于空气孔的轴方 向. 本文中我们考虑有限长空气孔按三角晶格周期 性地排列在 GaAs 材料的平板中,构成完整的二维 光子晶体. 主要结构参数选取如下:GaAs 材料折射 率 n = 3.38, 空气孔半径 r = 0.45a, 其中 a 是晶格常 数. 具有上述结构参数的完整光子晶体,存在一完 全光子禁带,其归一化频率范围为 0.4097 $\leq a/\lambda \leq$ 0.4476(λ 为真空中的波长),在该频率范围内,TE 模与 TM 模的光波都不能传播. 换言之,在该完整 结构中通过移除空气孔形成的波导能对频率落在 禁带范围内的光波进行微损耗甚至零损耗传输,而 正是由于这个全新的物理特性,基于光子晶体波导 的各种研究已广泛和深入的开展. 其中 Adibi 等人 指出当改变波导邻近两侧空气孔大小时,可将高阶 模推出禁带范围,从而形成禁带范围内的单一传导 模,也即单模波导^[19].但我们通过进一步研究发 现,当增大波导内邻近两侧空气孔半径时,能形成 完全光子禁带范围内特定频率下的单一偏振态传 输模式,也即特定频率下的单偏振态波导. 该结果 也表明,当波导内侧邻近空气孔半径增大至某一值 时, TE 模与 TM 模光波将会在波导中进行分离. 如 图1所示,将波导内邻近两侧空气孔的一部分空气 孔增至 r = 0.476a.

由图1可以清晰的看到,电磁波的两种偏振态 在通过偏振光分束结构时由于 TE 模完全被阻隔而 TM 模通过被高效分离,因此只要引入输出通道对 TE 模光波进行导出便能实现两偏振态光波的分离. 除此之外,我们还发现,只要根据需要调整波导内 邻近两侧的空气孔半径,这种结构还可以用来实现 单偏振态下不同频率光波滤波器的设计,如果采用 级联结构并辅以输出通道,则可以同时分离多个波 长,从而实现波分解复用器的功能,本文在此不加 以详述.

采用平面波展开法^[20] (plane wave expansion, PWE)进一步研究,计算其色散曲线关系,如图 2 和 图 3 所示,由两偏振模式的色散曲线图可以看出,当 将波导邻近两侧空气孔半径由 r = 0.45a 增至 r =



图 1 (a)偏振光分束结构;光场达到稳定时(b)TE 模;(c)TM 模的坡印廷矢量图

0.476*a*时,传导模向高频方向移动,虽然传导模未 被推出完全光子禁带范围,但TM偏振态在归一化 频率 $a/\lambda = 0.4194$ 处却形成了只在单一偏振态下 的传导模;并且从两偏振模式的色散图还可以看 出,当波导邻近两侧空气孔半径为r = 0.45a时,两 偏振态的传导模几乎都能覆盖整个完全光子禁带, 而当波导邻近两侧空气孔半径r = 0.476a时,TE偏 振态的传导模覆盖范围为 $0.431 \le a/\lambda \le 0.4476$,而 TM偏振态传导模的覆盖范围为 $0.417 \le a/\lambda \le$ 0.4476,显然,两偏振态传导模的覆盖范围之间存在 一单偏振态的传导模光子禁带范围,其频率范围为



图 2 TE 偏振态下完全光子禁带内不同空气孔半径的传导模

0.417≤*a*/λ≤0.431.即只有归一化频率落在此频 率范围内的工作点才有可能形成单偏振态波导.由 此可见,TE模与TM模光波在特定归一化频率处能 够在上述偏振分束结构中有效的分离.



图 3 TM 偏振态下完全光子禁带内不同空气孔半径的传导模

为了实现两偏振态光波的分离输出,我们在输入波导邻近处移除一排空气孔来导出 TE 模式的光 波,与输入波导成 120°构置.显然,TE 模光波在输入与输出的传播方向上发生急剧变化会导致极大 的反射率,这一点在我们的数值计算中得到了验 证,其反射率高达 75.4%.因此我们有意引入 3 个 缺陷孔来减小反射率,同时也是为了提高消光比. 通过计算,取 R₁ = 0.4*a*, R₂ = 0.114*a*, R₃ = 0.285*a*. 这里需要特别指出的是,缺陷孔 R₃ 的引入主要用来 控制光波的传播方向及输出效率^[21].整个器件结 构如图 4 所示.



图4 三角晶格偏振光分束器结构,图中矩形框内为分束结构, 长度为10*a*,内部空气孔半径*r*=0.476*a*.

3. 模拟与结果

通过时域有限差分法^[22] (finite-difference time-

domain method, FDTD)模拟和计算电磁波在此结构 中的传输特性及模场分布,在偏振分束器结构四周 采用完全匹配层(perfect matched layer, PML)的吸 收边界条件.我们选取工作频率为归一化频率 a/λ =0.4194的高斯脉冲为入射光束时,若取晶格常数 $a = 0.65 \mu m$ (对应该偏振光分束器的设计结构,则 可以计算出该设计结构的尺寸仅为 17.6 $\mu m \times 9.8$ μm),则该归一化频率对应波长为 $\lambda = 1.55 \mu m$,正 好是光通信窗口中常用的波长.如图 5 为光场达到 稳定状态时,偏振光分束器中的电场幅度分布图. 从图能清晰地看到,两模式光波能达到 120°的大角 度分离,并且缺陷孔 R_3 也能起到控制光波传播方向 的作用.



图 5 在归一化频率为 a/λ = 0.4194 处,偏振光分束器中光场达 到稳定状态时电场幅度分布图 (a) TE 模;(b) TM 模

采用 FDTD 方法进一步计算各输出端口透射率 和偏振消光比(polarization extinction ratio, PER). 计 算结果表明, TE 模与 TM 模光波的透射率分别为 99.2%和95.8%,具有很高的透射率. 同时为了计 算该结构的偏振消光比,端口 B 和端口 C 的偏振消 光比分别定义为^[10]

$$PER^{B} = 10\log(T^{B}_{TM}/T^{B}_{TE}), \qquad (1)$$

$$\operatorname{PER}^{c} = 10\log(T_{\mathrm{TE}}^{c}/T_{\mathrm{TM}}^{c}), \qquad (2)$$

其中 T_{TE}^{B} , T_{TE}^{C} 和 T_{TM}^{B} , T_{TM}^{C} 分别为 TE 偏振态和 TM 偏 振态下端口 B 与 C 的透射率. 如前所述, 缺陷孔 R_3 可以实现控制输出效率, 如图 6 所示, 在缺陷孔 R_1 与 R_2 确定的情况下, 我们计算了缺陷孔 R_3 与偏振 消光比之间的关系.

由图可知,端口 *B* 与端口 *C* 的偏振消光比在缺陷孔 *R*₃ = 0.285*a* 时能分别达到 21.4 和 29.3 dB. 显然具有较高的消光比.



图 6 缺陷空气孔 R₃(a)与偏振消光比的关系

- [1] Yablonovitch E 1987 Phys. Rev. Lett. 58 2059
- [2] John S 1987 Phys. Rev. Lett. 58 2486
- [3] Hu X Y, Wang Y Q, Liu Y H, Cheng B Y, Zhang D Z 2004 Opt. Commun. 237 371
- [4] Locatelli A, Modotto D, Paloschi D, Angelis C D 2007 Opt. Commun. 237 97
- [5] Ghaffari A, Monifi F, Djavid M, Abrishamian M S 2008 Opt. Commun. 281 5929
- Yu T B, Wang M H, Jiang X Q, Liao Q H, Yang J Y 2007 J.
 Opt. A: Pure Appl. Opt. 9 37
- [7] Ye T, Xu X M 2010 Acta Phys. Sin. 59 9 (in Chinese)[叶 涛、徐旭明 2010 物理学报 59 9]
- [8] Diavid M, Monifi F, Ghaffari A, Abrishamian M S 2008 Opt. Commun. 281 4028
- [9] Guo H, Wu P, Yu T B, Liao Q H, Liu N H, Huang Y Z 2010 Acta Phys. Sin. 59 8 (in Chinese)[郭 浩、吴 评、于天宝、 廖清华、刘念华、黄永箴 2010 物理学报 59 8]
- [10] Chen H B, Xu Y, He J L, Hong Z 2009 Opt. Commun. 282 3626
- [11] Zabelin V, Dunbar L A, Thomas N Ne, Houdré R, Kotlyar M V, O'Faolain L, Krauss T F 2007 Opt. Lett. 32 5530

4. 结 论

本文提出了一种新型的基于二维光子晶体完 全光子禁带内单偏振态波导结构的超微偏振光分 束器.通过改变波导邻近两侧空气孔的大小形成 TM 模在归一化频率 *a*/λ = 0.4194 处的单模波导来 分离两偏振态,同时引入三个缺陷空气孔来高效导 出 TE 模光波.计算结果表明,该偏振光分束器具有 结构简单紧凑、分束角度大、高消光比和高透射率 等特点,在未来的集成光回路中无疑具有重要的理 论意义和实用价值.

- [12] Schonbrun E, Wu Q, Park W, Yamashita T, Summers C J 2006 Opt. Lett. 31 3104
- [13] Chen X Y, Yao P J, Chen B, Li F, Zhang J Y, Xie J P, Ming H, Shan H F 2004 Chin. Phys. Lett. 21 1285
- [14] Shen X P, Han K, Shen Y F, Li H P, Wu Y X, Tang G 2007 Phys. Lett. A 369 524
- [15] Zhen Y R, Li L M 2005 J. Phys. D: Appl. Phys. 38 3391
- [16] Lu M F, Liao S M, Huang Y T 2010 Appl. Opt. 49 41
- [17] Lu Z H, Tang Y F, Shen Y F, Liu X H, Zi J 2005 Phys. Lett. A 346 243
- [18] Ao X Y, Liu L, Wosinski L, He S L 2006 Appl. Phys. Lett. 89 171115
- [19] Adibi A, Lee R K, Xu Y, Yariv A, Scherer A 2000 Electron. Lett. 36 16
- [20] Johns S G, Joannopoulos J D 2001 Opt. Express. 8 173
- [21] Yu T B, Huang J H, Liu N H, Yang J Y, Liao Q H, Jiang X Q 2010 Appl. Opt. 49 2168
- [22] Taflove A, Hagness S C 2000 Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method 2nd edn (Boston: Artech House)

Proposal of novel and efficient polarization beam splitter*

Zhang Xuan Liao Qing-Hua[†] Chen Shu-Wen Hu Ping Yu Tian-Bao Liu Nian-Hua

(Department of Physics, Nanchang University, Nanchang 330031, China) (Received 15 November 2010; revised manuscript received 4 December 2010)

Abstract

We study and analyze the propagation and the characteristics of light in structure, and find that by increasing the sizes of air holes in the two rows that are adjacent to the middle slab, there appears only one polarization state that can propagate in the waveguide within the complete photonic band gap at a specific frequency. Then we propose a new structure of polarization beam splitter based on the principle. The results of calculation and simulation show that the device can separate TE mode from TM mode effectively with a large angle. And the device size is less than 17. $6\mu m \times 9.8\mu m$. We believes that it will have potential applications in the photonic integrated circuits.

Keywords: photonic crystal, polarization beam splitter, FDTD, PWE **PACS**: 42. 70. Qs, 42. 25. Bs

^{*} Project supported by the Open Project of the State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics from Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, the Research Project from Department of Education of Jiangxi Province, China (Grant Nos. 2007-59, GJJ08066), and the Natural Science Foundation of Jiangxi Province, China (Grant Nos. 2008GZW0006, 2007GQW2057).

[†] Corresponding author. E-mail: lqhua@ncu.edu.cn