

doi:10.3788/gzxb20144312.1223002

二维光子晶体偏振滤波分束器的设计与优化

王晨歌^{1,2}, 张彩妮¹, 陈侃¹, 黄腾超^{1,2}, 舒晓武^{1,2}, 刘承^{1,2}

(1 浙江大学 光电系, 杭州 310027)

(2 浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 杭州 310027)

摘 要:设计了一种基于二维光子晶体的偏振滤波分束器. 利用平面波展开法计算光子晶体带隙, 确定入射光波 1 550 nm 下获得单偏振光的微结构参数, 利用时域有限差分法对 90° 弯折缓冲层和分支冲击壁进行优化. 分束器实质为在二维光子晶体阵列中引入缺陷而构成的波导, 利用光子带隙效应和线缺陷 90° 偏转将入射光中的 TM 偏振分量(或 TE 偏振)完全过滤, 得到单偏振光, 最后通过 Y 型分支实现 1:1 的单偏振光分光输出. 仿真结果表明总输出/输入功率比达到 68%.

关键词: 二维光子晶体; 偏振滤波; 分束; 光子带隙效应; 缓冲层

中图分类号: O436.3

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)12-1223002-4

Design and Optimization of Beam-splitting Polarizing Filter Based on Two-dimensional Photonics Crystal

WANG Chen-ge^{1,2}, ZHANG Cai-ni¹, CHEN Kan¹, HUANG Teng-chao^{1,2}, SHU xiao-wu^{1,2}, LIU Cheng^{1,2}

(1 Department of Optical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

(2 State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: A kind of beam-splitting polarizing filter based on two-dimensional photonics crystal was proposed. The photonic bandgap was calculated by plane wave expansion method to confirm the micro-structure parameters, with which single polarized beam in 1550nm can be obtained; Finite-different time-domain method was used to optimize the 90° bending buffer layer and impacting wall of beam-splitter. This device indeed is a waveguide fabricated by introducing defect in two-dimensional photonics crystal array, a single polarization source can be obtained by using photonics band gap and 90° linear defect to filter a certain polarization completely off. By the construction of Y-shaped defect, an approximate splitting ration of 1:1 is achieved. Through the optimization of the 90° linear defect and buffer layer, a ratio of 68% between the output power and input power is finally gained.

Key words: Two-dimensional photonics crystal; Polarizing filter; Beam-splitting; Photonic bandgap; Buffer layer

OCIS Codes: 230.5298; 130.5296; 130.1750; 130.2790; 130.3120

0 引言

光子晶体并非某种特定的新型材料,而是由电介质材料在纳米尺度空间中周期排列所构成的一种结构. 如果选择适当的周期性、对称性以及介电系数等参数,光子晶体便会呈现出带隙特性,即光子带隙(Photonic Band Gap, PBG). 这个特性是针对两个正交

的偏振分量(TE/TM)而言的^[1],即光子带隙决定了某个频段下 TE/TM 的通阻. 基于这个特性,光子晶体已被应用在了众多光学器件上,例如大角度弯折波导^[2],滤波器^[3-5],光栅^[6],波分复用器^[7-8],激光谐振腔^[9-11]等,也被应用于慢光^[12-13]和量子光源^[14]等前沿课题研究中.

如果将光子晶体波导和波导耦合器通过结构设计

基金项目: 航天支撑技术基金项目资助

第一作者: 王晨歌(1988-),男,博士研究生,主要研究方向为光子晶体波导及器件. Email: wcggha@zju.edu.cn

导师(通讯作者): 张彩妮(1973-),女,副教授,博士,主要研究方向为光纤传感技术. Email: zhangcn@zju.edu.cn

收稿日期: 2014-04-18; 录用日期: 2014-07-01

<http://www.photon.ac.cn>

结合在一起,便可灵活地控制光波的传播,并与其他微纳光子器件按波长尺度集成,构建出包括马赫-曾德尔(Mach-Zehnder)干涉仪在内的几乎所有集成光学器件.若在光子晶体中引入非线性、色散和增益介质,还能做出许多小尺度的新型光控制和处理集成器件.

在光子晶体结构中引入一个线缺陷(即删除其中数个介质柱),创建一个导光的通道,便形成了光子晶体光波导(Photonic Crystal Waveguide, PCW).它与基于全内反射的传统光波导有很大不同,全内反射导光机制对光的束缚能力很微弱,即使在仅有 5° 弯曲的情况下,一般光场就有超过50%的损耗,因此弯曲损耗已成为集成光路发展的瓶颈.而光子晶体光波导主要利用缺陷态的导波效应(即光子带隙效应),缺陷的引入在光子带隙PBG中形成新的光子态,利用缺陷模式导光不会产生模式泄露.基于这种优异的光子约束特性,可实现光波导的大角度弯曲,即使在 90° 转角处功率传输能保持95%以上^[2].

本文所提出的偏振滤波分束器正是基于光子带隙的特性而设计的,其整体构成为砷化镓(Gallium-Arsenide, GaAs)介质柱在空气中的正方晶格周期性排布.该器件的作用是将普通光源调制为单偏振光源以匹配某些对光源偏振性有要求的系统,例如光纤陀螺等.利用平面波展开法(Plane Wave Expansion, PWE)对GaAs光子晶体的带隙进行计算,并选择合适的结构参数以匹配工作波长($\lambda=1550\text{ nm}$);然后利用时域有限差分法(Finite-Difference Time-Domain, FDTD)对器件结构进行数值仿真并进行参数优化以获取较理想的工作效率.

1 光子带隙计算

带隙的概念最早来自于半导体物理.在固体物理中,带隙(或能带)指的是一段能量范围,在这个能量段中是不可能存在电子的.而光子晶体中的带隙指的是一段频率范围,在这个频率段中不可能存在光子,即频率落在该频段内的光子无法通过光子晶体.

本文中提出的二维光子晶体结构参数为:晶格常数为 Λ ,介质柱材料为GaAs,半径为 r ,折射率 $n=3.4$ ($\lambda=1550\text{ nm}$ 时)^[15],背景介质为空气.这种形式的光子晶体波导通常可以使用分子束外延^[16]和蚀刻^[17]的方式进行加工.当光子晶体的介质柱材料和背景介质选定后,影响带隙分布的重要参数是 r/Λ .对 r/Λ 进行参数扫描,可以确定带隙宽,且工作范围覆盖 λ 的结构.参数扫描结果如图1(a).

从图1(a)可以看出该结构的TE带隙都很窄,而且通常这些过窄的带隙无法在仿真过程中观测到,即不具备实用的性质.为了匹配目标工作波长($\lambda=1550\text{ nm}$),也就是图1(a)所示193 THz的横线标识,

最终选择参数 $r/\Lambda=0.18$.此时的光子带隙如图1(b).

图1(b)中的斜线部分即为光子带隙所在的频段.可以看到该结构在 $\lambda=1550\text{ nm}$ 工作波段($\omega a/2\pi c=a/\lambda=0.37$ 处,即193.4 THz附近)仅存在TM带隙(斜线标识).这意味着频率为193.4 THz的入射光源,它的TM分量无法通过该光子晶体结构,而TE分量则可以自由通行(介质结构对光波透明).基于这个特点即可实现对入射光源偏振滤波的功能.

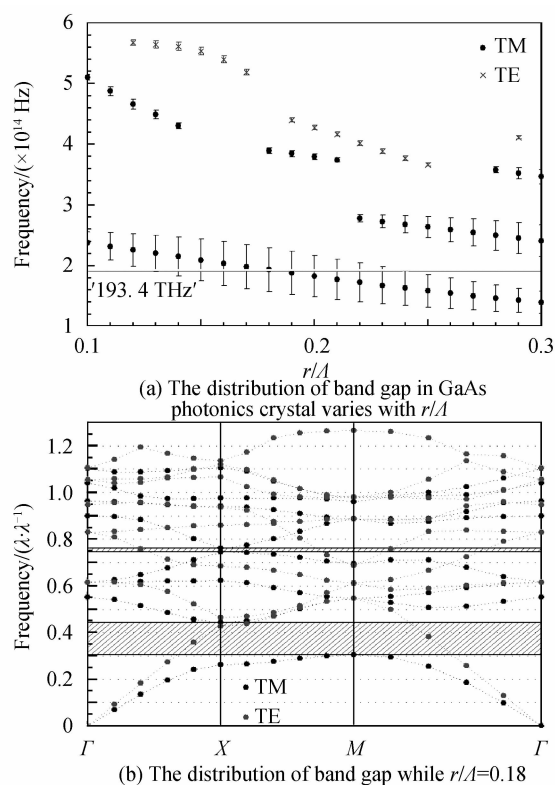


图1 GaAs光子晶体的带隙分布
Fig. 1 The distribution of band gap in GaAs photonic crystal

2 结构仿真

对入射光源进行偏振滤波,考虑在波导中引入大角度弯折的线性缺陷.缺陷可以理解为破坏了晶格结构周期性的区域,光波被约束在缺陷中传播.在本例中,从GaAs阵列中移除了几根介质柱充当了缺陷区域.如果是完整周期的光子晶体,在上述结构参数下,原本频率在带隙内(无法传播)的TM分量,可以通过缺陷传播;而TE分量都是自由传播(不存在带隙)的.利用FDTD方法数值仿真的结果如图2.

从仿真结果来看,在光子晶体波导中引入几何弯折缺陷,可以分开TE和TM这两种偏振光.实验中,经过几何弯折后,仅有TM偏振光可以在波导中定向传输.

在获取单偏振的光源后,设计了分束用的缺陷波导,从而搭建出集偏振滤波和分束为一体的器件,见图3(a).

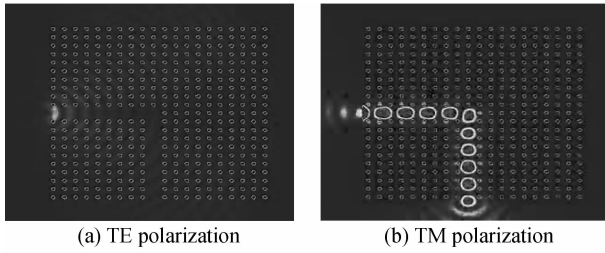


图 2 相同频率的 TE 和 TM 偏振光通过相同的结构,入射光源均从结构左端入射

Fig. 2 Two polarized beams in the same frequency propagate in the same structure. Both sources enter into the structure from the left

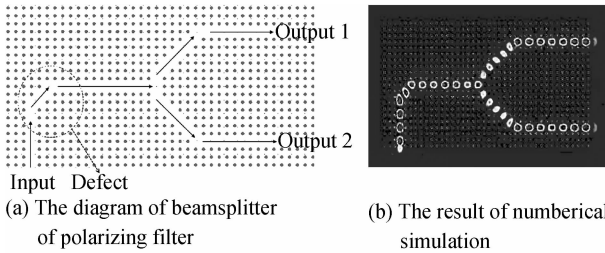


图 3 器件的结构示意图与数值仿真结果

Fig. 3 The diagram and simulation result of the device

入射光源从输入口进入波导,经过几何弯折缺陷时会被过滤掉 TE 偏振分量,仅保留 TM 分量在波导中继续传播,最后被分成两束单偏振光输出.仿真结果如图 3(b).

在衡量该分束器的工作效率时,需要关注两支输出臂的输出功率是否按 1:1 的比率输出,因此分别对分束器两个输出臂的功率数据进行了采集.设输出口 1 的输出功率为 I_1 ,输出口 2 的输出功率为 I_2 ,则两者的偏差率 $deviation = 2 \times |I_1 - I_2| / (I_1 + I_2)$.一共采集了 200 个样本,如图 4.记录结果显示两支输出臂的输出功率差值偏差率低于 0.04%,即两支输出臂的输出功率近似为 1:1.

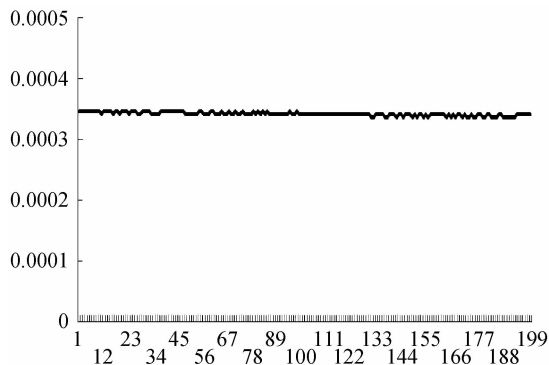


图 4 分束器的两支输出臂的偏差值

Fig. 4 The ratio of the power from two output arm of the beamsplitter

3 结构优化

从图 3 可以看到,为避免入射光通过 90°直角弯折

时产生较为强烈的背向反射,可以采用阶梯状的缓冲结构,通过引入缓冲层来抑制这一现象.分别设计了 0~13 阶的缓冲层结构,其中 0~5 阶缓冲层的仿真结果分别如图 5.

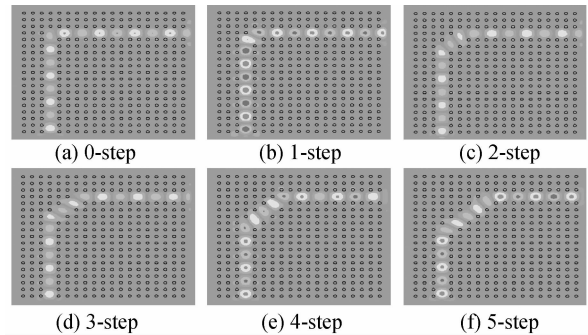


图 5 0~5 阶缓冲层的仿真结果

Fig. 5 The results of numerical simulation for buffer layer with 0~5 steps

对输出口和输入口的功率进行数据采集.根据仿真计算结果,缓冲层的阶梯数对背向反射和入射功率的比值是有一定影响的.将 0~13 阶的计算数据作比较,结果如图 6.

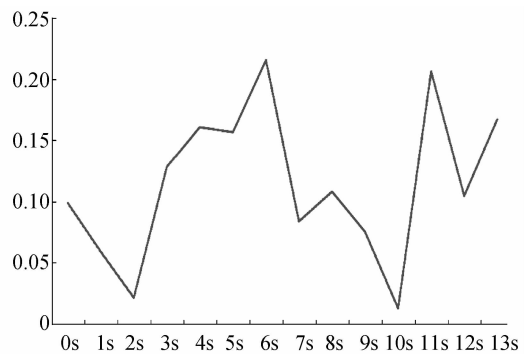


图 6 缓冲层台阶数与背向反射和入射功率比值之间的关系
Fig. 6 The relationship of the buffer layer and the ration between backward reflection and incident power

图 6 中,纵坐标为背向反射功率与入射功率的比值,横坐标为缓冲层的阶梯数(5s 表示 5 个台阶,依次类推).该次数值仿真所对应的工作波长 $\lambda = 1550 \text{ nm}$.

根据数值仿真结果,缓冲层的阶梯数对背向反射的大小存在一定影响,且该影响的浮动幅值为 1.3%~21.5%.其中当阶梯数取 2 阶和 10 阶时,背向反射功率取到极小值.考虑到波导实际加工的复杂性,本例中最终选定的缓冲层结构为 2 阶.

入射光在分束器的分岔路口存在较强的背向反射,对于分束器整体的工作效率存在着影响,为此对图 7(a)中黑圈部分的冲击壁尺寸进行参数优化,即调节黑圈处三根介质柱的半径,同时记录下输出臂的功率与入射功率的比值,结果如图 7(b)所示.图 7(b)中横坐标表示冲击壁三根介质柱的半径,变化范围为 $0.01 \sim 0.29 \mu\text{m}$.可以看出随着冲击壁半径的变化,单

臂输出功率和输入总功率功率的比值浮动范围为 0.6%~34.1%，其中 34% 所对应的冲击壁半径为 0.08 μm 。最终确定的结构输出功率比约为 68% (双臂输出)。在上述设计参数下，可得到该器件的损耗主要由两个区域的背向反射所致：大角度弯折处和 Y 型分支处。特别针对 Y 型分支构造形式的研究与改进，输出功率将会进一步得到提高。

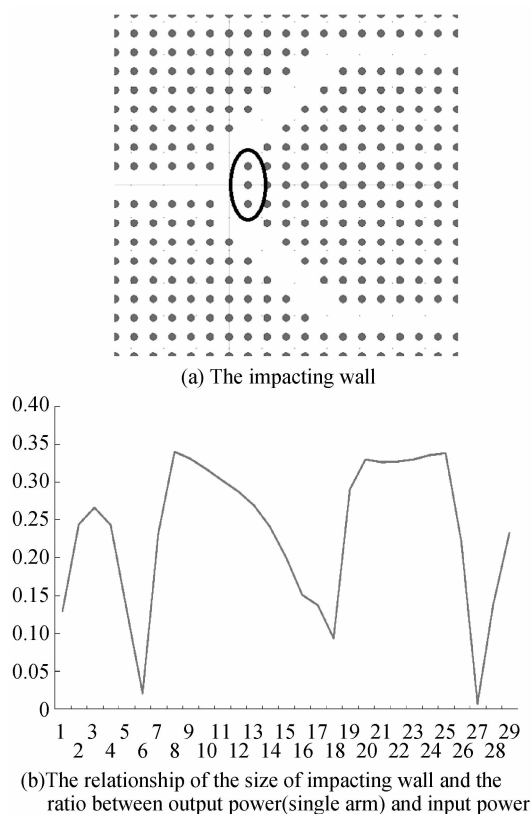


图 7 分束器冲击壁示意图和功率比值关系

Fig. 7 The diagram and power ratio of the impacting wall in the crossroad of the beamsplitter

4 结论

本文所提出的基于二维光子晶体的偏振滤波分束器可对 TE/TM 中的某一偏振分量进行完全过滤，并获得两束功率比为 1:1 的单偏振光源输出 (偏差值低于 0.04%)，为今后偏振滤波与分束功能的波导或器件提供了一种微型化、集成式的技术设计方法。通过对结构中缓冲层和冲击壁的设计使结构模型进一步优化，最终确定结构输出功率总和占总输入光源的 68%。

参考文献

[1] SNOEKS E, MOROZ A, *et al.* Design and optimization of 2D photonic crystal waveguides based on silicon[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2002, **34**(1-3): 145-159.

[2] MEKIS A, KURLAND I. High transmission through sharp bends in photonic crystal waveguides[J]. *Physical Review Letters*, 1996, **77**(18): 3787.

[3] STOFFER R, HOEKSTRA H, *et al.* Numerical studies of 2D

photonic crystals: Waveguides, coupling between waveguides and filters[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2000, **32**(6-8): 947-961.

- [4] NIYAZI M, AMIRKHANI A. Investigation and simulation of a two-channel drop filter with tunable double optical resonators [J]. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, 2013: 1-8.
- [5] WANG Kai, FENG Li-shuang, YANG De-wei, *et al.* Design of silicon hole based photonic crystal filter with high selectivity [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(2): 311-315.
- 王恺, 冯丽爽, 杨德伟, 等. 硅基孔状光子晶体高选择性滤波器设计[J]. *光子学报*, 2012, **41**(2): 154-158.
- [6] GUYOT C, ULLIAC G, DAHDAH J, *et al.* Optical characterization of ultra-short Bragg grating on lithium niobate ridge waveguide[J]. *Optics Letters*, 2014, **39**(2): 371-374.
- [7] LI Lei, LIU Gui-qiang, CHEN Yuan-hao, *et al.* Photonic crystal three-wave length power splitter based on directional coupling [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(2): 167-170.
- 黎磊, 刘桂强, 陈元浩, 等. 光子晶体定向耦合三波长功分器 [J]. *光子学报*, 2013, **42**(2): 167-170.
- [8] LIN Gui-min, CHEN Xi-yao, LI Jun-jun, *et al.* 1×2 optical drop splitter in a rod-type silicon photonic crystal [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(3): 311-315.
- 林贵敏, 陈曦曜, 李军军, 等. 基于圆柱型硅光子晶体的 1×2 光下路分束器 [J]. *光子学报*, 2012, **41**(3): 311-315.
- [9] BORUAH J, KALRA Y. Demonstration of temperature resilient properties of 2D silicon carbide photonic crystal structures and cavity modes [J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2014, **125**(5): 1663-1666.
- [10] KIM S, POSTIGO P. Uniquely and arbitrarily shaped laser resonators using 2D InAsP/InP photonic crystals [J]. *Electronics Letters*, 2013, **49**(25): 1633-1635.
- [11] XV Xiao-fu, HAO Xiao-long, JIANG Jan-zhen, *et al.* Design of high-drop hole-type photonic crystal ring resonators [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(8): 982-985.
- 许晓赋, 郝小龙, 蒋俊贞, 等. 高下路空气孔型光子晶体环形谐振腔的设计 [J]. *光子学报*, 2012, **41**(8): 982-985.
- [12] WAN Y, GE S, GUO Y, *et al.* Application of 2D graded eye-shape scatterers for slow light effect in photonic crystal line defect waveguide [J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2014, **125**(5): 1605-1609.
- [13] ZHANG Xiao-juan, ZHAO Jian-lin, FANG liang. Analysis of pulse trapping characteristic in high birefringent photonic crystal fiber [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(8): 1154-1160.
- 张晓娟, 赵建林, 方亮. 一种高双折射光子晶体光纤中的脉冲俘获分析 [J]. *光子学报*, 2011, **40**(8): 1154-1160.
- [14] JARLOV C, ATLASOV K, FERRIER L, *et al.* 1D and 2D arrays of coupled photonic crystal cavities with a site-controlled quantum wire light source [J]. *Optics Express*, 2013, **21**(25): 31082-31091.
- [15] MICHAEL B. Handbook of Optics 3rd edition Vol 4 [M]. 2009.
- [16] SWEET J, RICHARDS B C, OLITZKY J D, *et al.* GaAs photonic crystal slab nanocavities: Growth, fabrication, and quality factor [J]. *Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications*, 2010, **8**(1): 1-6.
- [17] CHEN Ke, HE Jian-Jun. Fabrication of GaAs Nanowires by Colloidal Lithography and Dry Etching [J]. *Chinese Physics Letters*, 2012, **29**(3): 036105.