

doi:10.3788/gzxb20134202.0167

光子晶体定向耦合三波长功分器

黎磊, 刘桂强, 陈元浩, 唐发林

(江西师范大学 物理与通信电子学院 江西省光电子与通信重点实验室, 南昌 330022)

摘要:以二维三角晶格光子晶体为研究对象,在该光子晶体中引入两行以一行耦合介质柱为间距的平行单模线缺陷波导.通过分析和研究光子晶体波导耦合结构的耦合和解耦合特性,发现在不同频率下耦合波导的耦合长度不同.利用平面波展开法和定向耦合原理计算了在不同入射光频率下,缺陷波导间耦合波导的耦合长度,设计了一种新型超微光子晶体波导耦合型三波长功分器,实现了归一化频率分别为 0.369、0.394、0.435 的光波的分束效果.采用时域有限差分法验证了该功分器具有很好的功率分配效果.本文结果有助于光子晶体新型滤波器、定向耦合器、波分复用器、偏振光分束器以及光开关等光子器件的研究.

关键词:光学器件;光子晶体;耦合波导;功分器

中图分类号:O431.1

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2013)02-0167-4

Photonic Crystal Three-wavelength Power Splitter Based on Directional Coupling

LI Lei, LIU Gui-qiang, CHEN Yuan-hao, TANG Fa-lin

(Key Laboratory of Optoelectronic and Telecommunication of Jiangxi, Institute of Physics and Communication Electronics, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China)

Abstract: A photonic crystal coupling structure is designed by introducing two parallel single mode defect waveguides with one row coupling rods in between them in the two-dimensional (2D) triangular lattice array. Based on the analysis of coupling and decoupling property of the coupled photonic crystal waveguides, it is known that different normalized frequencies correspond to different coupling lengths. The coupling lengths for coupled waveguides at different frequencies are calculated to design a new super-tiny photonic crystal three-wavelength power splitter by the plane wave expansion method and the principle of directional coupling. The effect of splitting the beam with normalized frequencies of 0.369, 0.394 and 0.435 are obtained. The function of the power splitter is analyzed by using finite different time domain method. The simulation results show that it has a good splitting beam effect. The result should contribute to the research over new kinds of optical filters, directional couplers, wavelength division multiplexers, polarization beam splitter, optical switches and other photonic devices.

Key words: Optical devices; Photonic crystal; Coupled waveguides; Power splitter

0 引言

光子晶体是由折射率不同的介电材料周期排列而成的人工微结构材料^[1-2].由于周期排列介电材料的多重布拉格散射,导致在该结构中光子的传播出现类似于半导体中电子的某些行为,处于特定频率

范围的光不能在光子晶体中传播,即所谓的光子禁带.在完整的光子晶体中连续除去一些介质柱,形成线缺陷,则原来处于光子禁带中的光可以沿着线缺陷传播,能量局域在缺陷中,形成光子晶体波导.不同于常规的介质波导,光子晶体波导是依靠光子带隙实现的,其优点是在大的拐角处可实现低损耗甚

基金项目:国家自然科学基金(Nos. 11004088, 11264017)、江西省自然科学基金(Nos. 2010GQW0025, 20122BAB202006)、江西省科技攻关项目(No. 20112BBE50033)和江西省教育厅科技项目(No. GJJ10099)资助

第一作者:黎磊(1988-),男,硕士,主要研究方向为光子晶体、表面等离子体. Email: fanrenlilei@126.com

导师(通讯作者):刘桂强(1977-),女,副教授,博士,主要研究方向为光子晶体、表面等离子体. Email: liougq@yahoo.com.cn

收稿日期:2012-09-07; **录用日期:**2012-11-05

至零损耗传输. 这一优点使得光子晶体波导更加容易集成, 所以在制作光子器件方面具有广泛的应用前景, 如设计和制备基于光子晶体的滤波器^[3-4]、光环行器^[5]、波分复用器^[6-7]、定向耦合器^[8-9]、偏振光分束器^[10]、光纤^[11]以及光开关^[12]等.

光分束器是复杂光子集成回路中重要的光学组成元器件, 近年来已引起越来越多的重视^[13-16]. 光子晶体波导耦合遵循普通介质波导耦合的一般规律, 也有定向耦合的功能^[8]. 通过合理设计, 将具有不同耦合长度的光子晶体定向耦合器集成在一起, 可实现多通道耦合, 设计高效的光分束器.

本文在一个二维三角排列的光子晶体中引入两行以一行耦合介质柱为间距的线缺陷波导, 通过研究两线缺陷波导之间的耦合作用, 计算在不同归一化频率(Ω)下耦合介质柱的耦合长度, 以此建构一个光子晶体功分器模型, 再通过时域有限差分法(Finite-Difference Time-Domain, FDTD)验证功分器的功能. 本文发现在耦合波导中设置合适的耦合区长度, 可以很好地改变光信号的输出路径, 使三个功率的光波分别在三个不同的输出通道中高效传输, 实现功分器的功能. 该结构设计尺寸小, 研究结果有助于新型光子晶体滤波器、定向耦合器、波分复用器、光开关、偏振光分束器等其它耦合光子器件的应用发展, 在未来的集成光路中具有潜在的应用前景.

1 结构设计及耦合原理分析

以三角晶格排列的二维光子晶体作为研究对象, 设计了光子晶体耦合波导功分器结构. 如图1所示, 该耦合结构通过移去两行介质柱得到两个相邻耦合波导, 两相邻波导间的一行介质柱称之为耦合介质柱, 整个耦合区由 M 和 N 两个区域组成. 该三角晶格阵列的晶格常量为 a , 组成三角晶格阵列的介质柱无限长, 半径为 r , $r=0.2a$, 介质柱的折射率为 n , 两耦合区域的长度分别为 $L_M(9a)$ 和 $L_N(4a)$, 光波从入射端口 A 入射, 通过不同长度的耦合波导来控制入射光波的传输行为, 使得光从端口 B、C 或 D 射出, 从而实现光信号的分离传输.

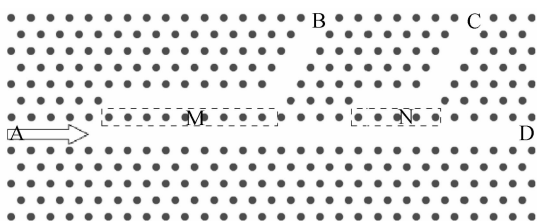


图1 设计的光子晶体功分器的结构
Fig. 1 Schematic diagram of the photonic crystal power splitter

为掌握该结构波导中电磁场能量的分布情况, 利用平面波展开法(Plane Wave Expansion Method, PWM)对该结构的横电模(电场方向平行于介质柱的轴向方向)和横磁模(磁场方向平行于介质柱的轴向方向)进行了数值模拟, 结果发现, 该结构的横磁模具有很宽的光子带隙, 范围为 $0.275 \sim 0.45$; 而横电模在该频率范围不存在光子带隙. 图2给出了 $n=3.4$ (GaAs)时横磁模的色散关系曲线图, 从图中可以看到, 线缺陷波导中的模式发生了分裂, 分裂成耦合系统中的两个本征模, 一个是对称模(偶模), 一个反对称模(奇模).

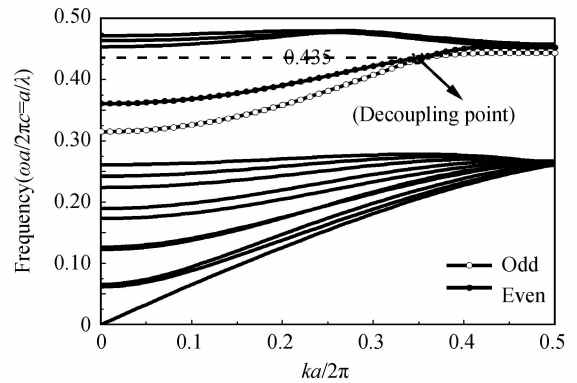


图2 $n=3.4$ 时该耦合波导的色散曲线
Fig. 2 The dispersion curves of the coupled waveguides when $n=3.4$

图3是奇模和偶模在 Γ 点的空间能量分布情况. 由图可知, 奇模的电场相对于对称中心(耦合区介质柱)成反对称分布, 而偶模则成对称分布. 当光

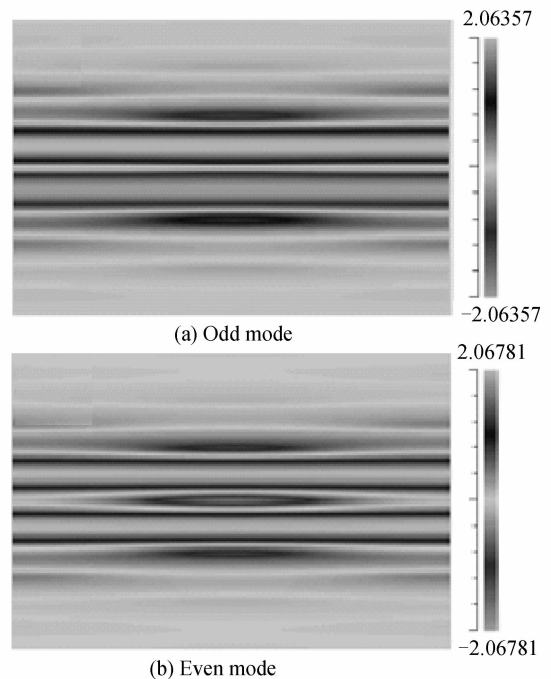


图3 缺陷模在 $\Gamma(k=0)$ 点的模场空间分布
Fig. 3 Mode field distributions for the defect mode at the Gamma point

波在其中一个线缺陷波导中传输时,可以将其分解为耦合系统中奇模和偶模的线性叠加,如果经过一段距离的传播后,当两本征模的相位差达到 π 的奇数倍时,光波就会转移到另外一个线缺陷波导中。

图 3 根据理论计算耦合波导中耦合介质柱在不同的入射光频率下,光波从一个波导传输到另一个波导所需的耦合长度. 假设偶模的传播常量记为 β_e , 奇模的传播常量记为 β_o , 则耦合长度 L_c 可以由传播常量表示^[13]

$$L_c = \pi / |\beta_o - \beta_e|$$

假设光波从输入端 A 输入. 当 $L_m(L_n)$ 为 L_c 的奇数倍时,光波从输出端 B(C) 输出,形成交叉态,当 $L_m(L_n)$ 为 L_c 的偶数倍时,光波从输出端 D 输出,形成直通态,光信号就这样在两个耦合波导中交替传输. 随着传播常量的增大,两个本征模先发生简并(图 2 中两缺陷模的交点,即解耦点),然后再解简并. 由图 2 可知,该功分器解耦点对应的归一化频率为 0.435, 即若以此频率的入射光入射的话,耦合波导的耦合长度 L_c 为无限大,即光波会沿着原来的波导传播,最终从 D 通道输出,不会发生转移。

图 4 是理论计算得出的归一化频率与耦合长度之间的关系曲线. 从该图可以看出,归一化频率越大,耦合长度也越大. 由图 4 可知,当入射光的归一化频率为 0.369 和 0.394 时,耦合波导的耦合长度 L_c 分别为 $4a$ 和 $9a$, 恰好等于图 1 所示功分器的 N 和 M 区域的耦合区长度 L_n 和 L_m , 满足奇数倍原则,即以此两种频率的光波入射的话,将以交叉态的形式分别从 C 和 B 通道输出. 所以,利用不同频率下耦合波导耦合长度的不同以及解耦点对应频率下光波的非转移传输特性,可分离不同频率的光波,实现功分特性。

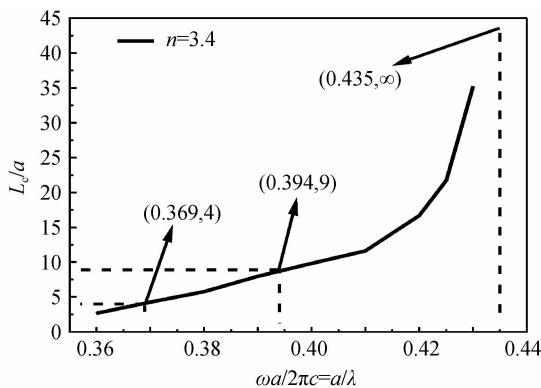


图 4 耦合长度与归一化频率的关系

Fig. 4 Coupling length vs. normalized frequency

2 数值模拟

以完全匹配层 (Perfectly Matched Layer,

PML) 作为理想的吸收边界,通过 FDTD 法模拟了光波在该结构中的传播情况. 为了保证结果的精确度,模拟计算时网格划分尺寸 Δx 为 $a/16$; 为了满足 FDTD 算法的收敛性要求,时间步长 Δt 取 $\Delta x / (2 \times c)$; 为了达到稳定态,模拟仿真时长为 $2^{14} \times \Delta t$.

为了研究不同频率的入射光波在该波导耦合结构中的传输情况,本文分别以归一化频率为 0.369、0.394、0.435 的高斯连续光波从入射端口 A 输入,模拟了三种不同频率的光波在该功分器的场分布情况. 结果如图 5 所示,模拟结果和理论计算结果一致. 当入射光的归一化频率为 0.369 时, $L_c = 4a$, 此时 $L_M \approx 2L_c, L_N = L_c$, 入射光经过 M 区域符合偶数倍原则,以直通态的形式继续向前传播,到达 N 区域时,符合奇数倍原则,将以交叉态的形式从 C 通道输出,见图 5(a); 当入射光的归一化频率为 0.394 时, $L_c = 9a$, 此时 $L_M = L_c$, 入射光经过 M 区域符合奇数倍原则,以交叉态的形式从 B 通道输出,见图 5

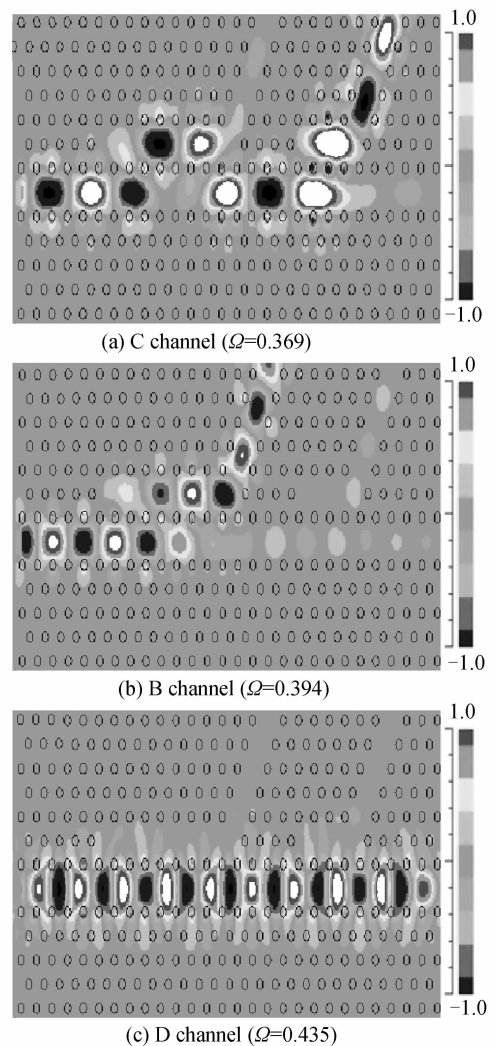


图 5 不同输出通道的场分布图

Fig. 5 The magnetic field patterns (amplitude of H_y field) for different channels

(b);当入射光的归一化频率为 0.435 时,对应该耦合波导的解耦点,耦合长度 L_c 为无限大,光波会沿着原来的波导传播,最终从 D 通道输出,见图 5(c).

3 结论

本文设计了基于二维三角晶格阵列的波导耦合功分器结构.通过 PWM 法和定向耦合原理计算了在不同入射光频率下,缺陷波导间耦合介质柱的耦合长度,并利用 FDTD 法对光子晶体耦合波导功分器中光的传输行为进行了分析和研究.结果表明:光子晶体波导耦合遵循普通介质波导耦合的一般规律,也有定向耦合的功能,通过不同长度的耦合介质柱,可以很好地分离不同频率的入射光波,改变光信号的输出路径,实现了 Ω 分别为 0.369、0.394、0.435 的光波分束传输的功能.本文的结果有助于基于光子晶体的新型滤波器、定向耦合器、波分复用器、偏振光分束器、光开关等其它耦合光器件的研究.

参考文献

- [1] GUO Wen-hua, WANG Ming, XIA Wei, *et al.* Evaporation-induced self-assembly of capillary cylindrical colloidal crystal in a face-centered cubic structure with controllable thickness[J]. *Journal of Materials Research*, 2012, **27**(13): 1663-1671.
- [2] LIU Gui-qiang, LIAO Yu-bo, CHEN Yan, *et al.* Experiment fabrication and theory analysis of three-dimension high quality photonic crystals[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(7): 1707-1712.
刘桂强,廖昱博,陈艳,等.高质量三维光子晶体的实验制备及理论分析[J].光子学报,2009,38(7):1707-1712.
- [3] LI Lei, LIU Gui-qiang, CHEN Yuan-hao, *et al.* Photonic crystal multi-channel drop filters with Fabry-Pérot microcavity reflection feedback[J]. *Optik*, 2012, doi:10.1016/j.ijleo.2012.07.036.
- [4] OU-YANG Zheng-biao, LI Jing-zhen, ZHANG Dao-zhong, *et al.* Investigations on multi-layer photonic crystal optical filters[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(1): 79-84.
欧阳征标,李景镇,张道中,等.多层光子晶体滤波器研究[J].光学学报,2002,22(1):79-84.
- [5] WANG Qiong, OUYANG Zheng-biao, TAO Ke-yu, *et al.* T-shaped optical circulator based on coupled magneto-optical rods and a side-coupled cavity in a square-lattice photonic crystal[J]. *Physics Letters A*, 2012, **376**(4): 646-649.
- [6] YE Tao, XU Xu-ming. The design and optimization of high efficiency heterostructure four-wavelength wavelength division multiplexing[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, **59**(9): 6273-6278.
叶涛,徐旭明.高效异质结构四波长波分复用器的设计与优化[J].物理学报,2010,59(9):6273-6278.
- [7] GHAFFARI A, DJAVID M, MONIFI F, *et al.* Photonic crystal power splitter and wavelength multi/demultiplexer based on directional coupling[J]. *Journal of Optics A: Pure Applied Optics*, 2008, **10**(7): 075203.
- [8] ZHU Zhi-hong, YE Wei-min, YUAN Xiao-dong, *et al.* Photonic crystal waveguide directional coupler[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(10): 1237-1240.
朱志宏,叶卫民,袁晓东,等.光子晶体波导定向耦合器[J].光学学报,2003,23(10):1237-1240.
- [9] KOSMIDOU E P, KRIEZIS E E, TSIBOUKIS T D. Analysis of tunable photonic crystal directional couplers[J]. *Journal of Applied Physics*, 2006, **100**(4): 043118.
- [10] ZHU Gui-xin, YU Tian-bao, CHEN Shu-wen, *et al.* A new ultracompact polarizing beam splitter based on photonic crystal directional coupler[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(3): 450-454.
朱桂新,于天宝,陈淑文,等.一种新型光子晶体波导定向耦合型超微偏振光分束器[J].光子学报,2010,39(3):450-454.
- [11] MISHRA S S, SINGH V K. Study of non-linear properties of hollow core photonic crystal fiber[J]. *Optik*, 2011, **122**(10): 687-690.
- [12] RAHMATI A T, GRANPAYEH N. Design and simulation of a switch based on nonlinear directional coupler[J]. *Optik*, 2010, **121**(10): 1631-1634.
- [13] PARK I, LEE H S, KIM H J, *et al.* Photonic crystal power-splitter based on directional coupling[J]. *Optics Express*, 2004, **12**(15): 3599-3604.
- [14] GHAFFARI A, DJAVID M, ABRISHAMIAN M S. Power splitters with different output power levels base on directional coupling[J]. *Applied Optics*, 2009, **48**(8): 1606-1609.
- [15] GAO Yong-feng, ZHOU Ming, ZHOU Jun, *et al.* Design of power splitter by directional coupling between photonic crystal waveguides[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, **38**(5): 0505003.
高永锋,周明,周骏,等.光子晶体波导定向耦合功分器的设计[J].中国激光,2011,38(5):0505003.
- [16] WANG Xin-hua, WANG Bin-ke, QU Shao-bo, *et al.* Simulation of power distribution and combination in two-dimensional photonic crystal[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(6): 1423-1426.
王新华,王斌科,屈绍波,等.二维光子晶体功率分配与合成的仿真[J].光子学报,2009,38(6):1423-1426.