

# 二维正方晶格光子晶体分束器设计与分析

武晴涛, 文化锋, 王红华

(宁波大学 信息科学与工程学院, 浙江 宁波 315211)

**摘要:** 光学器件应用于集成光路中尺寸必须足够小, 传统耦合分束方式需较长的耦合距离, 尺寸不易控制在较小范围内。采用耦合区域增加可变介质柱可以有效减小耦合距离, 在完整的光子晶体中引入直波导, 并且在直波导的出射端设计成 3 个波导出射口, 其中两侧出射口结构完全相同。利用时域有限差分法分析, 结果表明: 通过改变直波导间耦合区域的介质柱大小可实现控制光波功率分配的目的, 从而实现了波导传播过程的分光比。

**关键词:** 光子晶体; 耦合; 分束器; 分光比

中图分类号: TN256 文献标识码: A 文章编号: 1002-5561(2020)04-0040-03

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2020.04.010

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Design and analysis of two-dimensional square lattice photonic crystal beam splitter

WU Qingtao, WEN Huafeng, WANG Honghua

(College of Information Science and Engineering, Ningbo University, Ningbo Zhejiang 315211, China)

**Abstract:** The size of the optical device used in the integrated optical path must be small enough. The traditional coupling beam splitting method requires a long coupling distance, the size is not easy to control in a small range. The use of a coupling region to increase the variable dielectric column can effectively reduce the coupling distance. Straight waveguides are introduced into the photonic crystals, and the exit ends of the straight waveguides are designed as three wave exit ports, where the exit ports on both sides have the same structure. Using the finite-difference time-domain analysis, the results show that the purpose of controlling the power distribution of light waves can be achieved by changing the size of the dielectric pillars in the coupling region between the straight waveguides, thereby achieving the splitting ratio of the waveguide transmission process.

**Key words:** photonic crystal; coupling; beam splitter; split ratio

### 0 引言

分束器是超密集成光路的重要设备, 是光子多功能设备和系统的关键构成模块。近年来, 基于光子晶体波导定向耦合、多模干涉效应的光分束器得到了深入研究<sup>[1-4]</sup>。目前, 主要有 2 种不同的方法将输入信号的功率平均分配到 2 个端口, 即通过定向耦合器<sup>[5-7]</sup>设计成 Y 型结构或 T 型结构<sup>[8-10]</sup>。文献[11]中提出了一种基于光子晶体波导定向耦合器的超微偏振分束器, 由于未考虑反射, 该分束器的透射率较低。文献[12]利用在拐角处设计合适阶梯型的结构可以作为光波传播时的缓冲层有效降低弯折处能量损耗, 但是该种分束器并非耦合型分束器, 分束器的灵活性不高。文献[13]中提出的光波导方向耦合器是利用波导间的耦合特性进行光波分束, 但是需要在满足一定的耦合长度的基础上不断改变结构, 并且分束器的尺寸随耦合长度的增加而增加。本文通过设计合理的耦合长度(耦合长度永远不会改变)来设计一种光子晶体分束器。

收稿日期: 2019-11-04。

**基金项目:** 国家自然科学基金(No.61371061)资助; 浙江省自然科学基金(LY12F01010)资助; 宁波市自然科学基金(No.2016A610060)资助。

**作者简介:** 武晴涛(1994—), 男, 安徽阜阳人, 硕士研究生, 就读于宁波大学信息科学与工程学院, 主要从事基于光子晶体的光学器件研究, 当前研究方向为基于二维光子晶体的耦合型波导分束器及传播研究。



计成 Y 型结构或 T 型结构<sup>[8-10]</sup>。文献[11]中提出了一种基于光子晶体波导定向耦合器的超微偏振分束器, 由于未考虑反射, 该分束器的透射率较低。文献[12]利用在拐角处设计合适阶梯型的结构可以作为光波传播时的缓冲层有效降低弯折处能量损耗, 但是该种分束器并非耦合型分束器, 分束器的灵活性不高。文献[13]中提出的光波导方向耦合器是利用波导间的耦合特性进行光波分束, 但是需要在满足一定的耦合长度的基础上不断改变结构, 并且分束器的尺寸随耦合长度的增加而增加。本文通过设计合理的耦合长度(耦合长度永远不会改变)来设计一种光子晶体分束器。

### 1 结构设计与分析

本文所设计的耦合分束器的结构模型如图 1 所示。晶格常数  $a=0.625 \mu\text{m}$ , 介质柱半径  $r=0.125 \mu\text{m}$ , 中

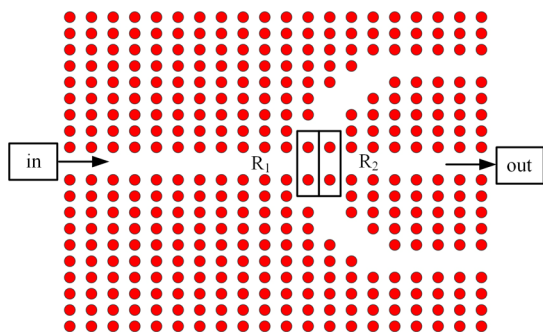
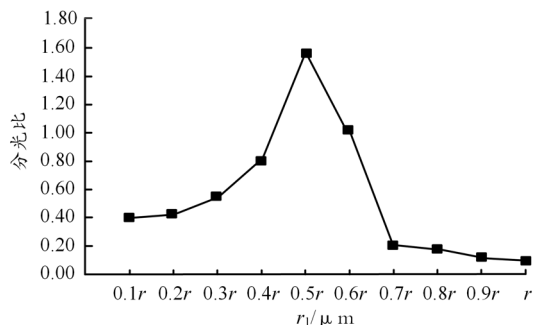
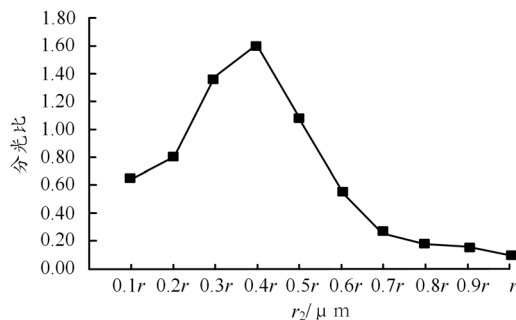


图1 耦合分束器结构模型

间连接输入/输出的部分为移去介质柱形成的波导,出射端直波导两侧为分束器光路。图中 $R_1$ 、 $R_2$ 为分束器中的一对介质柱,通过改变图中 $R_1$ 和 $R_2$ 的介质柱半径(分别用 $r_1$ 、 $r_2$ 表示)大小可实现控制分配到两侧的光波功率大小。由于两侧结构完全一样,所以同时改变 $R_1$ 或 $R_2$ 中的2个介质柱就可以控制两侧光波功率基本相同。

## 2 仿真结果分析

本文使用Rsoft软件模拟二维光子晶体波导光路传播,利用麦克斯韦方程组中的2个旋度方程,通过对电磁场中的电场、磁场分量在空间和时间上采取交替抽样的方式离散化,将含有时间分量的麦克斯韦旋度方程转化为一组差分方程,并在时间轴上逐步推进地求解空间电磁场,从而模拟光路传播。仿真中所用的入射光均为 $1.55\text{ }\mu\text{m}$ 通信波长,当 $r_2=r$ 时,随着 $r_1$ 的改变分光比(分束器光路和直波导的光波功率比值)的变化如图2所示。根据此变化曲线可知,当 $r_2$ 不变时,随着 $r_1$ 增大分光比先变大后变小,并且当 $r_1=0.5r$ 时分光比达到峰值,大约为1.55,即分束器光路光波功率是直波导的1.55倍;当 $r_1=0.6r$ 时分光比为1,即3条光路的光波功率相等。当 $r_1=r$ 时,随着 $r_2$ 的改变分光比的变化趋势如图3所示。当 $r_2=0.4r$ 时分光比最大,大约为1.6,即此时分束器光路光波功率是直波

图2 分光比随 $r_1$ 变化图图3 分光比随 $r_2$ 变化图

导的1.6倍,并且此变化趋势和随着 $r_1$ 半径的改变分光比的变化趋势相同。

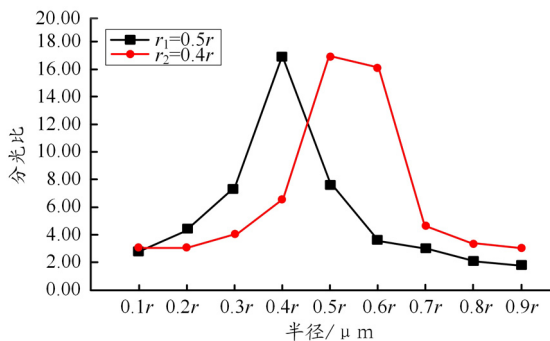
从图2和图3可知,当 $r_1=0.5r$ 、 $r_2=0.4r$ 时分光比达到峰值。为防止不同的 $r_1$ 和 $r_2$ 导致空间模场分布改变进而影响分光比峰值,通过反复调整 $r_1$ 和 $r_2$ 大小可得折线如图4所示。图中黑色折线表示 $r_1=0.5r$ 时随着 $r_2$ 大小改变得到的分光比变化折线,此时 $r_2=0.4r$ 分光比折线达到峰值;图中红色折线表示 $r_2=0.4r$ 时随着 $r_1$ 大小改变得到的分光比变化折线,此时 $r_1=0.5r$ 分光比折线达到峰值。对比以上2种方式的变化结果,可以看出当 $r_1=0.5r$ 、 $r_2=0.4r$ 时分束器光路分配到的光波功率最大,此时分光比大概为17。

### 2.1 单波导光波传播

根据图2和图3可知,当 $r_1=r$ 、 $r_2=r$ (4个介质柱半径全为 $r$ )时分光比的值为0.1左右,即分束器支路与分束器直波导光波能量比值接近于零,所以光波基本都集中在直波导中传播,波导的传播情况如图5所示。

### 2.2 双波导传播

由图4分析可知,当 $r_1=0.5r$ 、 $r_2=0.4r$ 时分光比等于17,即分束器支路与分束器直波导光波能量比值为17,分束器支路传播光波能量是分束器直波导光波能量的17倍左右,所以光波基本都沿着分束器支路传播。分束器光路传播如图6所示。

图4 分光比随 $r_1$ 和 $r_2$ 变化图

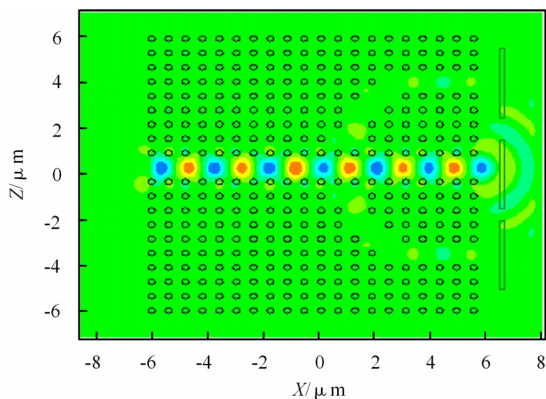


图5 单波导光波传播

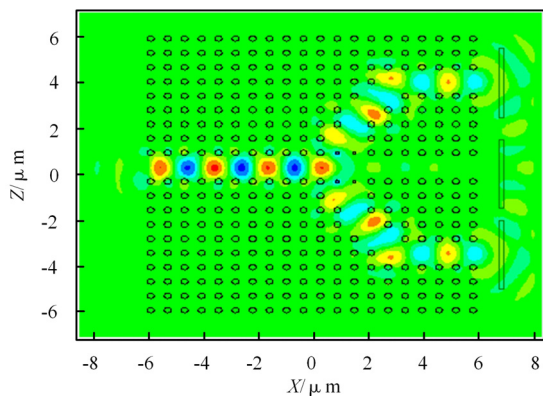


图6 双波导光波传播

### 2.3 三波导传播

从图2和图3分析可知,当 $r_1=0.6r$ 、 $r_2=r$ 或 $r_1=r$ 、 $r_2=0.5r$ 时分光比大约为1,即分束器支路光波能量与分束器直波导光波能量比值为1,此时三通道的传播光波能量相等即入射光被均分到3个光路中。光波传播如图7所示。

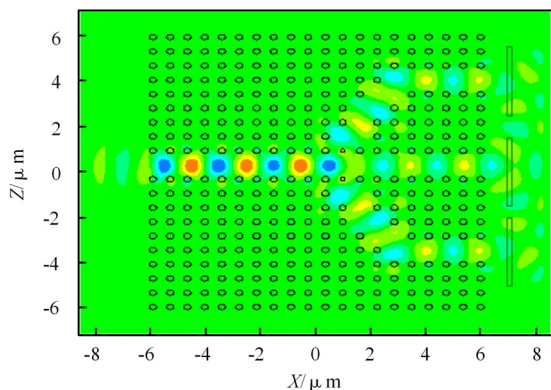


图7 三波导光波传播

## 3 结束语

本文设计了一种新型的耦合分束器,相比于其它

分束器,结构更简单并且灵活度更高,可以通过改变耦合区域的介质柱半径大小改变分光程度。当 $r_1=r$ 、 $r_2=r$ 时该器件为单波导传播;当 $r_1=0.5r$ 、 $r_2=0.4r$ 时该器件为分束器光路双波导传播;当 $r_1=0.6r$ 、 $r_2=r$ 或 $r_1=r$ 、 $r_2=0.5r$ 时该器件为三波导等量传播。这种设计更加符合集成光学的需求,合理设置耦合区域介质柱的半径大小就可轻易控制分光比。仿真表明:通过设计此种结构可以有效降低光波能量损耗;本文的结构设计不仅结构简单而且尺寸可控制在较小的范围内,更加适用于光学设备中。

### 参考文献:

- [1] 黎磊,刘桂强,陈元浩. 光子晶体异质耦合波导光开关[J]. 光学学报, 2013, 33(1): 216-222.
- [2] TEE D C, TAMCHEK N, SHEE Y G, et al. Numerical investigation on cascaded 1×3 photonic crystal power splitter based on asymmetric and symmetric 1×2 photonic crystal splitters designed with flexible structural defects[J]. Optics Express, 2014, 22(20): 24241-24255.
- [3] DIN C T, ADIKAN F R M, NIZAM T, et al. Efficient, Wide Angle, Structure Tuned 1×3 Photonic Crystal Power Splitter at 1550, nm for Triple Play Applications [J]. Journal of Lightwave Technology, 2012, 30(17): 2818-2823.
- [4] HUANG L, TIAN H, YANG D, et al. Optimization of figure of merit in label-free biochemical sensors by designing a ring defect coupled resonator [J]. Optics Communications, 2014, 332: 42-49.
- [5] 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.
- [6] YU T B, WANG M H, JIANG X Q, et al. Ultracompact and wideband power splitter based on triple photonic crystal waveguides directional coupler[J]. Journal of Optics A Pure & Applied Optics, 2007, 9(1): 37-42.
- [7] 刘文楷,孙耀,董小伟. 复合结构光子晶体耦合腔波导慢光特性研究[J]. 激光技术, 2017, 41(4): 591-595.
- [8] 崔乃迪,寇婕婷,梁静秋,等. 跑道型结构光子晶体波导定向耦合器[J]. 发光学报, 2013, 34(3): 375-381.
- [9] MAKTOOBI S, BAHADORI-HAGHIGHI S. Investigation and simulation of photonic crystal directional coupler switch [J]. Electronics Letters, 2015, 51(13): 1016-1018.
- [10] SHARMA J, SHARMA R, DUSADL K. Review and analysis of photonic crystal beam splitters for optical communication applications [C]// 2015 International Conference on Green Computing and Internet of Things (ICGCIoT), October 8-10, 2015, Greater Noida, Delhi, India. New York: IEEE, 2015: 160-162.
- [11] 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.
- [12] 王晨歌,张彩妮,陈佩,等. 二维光子晶体偏振滤波分束器的设计与优化[J]. 光子学报, 2014, 43(12): 164-167.
- [13] 苏康,王梓名,刘建军. 二维正方晶格光子晶体三光波导方向耦合器[J]. 光学学报, 2016(3): 202-207.