

基于光子晶体三通道解波分复用器

王一飞¹, 王梦梦¹, 文丰¹, 杨啸宇¹, 华尔天², 闫树斌^{1,2*}

(1. 中北大学 仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 太原 030051; 2. 浙江水利水电学院, 杭州 310018)

摘要: 为了实现结构紧凑、高透射率的解波分复用功能, 基于光子晶体的禁带特性, 提出了一种高效率的三通道解波分复用器。基于平面波展开法(PWE)分析了光子晶体的传播特性并给出了光子晶体能带图; 使用有限元分析法(FEM)对器件结构参数优化, 给出了不同端口的透射谱图。实验结果表明: 该器件可以实现 1537.8 nm、1543.7 nm 和 1548.7 nm 等 3 个波长的波分解复用; 输出端口的透射率均达到 90% 以上, 且信道平均间隔仅为 5.5 nm; 输出端口的平均信道串扰值为 -27 dB; 该解波分复用器具有耦合效率高、波长选择性好、信道间隔小、信道串扰低、波长调节方法简单和易于集成等特点。

关键词: 光子晶体; 解波分复用器; 环形谐振腔

中图分类号: TN256 文献标识码: A 文章编号: 1002-5561(2019)12-0027-03

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2019.12.006

开放科学(资源服务)标识码(OSID): 

Three-channel wavelength division demultiplexer based on photonic crystal

WANG Yifei¹, WANG Mengmeng¹, WEN Fen¹, YANG Xiaoyu¹, HUA Ertian², YAN Shubin^{1,2*}

(1. Science and Technology on Electronic Test & Measurement Laboratory School of Instrument and Electronics, North University of China, Taiyuan 030051, China; 2. Zhejiang University of Water Resources and Electric Power, Hangzhou 310018, China)

Abstract: In order to realize the function of wavelength division multiplexer with compact structure and high transmissivity, a high efficient three-channel wavelength division demultiplexer based on the energy band characteristics of photonic crystal is presented. Based on the plane wave expansion method (PWE), the propagation characteristics of photonic crystals are analyzed and the band gap of photonic crystals is given. The finite element method (FEM) is used to optimize the structure parameters of the device and the transmission spectrums of different ports are given. The experiment results show that the proposed device is able to drop three channels at resonance wavelength of 1537.8 nm, 1543.7 nm, 1548.7 nm. The transmission of output ports both reach 90%, the average channel spacing is about 5.5 nm, and the average value of the crosstalk between output channels is about -27 dB. Besides, it has high coupling efficiency, good wavelength selectivity, low value of channel spacing and crosstalk. At the same time, the wavelength adjustment method is simple and easy to integrate.

Key words: photonic crystals; wavelength division demultiplexer; ring resonator

0 引言

在通信和光学传感器领域, 解波分复用器可以实

收稿日期: 2019-07-02。

基金项目: 国家自然科学基金(61675185, 6187250)资助; 山西省“1331工程”重点学科建设计划资助; 山西省新兴产业领军人才项目资助; 山西省留学回国人员择优项目资助。

作者简介: 王一飞(1993-), 男, 山西阳泉人, 硕士, 中北大学仪器与电子学院在读学生, 主要从事半导体器件的设计与仿真以及光纤传感等方面的研究。参加国家自然科学基金 1 项、山西省自然科学基金 1 项; 申请国家发明专利 1 项。

* 通信作者: 闫树斌(E-mail: shubin_yan@nuc.edu.cn)。



现不同光信号的分离。其中, 端口透射率、信道串扰和信道间距是设计解波分复用器的几个重要性能参数。近年来, 研究人员提出了实现光子晶体解波分复用器的各种方法和机制。2012 年, 唐发林等人^[1]利用光子晶体的点缺陷设计了一种三通道解波分复用器, 实现了端口透射率达 80% 的解波分复用功能, 但其信道间距和信道串扰值很大; 2013 年, 周兴平等人^[2]设计了一种双通道的解波分复用器, 通过增加介质柱, 极大地提高了解波分复用器的耦合效率, 但其信道间距较大, 约为 20 nm; 2016 年, 董小伟等人^[3]利用光子晶体环形谐振腔设计了一种四通道的解波分复用器, 其各通道

的透射率达到 90% 以上,但其信道间距和信道串扰值较大,分别为 40 nm、20 dB;2018 年,张小伟等人^[4]通过将波导与 4 个不同参数的微腔耦合,实现了四波长的波分解复用,其四波长的平均透射率达到 93%,但其信道间距较大。

本文利用光子晶体波导与环形谐振腔的耦合设计一种高效率的三通道解波分复用器,使用有限元分析法(FEM)对结构参数优化并进行仿真分析。

1 原理及分析

1.1 光子禁带

在空气背景中按三角阵列周期性插入圆形介质柱,构成完整的二维三角晶格光子晶体。晶格常数 $a=635$ nm,空气折射率 $n_0=1.0$,介质柱选用硫化铅,材料的有效折射率 $n=3.94$,半径 $r=106$ nm。使用平面波展开法(PWE)^[5]仿真得到三角晶格介质柱横电(TE)模和横磁(TM)模能带结构图如图 1 所示。从图 1(a)中可以看出 TE 模归一化频率 $0.27 \leq a/\lambda \leq 0.473$,由此计算可得波长范围为 $1340 \text{ nm} \leq \lambda \leq 2310 \text{ nm}$ 。TE 模式下的光子禁带宽度足够覆盖光通信波段^[6]。TM 模能带结构如图 1(b)所示,可以观察到光子禁带较小,为了使解波分复用器有更大的频率选择范围,所以本文的研究将在 TE 模下进行。

1.2 谐振耦合单元设计

整个器件的共振耦合腔原理图如图 2 所示。整个光子晶体器件是由半径 r 为 106 nm 的介质柱组成,耦合波导是通过移除介质柱形成的。环形谐振腔是由半径 R 为 171 nm 的中心圆柱组成。在环形谐振腔的四周添

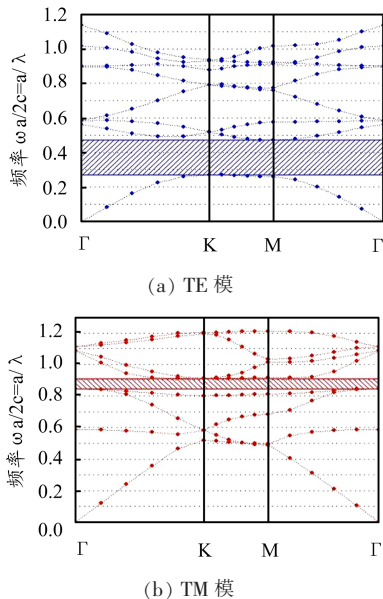


图 1 光子晶体的能带结构图

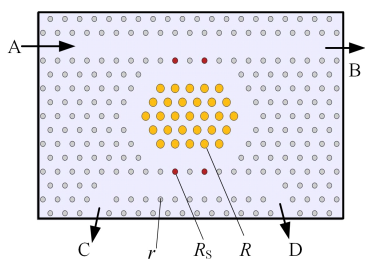


图 2 共振耦合腔原理图

加了 4 个半径 R_s 为 115 nm 的散射柱,以防止光的散射;输入端口 A 输入光源;B 作为主波导的输出端;C 和 D 分别作为负载波导的前向输出端和后向输出端;含有谐振频率的光从 A 端口输入,通过谐振后从 C 端口输出,而其它不包含谐振频率的光波则从 B 端口输出。

在 Comsol Mutiphysics 5.3b 软件环境下,本文利用 FEM 对所设计的结构进行仿真模拟,输入光为 TE 模式的高斯光,吸收边界采用完美电导体,计算步长为 0.1 nm,并利用软件内置的 S 参数曲线去计算输出端口的透射谱线,得到如图 3 所示的透射率分布图。可以看出,环形谐振腔在 1537.8 nm 处发生了谐振,且 C 端口的透射率达到 96.5%。图 4 为 1537.8 nm 处的电场分布图。

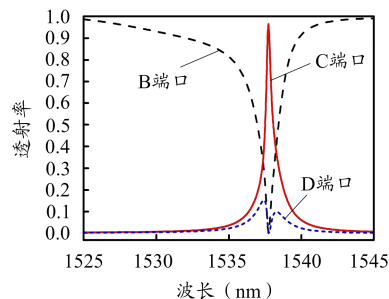


图 3 输出端透射率分布图

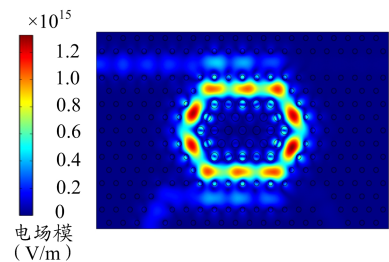


图 4 1537.8 nm 处电场分布图

1.3 解波分复用器设计原理

本文在模拟仿真中发现,当环形谐振腔中心柱 R 变化时,谐振波长和透射率会发生相应的变化,因此找到中心柱 R 的变化对耦合结构谐振波长的影响及规律至关重要。选取谐振腔内部中心柱半径分别为 171 nm、175 nm 和 179 nm,其它结构参数尺寸保持不变,输出端口的透射率分布图如图 5 所示。可以看出,随着中心柱半径 R 的增加,谐振波长向长波长方向(低频)移动,透射率会有略微的下降。因此,在一定范围内可以通过改变中心柱的半径来控制不同频率波长的输出。

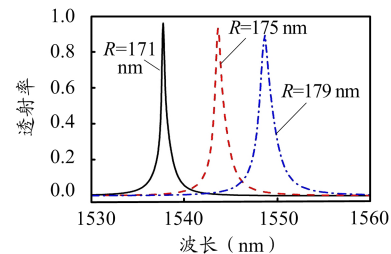


图 5 不同中心柱半径下 C 端口的透射率分布图

基于上述分析,本文通过设置不同的环形谐振腔中心柱半径,就可以输出不同频率的谐振波长,从而实现解波分复用器的功能。

2 设计和讨论

基于上述分析,本文将单一的环形谐振腔通过主波导依次并排连接,每个环形谐振腔对应不同的中心柱半径,依次为 171 nm、175 nm 和 179 nm,得到了如图6所示的解波分复用器结构示意图。依然从 A 端口输入 TE 模式的人射光,主波导输出端为 B 端,3 个信道输出端口依次为 C、D 和 E。

本文最终计算出解波分复用器的透射率分布图如图7所示。可以看出,该器件通带的线形为梳状窄带,在 1537.8 nm、1543.7 nm、1548.7 nm 处产生了明显的透射峰,透射率依次为 91%、94% 和 90%,信道平均间距仅为 5.5 nm,各信道透射谱线的平均-3 dB 带宽为 0.855×10^{17} Hz,各信道的最大插入损耗仅为 0.4575 dB。这体现了良好的耦合效率和波长选择性。为了更好地验证这一结果,本文将对应谐振波长的光波依次从 A 端口输入,得到如图8所示的在不同谐振波长下整个器件的电场分布图。仿真结果表明:当特定波长的光波输入时,光波

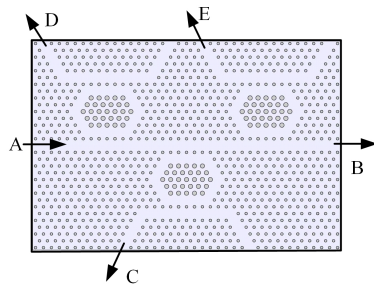


图6 三通道解波分复用器结构示意图

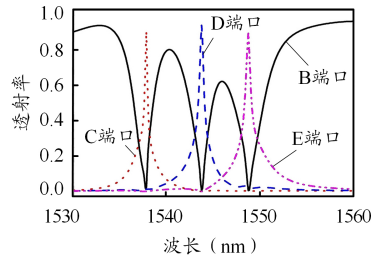
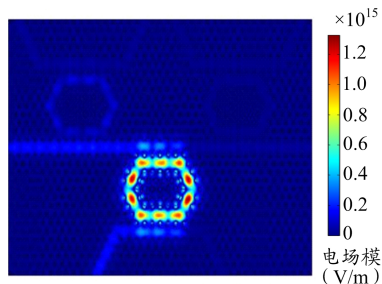
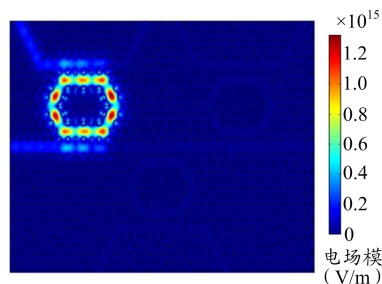


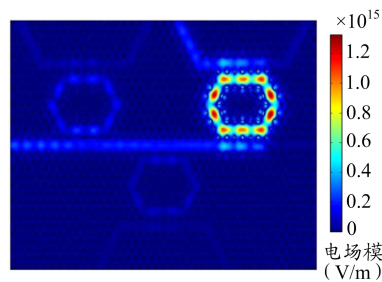
图7 三通道解波分复用器的透射率分布图



(a) 1537.8 nm



(b) 1543.7 nm



(c) 1548.7 nm

图8 不同谐振波长下的电场分布图

从其它端口输出的强度很小,都可以沿着设定好的共振耦合结构从特定的端口输出。

信道串扰是衡量解波分复用器的重要指标。它定义为相邻信道对传输信道的串扰程度,其表达式为:

$$I = 10 \lg(P_s/P_m) \quad (1)$$

其中, P_s 为相邻信道进入传输信道的辐射强度, P_m 为传输信道的透射强度。根据式(1)可知,信道串扰值越低,器件的性能越好。将仿真结果代入式(1)便可得到各通道的串扰大小如表1所示,计算可得各通道的平均信道串扰值仅为-27 dB,可以实现高效率的信号隔离。

表1 三通道解波分复用器各通道之间的信号串扰值

端口通道	串扰值(dB)
C端口-D端口	-18
C端口-E端口	-36.7
D端口-C端口	-32.3
D端口-E端口	-37.8
E端口-C端口	-22.9
E端口-D端口	-14

3 结束语

本文是在二维三角晶格光子晶体上设计了一种高效率的三通道解波分复用器。利用平面波展开法和有限元分析法分别对其进行了能带和传输特性的分析,通过设置不同的中心柱半径,实现了 1537.8 nm、1543.7 nm 和 1548.7 nm 的波分解复用,输出端口的透射率均达到 90% 以上,且平均信道间距仅为 5.5 nm,平均信道串扰值为-27 dB,该器件波长调谐方法简单,易于集成,在未来的光通信集成领域具有一定的市场前景。

参考文献:

- [1] 张通,孙晶,杨运兴. 光子晶体波分复用器的设计[J]. 光通信技术, 2018, 42(3): 33-35.
- [2] 唐发林,刘桂强,黎磊,等. 二维三角晶格光子晶体三通道解波分复用器[J]. 光子学报, 2012, 41(12): 1470-1473.
- [3] 周兴平,疏静,卢斌杰,等. 基于三角晶格光子晶体谐振腔的双通道解波分复用器[J]. 光学学报, 2013, 33(1): 211-215.
- [4] 董小伟,倪品品,刘文楷. 四通道光子晶体解波分复用器的研究[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(3): 030603-1-030603-6.
- [5] JOHNSON S G. Block-iterative frequency-domain methods for Maxwell's equations in a planewave basis [J]. Optics Express, 2001, 8(3): 173-190.
- [6] ALIPOURBANAEI H, MEHDIZADEH F. High sensitive photonic crystal ring resonator structure applicable for optical integrated circuits[J]. Photonic Network Communications, 2016, 33(2): 1-7.