

光子晶体波分复用器的设计

张通, 孙晶*, 杨运兴

(吉首大学 物理与机电工程学院, 湖南 吉首 416000)

摘要:点缺陷微腔因其具有选频功能在光子晶体滤波中被广泛应用。通过波导与四个不同参数微腔的耦合, 实现了 1530nm、1555nm、1580nm 和 1605nm 四波长的波分解复用功能。结果表明, 该器件仅通过调节微腔介质柱半径就可实现四波长平均透射率约为 93% 的高效输出, 适用波长间距短、分辨率高且器件尺寸小, 在光通信中具有潜在的应用价值。

关键词:光子晶体点缺陷; 共振耦合; 波分复用器

中图分类号: TN915.62 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-5561(2018)03-0033-03

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2018.03.009

Design of WDM based on photonic crystal

ZHANG Tong, SUN Jing*, YANG Yunxing

(School of Physics, Mechanical and Electrical Engineering,
Jishou University, Jishou Hunan 416000, China)

Abstract: Point defect microcavities are widely used in photonic crystal filters because they are useful in frequency selection. By coupling waveguides with microcavities of four different types, it is possible to demultiplex wavelengths of 1530nm, 1555nm, 1580nm, and 1605nm. Results show that multi-wavelength transmittance of approximately 93% (which indicates a high output efficiency) can be achieved by adjusting the radius of the microcavity medium. This paper has potential applications in small, very selective, high-resolution optical communications devices.

Key words: photonic crystal point defect; resonance coupling; WDM

0 引言

波分复用/解复用技术在光通信应用中前景广阔且已得到广泛研究^[1], 实现波分复用/解复用的方法有: 通过调节微腔半径实现四波长波分解复用^[2]、调节与环形腔耦合的微腔结构实现波分解复用^[3]和调节环形腔中心介质柱半径实现波分复用^[4]等, 但研究中大都采用环形腔结构, 存在占用较多空间的不足, 不利于器件集成化。点缺陷微腔具有特定的共振频率, 临近波导中传输的与其频率相近的光信号可被耦合输出, 滤波性好、消光率高^[5], 在光开关^[6]、滤波器^[7]和波分复

用器^[8]等器件中已被广泛使用。本文利用波导与微腔的耦合使得共振耦合区尺寸减小, 并通过调节微腔介质柱半径, 设计一种高输出效率的基于光子晶体共振耦合的波分复用/解复用器。

1 原理与分析

光子晶体结构选用的 Si 介质柱在空气背景中呈方形周期排列, 晶格常数 $a=528.6\text{nm}$, 介质柱介电常数 $\varepsilon=11.56$, 半径 $r=0.18a$ 。光子晶体独特的本领在于“光子禁带”的存在, 这种类似于半导体禁带的特性决定了光信号的选择性传播(禁带频率范围内的光禁止传播)。本文利用平面波展开法^[9]求解能带分布, 其中, TM 模(电场方向平行于介质柱轴方向)在 $0.303(a/\lambda) \sim 0.444(a/\lambda)$ 范围存在光子带隙。

通过移除超胞示意图 1(a) 中间的介质柱形成线

收稿日期: 2017-11-11。

基金项目: 湖南省教育厅优秀青年项目(编号: 17B212)资助; 吉首大学研究生校级科研项目(编号: Jdy17033)资助。

作者简介: 张通(1994-), 男, 硕士研究生, 主要从事非线性光学方面的研究工作。

* 通信作者: 孙晶(E-mail: sunjingsd@aliyun.com)。

缺陷,求解出在超胞布里渊区 Γ -X 方向的带结构及缺陷态分布如图 1(b)、图 1(c)所示。在缺陷态频率范围 $0.312(a/\lambda) \sim 0.452(a/\lambda)$ 内原本处于禁带中禁止传播的光信号可以通过波导传播。因此,本文选取处于禁带及缺陷态频率范围 $0.312(a/\lambda) \sim 0.444(a/\lambda)$ 内的光信号作为研究对象。

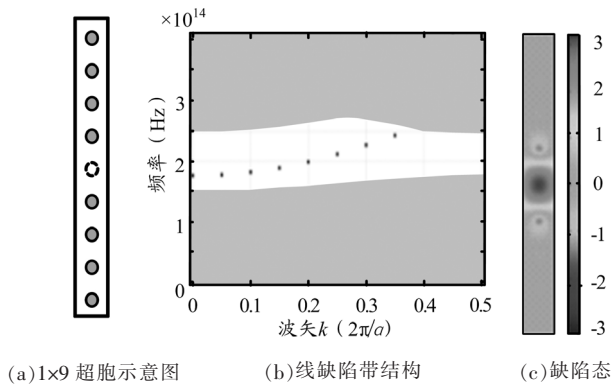


图 1 线缺陷带结构及超胞缺陷态本征场

当波导中光信号传输至微腔附近时,由于微腔的选频特性,只有与微腔共振频率相近的光信号才可产生共振,实现特定频率光信号的滤波输出,其它频率光信号由于不能耦合进微腔而被反射或者消耗。当移除一介质柱后打破完整的周期性结构形成点缺陷,点缺陷具有特定的谐振波长,仿真结果表明,谐振波长与点缺陷半径大小成正比。

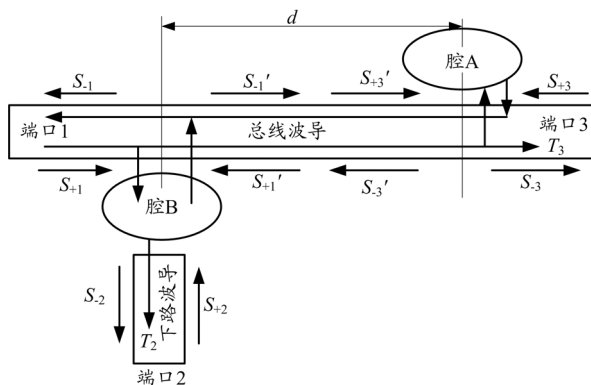


图 2 微腔与波导的耦合结构

微腔与波导的耦合结构如图 2 所示,本文采用耦合模理论^[10]分析两者的耦合特性。

设 R 为反射系数, d 为两微腔水平距离, T_2 、 T_3 分别为端口 2、端口 3 的传输系数。根据耦合模方程有:

$$\frac{da}{dt} = \left(j\omega_a - \frac{\omega_a}{Q_a} - \frac{\omega_a}{2Q_3} \right) a + \sqrt{\frac{\omega_a}{2Q_3}} e^{j\theta_3} S_{a3} + \sqrt{\frac{\omega_a}{2Q_3}} e^{j\theta_3} S_{a3}' \quad (1)$$

$$\frac{db}{dt} = \left(j\omega_b - \frac{\omega_b}{Q_b} - \frac{\omega_b}{2Q_1} - \frac{\omega_b}{2Q_2} \right) b + \sqrt{\frac{\omega_b}{2Q_1}} e^{j\theta_1} S_{b1} + \sqrt{\frac{\omega_b}{2Q_1}} e^{j\theta_1} S_{b1}' + \sqrt{\frac{\omega_b}{2Q_2}} e^{j\theta_2} S_{b2} + \sqrt{\frac{\omega_b}{2Q_2}} e^{j\theta_2} S_{b2}' \quad (2)$$

其中, a 、 b 分别为腔 A、腔 B 的信号幅度, ω_a 、 ω_b 分别为微腔耦合频率, Q_a 、 Q_b 分别为微腔自身损耗产生的 Q 值, Q_1 、 Q_2 、 Q_3 分别为微腔耦合到端口 1、2、3 的值。 S_{ai} 为总线波导与下路波导中各端口的信号幅度, S_{ai}' 为 S_{ai} 信号与腔 A、腔 B 作用后的信号幅度, θ_1 、 θ_2 为腔 B 与主线波导及下路波导耦合系数的相位, θ_3 为腔 A 与主线波导耦合系数的相位。由文献[11]可知,信号从端口 1 耦合到端口 2 的效率可用传输系数 T_1 表示为:

$$T_1 = \frac{S_{-2}}{S_{+1}} = \frac{\exp(j\theta_1 - j\theta_2) \sqrt{\frac{1}{2Q_1 Q_2}} [1 - r(\cos\varphi - j\sin\varphi)]}{j \left(\frac{\omega}{\omega_b} - 1 + \frac{r}{2Q_1} \sin\varphi \right) + \frac{1}{Q_b} + \frac{1}{2Q_2} + \frac{1}{2Q_1} (1 - r\cos\varphi)} \quad (3)$$

当波导频率 $\omega = \omega_0 = \omega_a = \omega_b$ 时,求出传输效率 η 如式(4)所示。

$$\eta = |T_1|^2 = \frac{(1 - \cos\varphi)^2 / (Q_1 Q_2)}{\left(\frac{1}{2Q_1} + \frac{1}{2Q_2} \right)^2 + \frac{1}{4Q_1^2} - \frac{\cos\varphi}{2Q_1 Q_2} - \frac{\cos\varphi}{2Q_1^2}} \quad (4)$$

当 $Q_1/Q_2 = 2$, $\varphi = (2n+1)\pi$ 时,可使理论传输效率几乎为 1。由于 $\varphi = 2\beta d$, β 为总线波导中光信号的传播常数,因此,本文选取两微腔中心点之间的水平方向距离 d 为 $5a$ 。

耦合区结构及两微腔共振频率为 $0.387(a/\lambda)$ 点处的模场分布如图 3 所示,由于其它频率点处两微腔不能同时被激发,从而实现了滤波功能。

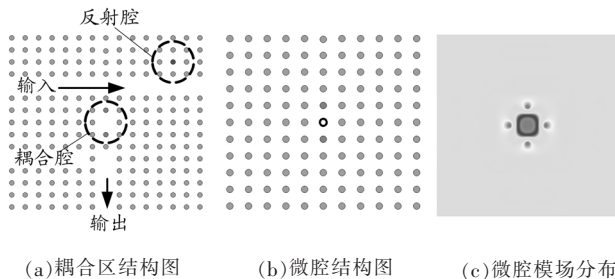


图 3 单波长模型图及模场分布

2 设计与仿真

根据微腔特性,不同结构微腔耦合不同频率光信

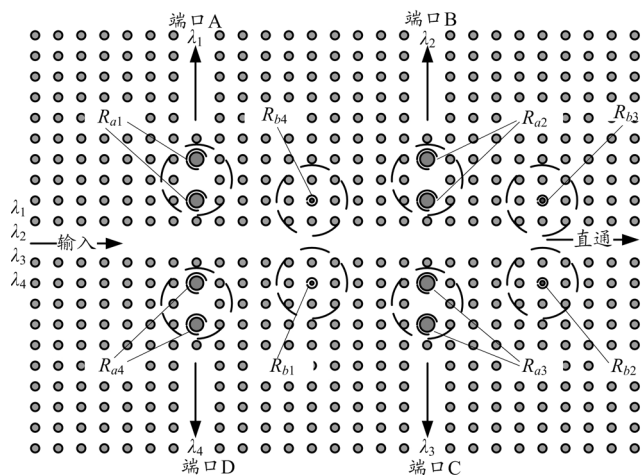


图4 四波长波分复用/解复用器结构图

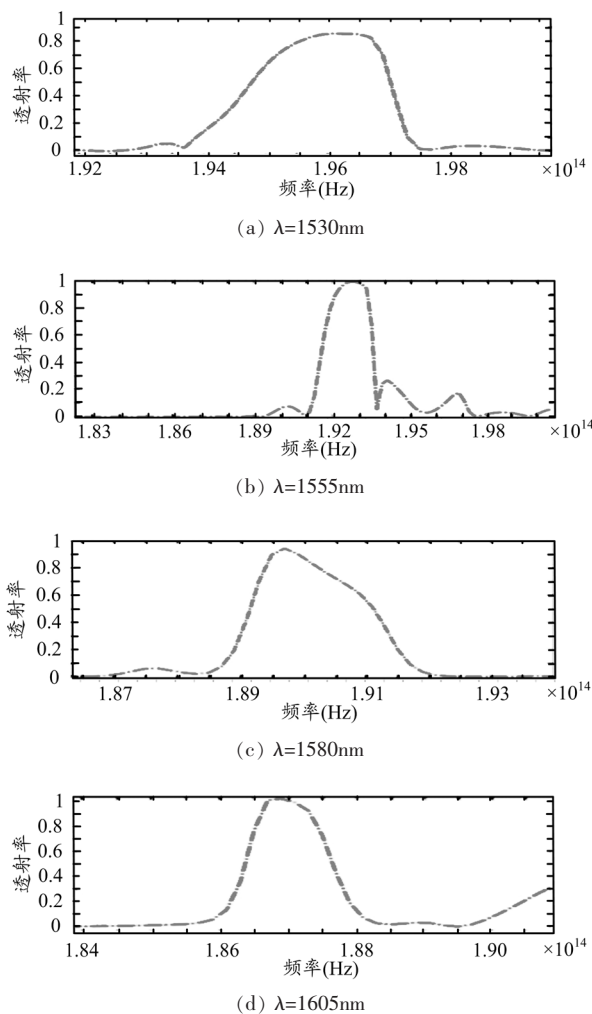


图5 波分复用/解复用器透射率分布

号,因此可通过调节微腔半径设计不同共振频率的微腔来实现多波长的滤波输出。

由一个直波导、四个耦合腔和四个反射腔构成的

波分解复用器结构示意图如图4所示。通过设定耦合腔两外围介质柱半径 $R_{a1}=159.7\text{nm}$ 、 $R_{a2}=164.3\text{nm}$ 、 $R_{a3}=169\text{nm}$ 、 $R_{a4}=155.2\text{nm}$ 及反射腔中心介质柱半径 $R_{b1}=0.521r$ 、 $R_{b2}=0.554r$ 、 $R_{b3}=0.588r$ 、 $R_{b4}=0.487r$ 来实现四波长波分解复用功能。

本文采用有限元法并借助 COMSOL 软件仿真,通过求解输出端口与输入端口能流(时均功率流)积分比值,求出波分解复用器稳定状态时的透射率分布如图5所示。在 1530nm 、 1555nm 、 1580nm 和 1605nm 四波长输入时,由于微腔分别对应于 $1.93\times 10^{14}\text{Hz}$ 、 $1.9\times 10^{14}\text{Hz}$ 、 $1.87\times 10^{14}\text{Hz}$ 和 $1.96\times 10^{14}\text{Hz}$ 四个不同共振频率,信号分别从四个端口输出,四波长对应透射率大小分别为 85.6% 、 98.6% 、 89.2% 和 100% 。

3 结束语

本文基于光子晶体波导与微腔的耦合,通过采用平面波展开法、有限元法制作了结构简单、输出效率高和波长分辨率强的波分复用/解复用器。该器件只需调节微腔半径参数即可改变工作频率,方法简单。器件尺寸约为 $11\mu\text{m}\times 14\mu\text{m}$,尺寸较小,利于集成。因此,该器件在光通信发展中具有潜在的应用价值。

参考文献:

- [1] FENG S, WANG Y. Unidirectional reciprocal wavelength filters based on the square-lattice photonic crystal structures with the rectangular defects [J]. Optics Express, 2013, 21(1): 220–228.
- [2] 张佳,徐旭明,何灵娟,等. 基于光子晶体共振耦合的四波长波分复用/解复用器[J]. 物理学报, 2012 (5): 228–234.
- [3] 陈燕彬,徐旭明,李未,等. 光子晶体共振耦合波分复用器的设计与研究[J]. 光通信技术, 2014, 38(2): 13–15.
- [4] 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 (1): 211–215.
- [5] XIAO S, LIU L, QIU M. Resonator channel drop filters in a plasmon-polaritons metal[J]. Optics Express, 2006, 14(7): 2932–2937.
- [6] 陈鹤鸣,王国栋. 一种新型缺陷模迁移光子晶体全光开关设计[J]. 光学学报, 2011(3): 267–272.
- [7] 朱志宏,叶卫民,季家熔,等. 光子晶体滤波特性分析[J]. 光子学报, 2004(6): 700–703.
- [8] 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(3): 68–73.
- [9] 李旭,乐孜纯. 光子晶体微腔稀疏波分解复用器的设计与模拟[J]. 光子学报, 2014(S1): 201–206.
- [10] VUCKOVIC J, WAKS E. Coupled mode theory for photonic crystal cavity-waveguide interaction[J]. Optic Express, 2005, 13(13): 5064–5073.
- [11] REN Hongliang, JIANG Chun, HU Weisheng, et al. Photonic crystal channel drop filter with a wavelength-selective reflection micro-cavity[J]. Optics Express, 2006, 14(6): 2446–2458.