

基于复式晶格光子晶体的可重构光分插复用器

孙晓光¹, 陈鹤鸣^{2*}

(1.南京邮电大学 光电工程学院, 南京 210023; 2.南京邮电大学 贝尔英才学院, 南京 210023)

摘要:提出了一种基于复式正方晶格的光子晶体可重构光分插复用器(ROADM),该ROADM利用线缺陷作为波导、填充液晶的点缺陷作为微腔来实现波长的分插复用。利用基于时域有限差分(FDTD)法的Rsoft软件进行仿真分析,结果表明,该器件可以实现上/下载的波长为1510nm、1530nm、1550nm和1570nm,即可以实现4个波长的快速重构,满足疏波分复用(CWDM)要求。

关键词:复式晶格;光子晶体;可重构;分插复用器;液晶

中图分类号:TN915.62 **文献标识码:**A **文章编号:**1002-5561(2018)02-0027-04

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2018.02.008

Reconfigurable optical add/drop multiplexer based on compound lattice photonic crystals

SUN Xiaoguang¹, CHEN Heming^{2*}

(1.School of Optoelectronic Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjiang 210023, China; 2. School of Bell Honors, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjiang 210023, China)

Abstract: A photonic crystal reconfigurable add/drop multiplexer (ROADM) based on compound square lattice is proposed. The ROADM uses line defects as waveguides and fills the point defects of liquid crystals as micro cavities to realize wavelength division multiplexing. By using the simulation analysis of Rsoft software based on FDTD, the simulation results show that the device can achieve upload or download the wavelength of 1510nm, 1530nm, 1550nm and 1570nm, which can realize the rapid reconstruction of four wavelengths, meet the requirements of CWDM.

Key words: compound lattice; photonic crystal; reconfigurable; add/drop multiplexers; liquid crystal

0 引言

随着云计算、三网合一及物联网等新信息技术的发展,各行业对信息传输的标准越来越高,光传输网因其可以提供可靠传输,使其发展前景一片光明。可重构光分插复用器(ROADM)是目前采用的WDM网络步入全光网络阶段的关键器件,它不仅可以从多波长信号中下载特定波长到本地,最关键的是具有动态可重构的能力,加快了光网络的智能化进程。为了能够

充分利用越来越珍贵的带宽资源,WDM系统的波长间隔肯定会越来越小,且信道的数量也肯定会逐渐增加。因此,这就需要ROADM的尺寸须容易集成且尽量小,而基于光子晶体的光分插复用器就满足这些要求。文献[3]中提出的分插复用器采用点缺陷实现信道间隔为20nm的分插复用的功能,但上/下载效率仅60%。文献[4]中提出的分插复用器为多模干涉型,其上/下载效率可以达到94%左右,但是要想用于疏波分复用(CWDM)系统中,波导的耦合长度非常大,会超过预计尺寸。这些分插复用器的频率上/下路是固定不变的,无法实现自由选择波长,缺乏动态配置波长的特性^[5]。针对上述分插复用器的不足,本文提出一种基于复式正方晶格的光子晶体ROADM。

收稿日期:2017-09-18。

基金项目:国家自然科学基金(61571237)资助;江苏省自然科学基金(BK20151509)资助;江苏省研究生创新项目(KYZZ16_0251)资助。

作者简介:孙晓光(1994-),男,硕士研究生,主要研究方向为光子晶体器件。

*通信作者:陈鹤鸣(E-mail: chhm@njupt.edu.cn)。

1 ROADM 结构模型、液晶特性和实现机理

1.1 ROADM 结构

本文设计的 ROADM 基于二维复式正方晶格光子晶体。复式晶格是由两种晶格嵌套形成的,即由方形和圆形两种介质柱嵌套后,再将这个结构旋转 45° 而成,形成新型的二维复式晶格的周期性排列^[7]。其中,一个点缺陷可以实现两个缺陷模(即能滤出两个波长),通过对两个波长进行优化,可以获得比简单晶格更优异的性能。ROADM 的结构如图 1 所示,以空气作为背景材料,折射率为 1;以硅作为介质柱材料,折射率 $n=3.4$;晶格常数为 a ,圆形介质柱半径 $R=0.2a$,方形介质柱边长 $b=0.405a$ 。该器件由两部分组成:一条主波导和两条上/下载波导;两个作为谐振腔的圆形点缺陷 A、B 和两个作为反射腔的圆形点缺陷 C、D。在光子晶体中间的一条线缺陷为主波导,主波导下方的点缺陷为谐振腔,并在点缺陷的下方制作一条线缺陷作上/下载波导,在主波导上方的点缺陷为反射腔。

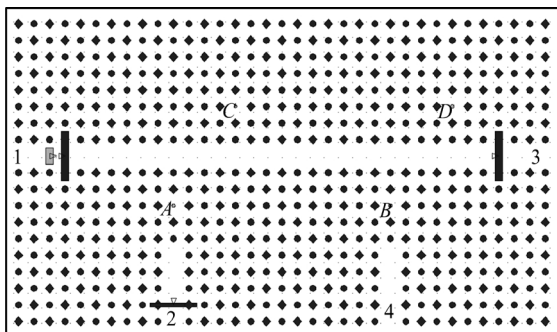


图 1 ROADM 结构示意图

本文采用圆形介质柱作为点缺陷形成谐振腔,选取点缺陷 A 和 B 的半径 r 为 $0.451R$ 和 $0.534R$,此时谐振腔与波导的耦合效果最优。本文通过优化波导与谐振腔之间的边缘介质柱的半径大小来提高上/下载效率和信道隔离度,在数次仿真优化之后,上/下载效率可达 98% 以上,信道隔离度最佳。

1.2 液晶特性

在液晶中,当入射光在一定偏振方向上入射时,会发生双折射。液晶分子在电场的作用下,分子极化轴的方向会发生改变,通过外加电场就可以改变液晶的光轴,这就是电控双折射效应。因此,电场可以控制液晶的光轴偏转,从而控制其双折射的相位差,以此来改变液晶的折射率^[8]。本文采用 Phenylacetylene 型液晶,其正常折射率为 1.590,非正常折射率为 2.223,折射率变化范围为 0.633。

1.3 ROADM 上/下载机理

上载机理:在上载波导输入光波,当光波传输到点缺陷时,满足点缺陷谐振频率的光波将耦合到主波导,以实现上载功能。下载机理:在主波导中传输多波长光信号,满足谐振腔波长要求的光波在点缺陷处会被耦合进下载波导中,这样就可通过谐振腔的频率选择特性实现对某个特定波长的下载。

本文设计的 ROADM 是在完整光子晶体上引入线缺陷作为主波导和上/下载波导,引入点缺陷作为谐振腔,使特定频率的载波可以耦合入点缺陷并从上/下载波导滤出。满足光子禁带范围内的波长在线缺陷主波导中传输,与谐振频率相符的载波会被耦合进点缺陷并积累谐振能量,最终耦合进上/下载波导。

2 仿真及其结果分析

我们利用平面波法(PWM)和FDTD 仿真分析所设计 ROADM 的性能。滤波器所采用的光子晶体由 35×19 个元胞组成,晶格常数 a 为 0.55,滤波器四周设有完美匹配层(PML)。

2.1 带隙特性仿真与分析

根据 PWM 法,利用 Rsoft 软件里的 BandSolve 组件仿真 TE 偏振模带隙,如图 2 所示。光子禁带的最大带隙的归一化频率范围为 0.2842~0.42083,禁带宽度为 0.13663。相比简单晶格,复式晶格的带隙范围更广,更有利于选择多个上/下载波长。

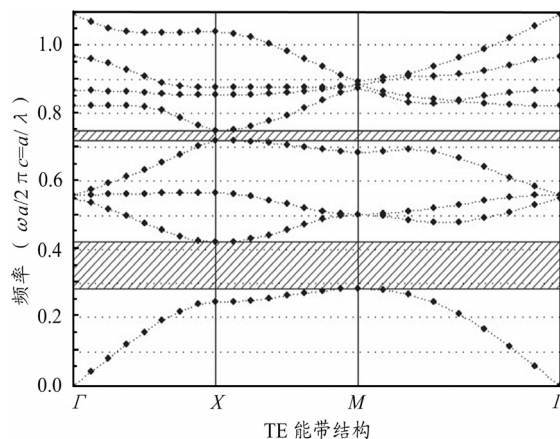


图 2 复式正方晶格 Si 介质柱光子晶体带隙结构图

2.2 缺陷模特性仿真与分析

我们利用 Rsoft 软件中的 FullWae 组件进行缺陷模特性仿真,光源采用脉冲波。当液晶折射率分别为 2.04 和 2.061 时,根据 FDTD 法仿真得出两个点缺陷 A、B 的缺陷模。1510nm 和 1530nm 波长的透射谱分别如图 3 和图 4 所示。

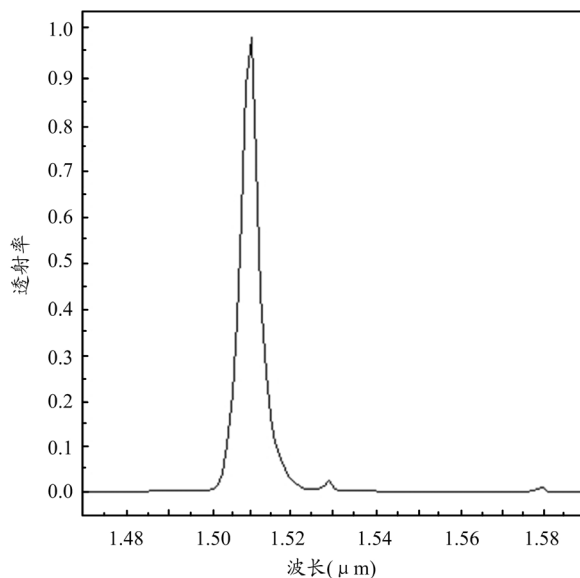


图3 点缺陷 A 的 1510nm 波长透射谱

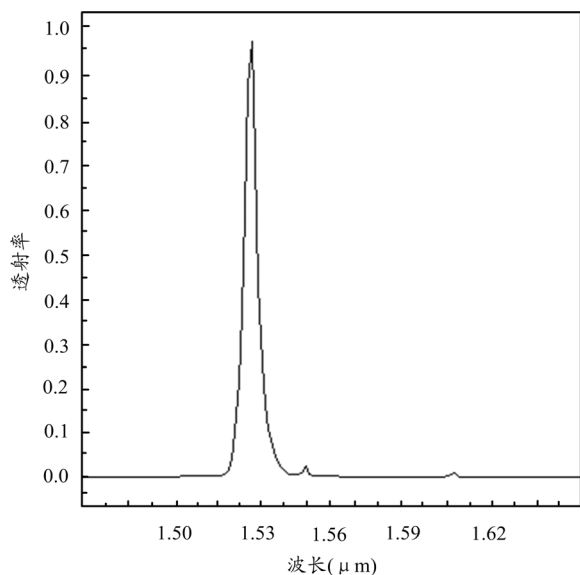


图4 点缺陷 B 的 1530nm 波长透射谱

2.3 ROADM 可重构特性

以点缺陷 A 为例,当液晶折射率为 2.043 时,点缺陷只下载一个波长即 1510nm,下载率为 98.5%。随着液晶折射率的升高,会激发出两个波长,此时对于 ROADM 是不适用的。当折射率为 2.181 时,只下载另一个 1550nm 的波长,此时下载率为 99.2%。同样,在点缺陷 B 处,当液晶折射率为 2.061 时只激发一个 1530nm 的波长,当液晶折射率升至 2.203 时,只下载 1570nm 的波长。因此,当改变电压来调谐液晶折射率就可以重构上下载波长。以点缺陷为 A 为例,控制加载在两端的电压分别为 7.82V、6.83V 和 5.91V,使得填充在点缺陷的液晶折射率分别为 2.043、2.13 和 2.181。用 Rsoft 软件仿真,得到的仿真图如图 5 所示。

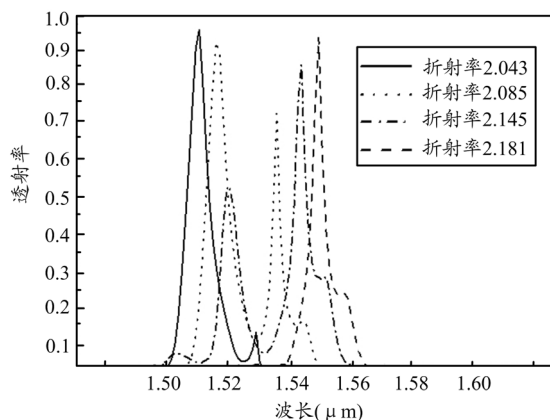


图5 点缺陷 A 在不同液晶折射率时的透射谱

3 ROADM 性能分析

3.1 上/下载效率

上/下载效率是指输出端口的光波强度与输入端口的光波强度的百分比。仿真计算结果表明,我们所设计 ROADM 的上/下载光波的波长为 1510nm、1530nm、1550nm 和 1570nm。上/下载率最高达 99.23%。图 6 为点缺陷 A 在 1510nm 波长下载时的稳态场强分布图。图 7 为点缺陷 B 在 1530nm 波长上载时的稳态场强分布图。

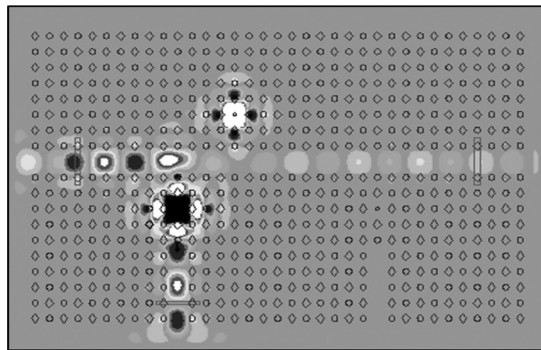


图6 点缺陷 A 的稳态场强分布图

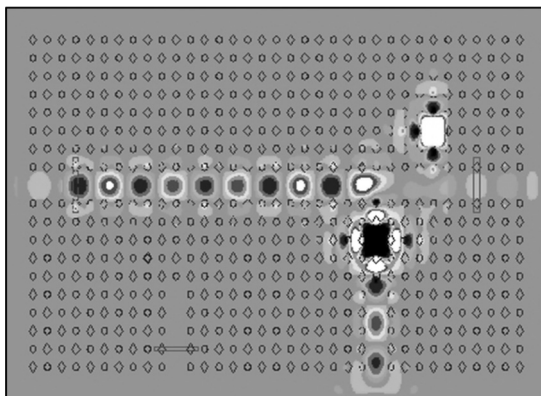


图7 点缺陷 B 的稳态场强分布图

3.2 响应时间

本文设计的光子晶体调谐型 ROADM 响应时间应考虑器件自身的稳定时间和液晶的响应时间。电控液晶的响应时间一般为毫秒量级。暂不考虑液晶响应时间,器件自身的响应时间可以通过 Rsoft 软件仿真得到器件时域稳态图来估算。图 8 为点缺陷 A 处 1510nm 波长的时域稳态响应图。

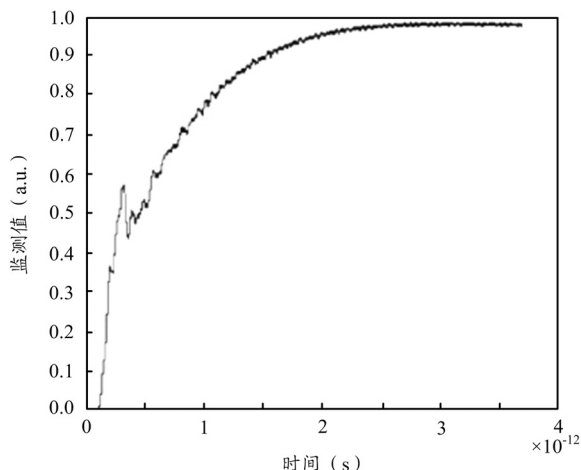


图 8 点缺陷 A 处 1510nm 波长的时域稳态响应图

分析图 8 可知,器件的稳定时间小于 10^{-11} s,相比液晶响应时间可以忽略不计。所以,本 ROADM 的重构时间主要由液晶响应时间是多少毫秒来决定。

3.3 插入损耗

插入损耗是评价 ROADM 性能的重要指标,通过计算,4 个工作波长下的插入损耗分别为 0.52dB、0.45dB、0.62dB 和 0.55dB,均控制在 1dB 以内,如表 1 所示。

表 1 ROADM 的插入损耗

点缺陷	波长	下载率/上载率	插入损耗
点缺陷 A	1510.3nm	98.2%/98.0%	0.52dB
	1550.02nm	99.1%/98.4%	0.45dB
点缺陷 B	1530.02nm	98.6%/98.8%	0.62dB
	1570.1nm	98.5%/98.1%	0.55dB

3.4 信道隔离度

信道隔离度是波分复用系统中的关键性能指标,定义为一个信道相对于相邻信道的串扰。表 2 为以点缺陷 A 为例的两波长的信道隔离度。由表 2 可知,信道隔离度均超过 20dB,甚至在几个波长下超过 30dB。

表 2 点缺陷 A 的信道隔离度

波长	串扰信道 输出信道	P1	P2	P3	P4
1510.3nm	P2(下载)			25.34dB	26.31dB
	P3(上载)	28.69dB	24.34dB		
1550.2nm	P2(下载)			30.19dB	32.58dB
	P3(上载)	27.45dB	29.52dB		

4 结束语

本文设计的 ROADM 利用点缺陷和线缺陷的耦合模理论,完全能够实现上/下载波长的重构。本器件尺寸小,上/下载效率均可超过 98%,插入损耗小于 1dB,信道隔离度超过 25dB,可以满足 CWDM 要求,在未来光通信系统中有潜在的应用价值。

参考文献:

- [1] 刘启能. 一种新型可调谐光子晶体滤波器的理论研究[J]. 光电子·激光, 2007, 18(5): 574-576.
- [2] KIM M J, KIM H K, LEE H M, et al. Low-cost optical add drop multiplexer module using 2×2 port optical device [J]. Opt. Eng., 2003, 42(9): 2489-2490.
- [3] 张文杰, 谭立英, 马晶. 光子晶体四信道波分复用器的研究[J]. 光学与光电技术, 2005, 3(1): 38-44.
- [4] JIN XIAOJUN, CHEN HEMING. Photonic crystal three wavelength division multiplexing based on multimode interference theory [C]// The 9th Inter. Conf. Optical Communications and Network, October, 24-27, 2010, Nanjing, China. Nanjing: IET, 2010: 395-398.
- [5] 徐林, 陈鹤鸣. 基于光子晶体可重构光分插复用器的设计[J]. 半导体光电, 2013, 4(6): 924-929.
- [6] 宋立涛, 何杰, 王华磊, 等. 液晶缺陷光子晶体滤波器的光学特性[J]. 中国激光, 2010, 37(11): 2835-2837.
- [7] 石洁, 陈鹤鸣. 复式晶格的 THz 双波长滤波器的设计与特性研究[J]. 光学应用(中英文版), 2013(4): 68-73.
- [8] MEKIS ATTILA, CHEN J C, KURLAND I, et al. High transmission through sharp bends in photonic crystal waveguides [J]. Physical Review Letters, 1996, 77(18): 3787-3790.
- [9] SHIU K T, AGASHE S S, FORREST S R. An InP-Based Monolithically Integrated Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2007, 19(19): 1445-1447.
- [10] FIGOTIN A, GODIN Y A, VITEBSKY I. Two-dimensional tunable photonic crystals [J]. Phys. Rev. B, 1998(57): 2841-2848.
- [11] KOSMIDOU ELISSAVET P, KRIEZIS EMMANOUIL E, TSI-BOUKIS THEODOROS D. FDTD analysis of photonic crystal defect layers filled with liquid crystals[J]. Optical and Quantum Electronics, 2005, 37(2): 149-160.