

基于环形腔的光子晶体滤波器的数值研究

关建飞，施政

(南京邮电大学 光电工程学院, 江苏南京 210046)

摘要: 文章采用有限元法分析了基于环形腔的光子晶体T型滤波器的滤波性能, 比较了整体介质柱及内柱折射率对滤波器输出端口归一化透射率曲线的影响。在此基础上设计了一种窄带光子晶体环形腔的滤波器模型, 数值模拟结果显示微环腔内部介质柱折射率与窄带滤波器下路波导输出的中心波长之间存在着近似线性的依赖关系, 这为光子晶体滤波器的设计与制作提供了理论参考。

关键词: 光子晶体滤波器; 环形腔; 有限元法; 归一化透射率

中图分类号: TN256 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-8788(2010)06-0032-04

Numerical study on ring resonator-based photonic crystal filters

Guan Jianfei, Shi Zheng

(College of Optoelectronic Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210046, China)

Abstract: In this paper, the ring resonator-based photonic crystal T-shaped channel-drop filter is investigated by the finite element method, in which the effects of the refractive index of the dielectric rods on the resonant frequency and normalized transmission are analyzed. On this basis, a filter model for the narrowband photonic crystal filter is designed. The numerical simulation results demonstrate the approximately linear dependence of the inner dielectric rods refractive index on the central wavelength of the drop waveguide output of the narrowband filter, which presents theoretical reference for the design and manufacture of photonic crystal filter.

Key words: photonic crystal filter; ring resonator; finite element method; normalized transmission

0 引言

利用光子晶体(PC)波导和谐振腔之间的耦合作用构造高品质的选频滤波器是目前光通信领域的一个研究热点^[1~2]。目前研究最多的是利用二维光子晶体波导线缺陷与点缺陷构成的谐振腔之间的耦合作用来实现滤波^[3~4], 通过改变腔体介质柱介电常量或改变腔体介质柱半径实现对不同波长的耦合达到滤波的功能; 然而点缺陷由于本身的结构较为简单, 因而存在谐振模式单一、调节范围有限的不足。Djavid等人提出了一种基于环形谐振腔与直线波导耦合的滤波器模型^[5~6], 环形腔相对于光子晶体点缺陷具有尺度变化范围大、结构设计灵活等优点, 可根据实用情况进行灵活设计, 因而在集成光无源器件中有着广阔的应用前景^[7]。

本文采用有限元法模拟了基于微环腔光子晶体滤波器输出端口的透射率随入射波长的变化关系, 比较了整体介质柱及腔内介质柱折射率对两输出端口透射率曲线的影响; 并在此基础上提出了一种改进的滤波器模型。数值模拟结果表明, 改进的模型能够有效地提升下路滤波器的品质因数, 为窄带滤波器的设计提供了有价值的参考。

1 理论模型

光子晶体滤波器的模型由在空气中呈正方形排列的介质柱阵列组成, 其截面如图1所示。在介质柱阵列中移除一行介质柱而引入线缺陷形成直波导

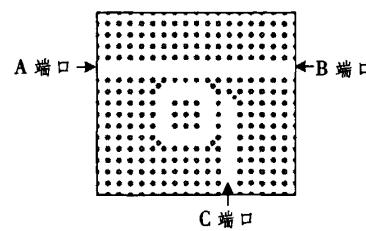


图1 基于环形腔的光子晶体
滤波器结构示意图

结构, 直波导两端分别为入射端口A与出射端口B。紧邻波导一侧引入一个类环形腔, 该腔与波导临界

的3根介质柱称为耦合柱, 而腔内4个顶角的介质柱称为散射柱, 腔内的9根介质柱称为内柱。在类环腔右侧引入的线缺陷称为下路波导, 对应C端口。这样初步构造了一个光子晶体下路滤波器的模型。

电磁波在非均匀介质中传输的本征方程如下:

$$\frac{1}{\epsilon(\vec{r})} \nabla \times [\nabla \times \vec{E}(\vec{r})] = \frac{\omega^2}{c^2} \vec{E}(\vec{r}), \quad (1)$$

收稿日期: 2010-08-06

基金项目: 江苏省高校自然科学基金资助项目(09KJB140005); 南京邮电大学攀登计划资助项目(NY207005)

作者简介: 关建飞(1979-), 男, 山西阳泉人, 讲师, 博士, 主要从事光纤通信与光波技术领域的研究工作。

式中, $\epsilon(\vec{r})$ 表示介质中的电容率分布; ω 与 c 分别表示入射光波的角频率及其在真空中的光速。在该滤波器模型中, 介质柱沿 Z 向呈均匀分布, 因而三维的滤波器模型可简化为 XOY 平面内的二维问题, 介质相对介电常数 $\epsilon_r = \epsilon_r(x, y)$ 是 XOY 面内的周期函数。对于波导中传输的 TE 模, 可以得到如下简化的二维 Helmholtz 方程:

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_z}{\partial y^2} + k_0^2 \epsilon_r(x, y) E_z = 0, \quad (2)$$

式中, E_z 表示 Z 向电场分量; $k_0 = \omega / \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}$ 是自由空间间的波数; ϵ_0 与 μ_0 分别为真空中的介电常数与磁导率。

2 数值模拟结果与讨论

2.1 两端口透射谱曲线

图 1 所示的平面模型中, 晶格常数 $a = 540$ nm, 介质柱半径 $r = 99.9$ nm; 位于环形腔四角的散射柱用以减少腔中谐振光波的逆向反射; 6 个耦合柱的半径均取为 $0.8r$, 以提高直条波导与环形腔之间的耦合效率。环形谐振腔中的谐振模式受光子晶体的禁带效应约束, 尤其是在波长量级的超小型环形谐振器中这种能带效应更加明显。相对于点缺陷或线缺陷的光子晶体微腔, 具有多模特性的环形谐振腔提供了大小的可拓展性和模式设计时的灵活性。

当整体介质柱的折射率取为 3.56 时, B、C 两端口的透射率曲线如图 2 所示。随着入射信号光波长

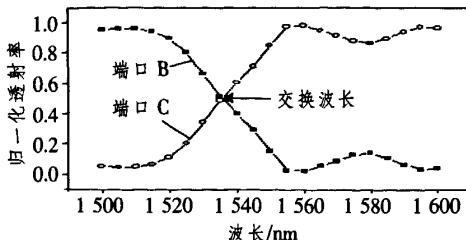
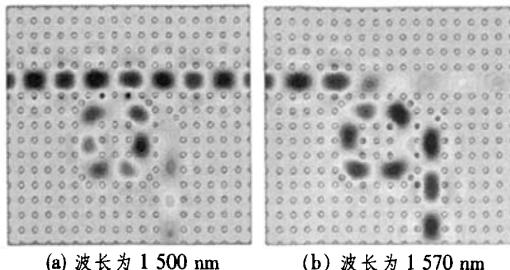


图 2 介质柱折射率为 3.56 时端口 B 与 C 的透射率的逐渐增大, B 端口的输出功率在波长为 1500~1520 nm 之间保持不变, 而当波长大于 1520 nm 时, 其透射率开始迅速减小; 与此同时, C 端口的输出功率在波长大于 1520 nm 之后呈现单调增加的趋势; 在波长为 1535 nm 处, B、C 两端口的透射率接近相等, 这一位置被称为交换波长。当光波长大于交换波长而继续增长时, B 端口的透射率继续下降, 同时 C 端口的透射率进一步上升。当入射波长大于 1555 nm 时, B 端口的归一化透射率趋近于 0, 而

C 端口的归一化透射率接近于 1。

图 2 中的曲线表明: 当波长从 1500 nm 增大到 1600 nm 时, 该滤波器的 B、C 两端口分别实现了高通与低通的滤波功能。在短波长区域, 光能主要集中在干路直线波导中, 通过 B 端口输出, 如图 3(a) 所示; 而在长波长区域, 光能将主要耦合进入环形谐振腔并传入下路波导中, 通过 C 端口输出, 如图 3(b) 所示。图 3 给出了入射光波长分别为 1500 及 1570 nm 时光子晶体滤波器中的模场分布。



(a) 波长为 1500 nm (b) 波长为 1570 nm

图 3 端口 A 入射光波长不同时滤波器的模场分布
2.2 介质柱折射率对透射谱的影响

图 4 给出了整体介质柱的折射率分别取 3.46、3.56 和 3.66 时, 光子晶体滤波器中 B、C 两端口对应的归一化透射率曲线。由图可知, 随着整体介质柱折射率的单调增大, B、C 两端口透射谱曲线的形状基本保持不变, 但位置随折射率的增大而不断向长波长方向移动, 因而两端口的交换波长也从左向右依次为 1515、1528 和 1541 nm。这一现象表明, 改变整体介质柱的折射率可以有效调节 B、C 两端口高通及低通的滤波范围。另外, 图中曲线还表明, 当改变整体介质柱的折射率时, 交换波长所对应的 B、C 两端口的归一化透射率值均保持在 0.5 左右。

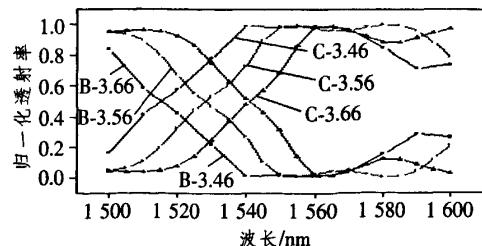


图 4 整体介质柱折射率取不同值时,
B、C 两端口的透射谱曲线

当整体介质柱折射率取为 3.46, 内部介质柱的折射率分别取为 3.46、3.56 和 3.66 时, B、C 两端口的透射率曲线如图 5 所示。随着内柱折射率的单调增大, 透射谱曲线逐渐向长波长方向移动, 交换波长分别为 1530、1535 和 1540 nm。与图 4 相比, 曲

线移动的幅度要小很多,这说明改变内柱的折射率能够实现对交换波长进行更加精细的调节。本模型中B、C两端口的滤波带宽都较宽,适用于高通及低通滤波;然而在密集波分复用系统中这容易造成信道间较大的串扰。

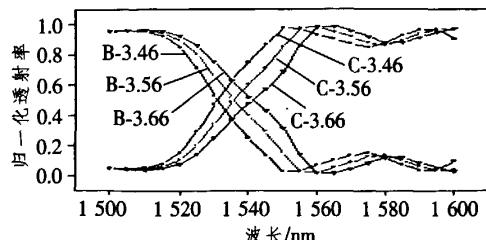


图5 内部介质柱折射率分别为3.46、3.56和3.66时的透射谱曲线

2.3 模型的改进

为了有效提升谐振腔的品质因数,实现滤波器窄带滤波的功能,在直波导与环形谐振腔之间添加

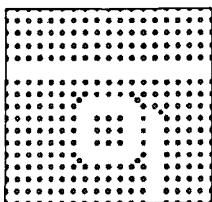


图6 改进后的结构示意图

一行介质柱,如图6所示,以加强波导及谐振腔本身对光波能量的束缚。新结构能够有效地提升环形谐振腔的品质因子,但同时也会减弱直波导与谐振腔之间的耦合作用,进而降低C端口的透射效率。

新模型在整体介质柱折射率发生改变时,B、C两端口的透射谱曲线如图7所示。图中曲线表明:在谐振频率附近B端口的透射率曲线出现了一个陡峭的下降峰,而同一位置C端口出现了一个尖锐的上升脉冲。随着整体介质柱折射率的增大,峰值位置开始向长波长方向移动,同时归一化透射率峰值开始减小。当整体介质柱折射率取为3.46时,改进后的滤波器能在保证Q值的前提下产生较高的滤波效率。

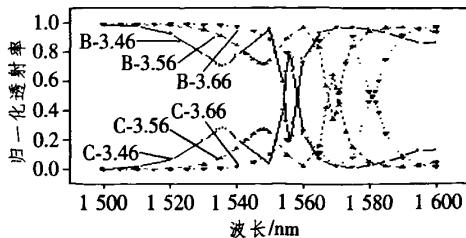


图7 整体介质柱的折射率改变对B、C两端口透射谱的影响

当保证整体介质柱折射率为3.46,而内部介质柱折射率取值变化时,对应的透射率曲线如图8所示。随着内部介质柱的折射率增大,C端口功率归一化峰值也向长波长方向移动,折射率每增加0.1,C端口的中心波长移动近4 nm。图9给出了内部介质柱折射率与C端口下路信号峰中心波长之间的对应关系及其线性拟合结果。当整体介质柱折射率保持不变时,内部介质柱折射率取值与C端口下路信号峰中心波长之间满足近似线性的变化关系;图中曲线斜率表明:内部介质柱折射率每增加0.03,对应C端口透射峰值波长移动1.2 nm。

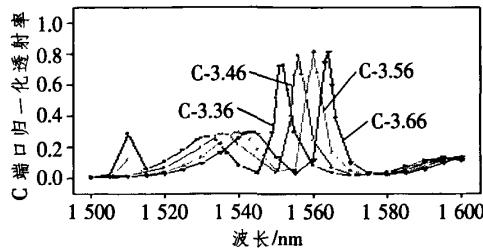


图8 内部介质柱折射率改变对C端口透射谱的影响

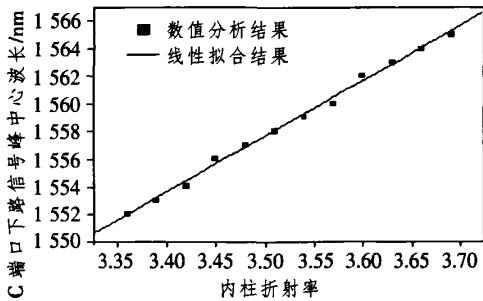


图9 内部介质柱折射率与C端口下路信号峰中心波长的拟合关系

3 结束语

本文采用有限元法数值分析了直波导与环形微腔耦合构成的T型下路滤波器模型,研究了干路波导与下路波导的高通与低通滤波效应以及介质柱折射率对滤波性能的影响。在此基础上提出了一种新型光子晶体窄带滤波器的设计。数值模拟结果显示,通过微调新模型内部介质柱的折射率能够有效地调节C端口下路信号峰中心波长,并通过曲线拟合得知内部介质柱折射率与C端口下路信号峰中心波长之间存在近似线性的依赖关系。本文的结论为密集波分复用系统中集成滤波器的设计提供了有价值的参考。

参考文献：

- [1] Fan S, Villeneuve P R, Joannopoulos J D, et al. Channel Drop Tunneling Through Localized States [J]. Phys Rev Lett, 1998, 80(2): 960-963.
- [2] Hwang K, Song G. Design of a high- Q channel add-drop multiplexer based on the two dimensional photonic-crystal membrane structure [J]. Optics Express, 2005, 13: 2596-2604.
- [3] Yoshihiro Akahane, Takashi Asano, Hitomichi Takanishi, et al. Two-dimensional photonic crystal slab channel drop filter with flat-top response [J]. Optics Express, 2005, 13(7): 2512-2530.
- [4] Qiu M, Jaskorzynska B. Design of a channel drop fil-
- ter in a two-dimensional triangular photonic crystal [J]. Applied Physics Letters, 2003, 83(6): 1074-1076.
- [5] Djavid M, Ghaffari A, Monifi F, et al. T-shaped channel-drop filters using photonic crystal ring resonators [J]. Physica E, 2008, 40(10): 3151-3154.
- [6] Djavid M, Monifi F, Ghaffari A, et al. A Photonic crystal L-shaped bend based on ring resonators [J]. Chinese Optics Letters, 2008, 6(10): 713-714.
- [7] Qiang Zexuan, Zhou Weidong, Soref Richard A. Optical add-drop filters based on photonic crystal ring resonators [J]. Optics Express, 2007, 15(4): 1823-1831.

(上接第 10 页)

根据统计结果,边界分支节点的个数在所有路由器节点个数中所占比例很小时,采用该算法,大部分的节点不需要保存状态信息,这就极大地提高了多播的扩展性。

(2) 区分服务方面:根据文献[5],在区分服务实现的情况下,主要考虑包头开销、路由器的开销和额外的带宽消耗。

$$\text{包头开销} = Cost_{BW}(TE - 1 + TC)OH,$$

$$\text{路由器的开销} = Cost_{state}(NE + NC),$$

额外的带宽消耗 = $Cost_{BW}(TE - 1 + TC)PS$,式中,TE 为参与组播树的边界路由器的数量;TC 为参与组播树的核心路由器的数量;NE 为域内边界路由器的数量;NC 为域内核心路由器的数量。从算法本身来看,实现区分服务采用 MPLS 头部的 EXP 字段,所有包头开销为零。路由器的开销域内核心路由器是无状态的,开销不增加;对于域内边界路由器,只有处于分支点的边界路由器需要维护组播表,表内带有 DSCP 值,增加的开销很少。核心路由器不需要额外的带宽消耗,虽然域内边界路由器需要与信息管理点交互,会产生一定的带宽消耗,但也很少。

5 结束语

本算法可以实现负载均衡,两个边界路由器之间可以采用不同的 LSP 来传输组播数据包;也可以实现组播聚合,有同一下游边界路由器的组播树可

以聚合成使用一个 LSP;还可以实现安全性,利用 MPLS 本身的安全机制实现组播包的安全传输;再者,可以实现带宽均衡,信息管理点也可以收集链路的带宽使用率,当部分链路的带宽占用过高时,边界路由器可以用新的 LSP 传输组播包。

参考文献：

- [1] Yang Baijian, Mohapatra Prasant. Edge router multicasting with MPLS traffic engineering [DB/OL]. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.18.8568>, 2002.
- [2] Striegel A, Bouabdallah A, Bettahar H, et al. A New Approach for Scalable DiffServ Multicasting [DB/OL]. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.2.8301>, 2003.
- [3] Boudani Ali, Cousin Bernard. A new approach to construct multicast trees in MPLS networks [DB/OL]. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.10.6467>, 2002.
- [4] Stoica I, Eugene NTS, Zhang Hui. REUNITE: A recursive unicast approach to multicast [DB/OL]. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.34.6895>, 2000-03.
- [5] Somani Arun, Kamal Ahmed, Jacobson Doug, et al. Scalable approaches for DiffServ multicasting [DB/OL]. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.20.5763.html>, 2002-06.

微波滤波器设计培训——视频课程

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养，是国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地。客户遍布中兴通讯、研通高频、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们推出的微波滤波器设计培训专题，有资深工程师领衔主讲，课程既有微波滤波器设计原理的详细解释，也有各种仿真分析工具的实际设计应用讲解，设计原理和设计仿真实践相结合，向大家呈现各种结构的微波滤波器的完整设计流程。旨在帮助大家透彻地理解并实际的掌握各种微波滤波器的设计。



微波滤波器设计培训专题视频课程

高清视频，专家授课，中文讲解，直观易学；既有微波滤波器设计原理的详细解释，也有像 ADS、CST、HFSS 各种仿真分析工具的实际设计应用讲解，旨在帮助大家透彻地理解并实际的掌握各种微波滤波器的设计。

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/filter/>

更多专业培训课程：

- **HFSS 视频培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/>

- **CST 视频培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/cst/>

- **天线设计专业培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/>

专注于微波、射频、天线设计人才的培养

易迪拓培训

官方网址: <http://www.edatop.com>

淘宝网店: <http://shop36920890.taobao.com>