

# 基于光子晶体 $1 \times 3$ 谐振腔滤波器的研究

吴立恒<sup>1</sup>, 王明红\*

(聊城大学 物理科学与信息工程学院, 山东 聊城 252059)

**摘要:** 考虑到滤波器输入波导中入射电磁波和反射电磁波的相位差, 通过 CMT 理论分析了不同设计情况下的工作性能, 然后优化设计了光子晶体  $1 \times 3$  谐振腔滤波器结构. 用 FDTD 方法研究了滤波器工作特性, 改变  $1 \times 3$  谐振腔下侧调谐柱位置得到滤波器结构的 96 个不同通带峰值波长平均正规化传输率为 89.6%, 相邻峰值波长平均间隔为 1.25 nm、平均传输带宽为 1.19 nm、谐振腔平均品质因数为 1350.2、提取的峰值波长调谐范围在 1534.04 ~ 1653.16 nm. 结果表明: 该滤波器具有正规化传输率高、带宽窄、波长信号提取强度平稳等特性. 其结构在密集型波分解复用 (DWDDM) 系统设计、光信号传感器件设计、密集型光路集成化设计等领域具有潜在的应用价值.

**关键词:** 光子晶体  $1 \times 3$  谐振腔; 相位差; 时域有限差分法; 耦合模理论; 密集型波分解复用; 滤波器

**中图分类号:** TN248.1 **文献标识码:** A

## Study on the filter based on photonic crystal $1 \times 3$ cavity

WU Li-Heng, WANG Ming-Hong\*

(School of Physics Science & Information Engineering, Liaocheng University, Liaocheng 252059, China)

**Abstract:** In consideration of the phase difference between the reflected electromagnetic wave and incident electromagnetic wave in the input waveguide of the filter, operational performances for different design conditions are analyzed by the coupled mode theory (CMT), then the filter structure based on photonic crystal  $1 \times 3$  cavity is optimized. The characteristics of the filter are studied by using the FDTD method. Average peak wavelength normalized transmission of the 96 pass-bands obtained by adjusting locations of the tuning rods below  $1 \times 3$  cavity is up to 89.6%. Average spacing between adjacent peak wavelengths is 1.25 nm. Average band width of the filter and average quality factor of the cavity are 1.19 nm and 1350.2, respectively. Tunable ranges of the dropping peak wavelengths are between 1534.04 nm and 1653.16 nm. The results show that the filter has the characteristics of high normalized transmission, narrow band width, and stable wavelength signal dropping intensity etc. This structure has potential value in the designs of dense wavelength division demultiplexing (DWDDM) system, optical sensing device, and dense optical path integration etc.

**Key words:** photonic crystal  $1 \times 3$  cavity, phase difference, finite-difference time-domain (FDTD) method, coupled mode theory (CMT), coarse wavelength division demultiplexing (CWDDM), filter

**PACS:** 42.79. Sz, 42.79. Gn

## 引言

最近几年, 为满足通信系统容量与效率需要提高的要求, IEEE 802.3 标准定义了以太网两个数据传输率标准 40 和 100 Gb/s. 对于 100 Gb/s 应用基

于双向单模光纤, 四信道中的每一信道运行于 25.781 25 Gb/s, 通过一些接口波分复用并与单模光纤相连接<sup>[1-2]</sup>. 第一代 100 Gb/s 接收发送器在商业上具有了可用性<sup>[3-4]</sup>, 随着带宽需求的迅速增长, 接下来 IEEE 802.3 标准在三年后 400 Gb 以太网研

收稿日期: 2018-03-01, 修回日期: 2018-09-13

Received date: 2018-03-01, revised date: 2018-09-13

基金项目: 国家自然科学基金(11375081)

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China(11375081)

作者简介 (Biography): 吴立恒 (1980-), 男, 临沂平邑县人, 主要从事电磁波理论与技术, 物理教学理论研究. E-mail: wulihengletu@163.com

\* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: wangminghong@lccu.edu.cn

究群体构筑,随后几年数据传输率增长是不可回避的问题.已提出了构建 400 Gb/s 几个设计方案,这些方法都是利用有关传统单模光纤设计并列光信道<sup>[5-6]</sup>, $16 \times 25$ 、 $8 \times 50$  和  $4 \times 100$  Gb/s 体系设计是获取 400 Gb 以太网最可取的设计候选者.光纤通信是电信网络中最受欢迎的一种通信方式,同时它是互联网非常有用的技术.集中于光子晶体高传输率器件设计是世界范围内研发的热题.按照目前 100 Gb 以太网标准,信道间隔选取的值有 200, 400 和 800 GHz,对于 200 GHz 信道间隔<sup>[7]</sup>,相邻两信道空间为 1 nm 左右.密集型波分复用 DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) 系统主要目标是在单模光纤第三通信窗口最大数量的信道传输.由于第三通信窗口提供的带宽不变,为获得更多的信道,信道空间间隔必须非常小,两相邻信道通带间的串扰变得非常重要.为获得低串扰信号,信道带宽必须减小,通带必须尽可能的陡峭,换句话说解复用信道结构品质因数必须足够高.以上所提的特征,设计 1 nm 左右的信道间隔将变得非常重要.在光子晶体中存在禁带频率,电磁波在其中不能传输,在光子晶体中制作缺陷,基于局部缺陷模式可用于设计插分滤波器<sup>[8]</sup>、解复用器<sup>[9]</sup>等器件.在 1 nm 左右或 1 nm 以下信道间隔的信道解复用器有许多技术挑战需要考虑,基于光子晶体光解复用器是取得 1 nm 左右信道间隔解复用设计中的最佳后选者.文中设计了基于  $1 \times 3$  光子晶体谐振腔滤波器结构,其工作输出光学参数表明该结构可用作 1 nm 左右信道间隔的单信道解复用器.

## 1 耦合模理论对光滤波器工作状态分析及其设计上的应用

二维光子晶体中设计的可调谐滤波器结构有两支波导、一谐振腔组成,在设计结构中用  $S_{+1}$ 、 $S_{+2}$  分别描述波导端口 a 和端口 c 的电磁波输入能量,用  $S_{+3}$  描述输入波导端口 a 输入电磁波在向上传输达到 d 输入波导反射介质柱区域被反射回来的电磁波,用  $S_{-1}$ 、 $S_{-2}$  描述对应端口 a 和端口 c 的电磁波输出能量,用描述输入波导端口 a 输入电磁波在向上传输经过 e 光子晶体  $1 \times 3$  谐振腔左侧后继续传输的能量,如图 4 所示.利用时域耦合模理论 CMT (Coupled-Mode Theory)<sup>[10-12]</sup> 对该滤波器中谐振腔与波导之间谐振耦合性能进行了理论分析.瞬时 CMT 理论基于输入及输出的电磁场通量平衡的一瞬时微分方程,设腔内场振幅为  $a(t)$ ,对应的谐振频率为

$\omega(0)$ . 根据 CMT 理论取振幅  $a(t)$  时间导数得:

$$\frac{da(t)}{dt} = j\omega_0 a(t) - \left( \frac{1}{\tau_0} + \frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_2} + \frac{1}{\tau_3} \right) a(t) + K_1 S_{+1} + K_2 S_{+2} + K_3 S_{+3}, \quad (1)$$

其中  $\frac{1}{\tau_1}$ 、 $\frac{1}{\tau_3}$  为谐振腔  $a(t)$  耦合耦合到输入波导入射端和输入波导反射端的模式振幅衰减率,  $\frac{1}{\tau_2}$  为谐振腔  $a(t)$  耦合到输出波导的模式振幅衰减率,  $\frac{1}{\tau_0}$  为 e 光子晶体  $1 \times 3$  谐振腔损耗衰减率,描述由于谐振腔可向周围结构传输功率泄露而造成的能量固有损耗.波导与谐振腔  $a(t)$  的耦合系数  $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$  依赖于其模式振幅衰减率  $\frac{1}{\tau_1}$ 、 $\frac{1}{\tau_2}$ 、 $\frac{1}{\tau_3}$  两者关系为:  $K_1 =$

$$\sqrt{\frac{2}{\tau_1}}, K_2 = \sqrt{\frac{2}{\tau_2}}, K_3 = \sqrt{\frac{2}{\tau_3}}.$$

该结构工作于谐振状态时,当  $S_{+2} = 0$ ,  $\theta$  为反射电磁波与入射电磁波的相位差,按照 CMT 理论得:

$$S_{+3} = S_{-3} e^{j\theta}, \quad (2)$$

$$S_{-1} = S_{+3} - \sqrt{\frac{2}{\tau_3}} a(t). \quad (3)$$

输出端口 c 处正规化传输率:

$$T = \left| \frac{S_{-2}}{S_{+1}} \right|^2 = 4 \left( \frac{\tau_3}{\tau_2} + \frac{\tau_1}{\tau_2} + \frac{2\sqrt{\tau_1\tau_3}\cos\theta}{\tau_2} \right) / \left[ \left( \frac{\sqrt{\tau_1\tau_3}}{\tau_0} + \frac{\sqrt{\tau_1\tau_3}}{\tau_2} + \sqrt{\frac{\tau_3}{\tau_1}} + \sqrt{\frac{\tau_1}{\tau_3}} \right)^2 + 4 \left( \frac{\sqrt{\tau_1\tau_3}}{\tau_0} + \frac{\sqrt{\tau_1\tau_3}}{\tau_2} + \sqrt{\frac{\tau_3}{\tau_1}} + \sqrt{\frac{\tau_1}{\tau_3}} \right) \cos\theta + 4 \right]. \quad (4)$$

输入端口 a 处正规化反射率:

$$R = \left| \frac{S_{-1}}{S_{+1}} \right|^2 = \left[ \left( \frac{\sqrt{\tau_1\tau_3}}{\tau_0} + \frac{\sqrt{\tau_1\tau_3}}{\tau_2} - \sqrt{\frac{\tau_3}{\tau_1}} - \sqrt{\frac{\tau_1}{\tau_3}} \right)^2 - 4 \left( \frac{\sqrt{\tau_1\tau_3}}{\tau_0} + \frac{\sqrt{\tau_1\tau_3}}{\tau_2} - \sqrt{\frac{\tau_3}{\tau_1}} - \sqrt{\frac{\tau_1}{\tau_3}} \right) \cos\theta + 4 \right] / \left[ \left( \frac{\sqrt{\tau_1\tau_3}}{\tau_0} + \frac{\sqrt{\tau_1\tau_3}}{\tau_2} + \sqrt{\frac{\tau_3}{\tau_1}} + \sqrt{\frac{\tau_1}{\tau_3}} \right)^2 + 4 \left( \frac{\sqrt{\tau_1\tau_3}}{\tau_0} + \frac{\sqrt{\tau_1\tau_3}}{\tau_2} + \sqrt{\frac{\tau_3}{\tau_1}} + \sqrt{\frac{\tau_1}{\tau_3}} \right) \cos\theta + 4 \right]. \quad (5)$$

谐振腔正规化损耗率:

$$L = 1 - T - R, \quad (6)$$

当  $\tau_1 = \tau_3$  时,

$$T = \frac{8 \frac{\tau_1}{\tau_2} (1 + \cos\theta)}{\left( \frac{\tau_1}{\tau_0} + \frac{\tau_1}{\tau_2} + 2 \right)^2 + 4 \left( \frac{\tau_1}{\tau_0} + \frac{\tau_1}{\tau_2} + 2 \right) \cos\theta + 4}, \quad (7)$$

$$R = \frac{\left(\frac{\tau_1}{\tau_0} + \frac{\tau_1}{\tau_2} - 2\right)^2 - 4\left(\frac{\tau_1}{\tau_0} + \frac{\tau_1}{\tau_2} - 2\right)\cos\theta + 4}{\left(\frac{\tau_1}{\tau_0} + \frac{\tau_1}{\tau_2} + 2\right)^2 + 4\left(\frac{\tau_1}{\tau_0} + \frac{\tau_1}{\tau_2} + 2\right)\cos\theta + 4}, \quad (8)$$

$$L = \frac{8\frac{\tau_1}{\tau_0}(1 + \cos\theta)}{\left(\frac{\tau_1}{\tau_0} + \frac{\tau_1}{\tau_2} + 2\right)^2 + 4\left(\frac{\tau_1}{\tau_0} + \frac{\tau_1}{\tau_2} + 2\right)\cos\theta + 4}. \quad (9)$$

根据式(7-9)图 1-3 依次给出了结构输出端口 c 正规化传输率  $T$ 、输入端口 a 处正规化反射率  $R$ 、谐振腔正规化损耗率  $L$  对应不同的结构工作参数随  $\theta$  周期性变化的特征曲线,其纵坐标取值范围在 0 ~ 1,横坐标取值范围在 0-4 $\pi$ . 图 1-3 各个分图(a-d)下方列出了对应的结构工作参数  $\tau_1/\tau_0$  比值,各个分图(a-d)右侧用不同颜色画线对应标出了结构工作参数  $\tau_1/\tau_2$  比值.

由图 1 得在滤波器中使用理想谐振腔满足  $\tau_1/\tau_0 = 0, \tau_1/\tau_2 = 4, \theta = 0, 2\pi, 4\pi$  时,  $T = 100\%$ , 结构实现输入信号能量 100% 提取强耦合传输条件;随  $\tau_1/\tau_0$  增大,在  $\theta = 0, 2\pi, 4\pi$  时,输出端口最大传输率在降低. 若  $\theta = \pi, 3\pi$  时,  $T = 0$ .

由图 2 得  $\theta = 0, 2\pi, 4\pi$  时输入端口反射率  $R$  取最小值,当滤波器结构设计满足  $\tau_1/\tau_0 + \tau_1/\tau_2 = 4$ , 由公式(8)得  $R = 0$ . 若  $\tau_1/\tau_0 \rightarrow \infty$ , 或  $\tau_1/\tau_2 \rightarrow \infty$ , 或同时  $\tau_1/\tau_0$  和  $\tau_1/\tau_2 \rightarrow 0$  时,  $R \rightarrow 100\%$ , 或取  $\theta = \pi, 3\pi$  时,  $R = 100\%$ , 结构实现了输入信号能量 100% 的强反射条件.

由图 3 得  $\theta = 0, 2\pi, 4\pi, \tau_1/\tau_2 = 0, \tau_1/\tau_0 = 4$  时,  $L = 100\%$ , 现了谐振腔对输入信号能量 100% 辐射损耗的强辐射条件;随  $\tau_1/\tau_2$  增大谐振腔最大损耗率在降低. 减小谐振腔损耗的设计方法有,增大  $\tau_1/\tau_2$  比值同时远离  $\tau_1/\tau_0 = 4$ , 或满足  $\theta = \pi, 3\pi$  时使得  $L = 0$ .

借助于 CMT 理论分析了基于光子晶体谐振腔的滤波器在不同设计结构状况下的工作性能,给出了结构输入信号能量 100% 提取强耦合传输条件、输入信号能量 100% 谐振腔损耗强辐射条件、及其输入信号能量 100% 反射的强反射条件,及相位差因子对  $\theta$  对其工作时正规化传输率、正规化反射率、谐振腔正规化损耗的周期性影响. CMT 理论为设计优异性能的滤波器结构提供了指导思想,当满足波

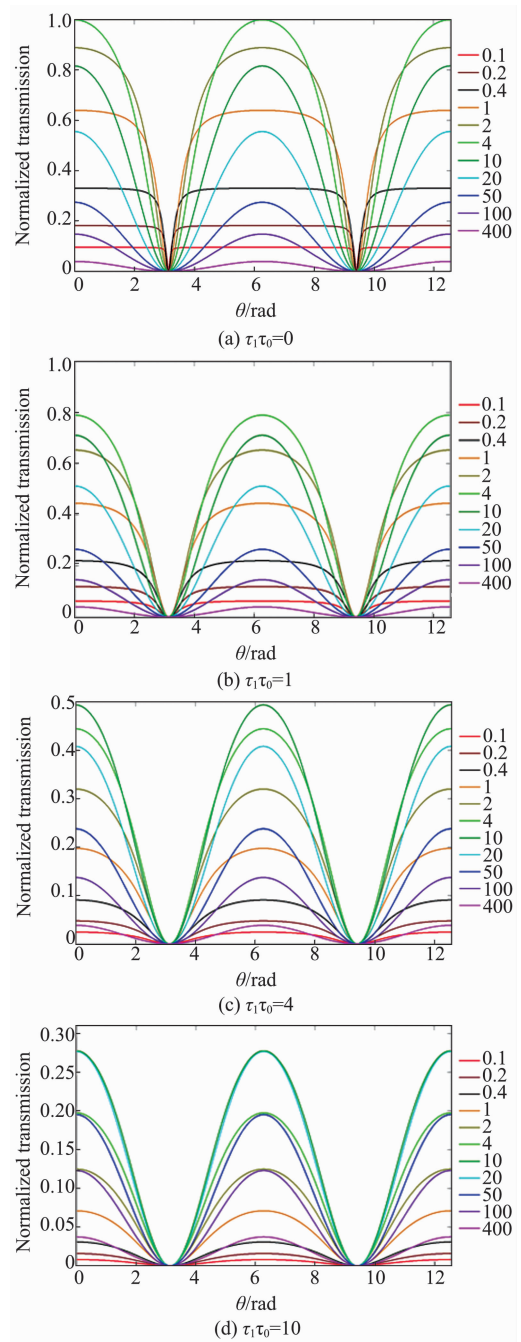


图 1 不同  $\tau_1/\tau_0$  和  $\tau_1/\tau_2$  结构参数比值状况下滤波器正规化传输率随相位差的变化

Fig. 1 Normalized transmission of the filter as a function of phase difference for different structural parameter ratios of  $\tau_1/\tau_0$  and  $\tau_1/\tau_2$

导与腔谐振模式的强耦合传输条件:  $\theta = 2n\pi$  ( $n$  为不小于 0 的整数),  $\tau_1/\tau_2 = 4, \tau_1/\tau_0 \rightarrow \infty$  时, 输入端口反射率和谐振腔损耗率都得到抑制, 可实现输入信号从输出端口无损耗的传输, CMT 理论为这个概念能提供定性描述.

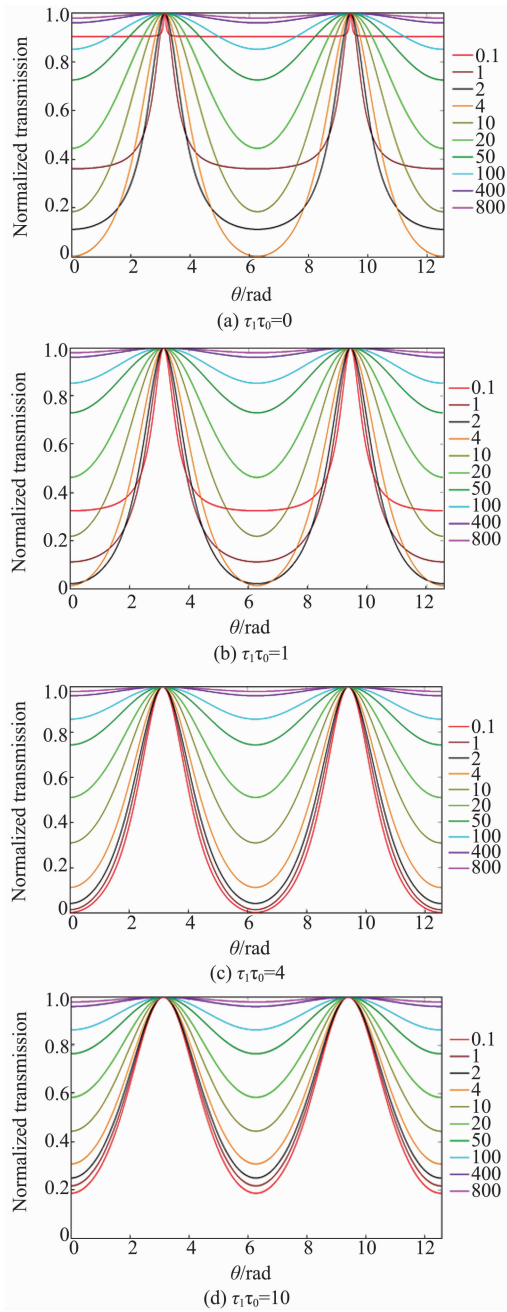


图2 不同  $\tau_1/\tau_0$  和  $\tau_1/\tau_2$  结构参数比值状况下滤波器正规化反射率随相位差的变化  
 Fig. 2 Normalized reflection of the filter as a function of phase difference for different structural parameter ratios of  $\tau_1/\tau_0$  and  $\tau_1/\tau_2$

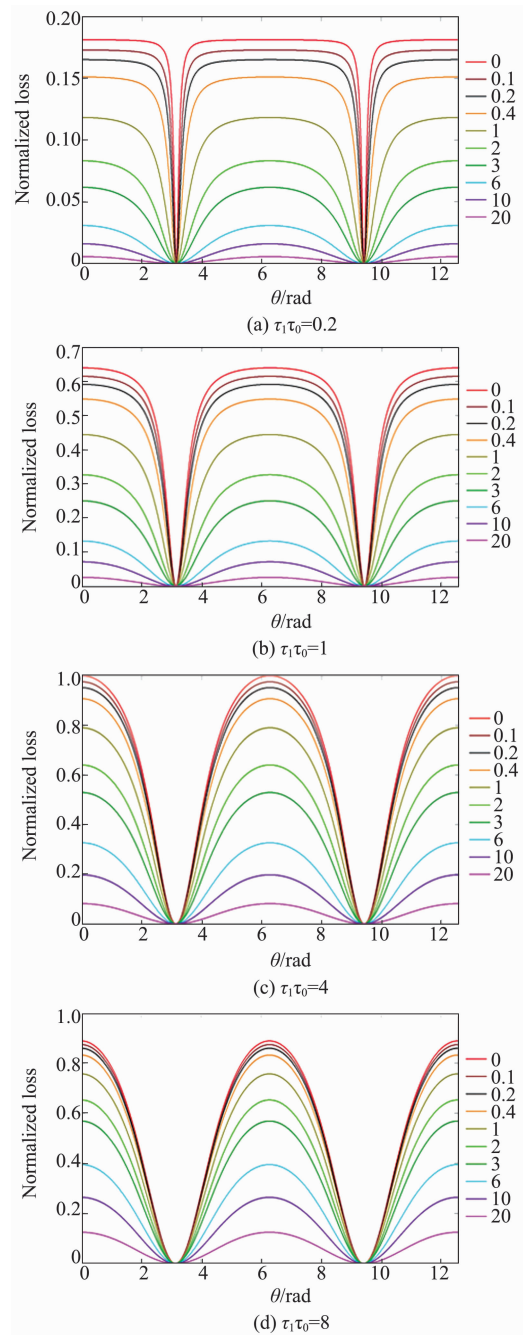


图3 不同  $\tau_1/\tau_0$  和  $\tau_1/\tau_2$  结构参数比值状况下谐振腔正规化损耗率随相位差的变化  
 Fig. 3 Normalized cavity loss as a function of phase difference for different structural parameter ratios of  $\tau_1/\tau_0$  and  $\tau_1/\tau_2$

## 2 基于光子晶体 1 × 3 谐振腔滤波器

在晶格常数为  $a = 580 \text{ nm}$ ,  $20 \times 23$  正方格介质柱光子晶体中柱半径和其相对介电常数分别为  $0.2a$  和 12, 图中绿色区域代表空气, 紫色区域代表介质柱, 在其中连续去除 3 支介质柱形成  $1 \times 3$  谐振腔, 在其左右两侧竖直方向和水平方向各放置一光

子晶体波导设计了图 4 所示基于  $1 \times 3$  谐振腔的光滤波器, 调节谐振腔 e 下侧的  $1 \times 3$  调谐介质柱(图中已用蓝色圆斑已标出), 在竖直方向改变  $1 \times 3$  调谐介质柱位置以调节谐振腔实现带通模式选择, 与其正下方相邻圆柱轴心距离为  $d$ . 设计的滤波器结构中全体介质柱半径与介电常数完全相同. 为改善了



该谐振腔与光子晶体波导组成的滤波器波长选择性,调节谐振腔左右两侧耦合介质柱与波导之间的耦合结构,首先垂直方向输入波导与谐振腔之间增大距离用两列介质柱耦合,再次输入波导与谐振腔的耦合长度适当增加以提高滤波器波长信号传输率,并适当设置  $d$  输入波导介质柱反射区域,调节反射电磁波与输入电磁波相位差  $\theta$ ,使得结构尽可能满足强耦合传输条件以进一步提高传输率. 图中在输入端口  $a$  处设置了波导源发射电磁波,  $a$  处和  $c$  处设置了电磁波接收器,并在结构周围设置了吸收边界完全匹配层<sup>[13]</sup>,将传入的电磁波吸收掉. 每个正方格原胞分成  $40 \times 40$  等分,在数值计算满足 Courant 稳定性条件<sup>[14]</sup>情况下,用 FDTD 法<sup>[15]</sup>研究了滤波器 TM 波的波长提取特性. 该结构工作的正规化功率传输谱如图 5-8 所示,图中横坐标表示波长(1 480 ~ 1 700 nm),纵坐标表示正规化传输率(0-1),即输出端口  $b$  传输电磁波功率与输入端口  $a$  输入电磁波功率的比值.

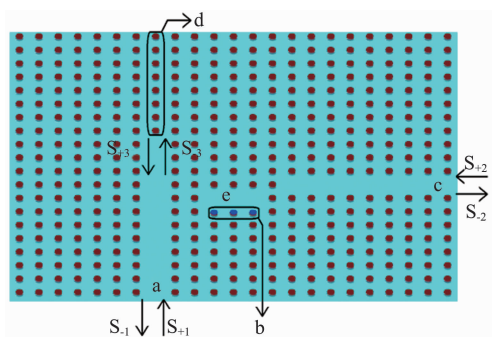


图 4 基于光子晶体  $1 \times 3$  谐振腔的光滤波器结构(a 输入端口 b 谐振腔下侧  $1 \times 3$  调谐柱 c 输出端口 d 输入波导末端反射区域 e 光子晶体  $1 \times 3$  谐振腔)  
Fig. 4 Optical filter structure based on photonic crystal  $1 \times 3$  cavity

### 3 基于光子晶体 $1 \times 3$ 谐振腔滤波器的工作特性

可调谐滤波器在光通信领域波段扩展应用上是一类重要元件,可调谐波长依赖于谐振腔结构设计,机械调谐等. 对于大容量信息网络互联通信, WDM 解复用是一种有效解决问题的方法. 基于光子晶体谐振腔的光滤波器是 WDM 解复用中的一类关键器件,滤波器的设计直接关系到 WDM 解复用系统的整体性能. 通过改变  $1 \times 3$  谐振腔下侧带通选择  $1 \times 3$  调谐介质柱位置,得到图 5 所示滤波器输出波长正规化功率传输谱,图中左右两侧用带有标号

1-24 不同颜色的点画线和实画线区分 24 个不同峰值波长的传输谱曲线,这 24 条曲线所对应结构中  $1 \times 3$  调谐介质柱 24 个不同位置,调谐介质柱中心位置到相邻正下方介质柱中心的距离  $d$  在表格 1 中标号 1-24 已列出对应距离  $d$  的大小,及滤波器工作对应的重要光学参数峰值波长  $\lambda$ 、及其正规化传输率  $T$ 、通带带宽  $\Delta\lambda$ 、谐振腔品质因数.

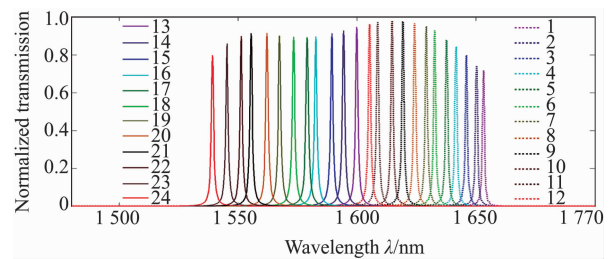


图 5 改变谐振腔下侧  $1 \times 3$  调谐柱位置得到滤波器结构的正规化功率传输谱

Fig. 5 Normalized power transmission spectra of the filter at varying locations of the  $1 \times 3$  tuning rods

表 1 改变  $1 \times 3$  调谐柱位置得到滤波器的输出光学参数  
Table 1 Output optical parameters of the filter at varying locations of the  $1 \times 3$  tuning rods

Channel (1-24)	$\lambda$ /nm	$d$ /nm	$T$	$\Delta\lambda$ /nm	$Q$
1	1 653.16	348.0	71.7%	1.04	1 589.6
2	1 650.18	359.6	74.4%	1.07	1 542.2
3	1 646.96	371.2	80.0%	1.10	1 497.2
4	1 641.61	382.8	84.5%	1.12	1 465.7
5	1 637.60	394.4	88.1%	1.14	1 436.5
6	1 632.68	406.0	92.9%	1.15	1 419.7
7	1 629.16	417.6	95.2%	1.15	1 416.7
8	1 624.29	429.2	96.7%	1.17	1 388.3
9	1 619.30	440.8	97.7%	1.18	1 372.3
10	1 614.79	452.4	98.2%	1.18	1 368.5
11	1 608.67	464.0	97.3%	1.19	1 351.8
12	1 605.25	475.6	96.2%	1.20	1 337.7
13	1 599.79	487.2	94.7%	1.22	1 311.3
14	1 594.36	498.8	92.9%	1.25	1 275.5
15	1 589.41	510.4	91.4%	1.27	1 251.5
16	1 582.62	522.0	89.6%	1.30	1 217.4
17	1 579.02	533.6	89.2%	1.31	1 205.4
18	1 573.31	545.2	89.5%	1.30	1 210.2
19	1 567.36	556.8	90.2%	1.27	1 234.1
20	1 562.15	568.4	91.6%	1.23	1 270.0
21	1 555.44	580.0	91.5%	1.18	1 318.2
22	1 551.28	591.6	89.9%	1.16	1 337.3
23	1 545.35	603.2	86.0%	1.14	1 355.6
24	1 539.20	614.8	79.8%	1.13	1 362.1

进一步调节  $1 \times 3$  调谐介质柱位置,得到了图 6-8 所示滤波器输出波长正规化功率传输谱,同样图中用带有顺序号不同颜色点画线、实画线对应滤波器设计结构的输出谱特性曲线,其结构输出谱重要参数依次分别列于表格 2 ~ 表格 4,并在表格中列出了结构设计对应距离  $d$  的大小和顺序号.

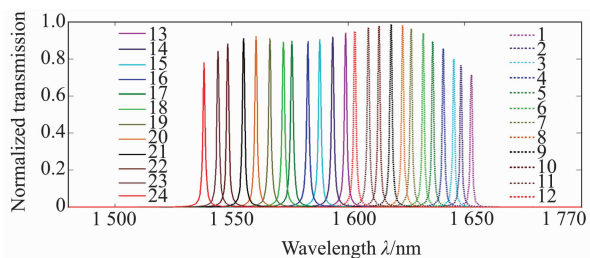


图 6 改变谐振腔下侧  $1 \times 3$  调谐柱位置得到滤波器结构的正规化功率传输谱

Fig. 6 Normalized power transmission spectra of the filter at varying locations of the  $1 \times 3$  tuning rods below the cavity

表 2 改变  $1 \times 3$  调谐柱位置得到滤波器的输出光学参数  
Table 2 Output optical parameters of the filter at varying locations of the  $1 \times 3$  tuning rods

Channel (1-24)	$\lambda$ /nm	$d$ /nm	$T$	$\Delta\lambda$ /nm	$Q$
1	1 652.84	350.9	71.5%	1.06	1 559.3
2	1 648.30	362.5	76.4 %	1.09	1 512.2
3	1 645.34	374.1	79.9%	1.11	1 482.3
4	1 640.84	385.7	85.4%	1.13	1 452.1
5	1 636.20	397.3	89.5%	1.14	1 435.3
6	1 632.21	408.9	93.9%	1.14	1 431.8
7	1 627.03	420.5	96.3%	1.15	1 414.8
8	1 623.38	432.1	98.0%	1.16	1 399.5
9	1 618.39	443.7	98.9%	1.16	1 395.2
10	1 613.29	455.3	97.9%	1.18	1 367.2
11	1 608.67	466.9	97.0%	1.20	1 340.6
12	1 602.74	478.5	95.0%	1.22	1 313.7
13	1 598.91	490.1	94.1%	1.23	1 300.0
14	1 593.34	501.7	92.0%	1.26	1 264.6
15	1 587.82	513.3	90.7%	1.28	1 240.5
16	1 582.76	524.9	89.5%	1.30	1 217.5
17	1 575.88	536.5	89.7%	1.31	1 203.0
18	1 572.17	548.1	89.3%	1.30	1 209.4
19	1 566.37	559.7	91.1%	1.26	1 243.2
20	1 560.46	571.3	92.4%	1.21	1 289.6
21	1 555.16	582.9	91.2%	1.18	1 317.9
22	1 548.38	594.5	88.2%	1.15	1 346.4
23	1 544.26	606.1	84.3%	1.15	1 342.8
24	1 538.25	617.7	78.1%	1.15	1 337.6

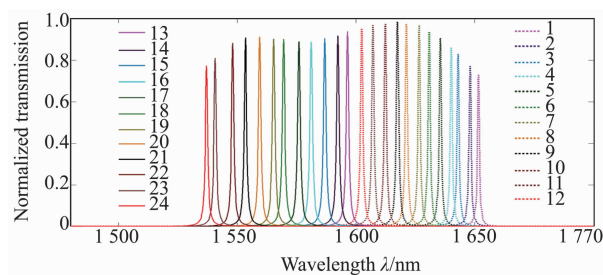


图 7 改变谐振腔下侧  $1 \times 3$  调谐柱位置得到滤波器结构的正规化功率传输谱

Fig. 7 Normalized power transmission spectra of the filter at varying locations of the  $1 \times 3$  tuning rods below the cavity

表 3 改变  $1 \times 3$  调谐柱位置得到滤波器的输出光学参数  
Table 3 Output optical parameters of the filter at varying locations of the  $1 \times 3$  tuning rods

Channel (1-24)	$\lambda$ /nm	$d$ /nm	$T$	$\Delta\lambda$ /nm	$Q$
1	1 651.59	353.8	73.0%	1.06	1 558.1
2	1 647.99	365.4	77.2%	1.09	1 511.9
3	1 643.01	377.0	82.9%	1.11	1 480.2
4	1 640.07	388.6	86.2%	1.13	1 451.4
5	1 635.44	400.2	90.8%	1.14	1 434.6
6	1 630.69	411.8	93.8%	1.15	1 418.0
7	1 626.57	423.4	97.1%	1.15	1 414.4
8	1 621.11	435.0	97.6%	1.17	1 385.6
9	1 617.49	446.6	98.6%	1.16	1 394.4
10	1 612.40	458.2	97.4%	1.19	1 355.0
11	1 607.03	469.8	96.8%	1.20	1 339.2
12	1 602.30	481.4	95.3%	1.21	1 324.2
13	1 596.41	493.0	93.9%	1.24	1 287.4
14	1 592.32	504.6	91.8%	1.26	1 263.7
15	1 586.80	516.2	90.5%	1.29	1 230.1
16	1 581.03	527.8	88.7%	1.31	1 206.9
17	1 576.02	539.4	89.1%	1.31	1 203.1
18	1 569.48	551.0	90.2%	1.29	1 216.7
19	1 565.38	562.6	90.2%	1.26	1 242.4
20	1 559.48	574.2	91.4%	1.22	1 278.3
21	1 553.50	585.8	91.0%	1.17	1327.8
22	1 548.11	597.4	88.3%	1.14	1 358.0
23	1 540.70	609.0	81.1%	1.14	1 351.5
24	1 537.02	620.6	77.3%	1.14	1 348.3

由表 1-4 列出数据得该滤波器结构通过调节带通选择  $1 \times 3$  调谐介质柱位置,使其与正下方相邻圆柱轴心距离  $d$  范围在 348.0 ~ 623.5 nm,在结构设计参数上得到滤波器输出波长  $\lambda$  可调谐范围在 1 534.04 ~ 1 653.16 nm,96 个通带峰值波长正规化传输率范围在 71.4% ~ 98.9%,传输带宽  $\Delta\lambda$  范围在 1.04 ~ 1.31 nm,谐振腔品质因数  $Q$  范围在 1 201.8 ~ 1 589.6,相邻峰值波长平均间隔为 1.25 nm、谐振腔平均品质因数为 1350.2、平均正规化传输率为

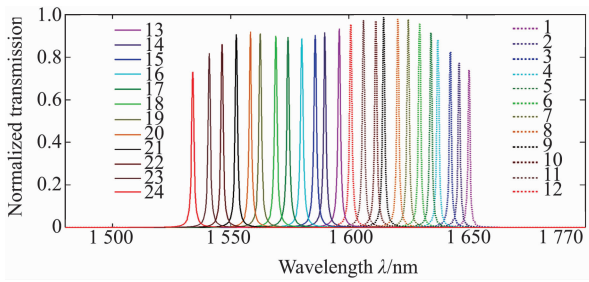


图 8 改变谐振腔下侧 1 × 3 调谐柱位置得到滤波器结构的正规化功率传输谱

Fig. 8 Normalized power transmission spectra of the filter at varying locations of the 1 × 3 tuning rods below the cavity

表 4 改变 1 × 3 调谐柱位置得到滤波器的输出光学参数  
Table 4 Output optical parameters of the filter at varying locations of the 1 × 3 tuning rods

Channel (1-24)	$\lambda/nm$	$d/nm$	$T_D$	$\Delta\lambda/nm$	$Q$
1	1 650.80	356.7	74.0%	1.07	1 542.8
2	1 646.74	368.3	77.3%	1.13	1 457.3
3	1 643.01	379.9	82.5%	1.12	1 467.0
4	1 637.75	391.5	88.3%	1.14	1 436.6
5	1 634.67	403.1	91.5%	1.14	1 433.9
6	1 629.92	414.7	95.7%	1.14	1 429.8
7	1 625.05	426.3	97.8%	1.15	1 413.1
8	1 620.66	437.9	97.9%	1.17	1 385.2
9	1 614.79	449.5	98.6%	1.17	1 380.2
10	1 611.36	461.1	97.1%	1.19	1 354.1
11	1 606.14	472.7	97.2%	1.19	1 349.7
12	1 600.82	484.3	95.2%	1.22	1 312.1
13	1 595.97	495.9	93.3%	1.24	1 287.1
14	1 589.85	507.5	91.6%	1.27	1 251.9
15	1 585.79	519.1	90.3%	1.29	1 229.3
16	1 580.17	530.7	88.8%	1.31	1 206.2
17	1 574.31	542.3	89.4%	1.31	1 201.8
18	1 569.05	553.9	90.0%	1.28	1 225.8
19	1 562.57	565.5	91.1%	1.24	1 260.1
20	1 558.37	577.1	92.0%	1.20	1 298.6
21	1 552.39	588.7	90.6%	1.16	1 338.3
22	1 546.32	600.3	86.0%	1.15	1 344.6
23	1 540.97	611.9	81.8%	1.14	1 351.7
24	1 534.04	623.5	73.0%	1.15	1 333.9

89.6%、平均传输带宽 1.19 nm,表明该滤波器可用于 DWDM 系统设计. 由输出谱特性曲线得:在 1 480 ~ 1 700 nm 波长段滤波器具有优异的单通带选择输出特性,能有效滤除噪声信号,可用作 1 nm 左右信道间隔的单信道解复用器设计.

在图 4 所示基于光子晶体 1 × 3 谐振腔的滤波器结构中当谐振腔 e 下侧调谐介质柱中心位置到相邻正下方介质柱中心的距离  $d = 487.2$  nm 时,有图 9 给出了该滤波器结构工作于 1 599.79 nm 波长时稳态光场图形分布,波导源发射的电磁波

沿着竖直方向波导上传播通过谐振腔结构后有输出波导把耦合提取的波长信号沿水平向右方向输出.

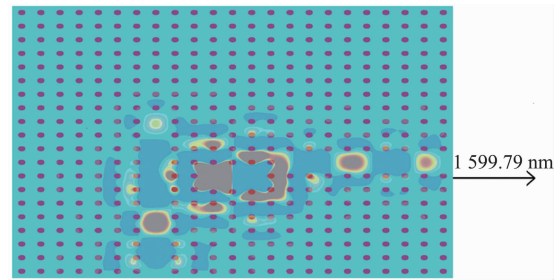


图 9 光子晶体滤波器结构工作于 1 599.79 nm 波长时稳态场分布

Fig. 9 Steady-state field distributions of the photonic crystal filter structure operating at the wavelength of 1 599.79 nm

为估算工作于 1 599.79 nm 波长时滤波器损耗及端口反射,可由式(7)得:

$$T\left(\frac{\tau_1}{\tau_2}\right)^2 + \left(2\left(\frac{\tau_1}{\tau_0} + 2\right)T + 4T\cos\theta - 8 - 8\cos\theta\right)\frac{\tau_1}{\tau_2} + 4T + 4\left(\frac{\tau_1}{\tau_0} + 2\right)T\cos\theta + \left(\frac{\tau_1}{\tau_0} + 2\right)^2 T = 0 \quad (10)$$

并利用条件  $\theta \rightarrow 2n\pi$ , ( $n$  为不小于 0 的整数),  $\cos\theta \rightarrow 1$ ,  $\frac{\tau_1}{\tau_0} \rightarrow 0$ ,则由公式(9)得  $L \rightarrow 0$ ,将该条件带入

上式可做近似估算,式(10)变为:  $T\left(\frac{\tau_1}{\tau_2}\right)^2 + (8T - 16)\frac{\tau_1}{\tau_2} + 16T = 0$ ,由结构工作于 1 599.79 nm 波长

的正规化传输率为  $T = 94.7\%$ ,求得  $\frac{\tau_1}{\tau_2} =$

2.502 957 或 6.392 503,把  $\frac{\tau_1}{\tau_2} = 2.502 957$  代入式

(8)估算输入端口正规化反射率  $R = 5.299 645\%$ ,则此时谐振腔正规化损耗率  $L = 1 - T - R = 0.000 355\%$ ,谐振腔损耗功率估算为输入的百万分之 3.55;把  $\frac{\tau_1}{\tau_2} = 6.392 503$  代入式(8)得输入端

口正规化反射率  $R = 5.299 863\%$ ,则对应的谐振腔正规化损耗率  $L = 0.000 137\%$ ,谐振腔损耗功率估算为输入的百万分之 1.37,估算的谐振腔损耗率与  $L \rightarrow 0$  的结论近似一致.该光子晶体结构如果应用

需考虑到输入耦合波导输入问题,可以将光直接照射到波导接口层,此处会产生接口损耗,为获得更高的信号传输强度,需要使光准直射入输入端口以减

低损耗. 该光子晶体结构如果应用需考虑到输入耦合波导输入问题,可以将光直接照射到波导接口层,此处会产生接口损耗,为获得更高的信号传输强度,需要使光准直射入输入端口以减

小输入耦合波导输入损耗,光进入耦合波导后,经谐振腔结构将输入的波长信号提取,最后有输出波导传输到信号接收端.文中利用的 $1 \times 3$ 谐振腔结构较光子晶体环型谐振器、光子晶体H型谐振器、光子晶体中心长方形介质柱谐振腔、光子晶体T型结构谐振腔设计尺寸更小有利于器件集成化设计.若通过改变结构的相对介电常数、或进一步调节结构设计,该滤波器可传输更多不同峰值波长信号,用于国际电信联盟—电信标准局推荐WDM系统1260~1675 nm波段的波长信号的解复用设计.

#### 4 结论

考虑到输入波导中反射电磁波与输入电磁波的相位差 $\theta$ ,用CMT理论定性分析了基于光子晶体 $1 \times 3$ 谐振腔滤波器结构设计不同状况下相位差对其正规化传输率、正规化反射率、谐振腔正规化损耗率进行周期性调节的作用,给出了滤波器结构强耦合传输条件:在理想谐振腔结构设计中满足, $\tau_1/\tau_2 = 4$ , $\theta = 2n\pi$ 时( $n$ 为不小于0的整数),输入信号能量由输出端100%传输;结构强反射条件:在结构设计中当 $\tau_1/\tau_0 \rightarrow \infty$ ,或 $\tau_1/\tau_2 \rightarrow \infty$ ,或同时 $\tau_1/\tau_0$ 与 $\tau_1/\tau_2 \rightarrow 0$ 时, $R \rightarrow 100\%$ ,或取 $\theta = (2n+1)\pi$ 时,输入端口对输入信号能量100%反射;谐振腔强辐射条件:在结构设计中当 $\tau_1/\tau_2 = 0$ , $\tau_1/\tau_0 = 4$ , $\theta = 2n\pi$ 时,谐振腔对输入信号能量100%辐射损耗.综合分析优化设计了滤波器结构,用FDTD方法研究了其传输谱特性,在设计的参数范围中,得到了96个不同传输通带峰值波长的平均正规化传输率为89.6%、平均通带带宽为1.19 nm、相邻峰值波长平均间隔为1.2 nm、谐振腔平均品质因数为1350.2、输出峰值波长范围在1534.04~1653.16 nm、正规化传输率范围在71.4%~98.9%、通带带宽范围在1.04~1.31 nm.表明:该滤波器具有正规化传输率高、带宽窄、信号传输强度较平稳、峰值波长调谐范围宽等特性.该结构可应用于DWDM系统设计、密集型光路集成化设计、光传感器设计等领域.

#### References

[1] Kanazawa S, Fujisawa T, Nunoya N, et al. Ultra-compact

- 100 GbE transmitter optical subassembly for 40-km SMF transmission [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, **31**(4):602-608.
- [2] Ohyama T, Ohki A, Takahata K, et al. Transmitter optical subassembly using a polarization beam combiner for 100 Gbit/s ethernet over 40-km transmission [J]. *Lightwave Technol*, 2015, **33**(10):1985-1992.
- [3] Fujisawa T, Kanazawa S, Ishii H, et al. 1.3- $\mu\text{m}$  4  $\times$  25-Gb/s monolithically integrated light source for metro area 100-Gb/s Ethernet [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, **23**(6):356-358.
- [4] Yoshimatsu T, Nada M, Oguma M, et al. Compact and high-sensitivity 100-Gb/s (4  $\times$  25 Gb/s) APD-ROSA with a LAN-WDM PLC demultiplexer [J]. *Opt. Express*, 2012, **20**(26):393-398.
- [5] Gutierrez-Castrejon R, Torres-Ferrera P. Design and technical feasibility of next 400 GbE 40-km PMD based on 16  $\times$  25 Gbps architecture [J]. *Lightwave Technol*, 2013, **31**(14):2386-2393.
- [6] Turkiewicz J, Dewaardt H. Low complexity up to 400-Gb/s transmission in the 1310-nm wave-length domain [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, **24**(11):942-944.
- [7] Torres-Ferrera P, Gutiérrez-Castrejon R. Impact of channel-spacing on next 400 Gb/s Ethernet 40-km PMD based on 16  $\times$  25 Gb/s WDM architecture [J]. *Optical Fiber Technology*, 2014, **20**(3):177-183.
- [8] Robinson S, Nakkeeran R. PCRR based add drop filter for ITU-T G. 694. 2 CWDM systems [J]. *Optik- International Journal for Light and Electron Optics*, 2013, **124**(5):393-398.
- [9] Mehdizadeh F, Soroosh M. A new proposal for eight-channel optical demultiplexer based on photonic crystal resonant cavities [J]. *Photonic Network Communications*, 2016, **31**(1):65-70.
- [10] Ghaffari A, Djavid M, Monifi F, et al. Photonic crystal power splitter and wavelength multi/demultiplexer based on directional coupling [J]. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 2008, **10**(7):75203-75209.
- [11] Ghaffari A, Monifi F, Djavid M, et al. Photonic crystal bends and power splitters based on ring resonators [J]. *Optics Communications*, 2008, **281**(23):5929-5934.
- [12] Ghaffari A, Monifi F, Djavid M, et al. Analysis of photonic crystal power splitters with different configurations [J]. *Journal of Applied Sciences*, 2008, **8**(8):1416-1425.
- [13] Berenger J P. A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves [J]. *Comput. Phys.* 1994, **114**(2):185-200.
- [14] Goldberg M. Stability criteria for finite difference approximations to parabolic systems [J]. *Applied Numerical Mathematics*, 2000, **33**(1-4):509-515.
- [15] Zhu Z, Brown T G. Full-vectorial finite-difference analysis of microstructured optical fibers [J]. *Opt. Express*, 2002, **10**(17):853-864.