

基于微谐振器的光子晶体滤波器工作特性

吴立恒, 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 为设计性能优异的大调谐带宽的滤波器,在二维光子晶体结构中,利用波导与微型谐振器不同耦合结构设计了带有两类微型谐振腔的4种滤波器,借助于耦合模理论(CMT)定性分析了相位失谐因子、耦合因子比值改变对滤波器工作性能产生的影响。调节 5×5 微型谐振器的柱半径大小,用时域有限差分法(FDTD)方法研究了滤波器传输谱特性,结果表明:3种对称结构提取的各个峰值波长具有归一化传输率高(85.3%~99.9%)、通带宽度窄(1.8~5.6 nm)、提取峰值波长调谐范围宽(1308.0~1582.3 nm)的特性。与非对称结构滤波器相比较,对称结构滤波器的提取峰值波长具有更高的归一化传输率,其结构在光学信号提取接口、光传感、光互连网络设计上有潜在的利用价值。

关键词 集成光学; 微型谐振器; 光子晶体滤波器; 时域有限差分法; 耦合模理论; 相位失谐因子

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.021301

Operating Characteristics of Photonic Crystal Filters Based on Micro Resonators

Wu Liheng, Wang Minghong

School of Physical Science & Information Engineering, Liaocheng University, Liaocheng, Shandong 252059, China

Abstract In order to design a wideband bandwidth-tunable filter, we design four kinds of filters with two types of micro cavities through different coupling structures between the waveguide and the micro resonator in the two-dimensional photonic crystal structure. By means of the coupled mode theory (CMT), we qualitatively analyze the influences of phase detuning factor and ratio of coupling quality factors on the fiber performances. We use finite-difference time-domain (FDTD) method to study the transmission spectra of the filter by adjusting rod radii of the 5×5 micro resonators. The simulated results show that the three symmetrical filters have high normalized transmission (85.3%~99.9%), narrow bandwidth (1.8-5.6 nm), and broad tunable range for extracting peak wavelength (1308.0-1582.3 nm) at each peak wavelength. Compared with the asymmetrical filter, symmetrical filters have higher normalized transmission at peak wavelength. The symmetrical structures have potential value in the designs of optical signal extraction interfaces, optical sensing, and optical interconnection networks.

Key words integrated optics; micro resonator; photonic crystal filter; finite-different time-domain method; coupled mode theory; phase detuning factor

OCIS codes 130.3990; 130.6010; 130.7408; 130.3120

1 引言

光通信网络和光学系统的高速、超带宽连接是满足人类传送和接收世界各个角落信息需求的最佳办法,其光信号可通过光纤、光子晶体光波导等传

送,再利用光子晶体光纤传感器、滤波器等将传送信号提取^[1-3]。在设计微型光信号提取器件方面,关键在于解决光在小空间范围的局域传输问题,光子晶体优异的光子带隙(PBG)特性为这一问题的解决提供了可行性^[4]。光滤波器在通信网络中是一种重要

收稿日期: 2017-06-12; 收到修改稿日期: 2017-07-18

基金项目: 国家自然科学基金(11375081)

作者简介: 吴立恒(1980—),男,硕士研究生,主要从事电磁波理论与技术以及物理教学理论方面的研究。

E-mail: wulihenglctu@163.com

导师简介: 王明红(1967—),男,博士,教授,主要从事高功率微波与器件方面的研究。

E-mail: wangminghong@lcu.edu.cn(通信联系人)

的核心元件,用于选择所需的波长信号。如果在一维光子晶体中添加一个缺陷层,可实现一个窄频带传输的滤波器^[5];通过用一个光子量子井取代缺陷层^[6],可设计一个多信道滤波器;另一种实现多信道滤波器的方法是在一维光子晶体中将超导体代替介电层,在这些结构中没有缺陷层^[7];其他设计滤波器的结构还有 Thue-Morse 多层数列结构、镜像对称光子晶体 $(AB)_N(BA)_N$ 结构、对称周期光子晶体 $(ABA)_N$ 结构等^[8-10],在上述这些滤波器结构中,通带位于一维光子晶体 PBG 区域中。基于一维光子晶体的滤波器结构没有完全的光子带隙,对输入光的入射角非常敏感,而基于二维光子晶体的滤波器结构具有完全的光子带隙,对输入光的入射角不敏感,其滤波器设计机理与一维光子晶体滤波器不同。一种方式是通过在二维光子晶体输入波导和输出波导之间放置一个谐振腔结构来制作二维光滤波器^[11],其谐振波长可通过改变谐振腔的有效长度进行调节;另一种方式是利用准光子晶体结构设计二维光滤波器^[12]。设计二维光子晶体滤波器的通常方法是利用环形谐振器,近年来不同种类的环形谐振器已经被提出^[13-16],在这些结构中环形谐振器的谐振波长取决于环形谐振器的设计尺寸和结构折射率^[17]。本文在二维光子晶体中利用 5×5 微型谐振器与波导耦合带通滤波选择特性,通过结构设计控制工作模式,在小尺度、性能优异的滤波器结构设计上有明显的优势。

2 耦合模理论在滤波器工作状态分析及其设计上的应用

在输入波导与输出波导间放置一个谐振器形成滤波器结构,用 S_{+1} 、 S_{+2} 分别描述滤波器输入端口和输出端口的电磁波输入能量,用 S_{-1} 、 S_{-2} 描述对应输入端口和输出端口的电磁波输出能量。利用时域耦合模理论(CMT)对该滤波器结构中谐振器和波导之间的耦合性能进行了定性分析^[18-20]。瞬时 CMT 理论基于输入及输出的电磁场通量平衡的瞬时微分方程,设谐振腔内场的振幅为 $a(t)$,对应的谐振频率为 ω_0 。当 $S_{+2} = 0$,根据 CMT 理论取振幅 $a(t)$ 的时间导数,可得

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

$$S_{-1} = -S_{+1} + \sqrt{\frac{2}{\tau_1}} a(t), \quad (2)$$

$$S_{-2} = \sqrt{\frac{2}{\tau_2}} a(t), \quad (3)$$

式中 $1/\tau_1$ 、 $1/\tau_2$ 分别为谐振腔内场耦合到输入波导、输出波导的模式振幅衰减率, $1/\tau_0$ 为谐振腔内场的腔损耗衰减率。相关的外部耦合因子 $Q_1 = \omega\tau_1/2$, $Q_2 = \omega\tau_2/2$; 谐振腔固有品质因子 $Q_0 = \omega\tau_0/2$, 其中 ω 为电磁波角频率。固有品质因子用于描述由于谐振腔向周围结构的传输功率泄漏而造成的能量固有损耗,外部耦合因子用于描述腔与波导耦合作用时能量的泄漏。输入波导与谐振腔内场的耦合系数 K_1 依赖于输入波导模式振幅衰减率 $1/\tau_1$, 两者的关系为: $K_1 = \sqrt{2/\tau_1}$ 。滤波器结构中提取角频率为 ω 的电磁波时,按照 CMT 理论得到滤波器输入端口处的反射率为

$$R = |S_{-1}/S_{+1}|^2 = \frac{(\omega - \omega_0)^2 \tau_2^2 + (Q_2/Q_1 - Q_2/Q_0 - 1)^2}{(\omega - \omega_0)^2 \tau_2^2 + (Q_2/Q_1 + Q_2/Q_0 + 1)^2}, \quad (4)$$

滤波器输出端口处的传输率为

$$T = |S_{-2}/S_{+1}|^2 = \frac{4(Q_2/Q_1)}{(\omega - \omega_0)^2 \tau_2^2 + (Q_2/Q_1 + Q_2/Q_0 + 1)^2}, \quad (5)$$

谐振腔损耗率为

$$L = 1 - R - T = \frac{4Q_2^2/(Q_1 Q_0)}{(\omega - \omega_0)^2 \tau_2^2 + (Q_2/Q_1 + Q_2/Q_0 + 1)^2}. \quad (6)$$

图(1)~(3)依次给出了滤波器输入端口信号反射率 R 、谐振腔损耗率 L 和输出端口传输率 T 随工作参数 Q_2/Q_1 、 Q_0/Q_2 、失谐相位因子 $(\omega - \omega_0)^2 \tau_2^2$ 变化的特征曲线,其横坐标为 Q_0/Q_2 ,图 1(a)~(f) 中的工作参数 Q_2/Q_1 已列出,每一幅图中参数 $(\omega - \omega_0)^2 \tau_2^2$ 的取值用不同颜色的曲线表示。

图 1(a)~(f) 反映反射率 R 随其结构工作参数变化的特征曲线,表明: $(\omega - \omega_0)^2 \tau_2^2 \rightarrow \infty$ 或 $Q_0/Q_2 \rightarrow 0$ 时, $R \rightarrow 100\%$; 当 $\sqrt{(\omega - \omega_0)^2 \tau_2^2 + (Q_2/Q_1)^2} < Q_2/Q_0 + 1$, R 为 Q_0/Q_2 的减函数, $Q_0/Q_2 = 0$ 时 $R_{\max} = 100\%$, $Q_0/Q_2 \rightarrow \infty$ 时,在给出的每一组工作参数下 R 趋于常数; $Q_2/Q_1 \in (1, \infty)$ 时,在 $Q_0/Q_2 = [\sqrt{(\omega - \omega_0)^2 \tau_2^2 + (Q_2/Q_1)^2} - 1]^{-1}$ 处 R 取极小值; $\sqrt{(\omega - \omega_0)^2 \tau_2^2 + (Q_2/Q_1)^2} > Q_2/Q_0 + 1$ 时, R 为 Q_0/Q_2 的增函数, $Q_0/Q_2 \rightarrow \infty$ 时,在给出的每一组工作参数下 R 趋于常数。当滤波器处于谐振状态 $(\omega - \omega_0)^2 \tau_2^2 = 0$, 且当 $Q_2/Q_1 \rightarrow 0$ 时, $R \rightarrow 1$; 当 $Q_2/Q_1 \in (0, 1)$ 时,且当图 1(a)~(b) 所示 Q_2/Q_1 取

值为 0.2 和 0.5 时, $R > 0$; 当 $Q_2/Q_1 = 1$ 时, 如图 1(c) 所示, $Q_0/Q_2 \rightarrow \infty, R \rightarrow 0$; 当 $Q_2/Q_1 \in (1, \infty)$, 且 $Q_0/Q_2 = (Q_2/Q_1 - 1)^{-1}$ 时, $R_{\min} = 0, T = Q_1/Q_2, L = 1 - Q_1/Q_2$, 如图 1(d)~(f)。当 Q_2/Q_1 取值为 10, 200, 600 时, 计算得到 $R_{\min} = 0$ 的横坐标 Q_0/Q_2 依次为 0.11111, 0.00503, 0.00167。制作对目标波长高反

射率滤波器系统的方法是调节工作参数使 $Q_2/Q_1 \rightarrow 0, Q_0/Q_2 \rightarrow 0$ 或者 $Q_2/Q_1 \rightarrow \infty, Q_0/Q_2 \rightarrow \infty$ 。制作对目标波长的低反射率系统的方法是 $Q_2/Q_1 = 1$ 时, $Q_0/Q_2 \rightarrow \infty, R \rightarrow 0$; $Q_2/Q_1 \in (1, \infty), Q_0/Q_2 = (Q_2/Q_1 - 1)^{-1}$ 时, $R = 0$ 。CMT 理论可用于分析滤波器系统输入端口处反射率随工作参数设计变化的特征。

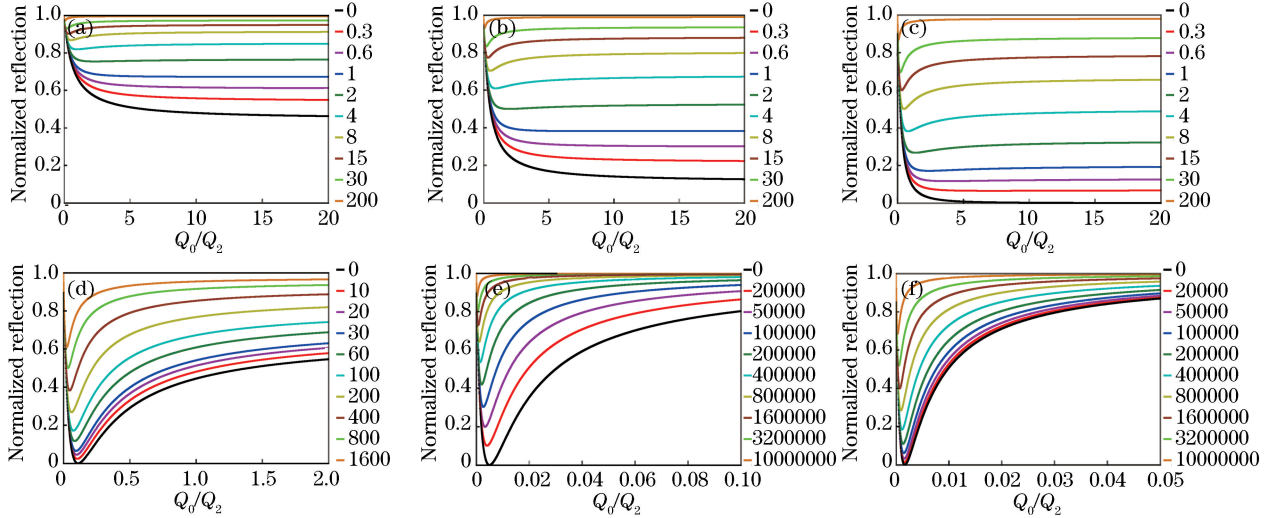


图 1 比值 Q_2/Q_1 和失谐相位因子 $(\omega - \omega_0)^2 \tau_2^2$ 取值的不同对归一化反射率的影响。

(a) $Q_2/Q_1 = 0.2$; (b) $Q_2/Q_1 = 0.5$; (c) $Q_2/Q_1 = 1$; (d) $Q_2/Q_1 = 10$; (e) $Q_2/Q_1 = 200$; (f) $Q_2/Q_1 = 600$

Fig. 1 Influence of different ratios of Q_2/Q_1 and values of phase detuning factor $(\omega - \omega_0)^2 \tau_2^2$ on normalized reflectivity.

(a) $Q_2/Q_1 = 0.2$; (b) $Q_2/Q_1 = 0.5$; (c) $Q_2/Q_1 = 1$; (d) $Q_2/Q_1 = 10$; (e) $Q_2/Q_1 = 200$; (f) $Q_2/Q_1 = 600$

图 2(a)~(f) 反映了谐振腔损耗率 L 随其结构工作参数变化的特征曲线, 从图中可以看出: 失谐因子 $(\omega - \omega_0)^2 \tau_2^2 \rightarrow \infty$, 则 $L \rightarrow 0$; 当 $Q_2/Q_0 > \sqrt{(\omega - \omega_0)^2 \tau_2^2 + (Q_2/Q_1 + 1)^2}$, L 为 Q_0/Q_2 的增函

数; 当 $Q_2/Q_0 < \sqrt{(\omega - \omega_0)^2 \tau_2^2 + (Q_2/Q_1 + 1)^2}$ 时, L 为 Q_0/Q_2 的减函数; 在 $Q_0/Q_2 = [\sqrt{(\omega - \omega_0)^2 \tau_2^2 + (Q_2/Q_1 + 1)^2}]^{-1}$ 处 L 取极大值。滤波器处于谐振状态时, $(\omega - \omega_0)^2 \tau_2^2 = 0, Q_0/Q_2 =$

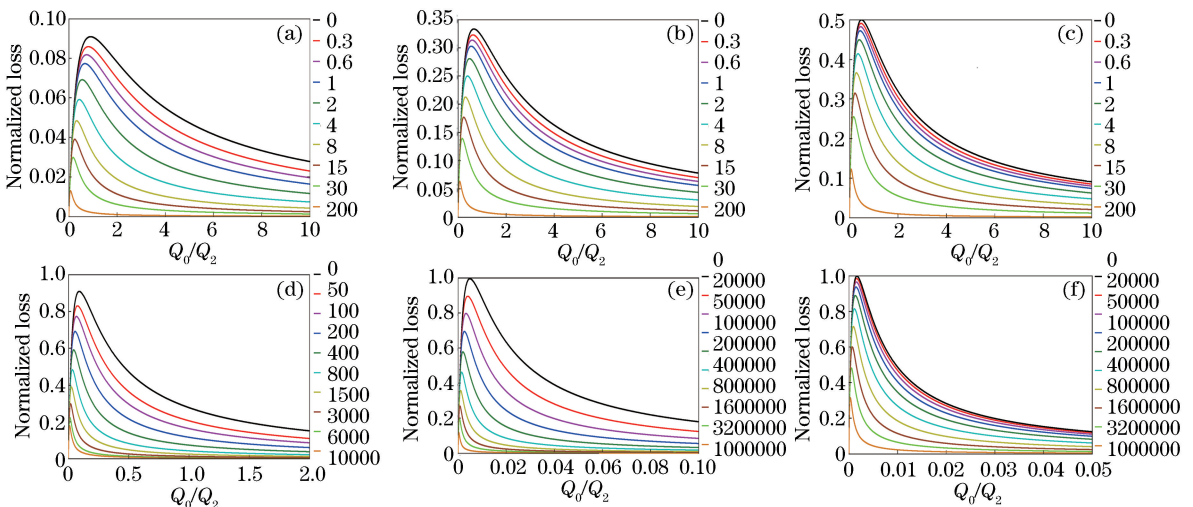


图 2 比值 Q_2/Q_1 和失谐相位因子 $(\omega - \omega_0)^2 \tau_2^2$ 取值的不同对归一化损耗率的影响。

(a) $Q_2/Q_1 = 0.1$; (b) $Q_2/Q_1 = 0.5$; (c) $Q_2/Q_1 = 1$; (d) $Q_2/Q_1 = 10$; (e) $Q_2/Q_1 = 200$; (f) $Q_2/Q_1 = 600$

Fig. 2 Influence of different ratios of Q_2/Q_1 and values of phase detuning factor $(\omega - \omega_0)^2 \tau_2^2$ on normalized loss ratio.

(a) $Q_2/Q_1 = 0.1$; (b) $Q_2/Q_1 = 0.5$; (c) $Q_2/Q_1 = 1$; (d) $Q_2/Q_1 = 10$; (e) $Q_2/Q_1 = 200$; (f) $Q_2/Q_1 = 600$

$(Q_2/Q_1+1)^{-1}$, $L_{\max} = Q_2/Q_1 (Q_2/Q_1+1)^{-1}$, $R = (Q_2/Q_1+1)^{-2}$, $T = Q_2/Q_1 (Q_2/Q_1+1)^{-2}$, 当 $Q_2/Q_1 \rightarrow \infty$ 时, $L_{\max} \rightarrow 100\%$, $R \rightarrow 0$, $T \rightarrow 0$; $Q_2/Q_1 \rightarrow 0$ 时, $L \rightarrow 0$, $R \rightarrow 1$, $T \rightarrow 0$ 。在滤波系统中利用低品质因数谐振腔并通过增大工作参数 Q_2/Q_1 比值, 可以设计得到高损耗率谐振腔。减小工作参数 Q_2/Q_1 比值, 在远离 L 取极大值的横坐标点 $Q_0/Q_2 = (Q_2/Q_1+1)^{-1}$, $L \rightarrow 0$ 。CMT 理论可用于分析滤波系统谐振腔损耗率随工作参数变化

的特征。

图 3(a)~(f)反映了波导传输率 T 随其结构工作参数变化的特征曲线, 从图中可以看出, 当 $(\omega - \omega_0)^2 \tau_2^2 \rightarrow \infty$, $T \rightarrow 0$; T 为 $Q_0/Q_2 \in [0, \infty)$ 上的增函数, 当 $Q_0/Q_2 \rightarrow \infty$, T 趋于常数。失谐相位因子为 $(\omega - \omega_0)^2 \tau_2^2 = 0$, 当 $Q_2/Q_1 = Q_2/Q_0 + 1$ 时, $R = 0$, $T = (Q_2/Q_0+1)^{-1}$, $L = Q_1/Q_0 = Q_2/Q_0 (Q_2/Q_0+1)^{-1}$, 若 $Q_0/Q_2 \rightarrow \infty$, 则 $Q_2 = Q_1$, $T \rightarrow 100\%$, $L \rightarrow 0$ 。

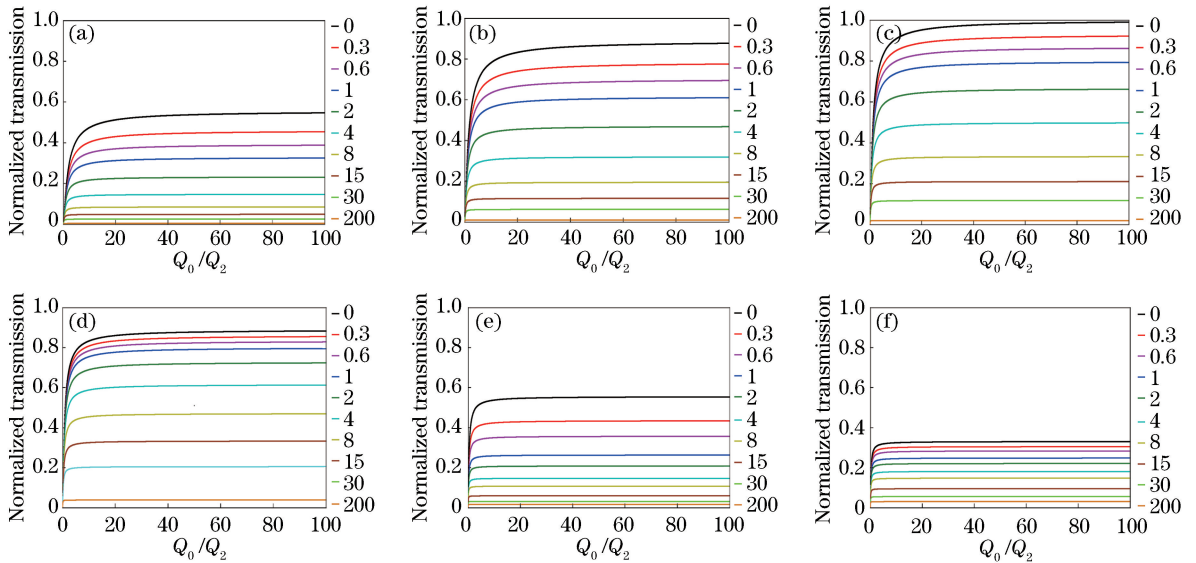


图 3 比值 Q_2/Q_1 和失谐相位因子 $(\omega - \omega_0)^2 \tau_2^2$ 取值的不同对波导归一化传输率的影响。

(a) $Q_2/Q_1 = 0.2$; (b) $Q_2/Q_1 = 0.5$; (c) $Q_2/Q_1 = 1$; (d) $Q_2/Q_1 = 2$; (e) $Q_2/Q_1 = 5$; (f) $Q_2/Q_1 = 10$

Fig. 3 Influence of different ratios of Q_2/Q_1 and values of phase detuning factor $(\omega - \omega_0)^2 \tau_2^2$ on normalized transmission.

(a) $Q_2/Q_1 = 0.2$; (b) $Q_2/Q_1 = 0.5$; (c) $Q_2/Q_1 = 1$; (d) $Q_2/Q_1 = 2$; (e) $Q_2/Q_1 = 5$; (f) $Q_2/Q_1 = 10$

CMT 理论可用于分析不同结构滤波器谐振时和相位失谐时的滤波性能变化特征, 可指导滤波器结构设计和用于分析不同工作状态下结构设计对其滤波特性的影响。对称滤波器系统工作于谐振状态时, $Q_2 = Q_1$, 当 $Q_0/Q_2 \rightarrow \infty$, $R = 0$, $L \rightarrow 0$, $T \rightarrow 100\%$, 这表明: 对称结构滤波器通过波导模式与谐振腔模式的强耦合作用使系统谐振腔的损耗率和输入端口反射率得到抑制, 提取信号传输率 T 为 100% , 在谐振腔与波导模式强耦合的状况下, CMT 理论可为这个概念提供定性描述。当非对称结构滤波器系统工作于谐振状态且 $Q_2/Q_1 \rightarrow \infty$ 时, 通过波导模式与谐振腔模式的耦合作用可使系统中反射率和传输率得到抑制 ($R \rightarrow 0$, $T \rightarrow 0$, $L_{\max} \rightarrow 100\%$), 实现谐振腔的强辐射损耗; $Q_2/Q_1 \rightarrow 0$ 时, $R \rightarrow 100\%$, $T \rightarrow 0$, $L \rightarrow 0$, 系统中谐振腔的损耗率和输出端口传输率得到抑制, 使输入的信号波长在输入端口 100% 被反射。CMT 理论为波导与谐振器耦合系

统滤波的工作状况提供了定性描述, 在现实中谐振腔的品质因数为有限值, 滤波器提取的目标波长信号对称结构较非对称结构的谐振腔损耗率和反射率都较低, 而传输率 T 更高。

3 基于两类微型谐振器的 4 种光子晶体滤波器结构

如图 4 所示, 在以空气为背景的正方格介质圆柱光子晶体中设计 4 种滤波器结构 (I ~ IV), 其空气的相对介电常数近似为 1, 介质柱材料相对介电常数为 12, 晶格常数 $a = 530 \text{ nm}$, 尺寸大小为 $23a \times 18a$ 。波导沿水平或垂直方向放置于谐振器一侧或正对着其中心的位置, 设计的 4 种耦合结构都利用了空气谐振腔和介质柱谐振腔结构, 在图中已用矩形框标示出带有空气谐振腔的 5×5 微型谐振器结构 I 和带有介质柱中心谐振腔的

5×5 微型谐振器结构 2, 中心柱半径为 $0.08a$ 。在滤波器结构 IV 中波导与 5×5 微型谐振器耦合拐角半个晶格常数处放置了 4 个相对介电常数为 12、半径为 $0.2a$ 的相同介质圆柱, 图中已用小矩形框标出。在设计的光子晶体滤波器结构输入端口 $S_{\pm 1}$ 处设置了波导源发射电磁波, 在波导输出端口

$S_{\pm 2}$ 处设置了接收器以探测滤波器提取的信号功率。为吸收结构向周围发出的电磁波设置了完全匹配层吸收边界^[21], 以将进入的电磁波吸收掉。每个正方形原胞分成 40×40 等分, 在数值计算满足 Courant 稳定性条件的情况下^[22], 用 FDTD 法研究了其结构对横磁波的滤波特性^[23]。

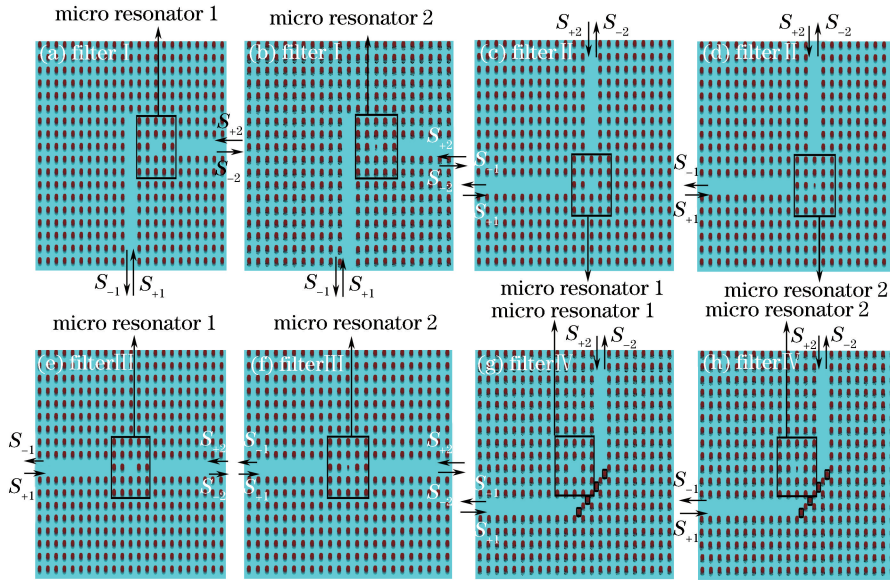


图 4 基于两类微型谐振器的光子晶体滤波器结构。(a)(c)(e)(g)带有空气谐振腔的谐振器 1; (b)(d)(f)(h)带有介质柱谐振腔的谐振器 2

Fig. 4 Structures of photonic crystal filters based on two types of micro resonators.

(a)(c)(e)(g) resonator 1 with an air cavity; (b)(d)(f)(h) resonator 2 with a rod cavity

改变图 4 中矩形框内微型谐振器中心之外的柱半径 r_i , 调节光子晶体波导与微谐振器的耦合模式, 依次得到这 4 种耦合结构的输出谱特性曲线, 如图 5 所示, 其横坐标表示滤波器工作波长 ($1290 \sim 1600$ nm), 纵坐标表示提取信号波长的归一化传输率 ($0 \sim 1$)。在图 5 中, 每一种带有空气谐振腔的滤波器结构输出谱特性曲线用实线表示, 每一种带有介质柱谐振腔的滤波器结构输出谱特性曲线用点线表示。结果表明: 所设计的滤波器结构在 $1290 \sim 1600$ nm 波长段具有单通带选择输出特性, 远离通带峰值波长时波长信号强度迅速衰减, 能有效隔离其他不需要的信号波长, 滤除光学噪声信号性能优异。

为便于观察和分析滤波器结构的输出光学信号特征, 在表 1~4 中依次列出了滤波器结构 I~IV 的光学特性参数: 峰值波长 λ 、通带带宽 $\Delta\lambda$ 、归一化传输率 T 。通过调节表 1~4 所列的设计结构参数来调节微型谐振器结构, 得到这 4 种滤波器结构 (I~IV) 提取信号波长传输通带, 由图 5 可以看出, 其通带个数依次为 29, 29, 28, 9。图 5 中每一特性曲线

用不同颜色表示, 按顺序号和表格中顺序号相对应能找到滤波器结构中微型谐振器的介质柱半径取值 r_i 。利用 5×5 微型谐振器的波长选择特性, 在与波导不同的耦合结构中调节 5×5 谐振器内中心谐振腔外的柱半径 r_i , 由表格 1~4 所列的重要光学参数可知: 两种滤波器结构中, 随柱半径 r_i 的增加, 提取波长向长波方向移动; 利用带有空气谐振腔的微谐振器 1 和带有介质柱谐振腔的微谐振器 2 可展宽结构通带峰值波长的可调谐范围; 非对称结构滤波器 I 提取的不同峰值波长归一化传输率范围为 $16.5\% \sim 97.7\%$, 选择传输带宽范围为 $1.5 \sim 3.8$ nm, 峰值波长调节范围为 $1309.0 \sim 1568.9$ nm, 具有通带峰值波长可调谐范围宽、归一化传输率变化幅度大、带宽窄的特性; 对称结构滤波器 II~IV 提取的不同峰值波长归一化传输率范围为 $85.3\% \sim 99.9\%$, 选择传输带宽范围为 $1.8 \sim 5.6$ nm, 峰值波长调节范围为 $1308.0 \sim 1582.3$ nm, 具有通带峰值波长归一化传输率高、带宽窄、可调谐范围宽且幅度平稳的特性。这与 CMT 理论描述的波导与谐振器结

构耦合系统的滤波工作状态相符合,表明通过波导模式与谐振腔模式的强耦合作用,对称结构滤波器中谐振腔的损耗率和输入端口反射率得到抑制,与非对称结构滤波器比较,对称结构的提取波长信号具有更高的归一化传输率。

滤波器的耦合结构对其光学滤波特性的影响表明:对称结构在给出的设计参数条件下,能实现波导与谐振器系统的宽波段强耦合作用,使滤波器提取通带峰值波长传输率高且平稳;非对称滤波器结构

在给出的设计参数条件下,不能实现波导与谐振器系统的宽波段强耦合作用,滤波器提取的峰值波长归一化传输率变化幅度较大,这是与 CMT 理论定性描述相符合的。设计的 4 种滤波器结构可将提取的波长信号向着原来的方向传输,或将其传输方向改变 90° 后传输。所设计滤波器可覆盖较宽的工作波段,且能有效滤除非目标波长,可应用于光信号提取接口设计、光传感器件设计、密集型光互联网络器件设计等方面。

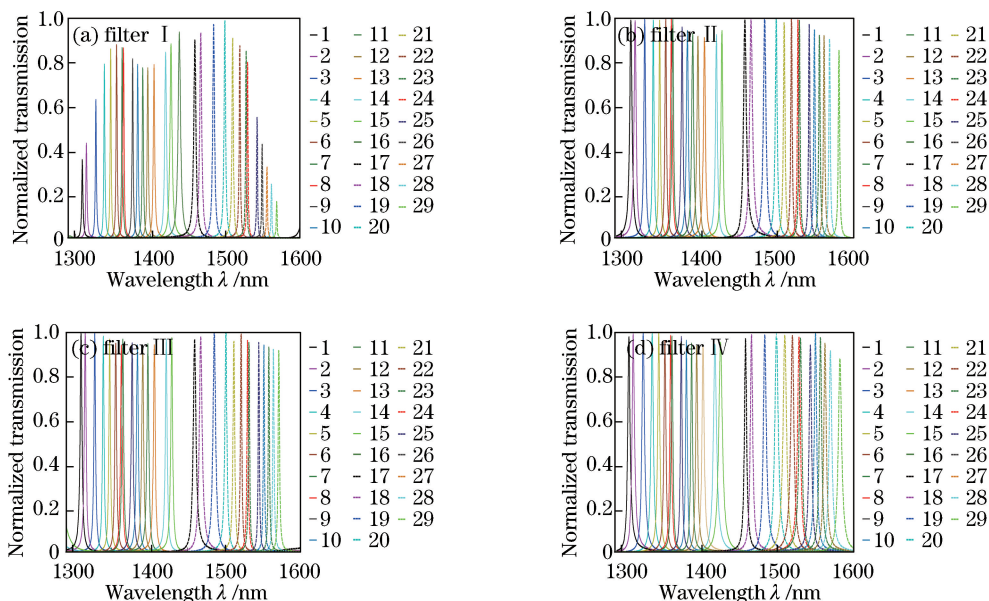


图 5 光子晶体滤波器结构的归一化传输谱。(a)滤波器 I;(b)滤波器 II;(c)滤波器 III;(d)滤波器 IV

Fig. 5 Normalized transmission spectra of photonic crystal filters. (a) Filter I; (b) filter II; (c) filter III; (d) filter IV

表 1 滤波器 I 的光学参数

Table 1 Optical parameters of filter I

Micro resonator 1					Micro resonator 2				
Solid line	r_i	λ	$\Delta\lambda$	$T / \%$	Dot line	r_i	λ	$\Delta\lambda$	$T / \%$
1	0.140a	1309.0	1.7	35.7	17	0.140a	1459.5	3.4	90.3
2	0.145a	1314.5	1.7	43.1	18	0.145a	1467.4	3.2	93.4
3	0.150a	1327.2	1.6	62.9	19	0.150a	1484.5	2.8	97.0
4	0.155a	1338.5	1.5	79.0	20	0.155a	1499.6	2.1	97.7
5	0.160a	1347.0	1.6	85.9	21	0.160a	1510.1	1.8	91.0
6	0.165a	1354.8	1.6	87.9	22	0.165a	1519.6	1.6	87.3
7	0.170a	1362.2	1.6	86.5	23	0.170a	1527.9	1.6	85.1
8	0.175a	1364.2	1.6	86.4	24	0.175a	1529.8	1.5	80.2
9	0.180a	1376.3	1.6	81.4	25	0.180a	1542.6	1.5	54.8
10	0.182a	1383.1	1.7	79.0	26	0.182a	1549.5	1.5	42.6
11	0.190a	1389.8	1.8	77.3	27	0.190a	1555.9	1.5	32.5
12	0.195a	1396.5	1.5	77.4	28	0.195a	1561.8	1.5	24.5
13	0.200a	1404.8	2.1	78.8	29	0.200a	1568.9	1.5	16.5
14	0.205a	1420.3	2.7	84.4					
15	0.210a	1427.5	3.2	88.2					
16	0.215a	1438.7	3.8	93.6					

表 2 滤波器 II 的光学参数
Table 2 Optical parameters of filter II

Micro resonator 1					Micro resonator 2				
Solid line	r_i	λ	$\Delta\lambda$	$T / \%$	Dot line	r_i	λ	$\Delta\lambda$	$T / \%$
1	0.140a	1309.9	3.6	99.0	16	0.140a	1459.2	4.4	99.5
2	0.145a	1315.5	3.2	98.7	17	0.145a	1467.1	4.5	99.1
3	0.150a	1328.0	2.5	99.5	18	0.150a	1485.0	4.0	99.3
4	0.155a	1339.3	2.3	99.0	19	0.155a	1500.2	3.1	99.2
5	0.160a	1347.6	2.2	99.0	20	0.160a	1510.6	2.5	97.9
6	0.165a	1355.6	2.2	99.4	21	0.165a	1520.1	2.1	99.4
7	0.170a	1363.1	2.4	99.7	21	0.170a	1528.7	2.0	99.2
8	0.175a	1364.8	2.4	99.4	23	0.175a	1530.6	2.0	98.9
9	0.180a	1377.0	2.8	95.9	24	0.180a	1543.4	2.0	97.4
10	0.182a	1384.0	2.9	94.3	25	0.182a	1550.3	2.0	94.5
11	0.190a	1390.9	3.0	92.9	26	0.190a	1556.7	2.1	92.1
12	0.195a	1397.8	3.1	91.7	27	0.195a	1562.9	2.2	91.9
13	0.200a	1406.2	3.0	91.2	28	0.200a	1570.0	2.2	90.6
14	0.205a	1421.9	2.9	92.5	29	0.205a	1582.3	2.1	85.3
15	0.210a	1429.2	2.9	94.3					

表 3 滤波器 III 的光学参数
Table 3 Optical parameters of filter III

Micro resonator 1					Micro resonator 2				
Solid line	r_i	λ	$\Delta\lambda$	$T / \%$	Dot line	r_i	λ	$\Delta\lambda$	$T / \%$
1	0.140a	1309.9	2.9	99.8	16	0.140a	1459.2	4.3	96.9
2	0.145a	1315.5	2.7	99.9	17	0.145a	1467.1	4.4	98.3
3	0.150a	1328.0	2.4	99.6	18	0.150a	1485.0	4.1	99.6
4	0.155a	1339.2	2.3	98.2	19	0.155a	1500.2	3.3	98.1
5	0.160a	1347.6	2.4	97.0	20	0.160a	1510.9	3.6	95.9
6	0.165a	1355.4	2.5	95.0	21	0.165a	1520.4	2.2	99.2
7	0.170a	1363.1	2.6	94.0	21	0.170a	1528.7	1.9	96.4
8	0.175a	1364.8	2.7	97.2	23	0.175a	1530.6	1.9	95.4
9	0.180a	1377.1	2.9	95.2	24	0.180a	1543.4	1.8	95.3
10	0.182a	1384.0	3.0	94.3	25	0.182a	1550.3	1.8	94.1
11	0.190a	1391.1	2.9	92.4	26	0.190a	1556.7	1.8	93.3
12	0.195a	1397.8	2.9	94.9	27	0.195a	1562.6	1.9	92.2
13	0.200a	1406.2	2.8	94.3	28	0.200a	1569.7	2.1	91.6
14	0.205a	1421.9	2.8	96.8					
15	0.210a	1429.2	2.8	97.5					

表 4 滤波器 IV 的光学参数
Table 4 Optical parameters of filter IV

Micro resonator 1					Micro resonator 2				
Solid line	r_i	λ	$\Delta\lambda$	$T / \%$	Dot line	r_i	λ	$\Delta\lambda$	$T / \%$
1	0.140a	1308.0	3.6	97.9	16	0.140a	1459.2	3.4	97.0
2	0.145a	1313.5	3.8	99.3	17	0.145a	1467.1	3.6	98.9
3	0.150a	1326.6	3.9	99.6	18	0.150a	1484.2	4.6	99.0
4	0.155a	1338.3	3.6	99.4	19	0.155a	1500.0	5.4	99.4
5	0.160a	1346.8	3.2	99.6	20	0.160a	1510.4	5.4	98.7
6	0.165a	1354.8	2.9	97.7	21	0.165a	1520.2	5.0	98.6
7	0.170a	1362.2	2.6	98.7	21	0.170a	1528.7	4.4	97.9
8	0.175a	1364.0	2.6	98.2	23	0.175a	1530.6	4.3	97.3
9	0.180a	1376.0	2.4	98.2	24	0.180a	1543.4	3.7	94.2
10	0.182a	1382.7	2.5	96.4	25	0.182a	1550.1	3.6	99.9
11	0.190a	1389.3	2.6	95.1	26	0.190a	1556.5	3.6	97.5
12	0.195a	1396.0	2.9	93.8	27	0.195a	1562.4	3.8	94.9
13	0.200a	1404.2	3.4	93.7	28	0.200a	1569.4	4.2	91.5
14	0.205a	1420.0	4.9	94.6	29	0.205a	1581.7	5.2	88.1
15	0.210a	1426.8	5.6	95.5					

4 结 论

在二维方格子介质圆柱光子晶体结构中利用两种类型的微型谐振器,通过波导与微型谐振器的不同耦合结构设计了4种滤波器。借助于CMT定性分析了波导与谐振器相位失谐因子、输出与输入外部耦合因子比值、谐振腔固有品质因数以及输出外部耦合因子比值对滤波器系统电磁波耦合性能的影响,为设计不同工作性能的滤波器提供了理论指导。用FDTD方法研究了不同耦合结构的滤波传输特性,结果表明:在给出的结构设计参数条件下,滤波器对称结构能实现波导与谐振腔的强耦合作用,提取的通带信号峰值波长具有归一化传输率高、信号强度平稳、调谐范围宽、通带宽度窄的特性;非对称结构在给出的设计参数条件下,不能实现波导与谐振器系统的宽波段强耦合作用,滤波器提取的峰值波长归一化传输率变化幅度较大,这与CMT理论相符合。在设计的滤波器结构中,通过调节谐振器中心以外介质柱半径可以调节谐振器波长选择性,波导与谐振器的耦合结构在1290~1600 nm波段能滤除不需要的波长,仅提取一个通带,波长信号提取质量高,所设计的滤波器结构在光通信网络信号提取、光传感设计等领域有潜在的利用价值。

参 考 文 献

- [1] Shi W H, You C J. High sensitivity magnetic field and temperature sensor of photonic crystal fiber based on directional coupling[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(7): 0706004.
施伟华, 尤承杰. 基于定向耦合的光子晶体光纤高灵敏度磁场和温度传感器[J]. *光学学报*, 2016, 36(7): 0706004.
- [2] Chen H F, Yan H M, Shan G F. Design of two-dimensional bending vector sensor based on selective infiltration of photonic crystal fiber[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(1): 0105003.
陈慧芳, 严惠民, 单国峰. 基于选择填充光子晶体光纤的二维弯曲矢量传感器设计[J]. *中国激光*, 2016, 43(1): 0105003.
- [3] Wang X W, Zhang W, Han J T, *et al.* Investigation of structure design and transmission characteristic of GeSbSe photonic crystal waveguides[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(1): 0105001.
王贤旺, 张巍, 韩金涛, 等. GeSbSe光子晶体波导结构设计及传输特性研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(1): 0105001.

- [4] John S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices[J]. *Physical Review Letters*, 1987, 58(23): 2486-2489.
- [5] Wu C J, Wang Z H. Properties of defect modes in one-dimensional photonic crystals[J]. *Progress in Electromagnetics Research*, 2010, 103: 169-184.
- [6] Qiao F, Zhang C, Wan J, *et al.* Photonic quantum-well structures: multiple channeled filtering phenomena[J]. *Applied Physics Letters*, 2000, 77(23): 3698-3700.
- [7] Lin W H, Wu C J, Yang T J, *et al.* Terahertz multichanneled filter in a superconducting photonic crystal[J]. *Optics Express*, 2010, 18(26): 27155-27166.
- [8] Abdalaoui E H E, Kasjan S, Lemańczyk M. 0-1 sequences of the Thue-Morse type and Sarnak's conjecture[J]. *Proceedings of the American Mathematical Society*, 2016, 144(1): 161-176.
- [9] Aghajamali A. Near-infrared tunable narrow filter in a periodic multi-nanolayer doped by a superconductor photonic quantum-well[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(34): 9797-9802.
- [10] Cerjan A, Raman A, Fan S. Exceptional contours and band structure design in parity-time symmetric photonic crystals[J]. *Physical Review Letters*, 2016, 116(20): 203902.
- [11] Alipour-Banaei H, Mehdizadeh F. Significant role of photonic crystal resonant cavities in WDM and DWDM communication tunable filters[J]. *Optik*, 2013, 124(17): 2639-2644.
- [12] Bazargani H P. Proposal for a 4-channel all optical demultiplexer using 12-fold photonic quasicrystal[J]. *Optics Communications*, 2012, 285(7): 1848-1853.
- [13] Chhipa M K, Radhouene M, Robinson S, *et al.* Improved dropping efficiency in two-dimensional photonic crystal-based channel drop filter for coarse wavelength division multiplexing application[J]. *Optical Engineering*, 2017, 56(1): 015107.
- [14] Djavid M, Abrishamian M S. Multi-channel drop filters using photonic crystal ring resonators[J]. *Optik*, 2012, 123(2): 167-170.
- [15] Taalbi A, Bassou G, Mahmoud M Y. New design of channel drop filters based on photonic crystal ring resonators[J]. *Optik*, 2013, 124(9): 824-827.
- [16] Mahmoud M Y, Bassou G, Taalbi A, *et al.* Optical channel drop filters based on photonic crystal ring resonators[J]. *Optics Communications*, 2012, 285(3): 368-372.

- [17] Mehdizadeh F, Alipour-Banaei H, Serajmohammadi S. Channel-drop filter based on a photonic crystal ring resonator[J]. *Journal of Optics*, 2013, 15(7): 075401.
- [18] 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): 075203.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] Berenger J P. A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves[J]. *Journal of Computational Physics*, 1994, 114(2): 185-200.
- [22] Goldberg M. Stability criteria for finite difference approximations to parabolic systems[J]. *Applied Numerical Mathematics*, 2000, 33(1/2/3/4): 509-515.
- [23] Zhu Z M, Brown T G. Full-vectorial finite-difference analysis of microstructured optical fibers[J]. *Optics Express*, 2002, 10(17): 853-864.