

文章编号:1002-2082(2011)06-1130-04

# 边带耦合光子晶体滤波器反射谱特性分析

张兴娇, 肖永江, 文如泉

(萍乡高等专科学校, 江西 萍乡 337000)

**摘要:**为研究边带耦合光子晶体滤波器的性质,利用耦合模理论(CMT)和传输矩阵方法(TMM)分析了谐振器腔体的周期,Q值和腔体的个数对滤波器反射谱的影响。仿真结果表明:相移为 $n\pi/2$ ,反射谱才具有对称性;Q值增加,反射峰带宽减小;N增大,反射峰带宽相应增大,旁瓣也随之出现。针对为实现增加带宽而出现的旁瓣增加的现象,采用了类似一维光子晶体滤波器的方法啁啾和级联技术实现了旁瓣的抑制。为设计具体光子晶体滤波器提供指导和依据。

**关键词:**光子晶体滤波器;耦合模理论;传输矩阵方法;反射谱

中图分类号: TN252

文献标志码: A

doi:10.5768/JAO201132.0601015

## Characteristics of reflection spectrum of side-coupled photonic crystal filter

ZHANG Xing-jiao, XIAO Yong-jiang, WEN Ru-quan

(Pingxiang College, Pingxiang 337000, China)

**Abstract:** To study the characteristics of side-coupled photonic crystal filter, the coupled mode theory (CMT) and the transfer matrix method (TMM) were used to analyze the dependence of the filter's reflection spectrum on the period of resonator, the value Q, and the number of cavities. The simulation result showed that the reflection spectrum was symmetrical when the phase shift was  $n\pi/2$ , the bandwidth of reflection spectrum peak decreased as Q increased, and the bandwidth of reflection spectrum peak increased and the side lobe occurred at the same time as N increased. To overcome the increasing side lobe due to the increase of bandwidth, the chirp and cascade technology similar to one-dimensional photonic crystal filter was used to achieve sidelobe suppression. This work can be used for the design of the photonic crystal filter.

**Key words:** photonic crystal filter; coupled mode theory; transfer matrix method; reflection spectra

## 引言

1987年, E. Yablonovitch 在研究抑制自发辐射时,提出了光子晶体(photon crystal)的概念。几乎同时, S. John 在讨论光子局域时也独立地提出了这个概念。光子晶体概念的提出向人们展示了一种新的控制光子的机制,它完全不同于以往利用全反射来引导光传输,给光通信技术的发展和应用带来了新的生机和活力<sup>[1-3]</sup>。通过光子晶体的带隙以及带隙中的缺陷态可以很方便地禁止或

允许一定频率的光子通过,这一特性决定了光子晶体有着广泛的应用潜力,特别是在光通信领域中。利用它可以制造出光通信中所用到的各种器件:品质优良的滤波器、光子晶体光纤、激光器、微谐振腔、光交换与光复用、集成光路等<sup>[1,4]</sup>。

目前为了充分利用有限的电磁频谱资源,信道空间要求越来越密,并且要求器件的体积也要很小,所以光子晶体成为设计滤波器的最佳选择。目前已经有很多学者专家提出了一些观点和设计

收稿日期:2011-01-06; 修回日期:2011-02-16

作者简介:张兴娇(1986—),女,江西萍乡人,助教,主要从事光电子器件方面的研究工作。

E-mail: zhangxingjiao521@163.com

方法, 目前采用最多的是利用波导线缺陷和腔体点缺陷的耦合特性, 通过改变腔体介质柱介电常量或改变腔体介质柱半径来改变波导和谐振腔的耦合系数, 从而实现对不同光波长的滤波。这种方法不仅使得器件的制作简单, 滤波效率也很高。本文主要讨论了改变腔体介质柱半径形成谐振腔从而实现滤波时, 腔体与波导耦合系数、腔体与腔体间间距、腔体个数等特性对反射谱的影响, 并分析了如何改进反射谱的特性。使得在归一化频率为 0.369 可以得到反射效率高、波长带宽宽和旁瓣小的反射谱, 更好地补偿光纤所固有的损耗等问题, 用此制作光滤波器和光纤光栅等光通信过程中重要设备。

## 1 基本原理

边带耦合光子晶体滤波器的结构如图 1 所示, 它由  $N$  个谐振腔和波导组成, 由  $11 \times 28$  行列周期排列的介质组成, 其中灰色圆点表示介质, 其余部分为空气, 晶体采用正方晶格介质圆柱结构, 介质柱的半径为  $r$ , 晶格常数为  $a$ , 介质的介电常数为  $E$ , 背景为空气。波导是通过去掉一行介质柱实现的, 谐振腔是通过改变介质柱的半径实现, 每个方格代表一个谐振腔。最近两个缺陷介质柱在  $x$  方向之间的距离为  $L=5a$ 。

波导和两个谐振腔耦合的基本结构如图 2 所示, 该滤波器由 2 个相同的谐振腔和与之耦合的光子晶体波导构成。

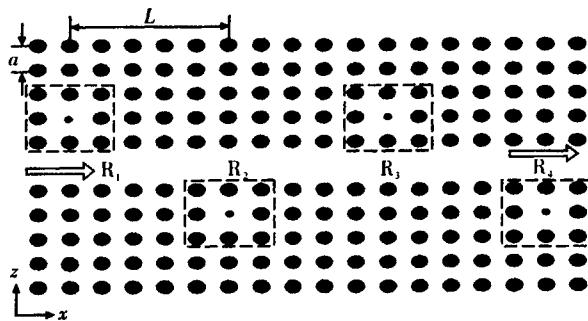


图 1 由光子晶体波导和  $N$  个周期排列的谐振腔组成的滤波器示意图

Fig. 1 Schematic of filter, which is composed of  $N$  resonators periodically placed on both side of PhC waveguide

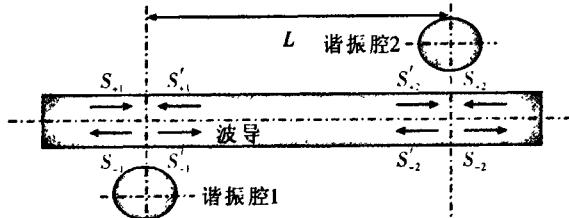


图 2 波导和两个谐振腔耦合的基本结构

Fig. 2 Basic structure of 2 resonators side-coupled to waveguide

由于隧道效应, 在这个结构中相邻两个谐振腔之间的直接耦合基本上不存在, 这样谐振腔只能通过光子晶体的波导基于耦合模理论, 波导和谐振腔之间的关系可以表示为

$$\begin{bmatrix} S'_{+1} \\ S'_{-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - j\gamma/(\omega - \omega_0) & -j\gamma/(\omega - \omega_0) \\ j\gamma/(\omega - \omega_0) & 1 + j\gamma/(\omega - \omega_0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{+1} \\ S_{-1} \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} S_{+1} \\ S_{-1} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:  $S_+$  和  $S_-$  分别表示射入谐振腔的光和从谐振腔反射出来的光的复振幅;  $\omega_0$  表示腔体的耦合频率;  $\gamma$  表示腔体的宽度, 它们之间关系为  $\gamma = \omega_0/Q$ , 其中  $Q$  是品质因子, 可以通过改变腔体介质柱介电常量或改变腔体介质柱半径来改变波导和谐振腔的耦合系数从而调节  $Q$  的大小, 由于光子晶体带隙的存在, 腔体光损耗很低,  $Q$  值可以达到  $10^4 \sim 10^6$ <sup>[5]</sup>。若两个谐振腔与同一波导耦合, 如图 1 所示, 根据耦合模理论和传输矩阵方法, 可以得到:

$$\begin{bmatrix} S_{+2} \\ S_{-2} \end{bmatrix} = T_2 \begin{bmatrix} \exp(j\Phi) & 0 \\ 0 & \exp(-j\Phi) \end{bmatrix} T_1 \begin{bmatrix} S_{+1} \\ S_{-1} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中相位  $\Phi = \beta L$ ,  $L$  为两谐振腔之间的距离, 如图 2 所示, 当沿着波导有  $N+1$  个谐振腔时, 波导和谐振腔之间的关系可以表示为

$$\begin{bmatrix} S_{+(N+1)} \\ S_{-(N+1)} \end{bmatrix} = T_{N+1} D_N T_N \cdots D_1 T_1 \cdots T_2 D_1 T_1 \begin{bmatrix} S_{+1} \\ S_{-1} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中:

$$T_i = \begin{bmatrix} 1 - j\gamma_i/(\omega_i - \omega_{0i}) & -j\gamma_i/(\omega_i - \omega_{0i}) \\ j\gamma_i/(\omega_i - \omega_{0i}) & 1 + j\gamma_i/(\omega_i - \omega_{0i}) \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$D_i = \begin{bmatrix} \exp(j\Phi_i) & 0 \\ 0 & \exp(-j\Phi_i) \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中  $i$  表示第  $i$  个谐振腔,  $i=1, 2, 3, \dots, N+1$ 。如果所有谐振腔的特性相同, 那么它们所对应的矩阵  $T$  和  $D$  也相同, 因此:

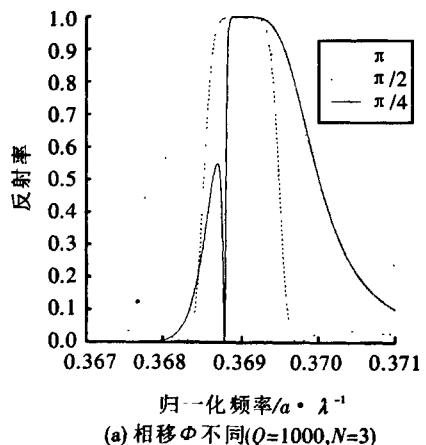
$$\begin{bmatrix} S_{+(N+1)} \\ S_{-(N+1)} \end{bmatrix} = T(DT)^N \begin{bmatrix} S_{+1} \\ S_{-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{+1} \\ S_{-1} \end{bmatrix} \quad (6)$$

对于由  $N+1$  个谐振腔组成的光子晶体阵列, 反射系数  $R$  为  $S_{-1}/S_{+1}$ , 利用边界条件  $S_{-(N+1)}=1, S_{+(N+1)}=0$ <sup>[6]</sup> 可得:

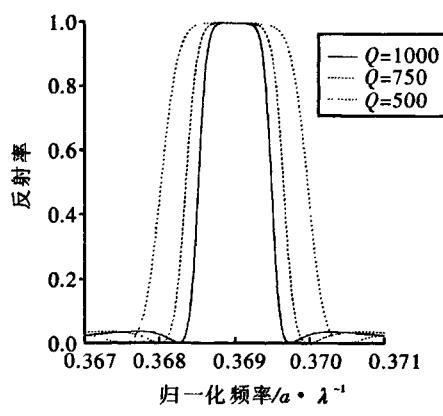
$$R = |r^2| = |-M_{12}/M_{11}|^2 \quad (7)$$

## 2 仿真结果

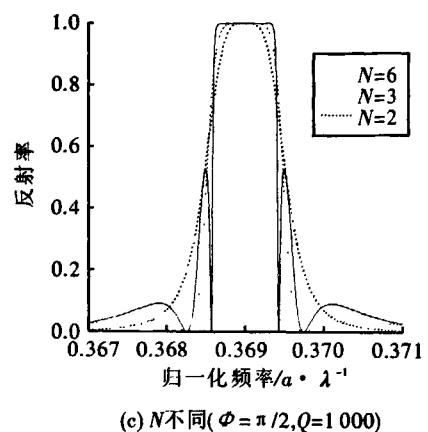
从理论可以看出, 光子晶体滤波器的反射谱与谐振腔的频率  $\omega_0$ 、品质因子  $Q$ 、相移  $\Phi$  和谐振腔的个数  $N$  有关。谐振腔的频率  $\omega_0$  决定反射谱的中心波长位置, 它们的关系如图 3 所示。



(a) 相移  $\Phi$  不同( $Q=1000, N=3$ )



(b)  $Q$  不同( $\Phi=\pi/2, N=3$ )



(c)  $N$  不同( $\Phi=\pi/2, Q=1000$ )

图 3 边带耦合滤波器不同参数的反射谱的比较

Fig. 3 Comparison of reflection spectrum of side-coupled filter with different parameters

图 3(a) 显示了 3 个不同相位分别为  $\pi/4, \pi/2$  和  $\pi$  的光子晶体滤波器的反射谱, 横坐标为归一化频率, 从图中可以看出: 当相移为  $n\pi/2$  时, 反射谱比较平滑, 且高度对称。当  $n$  为奇数时, 反射谱的峰值宽度更大且下降得更加迅速。

从图 3(b) 和 (c) 中可以看出: 当滤波器中所有谐振腔的相移都相同时, 且相移为  $(n+1/2)\pi$ , 随着品质因子  $Q$  的增加反射谱的带宽减小。随着  $N$  的增加, 峰值反射率的宽度增加, 当  $N \geq 3$ , 开始出现旁瓣。因此, 为了获得更宽更平坦的反射峰, 可以增加谐振腔的个数。随着  $N$  增加, 因为破坏了光子晶体的周期性, 旁瓣变得很大, 为了抑制旁瓣, 可以采用和一维光子晶体(光栅)类似的方法: 1) 切趾技术, 即修改波导与谐振腔的耦合系数, 使之沿着波导方向成某种函数的关系, 如高斯函数等, 但是这种技术在光子晶体中很难实现; 2) 喇叭技术, 修改两谐振腔之间的距离, 使之随着波导传输方向位置量的增加而增加(或减小), 即修改谐振腔的周期, 使之不再均匀地排列在波导两边; 3) 级联技术, 即将不同谐振频率的谐振腔级联。

采用喇叭和级联技术的边带耦合滤波器的反射谱如图 4 和图 5 所示。图 4 为采用谐振腔之间的距离分别为  $(n+1/2)\pi$  和  $n\pi$  ( $n=2$ , 均满足反射谱高度对称) 交替出现的 6 个谐振腔所得到的反射谱。图 5 将每个谐振腔的中心谐振频率成等差数列增加, 第一个谐振腔中心频率为 0.369 1(归一化频率), 增量为 0.000 1。

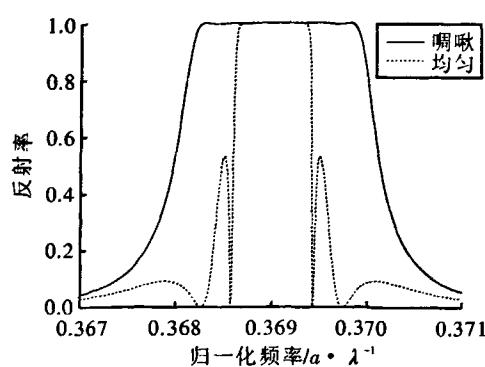


图 4 6 个谐振腔的边带耦合滤波器采用非均匀相位和均匀相位的反射谱比较

Fig. 4 Comparison of reflection spectrum of side-coupled filter with 6 resonators adopting uniform phase (dotted line) and non-uniform phase (solid line)

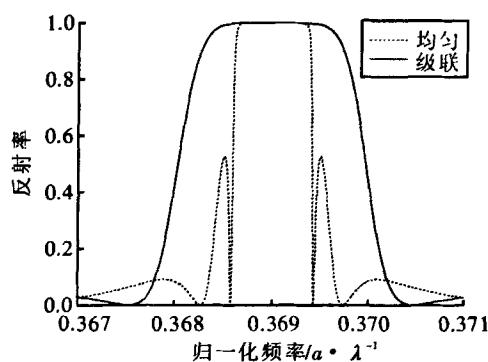


图 5 边带耦合滤波器的 6 个谐振腔采用不同谐振频率与统一谐振频率的反射谱比较

Fig. 5 Comparison of reflection spectrum of side-coupled filter with 6 resonators adopting uniform resonant frequency (dotted line) and non-uniform resonant frequency (solid line)

从图中可以看出,采用啁啾技术旁瓣减小得很快,且反射谱的宽度增加了。采用级联技术可以拓宽带宽,并且有效地抑制了旁瓣,合理地选择  $\omega_0$  和  $Q$  值可以设计所需要的带宽的滤波器。

### 3 总结

本文通过耦合模理论,用传输矩阵分析了边带耦合光子晶体滤波器在参数改变情况下的反射光谱特性。当相移为  $n\pi/2$ ,反射谱具有对称性。随着  $Q$  值增加,反射峰带宽减小。随着  $N$  增大,反

射峰带宽相应增大,旁瓣也随之出现。为了抑制旁瓣,提出采用啁啾和级联技术,即改变了谐振腔的周期和谐振频率,使得旁瓣得到了很好的抑制,并且可以获取适当的带宽。在具体设计时应综合考虑多方面因素,掌握这些变化规律对于设计具体光子晶体滤波器有一定的指导意义。

### 参考文献:

- [1] JOHN S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices[J]. Physical Review Letters, 1987, 58(23): 2486-2489.
- [2] HEINZEN D J, CHILDS J J, THOMAS J E, et al. Enhanced and inhibited visible spontaneous emission by atoms in a confocal resonator[J]. Physical Review Letters, 1987, 58(13): 1320-1323.
- [3] 张宁, 纪越峰. 光子晶体及其在光通信中的应用研究[J]. 光通信技术, 2004(7): 4-8.  
ZHANG Ning, JI Yue-feng. Study on photonic crystal and its applications in optical communication[J]. Optical Communication Technology, 2004 (7): 4-8. (in Chinese with an English abstract)
- [4] 王海松, 李康, 孔凡敏, 等. 高效多信道光子晶体滤波器的设计与仿真[J]. 光子学报, 2008, 37(6): 1122-1125.  
WANG Hai-song, LI Kang, KONG Fan-min, et al. Design and simulation of high effective multi-channel photonic crystal filters[J]. Acta Photonica Sinica, 2008, 37(6): 1122-1125. (in Chinese with an English abstract)
- [5] 许桂雯, 欧阳征标, 安鹤男, 等. 光子晶体缺陷模的带宽与品质因子研究[J]. 光子学报, 2003, 32(9): 1079-1082.  
XU Gui-wen, OU-YANG Zheng-biao, AN He-nan, et al. Investigation on the bandwidth and quality factor of the defect mode in a photonic crystal with a defect[J]. Acta Photonica Sinica, 2003, 32(9): 1079-1082. (in Chinese with an English abstract)
- [6] 张兴娇, 叶志清. 基于非均匀取样布拉格光纤光栅 Interleaver 的设计[J]. 应用光学, 2009, 30(2): 313-316.  
ZHANG Xing-jiao, YE Zhi-qing. Design of optical Interleaver based on non-uniformly sampled FBG[J]. Journal of Applied Optics, 2009, 30(2): 313-316. (in Chinese with an English abstract)

## 微波滤波器设计培训——视频课程

易迪拓培训([www.edatop.com](http://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>