

光子晶体与光子准晶复合型上下载滤波器

赵亚飞¹, 王梓名¹, 蒋忠君¹, 陈 娴¹, 岳晨曦¹, 王珺仲¹, 刘建军^{1,2,*}

(1. 湖南大学 物理与微电子科学学院, 微纳光电器件及应用教育部重点实验室, 湖南 长沙 410082;

2. 纽约州立大学布法罗分校, 激光、光子学及生物光子学研究所, 美国 布法罗 14260)

摘要: 基于二维正方晶格光子晶体与十二重 Stampfli 型光子准晶提出了单环形腔上下载滤波器及双环形腔串联上下载滤波器. 分析并对比了两种上下载滤波器的传输效率随光子准晶介质柱半径及折射率大小的变化规律, 且对比了两种上下载滤波器的品质因数随环形腔中心介质柱半径及折射率大小的变化规律. 结果表明, 双环形腔串联复合型上下载滤波器的性能优于单环形腔复合型上下载滤波器. 研究结果将为设计及制备优良上下载滤波器器件提供一定指导作用.

关键词: 光子晶体; 光子准晶; 上下载滤波器; 传输效率; 品质因数

中图分类号: O734 **文献标识码:** A

Add-drop filter with compound structures of photonic crystal and photonic quasicrystal

ZHAO Ya-Fei¹, WANG Zi-Ming¹, JIANG Zhong-Jun¹, CHEN Xian¹, YUE Chen-Xi¹,
WANG Jun-Zhong¹, LIU Jian-Jun^{1,2,*}

(1. Key Laboratory for Micro-/Nano-Optoelectronic Devices of Ministry of Education,
School of Physics and Electronics, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. Institute for Lasers, Photonics and Biophotonics, State University of New York at Buffalo, Buffalo 14260, USA)

Abstract: In this paper, based on two-dimensional square lattice photonic crystal and twelve-fold Stampfli-type photonic quasicrystal (PQC), a single-ring-cavity add-drop filter and a double-ring-cavity-cascade add-drop filter are proposed. The dependence of the transmission efficiency of the two filters on the radius and the refractive index of the dielectric rod in the PQC were analyzed and compared. The dependence of the quality factor of the two filters on the radius and the refractive index of the dielectric rod in the center of the ring-cavity were also analyzed and compared. The results show that the performance of the double-ring-cavity-cascade add-drop filter is better than that of the single-ring-cavity add-drop filter. The research results will be helpful for the design and the fabrication of the high-quality add-drop filter devices.

Key words: photonic crystal, photonic quasicrystal, add-drop filter, transmission efficiency, quality factor

PACS: 42. 60. Da, 42. 72. Ai, 42. 70. Qs, 42. 82. Et

引言

光子准晶^[1], 是一种特殊的光子晶体^[2], 其结构具有准周期性(即长程取向序与旋转对称性^[3]). 光子准晶结构的特殊性使其不需引入缺陷即可实现

光子局域^[4]. 相比周期光子晶体, 其局域特性更特殊, 且大大提高了直波导和弯曲波导能量传输效率^[5-6]. 利用光子准晶这种特性, 可设计制备出高性能微腔激光器^[7]及比普通光子晶体光纤^[8]更优双折射特性、非线性特性及色散特性的光子准晶光

收稿日期: 2016-06-27, 修回日期: 2017-01-20

基金项目: 国家自然科学基金(61405058)

Foundation items: Supported by the National Natural Science Foundation of China (61405058)

作者简介 (Biography): 赵亚飞(1995-), 汉族, 男, 新疆博乐人, 本科生, 主要研究领域为光子晶体器件. E-mail: zhaoyafei1302@163.com

* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: jianjun.liu@hnu.edu.cn

Received date: 2016-06-27, **revised date:** 2017-01-20

纤^[9-14]. 光子准晶比周期光子晶体更易产生完全带隙^[15], 可结合全息光刻技术制造出低成本且高质量的硅衬底设备^[16]. 光子准晶良好的非线性频率转换特性, 使其在光开关上具有重要应用^[17]. 光子准晶各向同性效应, 大大提高了对光的提取效率, 使其在发光二极管(LED)方面也取得重大突破^[18-20]. 光子准晶结构不具有平移对称性, 因而在不同位置引入缺陷可产生不同缺陷模式^[1, 21], 其丰富的缺陷模式使其在制备选频器件及滤波器^[22]上更具优势.

光子准晶滤波器的重要性能参数为传输效率 T 与品质因数 Q . 传输效率 T 为输出光与输入光强度之比, 其值高低体现微纳光子器件对光传输性能之强弱. 品质因数 Q 是微环谐振腔的重要特性参数, 其值越大, 透射谱在谐振点附近谱线越窄, 损耗越小, 滤波特性越好. Romero-Vivas 等^[22]提出了八重光子准晶上下载滤波器, 其传输效率虽达到了 95%, 但其品质因数仅为 700 左右. Mehdizadeh 等^[23]基于十二重 Stampfli 型光子准晶的结构单元与二维正方晶格光子晶体提出了以光子晶体为主且以光子准晶为辅的上下载滤波器, 虽其传输效率接近 1, 但品质因数只达到 344. Vasconcelos 等^[24]通过引入不同序列, 如佩尔序列、斐波那契序列、Thue - Morse 序列及双周期置换序列以调节光子准晶结构滤波器性能, 但效果仍不理想. 因此, 在保证高传输效率的前提下, 如何提高品质因数已成为光子准晶滤波器现阶段研究的重要课题.

光子晶体微结构器件的传输效率及品质因数与器件的结构参数及材料参数密切相关, 也即晶格常数及介质柱形状、大小、排列方式、介电常数及折射率等都影响上下载滤波器在特定波长下的传输效率及品质因数. 为了获得更高品质因数的上下载滤波器, 可通过两种方式: 采用新型结构(如十重、十二重准晶结构), 或改变材料参数(如介电常数、折射率). 本文基于二维正方晶格光子晶体与十二重 Stampfli 型光子准晶设计了单环形腔及双环形腔串联的复合型上下载滤波器. 其结构可分为空气孔型与介质柱型, 空气孔型光子晶体虽易制备, 但其表面的反射率较高, 为降低其反射率, 往往需在其表面设计复杂的光栅结构^[25], 介质柱型光子晶体表面的散射子本身可构成光栅结构. 因此, 本文只研究了介质柱型上下载滤波器, 分析了其传输效率随光子准晶介质柱半径及折射率变化规律, 以及品质因数随环形腔中心介质柱半径及折射率变化规律. 另外, 通过调整光子准晶和光子晶体两种结构, 可设计不同波长

上下载滤波器, 即复合型结构增加了器件调节的灵活性.

1 结构与算法

十二重 Stampfli 型光子准晶的形成过程^[26], 如图 1(a) ~ 1(d). 十二重 Stampfli 型光子准晶基本单元格子是由正三角形及正方形按一定规律组合而成的正十二边形, 如图 1(a). 因十二重 Stampfli 型光子准晶自相似因子为 $\delta = 3.732 00$, 将其基本单元格子按 $1/\delta = 0.267 95$ 比例缩小, 如图 1(b). 图 1(a) 中的每个格点放置缩小的基本单元格子, 形成自相似性结构, 如图 1(c). 将图 1(c) 中的每个格点放置散射子(本文为介质柱)形成图 1(d), 即为十二重 Stampfli 型光子准晶结构. 将图 1(d) 中蓝实线左侧散射子去掉且右侧散射子以蓝实线为基准镜像对称可得图 1(e). 将图 1(d) 和图 1(e) 中只保留红虚线范围内部分并将红色散射子去除, 剩余部分与二维正方晶格光子晶体复合, 分别构成了单环形腔及双环形腔串联的复合型上下载滤波器, 如图 1(f)、图 1(g).

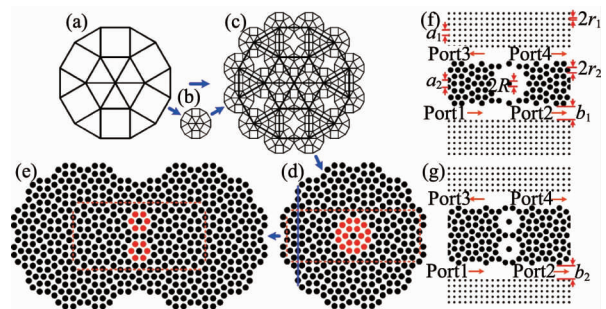


图 1 十二重 Stampfli 型光子准晶的形成及光子晶体与光子准晶复合型上下载滤波器结构: (a) 基本单元格子, (b) 缩小的基本单元格子, (c) 结构的自相似性, (d) 十二重 Stampfli 型光子准晶, (e) 双环形腔串联上下载滤波器所用光子准晶初始结构, (f) 单环形腔上下载滤波器, (g) 双环形腔串联上下载滤波器

Fig. 1 Formation of dodecagonal Stampfli-type PQC and structure of add-drop filter composed of photonic crystal and photonic quasicrystal: (a) basic unit lattice, (b) contractible basic unit lattice, (c) self-similarity of the structure, (d) dodecagonal Stampfli-type PQC, (e) initial structure of double-ring-cavity-cascade add-drop filter, (f) single-ring-cavity add-drop filter, (g) double-ring-cavity-cascade add-drop filter

在图 1(f)、图 1(g) 中, 直波导由光子晶体与光子准晶复合而成. 下方直波导中的光波从端口 Port1 输入引起环形腔极化强度的扰动, 发生耦合行为产生能量交换, 环形腔使特定共振频率光波局域在环形腔中, 然后再与上方直波导发生耦合使特定频率

光波从端口 Port3 输出,对特定频率以外的频点进行有效滤除,以此达到滤波效果.无特殊说明下,中光子晶体及光子准晶中的介质柱折射率 $n = 3$,介质柱半径分别为 $r_1 = 0.2 \mu\text{m}$ 、 $r_2 = 0.5 \mu\text{m}$,晶格常数分别为 $a_1 = 1 \mu\text{m}$ 、 $a_2 = 1.33 \mu\text{m}$,环形腔中介质柱半径 $R = 0.5 \mu\text{m}$,光子晶体与光子准晶的间距,即通道宽度分别为 $b_1 = 2 \mu\text{m}$ 、 $b_2 = 2.5 \mu\text{m}$.

采用时域有限差分法^[27](FDTD)对光波传输进行计算分析.FDTD 具有近似少、精度高、简单直观且能求解分析任意形状微结构物理及光学特性,已被广泛应用于计算电磁学领域及光子晶体领域,其基本原理是:把电磁场中的电场和磁场分量在时间和空间上采取交替抽样的离散方式,每个电场(或磁场)周围有四个磁场(电场)分量环绕,在 Yee 氏网格空间中,麦克斯韦旋度方程直接被离散化为差分方程,且电场和磁场在时间上交替更新.也即,空间中的电场(或磁场)分量仅与其相邻磁场(或电场)分量及上一时间步该点场值有关,且随时间步的推进,可直接模拟电磁波(光波)的传播过程.

为使数值稳定而收敛,需根据空间步长限制时间步长,即二者不独立,其取值存在约束条件.对于本文中二维光子准晶结构,FDTD 计算的时间步长及空间步长的设置满足稳定性条件:

$$\Delta t \leq \frac{1}{c \sqrt{\frac{1}{(\Delta x)^2} + \frac{1}{(\Delta z)^2}}}, \quad (1)$$

式(1)中空间步长与时间步长值分别设为: $\Delta x = \Delta z = 0.02 \mu\text{m}$, $\Delta t = 0.04 \mu\text{s}$ 满足此不等式(1).

2 结果与讨论

2.1 光子带隙

对于图 1(f)、图 1(g)中直线光波导,需分析光子晶体的光子带隙特性,使处于带隙中的波长不传输于光子晶体而传输于光子晶体与光子准晶间的波导中,也即光子带隙特性可使滤波器以最大限度提高传输效率.因平面波展开法^[28]的物理概念清晰、理论推导简单、信息量丰富且已广泛应用于研究新型光子晶体及其微纳光子器件的能带结构与带隙特性,本文采用平面波展开法计算分析光子带隙.另外, TM 模式的谐振频率不受腔体厚度限制^[29],相比于普通波导滤波器和 TE 模式波导滤波器结构, TM 模式下滤波器结构更紧凑,易与其它微结构光子器件集成.因此,本文只研究 TM 模式下的上下载滤波器特性.

采用平面波展开法可计算得到光子晶体的 TM 能带结构,如图 2 所示.

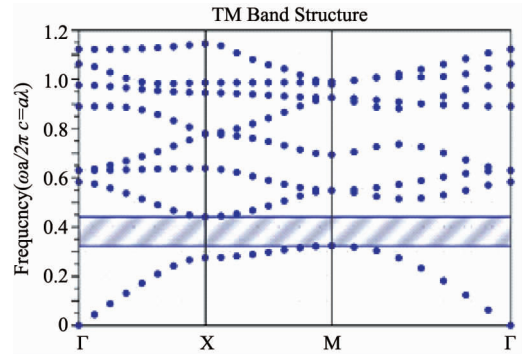


图 2 光子晶体能带结构
Fig. 2 Band structure of the photonic crystal

由图 2 易知,光子晶体的光子带隙归一化频率为: $f \in [0.317, 0.441]$.为使光波在图 1 所示光波导中传输而不进入光子晶体中,可在光子带隙中任取归一化频率值.本文取值 $f = 0.343$,由 $f = a_1/\lambda$ 及 $a_1 = 1 \mu\text{m}$,可得 $\lambda = 2.91 \mu\text{m}$.该波长接近中红外波段且处于水汽吸收带位($2.4 \sim 3.3 \mu\text{m}$)和大气透明窗口之中,在生物化学方面的光谱分析、空间遥感、污染监测、分子基因的振动及转动能级,以及医疗方面都具有重要应用^[30-33].

2.2 传输效率

(1) 传输效率与入射波长的关系

传输效率即为 Port3 输出能量与 Port1 输入能量之比. $2.91 \mu\text{m}$ TM 偏振光在单环形腔上下载滤波器与双环形腔串联上下载滤波器中的传输场,如图 3 所示.

在保证其它参数不变的情况下,以步长 $\Delta \lambda = 0.005 \mu\text{m}$ 改变波长 λ ,取 $\lambda \in [2.860 \mu\text{m}, 2.960 \mu\text{m}]$ 时,经多次计算可得传输效率与波长变化关系,如图 4 所示.

由图 4 可知,随着波长增大,传输效率先增加后减小,且单环形腔上下载滤波器与双环形腔串联上下载滤波器均在波长 $\lambda = 2.915 \mu\text{m}$ 处取得峰值,其值分别为:87.45%、92.77%.

(2) 传输效率与光子准晶介质柱半径的关系

在保证其它参数不变的情况下,以步长 $\Delta r_2 = 0.001 \mu\text{m}$ 改变介质柱半径 r_2 ,且 R 与 r_2 相同变化.当选取 $r_2 \in [0.480 \mu\text{m}, 0.510 \mu\text{m}]$ 时,上下载滤波器有较明显的滤波特性.经多次数值计算,可得到两种结构传输效率与光子准晶介质柱半径变化关系,如图 5 所示.

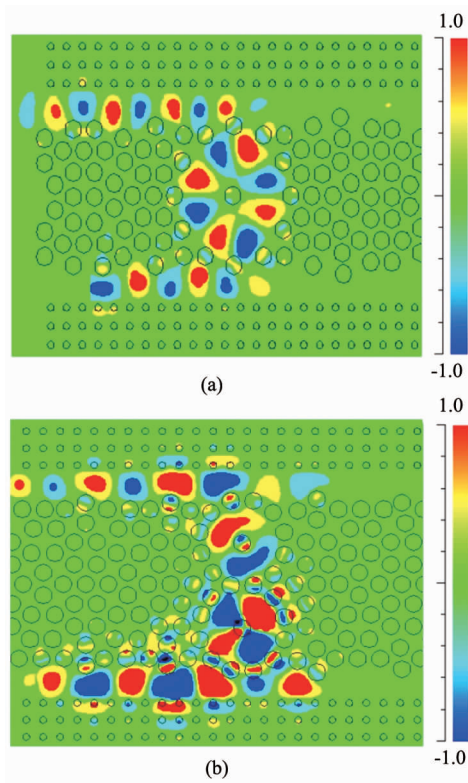


图3 两种上下载滤波器的光传输场分布:(a)单环形腔上下载滤波器,(b)双环形腔串联上下载滤波器

Fig. 3 Field distribution of light transmission in the two add-drop filters: (a) single-ring-cavity add-drop filter, (b) double-ring-cavity-cascade add-drop filter

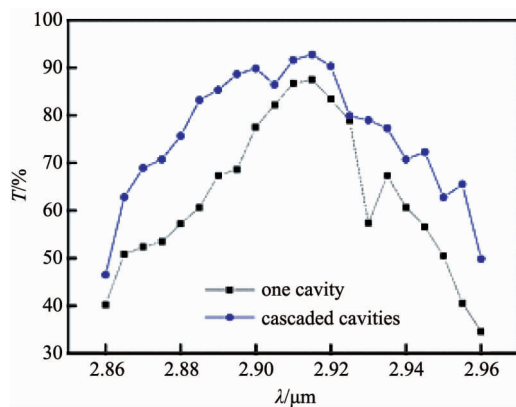


图4 两种上下载滤波器传输效率与入射波长的关系
Fig. 4 Incidence wavelength dependence of the transmission efficiency of the two add-drop filters

由图5易知,两种上下载滤波器的传输效率随介质柱半径变化总趋势是先增大后减小且存在振荡变化.单环形腔上下载滤波器在 $r_2 = 0.502 \mu\text{m}$ 时传输效率最高达到94.74%,而双环形腔串联上下载滤波器在 $r_2 = 0.498 \mu\text{m}$ 时传输效率最高达到

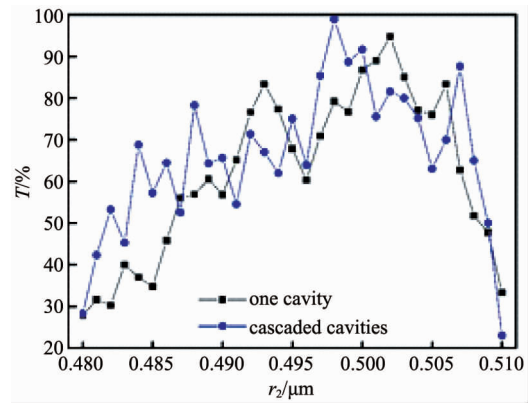


图5 两种上下载滤波器传输效率与光子准晶介质柱半径的关系
Fig. 5 Radius of the dielectric rod in the PQC dependence of the transmission efficiency of the two add-drop filters

98.89%,该传输效率优于文献[22]的传输效率95%.当介质柱半径开始增大时,填充比也随之增大,使得光子准晶的相对能带宽度也相应增大,从而使传输效率随之增大,当达到最佳填充比时介质柱半径继续增大则使光子准晶相对能带宽度随之减小,从而使传输效率也随之变小^[34].通过对比发现,在相同介质柱半径下,单环形腔上下载滤波器的传输效率总体上小于双环形腔串联上下载滤波器的传输效率.其原因在于,单环形腔结构输出谱线两侧的滚降(即:滤波器并不能够将期望频率范围外的所有频率完全衰减掉,尤其是在所要的通带外还有一个被衰减但是没有被隔离的范围)并不能很好的解决信道之间的串扰,这也是单环腔结构的固有局限性,而双环形腔串联结构却能使输出光谱得到很好的优化,同时减少信道之间的串扰,其传输效率也会相应提高^[35].

(3) 传输效率与光子准晶介质柱折射率的关系

在保证其它参数不变的情况下,以步长 $\Delta n = 0.001$ 改变介质柱折射率 n .当 $n \in [2.980, 3.020]$ 时,经多次数值计算,可得到两种上下载滤波器的传输效率与光子准晶介质柱折射率变化关系,如图6所示.

由图6易知,两种上下载滤波器的传输效率随介质柱折射率变化总趋势是先增大后减小且存在振荡变化,与介质柱半径变化下的总趋势类似.双环形腔串联上下载滤波器的传输效率比单环形腔上下载滤波器的传输效率更稳定,其稳定性在介质柱折射率 $n \in [2.986, 3.010]$ 范围表现更突出.双环形腔

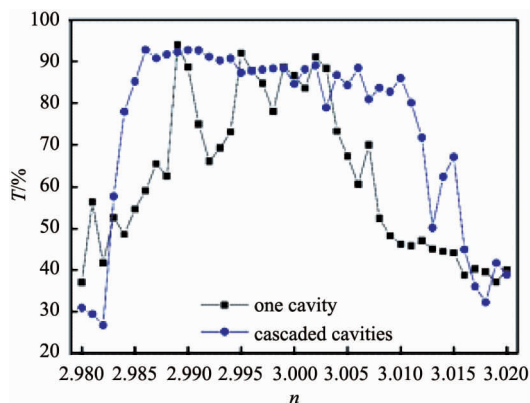


图6 两种上下载滤波器传输效率与光子准晶介质柱折射率的关系

Fig. 6 Refractive index of the dielectric rod in the PQC dependence of the transmission efficiency of the two add-drop filters

串联上下载滤波器在介质柱折射率 $n = 2.986$ 时的传输效率最高可达 97.37% (优于文献[22]的传输效率 95%), 而单环形腔上下载滤波器在介质柱折射率 $n = 2.989$ 时的传输效率最高只达 94.00%.

2.3 品质因数

(1) 品质因数与环形腔中心介质柱半径的关系

设 U_0 为腔内 t_0 时刻所监测到的能量, $U(t)$ 为腔内 t 时刻所监测到的能量, 为衰减因子, 则:

$$U(t) = U_0 \exp(-\alpha t) \quad (2)$$

设 f 为入射光频率, 则滤波器品质因数为:

$$Q = 2\pi f / \alpha \quad (3)$$

因十二重 Stamfli 型结构特征, 中心介质柱半径取值 $R \in [0 \mu\text{m}, 1 \mu\text{m}]$, 并设计算步长 $\Delta R = 0.001 \mu\text{m}$. 经数值计算可得到两种上下载滤波器品质因数与环形腔中心介质柱半径变化关系, 如图 7 所示.

由图 7 可知, 单环形腔上下载滤波器的品质因数随环形腔中心介质柱半径增大而在 700 左右波动. 当 $R = 0.325 \mu\text{m}$ 时, 品质因数最高达到了 733. 双环形腔串联上下载滤波器的品质因数随环形腔中心介质柱半径变化的总趋势是先增大后减小且振荡变化, 品质因数几乎均在 700 以上; 当 $R = 0.625 \mu\text{m}$ 时, 品质因数最高达到了 3122, 该品质因数远高于文献[22-23]中的品质因数 700 和 344. 本文提出的双环形腔串联上下载滤波器结构属于弱周期耦合谐振光波导 (Coupled Resonator Optical Waveguide, CROW) 结构^[36]. 由紧束缚近似理论和布洛赫定理可知, 由于谐振腔尺寸减小, 群速度增大, 衰减常数减小^[37], 因此在 $R \in [0 \mu\text{m}, 0.625 \mu\text{m}]$ 时, 品质因

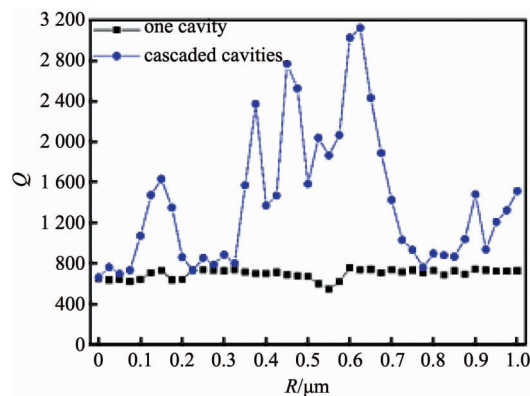


图7 两种上下载滤波器品质因数与腔内介质柱半径的关系

Fig. 7 Radius of the dielectric rod in the cavity dependence of the quality factor of the two add-drop filters

数随环形腔内介质柱半径的增大而增大; 当中心介质柱半径超过 $0.625 \mu\text{m}$ 时, 由于结构、材料参数等因素综合影响, 使谐振腔中心介质柱尺寸对腔内衰减损耗不再起主导作用, 此时 R 继续增大使谐振频率随之增大而导致群速度减小, 衰减常数有所增大, 导致品质因数出现下降.

(2) 品质因数与环形腔中心介质柱折射率的关系

以步长 $\Delta n = 0.1$ 改变环形腔中心介质柱折射率 n , 研究上下载滤波器的品质因数随环形腔中心介质柱折射率的变化规律. 当 $n \in [1, 4]$ 时, 经多次计算可得到两种上下载滤波器品质因数与环形腔中心介质柱折射率变化关系, 如图 8 所示.

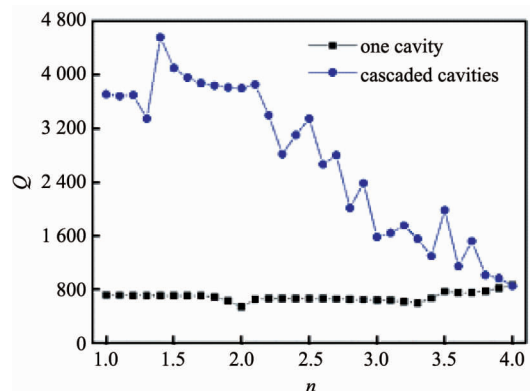


图8 两种上下载滤波器品质因数与腔内介质柱折射率的关系

Fig. 8 Refractive index of the dielectric rod in the cavity dependence of the quality factor of the two add-drop filters

由图 8 可知, 单环形腔上下载滤波器的品质因数随环形腔中心介质柱折射率增大而在 700 左右波

动.当 $n=4$ 时,品质因数最高达到了 868.随环形腔中心介质柱折射率增大,双环形腔串联上下载滤波器的品质因数总体呈现减小且振荡变化趋势,且品质因数均大于 800;当 $n=1.4$ 时,其品质因数最高达到了 4 558,该品质因数远高于文献[22-23]的品质因数 700 和 344.因弱周期耦合谐振光波导(CROW)结构且由紧束缚近似理论及布洛赫定理可知,若环形腔中心介质柱折射率增大,则群速度减小,衰减常数增大^[37],即导致品质因数随环形腔中心介质柱折射率增大呈现下降趋势.

综合以上 4 组数据(图 5-8)分析可知,在 2.91 μm TM 偏振光下,光子晶体与光子准晶复合型上下载滤波器(在光子准晶介质柱、环形腔中心介质柱的半径及折射率一定变化范围内)的传输效率、品质因数均具有一定规律性,且双环形腔串联上下载滤波器的性能参数及其稳定性明显优于单环形腔上下载滤波器.另外,本文研究的滤波器是由周期结构与准周期结构复合而成,其准周期结构部分不具有平移对称性,也即单调增加介质柱的半径及折射率,滤波器的品质因数曲线会出现不规则振荡变化.

3 结论

提出了光子晶体与光子准晶复合型单环形腔上下载滤波器及双环形腔串联上下载滤波器,采用时域有限差分法对比研究了两种滤波器在不同参数变化下传输效率及品质因数的变化规律.

(1)随着光子准晶介质柱半径及折射率的增大,两种上下载滤波器的传输效率基本呈现先增大后减小且振荡变化趋势.

(2)随着环形腔中心介质柱半径的增大,双环形腔串联上下载滤波器的品质因数呈现先增大后减小且振荡变化趋势,单环形腔上下载滤波器的品质因数则基本不变.

(3)随着环形腔中心介质柱折射率的增大,双环形腔串联上下载滤波器的品质因数呈现减小变化趋势,单环形腔上下载滤波器的品质因数则基本不变.

(4)双环形腔串联上下载滤波器的传输效率及品质因数均优于单环形腔上下载滤波器.

以上研究结果将为设计及制备更加优良的上下载滤波器件提供一定指导作用.

References

[1] Chan Y S, Chan C T, Liu Z Y. Photonic band gaps in two

dimensional photonic quasicrystals [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1998, **80**(5): 956-959.

- [2] Huang Y, Gong-Ying L, Ge H, *et al.* Analysis for optical transmission characteristic of $\text{Fe}_3\text{O}_4 @ \text{TiO}_2$ core @ shell colloidal photonic crystals [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (黄岩,梁工英,霍格,等. $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ 核壳结构胶体光子晶体的光学传输特性分析. *红外与毫米波学报*), 2015, **34**(2): 150-156.
- [3] Shechtman D, Blech I, Gratias D, *et al.* Metallic phase with long-range orientational order and no translational symmetry [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1984, **53**(20): 1951-1953.
- [4] Wang Y, Hu X, Xu X, *et al.* Localized modes in defect-free dodecagonal quasiperiodic photonic crystals [J]. *Phys. Rev. B*, 2003, **68**(16): 1651061-1651064.
- [5] Jin C, Cheng B, Man B, *et al.* Band gap and wave guiding effect in a quasiperiodic photonic crystal [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1999, **75**(13): 1848-1850.
- [6] Shen Y, Wang G, Yu G, *et al.* Multiple slow light bands in photonic crystal coupled resonator optical waveguides constructed with a portion of photonic quasicrystals [J]. *Phys. Lett. A*, 2011, **375**(3): 712-715.
- [7] Guerrero G, Boiko D, Kapon E. Photonic crystal heterostructures implemented with vertical-cavity surface-emitting lasers [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(20): 4922-4928.
- [8] Yang T Y, Jiang H M, Wang E L, *et al.* Photonic crystal fibers with large birefringence and high nonlinearity in near-infrared band [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (杨天宇,姜海明,王二垒,等. 一种近红外波段的高双折射高非线性光子晶体光纤. *红外与毫米波学报*), 2016, **35**(3): 350-354.
- [9] Zhao H, Zaccaria R P, Verma P, *et al.* Validity of the V parameter for photonic quasi-crystal fibers [J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(7): 1064-1066.
- [10] Zhao H, Zaccaria R P, Verma P, *et al.* Single-mode operation regime for 12-fold index-guiding quasicrystal optical fibers [J]. *Appl. Phys. B*, 2010, **100**(3): 499-503.
- [11] Bhattacharjee R, Senthilnathan K, Sivabalan S, *et al.* Designing photonic quasi-crystal fibers of various folds: onto optimization of efficiency and bandwidth of second harmonic generation [J]. *Appl. Opt.*, 2014, **53**(13): 2899-2905.
- [12] Liu H F, Xiao W, Cai W C, *et al.* Photonic quasi-crystal fiber with high birefringence [J]. *Opt. Eng.*, 2016, **55**(3): 036101-1-036101-5.
- [13] Cai W C, Liu E X, Feng B, *et al.* Dispersion properties of a photonic quasi-crystal fiber with double cladding air holes [J]. *Optik*, 2016, **127**(10): 4438-4442.
- [14] Cai W C, Liu E X, Feng B, *et al.* Dodecagonal photonic quasi-crystal fiber with high birefringence [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 2016, **33**(10): 2108-2114.
- [15] Fan Z, Liu J, Chen S, *et al.* Comparative study of photonic band gaps of germanium-based two-dimensional triangular-lattice and square-lattice and decagonal quasi-periodic photonic crystals [J]. *Microelectron. Eng.*, 2012, **96**(2012): 11-17.
- [16] Zito G, Priya Rose T, Di Gennaro E, *et al.* Bandgap properties of low - index contrast aperiodically ordered photonic quasicrystals [J]. *Microw. Opt. Techn. Lett.*, 2009, **51**(11): 2732-2737.
- [17] Ganany-Padoviz A, Juwiler I, Gayer O, *et al.* All-optical

- polarization switch in a quadratic nonlinear photonic quasi-crystal [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, **94**(9):091108 – 091108 – 3.
- [18] Huang H W, Huang J K, Kuo S Y, *et al.* High extraction efficiency GaN-based light-emitting diodes on embedded SiO₂ nanorod array and nanoscale patterned sapphire substrate [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, **96**(26): 263115 – 26315 – 3.
- [19] Lin J H, Chang W L, Lin H Y, *et al.* Enhancing light extraction efficiency of polymer light-emitting diodes with a 12-fold photonic quasi crystal [J]. *Opt. Express*, 2013, **21**(19):22090 – 22097.
- [20] Lewins C J, Allsopp D W E, Shields P A, *et al.* Light extracting properties of buried photonic quasi-crystal slabs in InGaN/GaN LEDs [J]. *J. Disp. Technol.*, 2013, **9**(5): 333 – 338.
- [21] Cheng S S M, Li L M, Chan C T, *et al.* Defect and transmission properties of two-dimensional quasiperiodic photonic band-gap systems [J]. *Phys. Rev. B*, 1999, **59**(6): 4091 – 4099.
- [22] Romero-Vivas J, Chigrin D N, Lavrinenko A V, *et al.* Resonant add-drop filter based on a photonic quasicrystal [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(3):826 – 835.
- [23] Mehdizadeh F, Alipour-Banaei H, Serajmohammadi S. Channel-drop filter based on a photonic crystal ring resonator [J]. *J. Opt.*, 2013, **15**(7):75401 – 75407.
- [24] Vasconcelos M S, Mauriz P W, Albuquerque E L. Optical filters based in quasiperiodic photonic crystal [J]. *Microelectron. J.*, 2009, **40**(4): 851 – 853.
- [25] Šmigaj W, Gralak B, Pierre R, *et al.* Antireflection gratings for a photonic-crystal flat lens [J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(22): 3532 – 3534.
- [26] Stampfli P. A dodecagonal quasi-periodic lattice in two dimensions [J]. *Helv. Phys. Acta*, 1986, **59**(6-7): 1260 – 1263.
- [27] Yee K S. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media [J]. *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 1966, **14**(3):302 – 307.
- [28] Liu J J, Fan Z G, Xiao H S, *et al.* Photonic band gap in Ge-based two-dimensional triangular lattice photonic crystals [J]. *Journal of Infrared Millimeter Waves*. 2012, **31**(1):35 – 41.
- [29] Bastioli S, Marcaccioli L, Tomassoni C, *et al.* Ultra-compact highly-selective dual-mode pseudoelliptic filters [J]. *Electron. Lett.*, 2010, **46**(2):147 – 149.
- [30] Wells J, Kao C, Jansen E D, *et al.* Application of infrared light for in vivo neural stimulation [J]. *J. Biomed. Opt.*, 2005, **10**(6):064003 – 064003 – 12.
- [31] Roggo Y, Chalup P, Maurer L, *et al.* A review of near infrared spectroscopy and chemometrics in pharmaceutical technologies [J]. *J. pharmaceut. biomed.*, 2007, **44**(3):683 – 700.
- [32] Bokobza L. Near infrared spectroscopy [J]. *J. Near Infrared Spec.*, 1998, **6**(1998):3 – 18.
- [33] Hu W D, Liang J, Yue F Y, *et al.* Recent progress of subwavelength photon trapping HgCdTe infrared detector [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (胡伟达, 梁健, 越方禹等. 新型亚波长陷光结构 HgCdTe 红外探测器研究进展. *红外与毫米波学报*), 2016, **35**(1): 25 – 36.
- [34] Yin J, Huang X, Liu S, *et al.* Photonic bandgap properties of 8-fold symmetric photonic quasicrystals [J]. *Opt. Commun.*, 2007, **269**(2):385 – 388.
- [35] Little B E, Chu S T, Haus H A, *et al.* Microring resonator channel dropping filters [J]. *J. of Lightwave Technol.*, 1997, **15**(6): 998 – 1005.
- [36] Yariv A, Xu Y, Lee R K, *et al.* Coupled-resonator optical waveguide: a proposal and analysis [J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(11): 711 – 713.
- [37] Poon J K S, Scheuer J, Mookherjee S. *et al.* Matrix analysis of microring coupled-resonator optical waveguides [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(1):90 – 103.