

文章编号: 1001-3806(2018)04-0550-06

左右手材料光子晶体的双重光学滤波功能

许江勇¹, 苏安², 周丽萍¹, 高英俊³, 谭福奎¹, 唐秀福²

(1. 兴义民族师范学院 物理与工程技术学院, 兴义 562400; 2. 河池学院 物理与机电工程学院, 宜州 546300; 3. 广西大学 物理科学与工程技术学院, 南宁 530004)

摘要: 为了设计高品质、高性能的光学滤波器件, 采用传输矩阵法, 研究左右手材料构成的光子晶体 $(HL)^m D^l (LH)^m$ 的窄带和宽带通道双重光学滤波功能, 并进行了计算机仿真。介质层 H 是左手或右手材料时, 随着排列周期数 m 增大, 在频率 ω/ω_0 奇数倍处均出现单条窄透射峰; 当 m 不等值变化时, ω/ω_0 奇数倍处透射峰透射率均下降且下降速度相同, 而 ω/ω_0 偶数倍处通带透射率不变; H 为左手材料时, ω/ω_0 偶数倍处还出现通带, 且 m 越大透射峰或通带越窄, ω/ω_0 奇数倍处及周围还出现多条窄透射峰。结果表明, 光子晶体由左右手材料组成时将得到更好的宽、窄带双重光学滤波效果及调制方法。该研究对新型光学滤波器件的研究和设计具有指导作用。

关键词: 材料; 光学滤波; 传输矩阵法; 左右手材料; 光子晶体

中图分类号: O431; O474 文献标志码: A doi: 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2018.04.022

Dual optical filtering function of photonic crystal made of left and right hand material

XU Jiangyong¹, SU An², ZHOU Liping¹, GAO Yingjun³, TAN Fukui¹, TANG Xiufu²

(1. College of Physics and Engineering Technology, Xingyi Normal University for Nationalities, Xingyi 562400, China; 2. Department of Physics and Mechanical & Electronic Engineering, Hechi University, Yizhou 546300, China; 3. College of Physical Science and Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: In order to design optical filter components with high-quality and high-performance, transfer matrix method was used to study the narrowband and broadband dual channel optical filtering function of photonic crystal $(HL)^m D^l (LH)^m$. Computer simulation was performed. The simulation results show that, whether the dielectric layer H is left hand material (LHM) or right hand material (RHM), with the increasing of cycle number m , a single narrow transmission peak always appears at odd times of ω/ω_0 . With irregular variations of m , the transmission rate of transmission peak at odd times of ω/ω_0 will decrease at the same speed and the transmission rate of pass band at even times of ω/ω_0 will unchanged. When H is LHM, more narrow transmission peaks appear at odd times of ω/ω_0 and pass band appears at even times of ω/ω_0 . The bigger m is, the narrower the bandwidth of transmission peak or pass band is. The results show that photonic crystal made of LHM and RHM will provide better narrowband and broadband dual channel filtering effect and modulation. The study has the guiding role in the research and design of new optical filters.

Key words: material; optical filtering; transmission matrix method; left and right hand material; photonic crystal

引言

光子晶体从概念诞生以来, 就被期待成为人为控制和利用光行为的新型光学材料, 因而一直是光通信材料领域的研究热点。光子晶体是由不同介电常数的薄膜介质按一定周期性排列而成的微结构材料, 电磁波在其中传播时, 光子晶体对电磁波频率具有选择性通过的功能, 即存在光子禁带和通带。当在光子晶体中恰当地引入缺陷时, 禁带中会出现透射率很高且带宽很窄的缺陷模(透射峰), 即光可以在缺陷中传

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51161003); 贵州省科技厅科技合作计划资助项目(黔科合 LH 字(2016)7039号); 贵州省黔西南州科技局科技计划资助项目(2014-3); 广西高等学校科学研究资助项目(KY2015YB258; KY2016LX287); 河池学院青年基金资助项目(XJ2015QN006)

作者简介: 许江勇(1978-), 男, 副教授, 硕士, 主要从事光子晶体方面的研究。

E-mail: xjiangyong@163.com

收稿日期: 2017-09-20; 收到修改稿日期: 2017-11-28

播,光子晶体的这种特性对研究和设计高品质、高性能的光学滤波器件具有积极的指导意义^[1-7]。常见的光子晶体薄膜介质材料的介电常量 ϵ 和磁导率 μ 均大于 0,由此可知它们的折射率亦是正值,光在这类材料中传播时,电场矢量 E 、磁场矢量 H 和波矢 k 满足右手螺旋法则,因此这类介质称右手材料(right hand material, RHM),或双正材料^[7-9]。1968 年 VESELAGO 通过 Maxwell 方程分析提出,当电磁波在负磁导率和负介电常数的材料中传播时电场矢量 E 、磁场矢量 H 和波矢 k 则满足左手螺旋法则,这种材料的 ϵ 和 μ 均小于 0,称为左手材料(left hand material, LHM),或双负材料^[9],其折射率为负($n = -\sqrt{\epsilon\mu}$)。

2001 年,美国 SMITH 等人成功研制具有负折射特性的左手材料,BERRIER 等人实验验证有效负折射率光子晶体中光通讯波段的负折射现象^[10];之后,LU 等人在微波段实现了有效负折射率光子晶体平板的次波长成像实验^[11];MOUSSA 等人设计出可发生负折射的三角形晶格微波波段 2 维光子晶体^[12];ZHANG 等人设计出近红外波段的金属双折射率材料光子晶体^[13]。LIU 等人根据 TE 模式和 TM 模式的折射效应设计出双折射偏振光分离器 2 维光子晶体^[14];德国的 DOLLING 等人研制出负折射率的 780nm 光波段金属材料 2 维光子晶体^[15]。随着研究进展,通过特殊设计的完全由电介质材料组成的左手材料光子晶体也相继实现^[16],如土耳其比尔肯特大学研究小组的白宝石介质棒组成的正方形晶格 2 维光子晶体,实现了左手材料特性^[17-18]。国内先后有浙江大学的 HE 团队也设计出具有有效负折射率光子晶体的偏振分离器和开口谐振腔^[19-20];北京师范大学物理系的 ZHANG 设计出对 TE 和 TM 偏振光具有相同的有效负折射率的金属棒结构 2 维光子晶体^[21];中国科学院物理研究所 FENG 等人设计出具有有效负折射率的光子晶体^[22]。可见,左手材料光子晶体已经从理论研究走向了实验制备,随着制备工艺的不断完善以及对左手材料特殊物理特性研究的深入,左手材料光子晶体应用研究和设计将进入一个新的热潮^[23]。

基于此,本文中在构造左右手材料光子晶体模型 $(HL)^m D^l (LH)^m$ 的基础上,利用传输矩阵法理论,通过计算机数值计算和可视化仿真,对比分析 H 为左手材料和右手材料时光子晶体传输特性的异同,找出光传输特性及其调制规律,为新型光学滤波器件的研究和设计提供指导。

1 研究模型和方法

构造和研究的左右手材料光子晶体模型为 $(HL)^m D^l (LH)^m$,不考虑色散,其中 H 介质层可为左手材料或右手材料,当其作为右手材料时是氟化镁,折射率 $n_H = 1.38$,光学厚度 $n_H d_H = \lambda_0/4$,当其作为左手材料时, $n_H = -1.38$,磁导率 $\mu_L = -1$, $n_H d_H = -\lambda_0/4$ 。L 和 D 介质层均为右手材料,其中 L 介质层为砷化镓, $n_L = 2.35$, $n_L d_L = \lambda_0/4$,D 介质层为碲化铅 $n_D = 4.1$, $n_D d_D = \lambda_0/2$,D 介质亦即插入到镜像对称结构光子晶体 $(HL)^m (LH)^m$ 中间的缺陷。 λ_0 是与光子晶体禁带中心频率 ω_0 对应中心波长, m 和 l 是光子晶体 $(HL)^m (LH)^m$ 与缺陷 D^l 的排列周期数,在计算中取正整数。

鉴于计算和研究的主要任务是左右手材料光子晶体的透射能带谱,因此研究方法采用相对成熟且比较简便、直观传输矩阵法^[2-7,24-25]。传输矩阵法在很多文献已经有详细的报道,在此不再赘述。

2 计算结果与分析

2.1 m 对双重滤波功能的调制

固定光子晶体 $(HL)^m D^l (LH)^m$ 的其它参量不变,取缺陷介质层 D 的排列周期数 $l = 1$,基本介质单元 $(HL)^m (LH)^m$ 的排列周期数 $m = 1, 2, 3, 4, 5$ 。由计算机软件 MATLAB 编程,通过计算机计算模拟,即可绘制出 H 为右手材料($n_H = 1.38$)和左手材料($n_H = -1.38$)时光子晶体 $(HL)^m D^l (LH)^m$ 的透射能带谱,如图 1 和

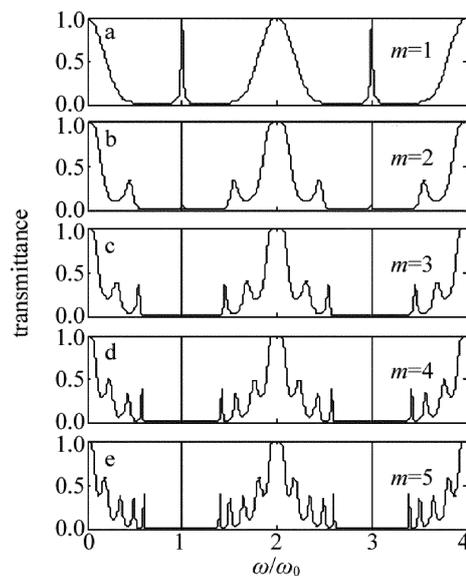


Fig. 1 Transmission spectrum for photonic crystals $(HL)^m D (LH)^m$ with $n_H = 1.38$

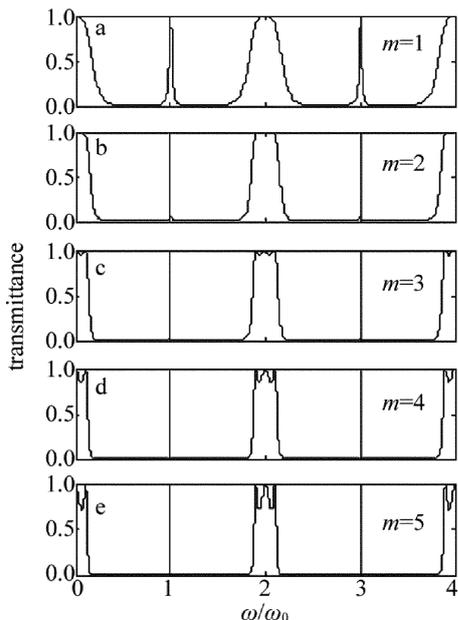


Fig. 2 Transmission spectrum for photonic crystals $(HL)^m D (LH)^m$ with $n_H = -1.38$

图 2 所示。图中横坐标单位为归一化频率 ω/ω_0 。

从图 1 可见,当 H 为右手材料 ($n_H = 1.38$) 时,光子晶体 $(HL)^m D (LH)^m$ 的透射能带谱由禁带和通带交替排列形成,而且禁带的中心出现一条精细的窄透射峰(缺陷模),即频率 ω/ω_0 奇数倍处出现窄透射峰,两条窄透射峰之间的频率 ω/ω_0 偶数倍处则出现通带。考虑图形周期性及文章篇幅,文中各图只绘制两个周期。随着周期数 m 增大,各禁带中心的透射峰和透射峰之间的通带位置不变,但它们的带宽变窄,而且当 m 增大到一定数值时通带出现严重的劈裂现象而发展成透射率比较低的透射峰。若以透射峰的半峰全宽(full width at half maximum, FWHM)计量带宽^[5-7],则频率 $1.00\omega/\omega_0$ 处的透射峰在 m 为 1,2,3,4,5 时的带宽 ΔW_1 分别为 $0.266 \times 10^{-1} \omega/\omega_0, 0.025 \times 10^{-1} \omega/\omega_0, 5.281 \times 10^{-4} \omega/\omega_0, 5.005 \times 10^{-4} \omega/\omega_0, 5.000 \times 10^{-4} \omega/\omega_0$, 而频率 $2.00\omega/\omega_0$ 处的中心通带对应各 m 值的带宽 ΔW_2 分别为 $4.137 \times 10^{-1} \omega/\omega_0, 3.106 \times 10^{-1} \omega/\omega_0, 2.543 \times 10^{-1} \omega/\omega_0, 2.197 \times 10^{-1} \omega/\omega_0, 1.967 \times 10^{-1} \omega/\omega_0$ 。可见,频率 ω/ω_0 处的透射峰或通带的带宽均变窄,如图 1a ~ 图 1e 所示。光子晶体的这种光传输特性对窄、宽带双重光学滤波器件的设计具有一定的指导价值。

当 $n_H = -1.38$,即 H 为左手材料时,如图 2 所示。光子晶体 $(HL)^m D (LH)^m$ 的透射能带谱由精细的窄透射峰和发育很完整的通带交替排列形成,整个能带谱可看成是一个带宽很宽的大禁带里交替出现透射峰和

透射带,窄透射峰处于禁带的频率 ω/ω_0 奇数倍处,能带处于禁带的频率 ω/ω_0 偶数倍处。随着周期数 m 增大,大禁带中的透射峰和通带频率位置也保持不变,但它们的带宽变窄。 $m = 1, 2, 3, 4, 5$ 时,频率 $1.00\omega/\omega_0$ 处的透射峰的带宽 ΔW_1 分别为 $0.273 \times 10^{-1} \omega/\omega_0, 0.026 \times 10^{-1} \omega/\omega_0, 3.111 \times 10^{-4} \omega/\omega_0, 2.510 \times 10^{-4} \omega/\omega_0, 2.500 \times 10^{-4} \omega/\omega_0$, 而频率 $2.00\omega/\omega_0$ 处通带对应的带宽 ΔW_2 分别为 $3.508 \times 10^{-1} \omega/\omega_0, 3.064 \times 10^{-1} \omega/\omega_0, 2.745 \times 10^{-1} \omega/\omega_0, 2.530 \times 10^{-1} \omega/\omega_0, 2.374 \times 10^{-1} \omega/\omega_0$ 。对比图 2 和图 1,特别值得注意的是,图 2 中大禁带中的通带随 m 增大带宽变窄的同时顶端劈裂比较微弱,即相比 H 为右手材料,当 H 为左手材料时光子晶体的通带更加完整。因此,由本光子晶体模型设计宽、窄带双重光学滤波器件时,可通过周期数 m 来调制滤波器各通道的品质,但当模型结构中的 H 介质层为左手材料时将会得到更好的滤波性能。

2.2 l 对双重滤波功能的调制

接着,固定光子晶体 $(HL)^m D^l (LH)^m$ 的其它参量不变,并固定基本单元介质 $(HL)^m (LH)^m$ 的排列周期数 $m = 5$,取缺陷介质层 D 的排列周期数 $l = 1, 2, 3, 4, 5$,也分别在介质 H 为右手材料 ($n_H = 1.38$) 和左手材料 ($n_H = -1.38$) 时模拟出光子晶体 $(HL)^5 D^l (LH)^5$ 的透射能带谱,如图 3 和图 4 所示。

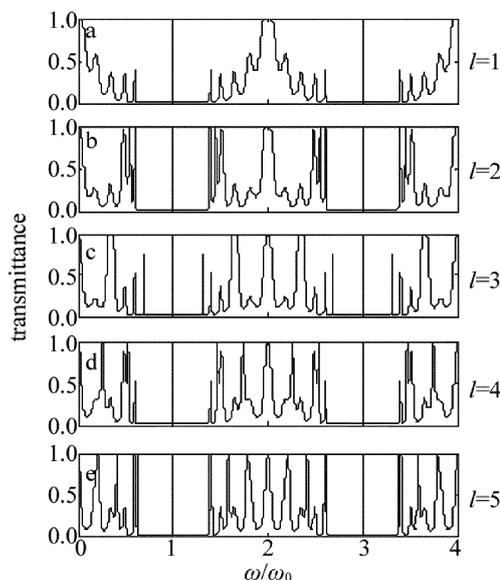


Fig. 3 Transmission spectrum for photonic crystals $(HL)^5 D^l (LH)^5$ with $n_H = 1.38$

由图 3 可见,当 H 为右手材料 ($n_H = 1.38$) 时,光子晶体 $(HL)^5 D^l (LH)^5$ 透射能带谱中的频率 ω/ω_0 奇数倍处仍然出现单条窄透射峰,同时频率 ω/ω_0 偶数

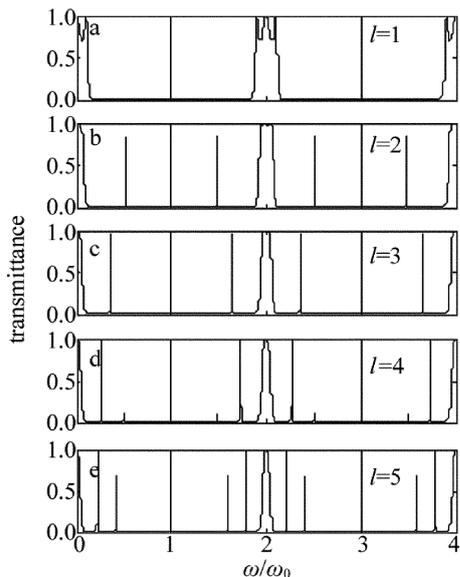


Fig. 4 Transmission spectrum for photonic crystals $(HL)^5D^l(LH)^5$ with $n_H = -1.38$

倍处亦出现带宽很宽的通带,但通带发育不完整, $2.0\omega/\omega_0$ 频率处两侧很宽的频率范围内通带的透射率很低。当周期数 l 增大时,频率 ω/ω_0 奇数倍处的窄透射峰透射率不变且保持精细带宽,但频率 ω/ω_0 偶数倍处的通带则快速产生分裂,形成带宽大小不一的小通带,且 l 越大分裂越严重,当 $l=3$ 时分裂成 3 条,当 $l=5$ 时分裂成 7 条,由于分裂成的这些通带之间距离很短,因此带宽也越来越小,但这些透射峰仍然发育不完整,没有形成完整分立的窄透射峰,因为它们的底部相连的部分的透射率还不等于零。可见,当 H 为右手材料时,光子晶体 $(HL)^5D^l(LH)^5$ 也可实现宽、窄带双重滤波功能,只是实现带宽滤波的通带发育不全且参差不齐。

当 H 为左手材料 ($n_H = -1.38$) 时,由图 4 可见,随着周期数 l 增大,频率 ω/ω_0 偶数倍处的通带带宽变窄,但通带的透射率保持 100% 不变,而且通带形态比较规整。如 l 为 1, 2, 3, 4, 5 时,频率 $2.00\omega/\omega_0$ 处的通带对应各 m 值的带宽 ΔW_2 分别为 $2.376 \times 10^{-1} \omega/\omega_0$, $1.545 \times 10^{-1} \omega/\omega_0$, $1.177 \times 10^{-1} \omega/\omega_0$, $0.955 \times 10^{-1} \omega/\omega_0$, $0.800 \times 10^{-1} \omega/\omega_0$ 。而频率 ω/ω_0 奇数倍处的窄透射峰左右两侧则新增多条精细透射峰,以频率 $1.00\omega/\omega_0$ 处为例,当 $l=1$ 时出现 1 条,当 l 为 2 和 3 时在频率 $1.00\omega/\omega_0$ 处窄透射峰的两侧新增了 2 条透射率很高的窄透射峰, $l=2$ 时透射率 84.63%, $l=4$ 时透射率 100%; 当 $l=4$ 时频率 $1.00\omega/\omega_0$ 处两侧又新增了 2 条,但此时新增的透射峰透射率比较低,只有 11.90%, 当 $l=5$ 时透射率达到 67.10%, 经计算,当 $l=6$ 时,这 2

条新增透射峰透射为 98%, 此时,频率 $1.00\omega/\omega_0$ 处及两侧即存在 5 条透射率很高的高品质窄透射峰。

从图 4 和图 3 可得,相对 H 为右手材料 ($n_H = 1.38$), 当 H 为左手材料 ($n_H = -1.38$) 时,通过缺陷自身周期数 l 调制,光子晶体 $(HL)^5D^l(LH)^5$ 可更好地实现宽、窄带双重滤波功能,而且还可以实现多通道窄带滤波功能,这个特性可对设计光学滤波器件具有指导意义。

2.3 m 不对称变化对双重滤波功能的调制

在实际设计中,光子晶体模型结构往往不是对称的,当模型对称性遭到破坏时,光子晶体的内部局域电场的量子化程度也将受到破坏,体现在宏观上的透射特性(分立透射峰)将随之改变。因此,为找出不对称因素对该光子晶体双重滤波功能的影响规律,下面以 $(HL)^m$ 和 $(LH)^m$ 的排列周期数不等值变化为例进行研究,即固定 $(HL)^m$ 的排列周期数 $m=5$ 和缺陷 D 的排列周期数 $l=1$, 而 $(LH)^m$ 的排列周期数取 m 为 1, 2, 3, 4, 5 依次递增,则可模拟出当介质 H 为右手材料 ($n_H = 1.38$) 和左手材料 ($n_H = -1.38$) 时, $(HL)^5D(LH)^m$ 的透射能带谱,如图 5 和图 6 所示。

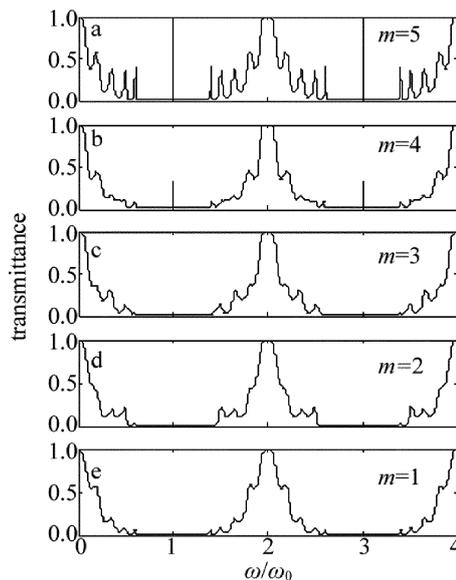


Fig. 5 Transmission spectrum for photonic crystals $(HL)^5D(LH)^m$ with $n_H = 1.38$

如果以 $\Delta m = 5 - m$ 表示光子晶体 $(HL)^5D(LH)^m$ 对称结构的破坏程度。 Δm 称为不对称度^[24-25], 则从图 5 可见,当介质 H 为右手材料 ($n_H = 1.38$) 时,随着不对称度 Δm 增大,频率 ω/ω_0 奇数倍处的窄透射峰透射率快速下降,而且频率 ω/ω_0 奇数倍处的各窄透射峰透射率下降的速度相等,如当 m 为 1, 2, 3, 4, 5, 亦即不对称度 Δm 为 0, 1, 2, 3, 4 时,频率 ω/ω_0 奇数倍处的

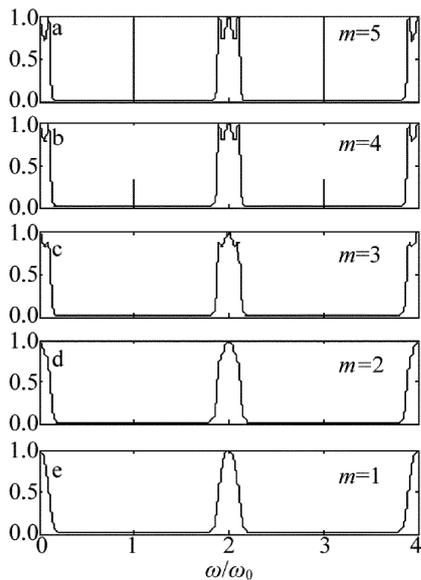


Fig. 6 Transmission spectrum for photonic crystals $(HL)^5D(LH)^m$ with $n_H = -1.38$

窄透射峰透射率为 100% ,31.72% ,3.55% ,0.03% 和 0%。显然,最终频率 ω/ω_0 奇数倍处及其周围将形成透射率为 0 的全反射带。而随着 Δm 增大,频率 ω/ω_0 偶数倍处的通带分布频率范围则变窄,即通带有向频率 ω/ω_0 偶数倍处压缩形成规整通带的趋势。当 Δm 为 0,1,2,3,4 时,频率 ω/ω_0 偶数倍处通带频率分布范围 ΔW_2 分别为 $1.968 \times 10^{-1} \omega/\omega_0$, $2.090 \times 10^{-1} \omega/\omega_0$, $2.283 \times 10^{-1} \omega/\omega_0$, $2.640 \times 10^{-1} \omega/\omega_0$, $4.170 \times 10^{-1} \omega/\omega_0$ 。

如图 6 所示,当 H 为左手材料($n_H = -1.38$)时,随着 Δm 增大,频率 ω/ω_0 奇数倍处的窄透射峰透射率也下降,而且各频率 ω/ω_0 奇数倍处的窄透射峰透射率下降速度相同,当 Δm 为 0,1,2,3,4 时,窄透射峰透射率为 100% ,31.72% ,3.55% ,0.03% 和 0%。显然,最终频率 ω/ω_0 奇数倍处及其周围也将形成透射率为 0 的全反射带。另外,对比右手材料的情况知,无论 H 是右手材料还是左手材料,随着不对称度 Δm 增大,频率 ω/ω_0 奇数倍处的窄透射峰透射率均下降,而且下降的速度相等。对于频率 ω/ω_0 偶数倍处通带,当 Δm 增大时,通带顶端的劈裂消失,且带宽变窄的同时发展成比较完整的通带,当 Δm 为 0,1,2,3,4 时,频率 ω/ω_0 偶数倍处通带频率分布范围 ΔW_1 分别为 $2.735 \times 10^{-1} \omega/\omega_0$, $2.473 \times 10^{-1} \omega/\omega_0$, $2.469 \times 10^{-1} \omega/\omega_0$, $2.396 \times 10^{-1} \omega/\omega_0$, $2.136 \times 10^{-1} \omega/\omega_0$ 。

综合图 6 和图 5 可得,随着周期不对称度 Δm 增大,无论 H 是右手材料还是左手材料,光子晶体 $(HL)^5D(LH)^m$ 窄带滤波功能将慢慢弱化,但其保持

宽带滤波功能,而且宽带滤波的频率范围随着 Δm 增大而变窄,同时 H 在左手材料情况下实现的滤波性能比右手材料情况下的好。即不对称度 Δm 对光子晶体 $(HL)^5D(LH)^m$ 宽、窄带双重或单重滤波功能具有灵敏的调制作用。

3 结 论

通过对光子晶体 $(HL)^m D^l (LH)^m$ 的光传输特性进行数值计算、模拟,得出研究结论:无论 H 是右手材料还是左手材料,光子晶体结构模型 $(HL)^m D^l (LH)^m$ 均可实现窄带、宽带双重光学滤波功能,但在相同调制机制情况下,两者的滤波性能不一样。

(1) 当 H 为左手材料时,周期数 m 可调制窄带和宽带通道的滤波品质,而当 H 为右手材料时,周期数 m 仅对窄带通道的滤波品质具有调制作用。

(2) 当 H 为左手材料时,周期数 l 不仅可调制宽带通道的滤波品质,而且还可以调制窄带滤波通道的通道数目,而当 H 为右手材料时,周期数 m 仅对宽、窄带通道的滤波特性调制作用不明显。

(3) 无论 H 为左手材料或右手材料,周期数不对称度 Δm 均对窄带滤波通道的透射率具有调制作用,而且两者的调制机制效果相同。而 Δm 对于宽带滤波通道性能的调制效果,则是左手材料优于右手材料。

可见,对于实现双重光学滤波功能的光子晶体 $(HL)^m D^l (LH)^m$ 模型,当 H 为左手材料时,可获得最好的滤波特性,而且这些特性对研究和设计多重、多通道的光学滤波器件具有指导意义。

参 考 文 献

- [1] LIU W K, SUN Y, DONG X W. Investigation on slow light in composite-structure photonic crystal coupled-cavity waveguide[J]. Laser Technology, 2017, 41(4):591-595 (in Chinese).
- [2] SU A, GAO Y J. Light propagation characteristics of one-dimensional photonic crystal with double-barrier quantum well[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(23):234208 (in Chinese).
- [3] WEI J J, SU A, GAO Y J, et al. Degeneracy effect of defects on transmission spectrum band of photonic crystal[J]. Laser Technology, 2017, 41(1):56-70 (in Chinese).
- [4] LIU Y F, LIU B, CHEN J, et al. Study on filtering characteristics based on tooth-shaped photonic crystal waveguide[J]. Laser Technology, 2016, 40(2):237-240 (in Chinese).
- [5] WEI Y Sh, SU A, XU J Y, et al. Features of dual-channel optical Filter in quaternary-heterostructure photonic crystal[J/OL]. Laser Technology, 2018, 42(2):212-216 (in Chinese).
- [6] SU A, MENG Ch J, GAO Y J. Modulation of activated impurity on filter property of photonic crystal quantum well[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(3):0306001 (in Chinese).
- [7] XU J Y, SU A, PAN J H, et al. Effect of double negative medium on

- the transmission spectra of onedimensional photonic crystal quantum well [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(8): 2156-2161 (in Chinese).
- [8] WU L W, ZHANG Zh P. Broadband and low-loss left-handed materials based on multi-opening cross shape structures[J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65(16):164101 (in Chinese).
- [9] VESELAGO V G. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ [J]. *Soviet Physics Uspekhi*, 1968, 10(4):509-514.
- [10] BERRIER A, MULOT M, SWILLO M, *et al.* Negative refraction at infrared wavelengths in a two-dimensional photonic crystal [J]. *Physical Review Letters*, 2004, 93(7):073902.
- [11] LU Z L, MURAKOWSKI J A, SCHUETZ C A, *et al.* Three-dimensional subwavelength imaging by a photonic-crystal flat lens using negative refraction at microwave frequencies [J]. *Physical Review Letters*, 2005, 95(15):153901.
- [12] MOUSSA R, FOTEINOPOULOU S, ZHANG L, *et al.* Negative refraction and superlens behavior in a two-dimensional photonic crystal [J]. *Physical Review*, 2005, B71(8):085106.
- [13] ZHANG S, FAN W J, MALLOY K J, *et al.* Near-infrared double negative metamaterials[J]. *Optics Express*, 2005, 13(13):4922-4930.
- [14] LIU L, AOB X, WOSINSKIA L, *et al.* Compact polarization beam splitter employing positive/negative refraction based on photonic crystals of pillar type[J]. *The International Society for Optical Engineering*, 2006, 6352(4):635209.
- [15] DOLLING G, WEGENER M. Negative-index metamaterial at 780nm wavelength[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(1):53-55.
- [16] NOTOMI M. Theory of light propagation in strongly modulated photonic crystals: Refraction like behavior in the vicinity of the photonic band gap[J]. *Physical Review*, 2000, B62(16): 10696-10705.
- [17] CUBUKCU E, AYDIN K, OZBAY E, *et al.* Electromagnetic waves: Negative refraction by photonic crystals[J]. *Nature*, 2003, 423(6940):604-605.
- [18] OZBAY E, BULUI I, GUVEN K, *et al.* Observation of negative refraction and ocusing in two-dimensional photonic crystals[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2006, 45(8A):6064-6070.
- [19] AO X Y, LIU L, WOSINSKI L, *et al.* Polarization beam splitter based on a two-dimensional photonic crystal of pillar type[J]. *Applied Physical Letters*, 2006, 89(17):171115.
- [20] RUANAND Z C, HE S L. Open cavity formed by a photonic crystal with negative effectiveindex of refraction[J]. *Optics Letters*, 2005, 30(17):2308-2310.
- [21] ZHANG X D. Tunable non-near-field focus and imaging of an unpolarized electromagnetic wave [J]. *Physical Review*, 2005, B71(23):235103.
- [22] FENG S, LI Z Y, FENG Z F, *et al.* Imaging properties of an elliptical-rod photonic-crystal slab lens[J]. *Physical Review*, 2005, B72(7):075101.
- [23] JIN D L, HONG J S, XIONG H. Dual wideband antenna for WLAN/Wi MAX and satellite system applications based on metamaterial transmission line [J]. *Chinese Physics Letters*, 2012, 29(10):104101.
- [24] MENG Ch J, SU A, PAN J H, *et al.* Effect of periodicity asymmetry on photonic crystals transmission spectrum[J]. *Acta Sinica Quantum Optica*, 2014, 20(2):154-158 (in Chinese).
- [25] PAN J H, SU A, MENG Ch J, *et al.* Effect of barrier layer periodicity asymmetry on photonic crystal quantum well transmission spectrum[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(1):012701 (in Chinese).