

具有缺陷态的二维光子晶体通讯波长滤波器的结构优化设计

郑渝, 徐群和, 李书平, 康俊勇

(福建省半导体材料及应用重点实验室, 厦门大学物理系, 福建 厦门 361005)

摘要: 采用平面波展开法分别模拟设计了理想和带有点缺陷与线缺陷的二维光子晶体能带结构; 进一步构建具有点缺陷和线缺陷联合结构滤波器, 通过改变介质折射率、介质柱半径和背景材料折射率, 使点缺陷的滤波中心波长处于光子晶体禁带中的 1.31 和 $1.55 \mu\text{m}$ 两个主要通讯波长. 同时, 采用时域有限差分算法模拟滤波器的传播和滤波频谱特性, 结果显示, 该结构滤波器的滤波频谱中心波长刚好分别位于 1.31 和 $1.55 \mu\text{m}$, 透射峰尖锐, 显现出优良的滤波特性.

关键词: 光子晶体; 光子禁带; 缺陷态; 滤波器; 结构设计

中图分类号: TN252

文献标识码: A

Structural design of communication filters using two-dimensional photonic crystals with defect modes

ZHENG Yu, XU Qun-he, LI Shu-ping, KANG Jun-yong

(Fujian Key Laboratory of Semiconductor Materials and Applications, Department of Physics, Xiamen University, Xiamen, Fujian 361005, China)

Abstract The band structures of 2D photonic crystals without and with point and line defects were simulated using plane wave expansion method. By calculating different index and radius of lattices the 2D photonic crystal structures combining a point and a line defects were successfully designed to have modes in 1.31 and $1.55 \mu\text{m}$. The optical transmission and leaching characteristics of the designed structures were simulated by finite-difference time-domain (FDTD) method. The results show that the leaching spectra are shape and centered at 1.31 and $1.55 \mu\text{m}$, respectively, which suggests the designed structures are good to apply to the communication filters.

Keywords photonic crystal; bandgap; defect; filter; structure design

自从 1987 年 Yablonovitch E^[1] 和 John S^[2] 分别提出了光子晶体的概念后, 光子晶体越来越受到人们的关注. 光子晶体是由不同折射率的介质在空间按一定的周期排列形成的一种新型的人工结构功能材料. 与半导体材料相似, 当空间周期与光波长相当时, 由折射率周期性分布的结构产生“光子带隙”, 可以控制光波在其中的传播特性. 近年来对光子晶体光纤、光子晶体滤波器、微波天线等光子晶体器件的研究不断升温^[3-5], 但在通讯波长滤波器优化设计方面的报道还较少.

本研究利用平面波展开法^[3, 6] 计算具有缺陷态的二维光子晶体能带结构, 通过改变介质折射率和介质柱半径等手段调整光子晶体禁带的位置, 再引入的不同缺陷结构在光子禁带中产生缺陷态, 使其恰好处于 1.33 和 $1.55 \mu\text{m}$ 两个主要通讯波长. 进一步采用时域有限差分算法^[7, 8] 模拟该结构的滤波频谱特性, 为光子晶体结构在通讯滤波器的制备提供了理论依据.

收稿日期: 2007-07-18

作者简介: 郑渝 (1985-), 女, 本科生; 通讯联系人: 康俊勇, 教授.

基金项目: “863” 计划资助项目 (2006AA03A110); 基础科研资助项目 (A1420060155); 国家自然科学基金资助项目 (60336020); 厦门市科技计划资助项目 (3502Z20063001)

1 设计方法

1.1 二维光子晶体能带结构模拟方法

在光子晶体中(非磁性均匀介质, $\mu_r = 1, \rho = 0, J = 0$ $\epsilon_r(r)$ 为 r 处的相对介电常数), 电磁波的传播遵循 Maxwell 波动方程组:

$$\begin{cases} \nabla^2 E = \frac{\epsilon_r(r)}{c^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \\ \nabla^2 H = \frac{\epsilon_r(r)}{c^2} \frac{\partial^2 H}{\partial t^2} \end{cases} \quad (1)$$

采用平面波展开法^[3, 6], 电场模量为:

$$E(r, t) = e^{-i\omega t} \sum_G E_{k+G} e^{i(k+G) \cdot r} \quad (2)$$

其中: ω 为波的角频率; k 为波矢; G 为倒格矢. 将式 (2) 代入式 (1), Maxwell 方程改写为:

$$\sum_G E_{k+G} \nabla^2 e^{i(k+G) \cdot r} = - \frac{\omega^2 \epsilon_r(r)}{c^2} \sum_G E_{k+G} e^{i(k+G) \cdot r} \quad (3)$$

对于二维的光子晶体, 给定一个波矢 k (在 1BZ 内), 式 (3) 为 $2N \times 2N$ 矩阵方程. 若以计算所得的本征值 ω_m , ($m = 1, 2, 3, \dots, m$ 称为能带指标) 为纵坐标, 以波矢 k 为横坐标, 就可得到二维光子晶体的能带结构.

在模拟计算具有缺陷态的二维光子晶体的能带结构时, 将多个理想原胞与缺陷原胞一起组成一个大的超原胞, 然后按平面波展开法进行.

1.2 二维光子晶体滤波器设计方法

时域有限差分算法^[7, 8]以差分原理为基础, 通过选择适当的网格, 在时间上和空间上对 Maxwell 方程的两个旋度方程进行离散化, 使 Maxwell 方程从微分形式转化为差分方程组, 迭代求解模场分布; 并通过傅里叶变换求得模场在频域中的分布, 从而得到光子晶体器件的频谱特性.

对于二维光子晶体, 以 TM 波为例, 可构造二维网格的 Yee^[7]原胞, 如图 1 所示. 于是无源区的 Maxwell 旋度方程可转化为差分方程组:

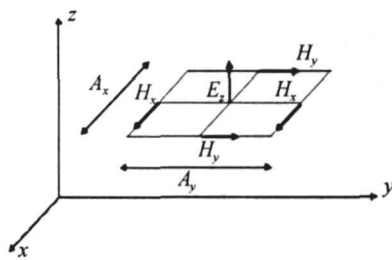


图 1 二维网格的 Yee 原胞

Fig. 1 A Yee cell in two-dimension

$$H_{x(i,j)}^{n+1} = H_{x(i,j)}^{n-(1/2)} - \frac{\Delta t}{\mu \Delta y} (E_{z(i,j)}^n - E_{z(i,j-1)}^n)$$

$$H_{y(i,j)}^{n+(1/2)} = H_{y(i,j)}^{n-(1/2)} - \frac{\Delta t}{\mu \Delta x} (E_{z(i,j)}^n - E_{z(i+1,j)}^n)$$

$$E_{z(i,j)}^{n+1} = E_{z(i,j)}^n + \frac{\Delta t}{\epsilon \Delta x} (H_{y(i+1,j)}^{n+(1/2)} - H_{y(i,j)}^{n+(1/2)}) - \frac{\Delta t}{\epsilon \Delta y} (H_{x(i,j-1)}^{n+(1/2)} - H_{x(i,j)}^{n+(1/2)}) \quad (4)$$

其中: $\Delta x, \Delta y, \Delta t$ 分别为空间和时间的离散间隔.

在模拟计算时, 采用理想匹配边条 (PML) 以及脉冲周期为 τ 迟滞时间为 t_0 、脉冲波中心频率为 ω 的高斯脉冲波 $g(t) = \exp\left[-\left(\frac{t-t_0}{\tau}\right)^2\right] \cdot \sin[\omega t]$ 激励源.

2 结果与讨论

2.1 理想及缺陷二维光子晶体能带结构

模拟采用的理想二维光子晶体模型如图 2(a), 其中折射率为 $n_2 = 3.4$ 的均匀介质柱半径 $r = 0.18 \mu\text{m}$, 在折射率为 $n_1 = 1$ 的背景材料中构成的晶格周期为 $a = 0.6 \mu\text{m}$ 的二维光子晶体. 用平面波展开法模拟出的理想二维光子晶体 TM 模和 TE 模的能带结构如图 2(b) 和图 2(c) 所示. 结果显示, 该二维光子晶体

存在 TM 模光子禁带, 特别是第二光子禁带归一化频率 ($a/\lambda = \omega a/2\pi c$) 范围为 0.417~0.517, 即在 1.16~1.44 μm 波段; 而不存在 TE 模光子禁带.

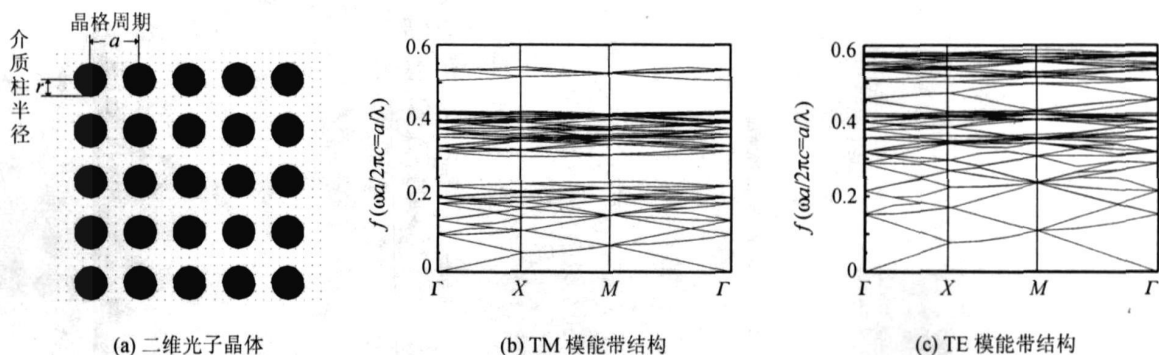


图 2 理想二维光子晶体模型及其 TM 和 TE 模的能带结构

Fig 2 2D photonic crystal model and TM, TE modes band structures

为了在光子禁带中引入缺陷态, 在该理想光子晶体结构中构造如图 3(a)所示的点缺陷^[9-10]. 以该超原胞进行模拟计算, 其 TM 模能带结构如图 3(b)所示. 结果显示在原 TM 模第二禁带中出现一新的能带, 其归一化频率范围为 0.466~0.470, 即在 1.277~1.288 μm 波段存在允许光子传播的允带. 其物理起源可归结为点缺陷破坏了理想光子晶体点阵的周期性, 形成一个光学微腔, TM 波可局限于缺陷处传播. 于是在理想光子禁带中产生缺陷态.

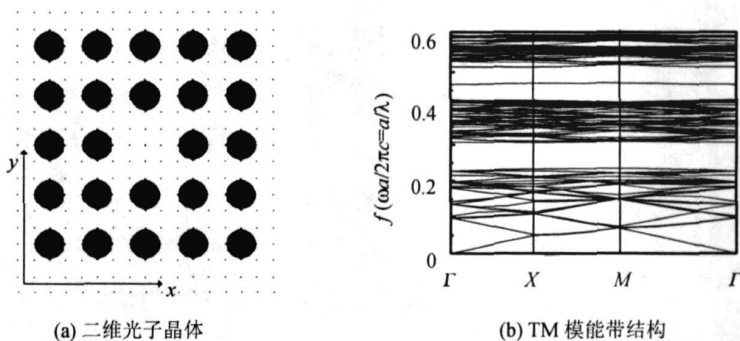


图 3 具有点缺陷的二维光子晶体及其 TM 模能带结构

Fig 3 2D photonic crystal model with point defect and its TM band structure

进一步在该理想光子晶体结构中构造如图 4(a)所示的线缺陷^[11-12]. 以该超原胞进行模拟计算, 其 TM 模能带结构如图 4(b)所示. 理想光子晶体的 TM 模第二禁带消失, 同时第一禁带宽度也相应减小. 可见原来在理想光子晶体中禁止传播的 1.16~1.44 μm 波段的 TM 波可沿线缺陷传播, 线缺陷已成为一个直波导.

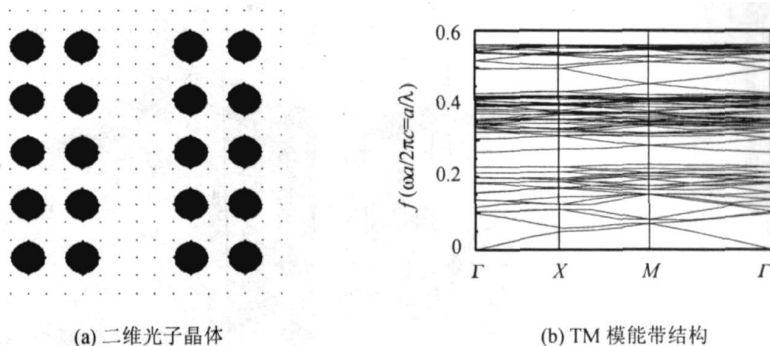


图 4 具有线缺陷的二维光子晶体及其 TM 模能带结构

Fig 4 2D photonic crystal model with line defect and its TM band structure

上述用平面波展开法得到的结果与采用其它方法计算得到的结果相符^[3, 10-12]. 在此基础上, 有人提出用线缺陷处形成直波导, 以点缺陷耦合光波形成微腔, 以此联合构造如图 5 所示的光子晶体滤波器^[4].

本工作也采用此联合结构, 通过优化设计, 以期在线缺陷传播 1.31 和 1.55 μm 通讯波长, 并在点缺陷处得到响应. 为此, 首先对介质柱半径 r 进行优化选择, 由图 6(a) 可见, 当 $r = 0.193 \mu\text{m}$ 时缺陷态中心频率 ($\omega a / 2\pi c = a/\lambda$) 刚好处于 0.458 处, 即中心波长响应为 1.31 μm. 进一步对介质与背景材料折射率差 $\delta = n_2 - n_1$ 进行优化选择, 由图 6(b) 可见, 当 $\delta = 2.39$ 时, 缺陷态中心频率 ($\omega a / 2\pi c = a/\lambda$) 刚好处于 0.451 处且缺陷态带宽最窄.

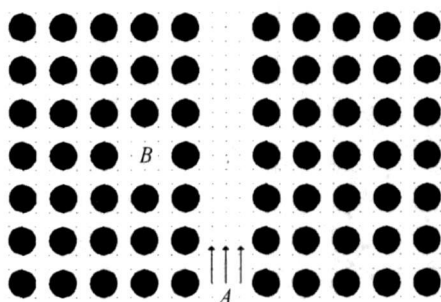


图 5 光子晶体滤波器

Fig 5 Photonic crystal filter

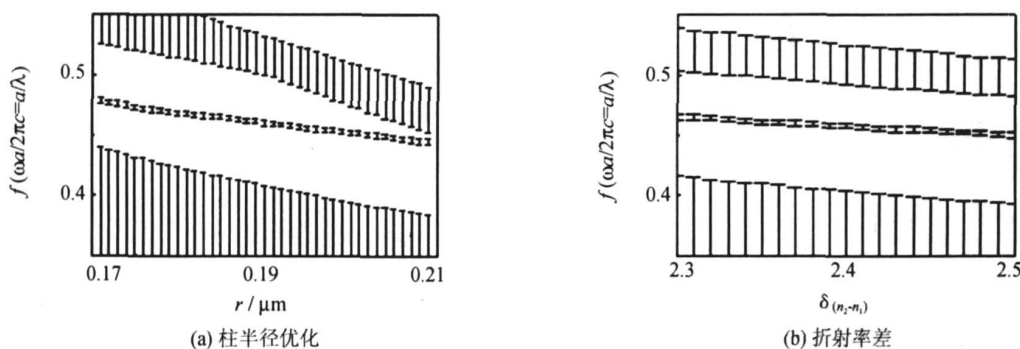


图 6 折射率差和介质柱半径优化图

Fig 6 TM band map for scanning coculation in r and δ

由于理想光子晶体禁带不包含 1.55 μm 波段, 1.55 μm 通讯波长的 TM 波将在光子晶体中发散传播. 为了使 1.55 μm 通讯波长的光波能沿线缺陷波导传播并在点缺陷感应耦合, 先对 1.31 μm 滤波器体系背景材料折射率 n_1 进行优化选择, 使缺陷态波长响应在 1.55 μm 波段. 由图 7(a) 可见, 当 $n_1 = 1.31$ 时, 缺陷态归一化频率刚好处于 0.387 处, 即中心响应波长为 1.55 μm. 进一步对介质柱半径 r 和介质与背景材料折射率差 $\delta = n_2 - n_1$ 进行优化选择. 由图 7(b)、图 7(c) 可见, 当 $r = 0.194 \mu\text{m}$, $\delta = 2.38$ 时, 缺陷态中心归一化频率刚好处于 0.387 处且缺陷态带宽最窄.

优化后的 1.33 和 1.55 μm 波段滤波器的体系参数列于表 1.

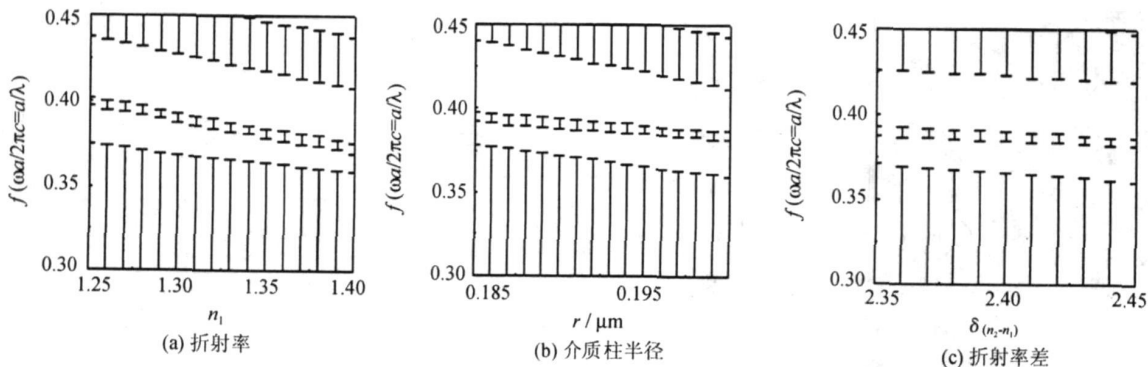


图 7 背景材料折射率、介质柱半径和折射率差优化图

Fig 7 TM band map for scanning coculation in n_1 , r and δ

表 1 1.31和 1.55 μm 波段滤波器的体系参数Tab 1 The parameters in filters of 1.31 and 1.55 μm

$\lambda / \mu\text{m}$	$a / \mu\text{m}$	$r / \mu\text{m}$	n_1	n_2	$\delta_{(n_2-n_1)}$
1.31	0.60	0.193	1.00	3.39	2.39
1.55	0.60	0.194	1.31	3.69	2.38

2.2 二维光子晶体滤波器性能模拟

对优化后的结构, 利用 FDTD 算法模拟高斯脉冲 TM 波从 A 处沿 Y 方向射入滤波器时, 输出口传播频谱特性和点缺陷 B 处的滤波频谱特性. 从传播频谱特性可以看到, 大部分 TM 波沿着线缺陷光波导传播. 特别是 1.55 μm 通讯波段的 TM 波, 避免了在光子晶体中发散传播. 同时滤波频谱特性出现一个很尖锐的透射峰, 其中心波长刚好分别位于 1.31 和 1.55 μm . 显示出该结构优良的滤波特性 (图 8).

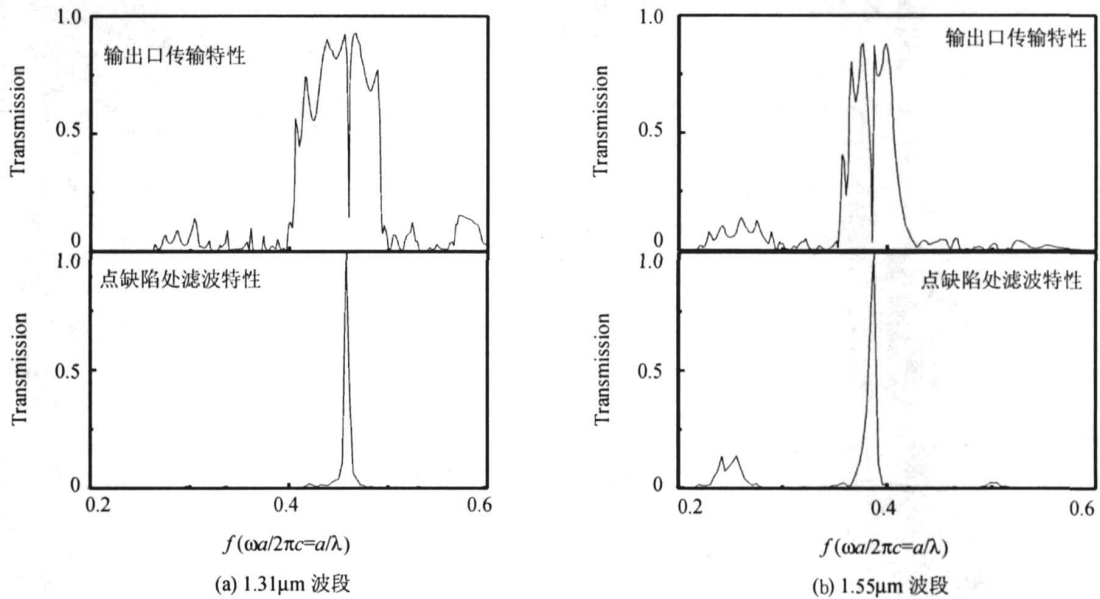


图 8 线缺陷和点缺陷滤波频谱特性图

Fig 8 The frequency spectra of the line and point defects in filter of 1.31 μm and of 1.55 μm

参考文献:

- [1] Yablonoitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics[J]. Phys Rev Lett 1987, 58(20): 2059-2062
- [2] John S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices[J]. Phys Rev Lett 1987, 58(20): 2486-2489.
- [3] 温熙森. 光子晶体理论与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2006
- [4] 朱志宏, 叶卫民, 季家熔, 等. 光子晶体滤波特性分析[J]. 光子学报, 2004, 33(6): 700-703
- [5] 周梅, 陈效双, 王少伟, 等. 波段的 FP 光子晶体滤波器[J]. 物理学报, 2006, 55(7): 3725-3729.
- [6] Shen L F, He S L, Xiao S S. Large absolute band gaps in two-dimensional photonic crystals formed by large dielectric pixels [J]. Phys Rev B, 2002, 66(16): 165315.
- [7] Yee K. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equation in isotropic media[J]. IEEE Trans AP, 1966, 14(3): 302-307.
- [8] 王长清, 祝西里. 电磁场计算中的时域有限差分法[M]. 北京: 北京大学出版社, 1994
- [9] Takano K, Sugano T, Nakagawa K. Frequency response of rotating shape defect in 2-D photonic crystal for optical tunable filter [J]. LEOS 2001, 2001, 1: 206-207.
- [10] Rodriguez-Esquerre V F, Koshiba M, Hernandez-Figueroa H E. Finite-element time-domain analysis of 2-D photonic crystal resonant cavities[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2004, 16(4): 816-818
- [11] Fan S, Villeneuve P R, Joannopoulos J D. Channel drop tunneling through localized states[J]. Phys Rev Lett 1998, 80: 960-963
- [12] Takano K, Nakagawa K. Frequency analysis of wavelength demultiplexers and optical filters with finite 2-D photonic crystals [J]. IEICE Transactions on Communications 2001, E84-B(5): 1295-1303

(责任编辑: 郑美莹)