

文章编号: 1001-3806(2010)03-0429-04

# 1 维掺杂光子晶体宽窄双重滤波器的理论研究

胡莉, 张利沙

(重庆工商大学 计算机科学与信息工程学院, 重庆 400067)

**摘要:** 为了研究1 维掺杂光子晶体宽窄双重滤波器的特性, 采用光学传输矩阵方法, 计算了双重滤波透射峰的峰值和半峰全宽。当杂质层折射率增加时, 窄滤波透射峰峰值保持不变, 其半峰全宽逐渐增加, 宽滤波透射带中心波长两边的透射率逐渐增加, 其半峰全宽逐渐减小; 当杂质的消光系数增加时, 窄滤波透射峰的峰值迅速减小, 宽滤波透射峰的峰值先快速减小随后缓慢减小, 两个滤波的半峰全宽都随着消光系数的增加而增大。结果表明, 在设计宽窄双重滤波器时, 可根据不同的要求选取不同材料的杂质层, 同时还必须考虑杂质吸收这一重要因素。

**关键词:** 材料; 光子晶体; 特征矩阵; 滤波器; 缺陷模

**中图分类号:** O436 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2010.03.040

## Properties of twofold broad and narrow band filter doped with 1-D photonic crystal

HU Li, ZHANG Li-sha

(College of Computer Science and Information Engineering, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China)

**Abstract:** In order to study the twofold properties of broad and narrow filter doped with 1-D photonic crystal, the peak transmissivity and full width at half maximum (FWHM) were calculated based on the transfer matrix. It was found that when the refractive index is increased the narrow band's peak transmissivity is invariable and the FWHM is increased, the broad band's transmissivity of the edge of the peak is increased and the FWHM is decreased. When the extinction coefficient is increased the narrow band's peak is decreased rapidly and the broad band's peak is decreased rapidly before decreased adagio, the FWHM is increased. A valuable conclusion is drawn that the refractive index is choice with different demand of the design of a twofold photonic crystal filter and the absorption of dopant has to be taken into account for the design of the twofold phonic crystal filter.

**Key words:** materials; photonic crystal; characteristic matrix; filter; defect mode

## 引言

自 JOHN<sup>[1]</sup> 和 YABLONOVITCH<sup>[2]</sup> 在 1987 年提出光子晶体的概念以来, 由于它在光学和光电子领域有广泛的应用前景, 光子晶体的研究正在世界各地广泛开展<sup>[3-6]</sup>, 由于介质的介电常数发生周期性的变化, 有些频率的光将不能在其中传播, 即出现光子传输的禁带, 如果在光子晶体中引入缺陷, 在光子带隙内将形成缺陷模。与缺陷模频率相对应的光将被局域在缺陷层附近, 使得该处的光场得到极大地增强, 从而导致在光子带隙内出现频率范围窄、透射率高的透射峰。含缺陷的 1 维光子晶体已被广泛应用于包括多通道滤波器

在内的各种宽、窄带通道滤波器<sup>[5-7]</sup>。负折射率材料又称左手材料。自从 2000 年 SMITH<sup>[7]</sup> 合成了介电常量和磁导率同时小于 0 的负折射率材料以来, 负折射率材料在实验上取得了重大进展, 从而成为近来理论和应用研究的热点之一。负折射率材料的奇异特性弥补了很多传统材料(正折射率材料或右手材料)的不足, 如可以产生反向多普勒频移和逆切伦科夫效应等<sup>[8]</sup>。

正负折射率交替 1 维光子晶体具有一些传统光子晶体所不具备的特性, 不少学者<sup>[9-10]</sup> 已经作了研究。作者通过在正负折射率交替 1 维光子晶体中引入缺陷, 设计了一种可以同时实现宽带滤波和窄带滤波的双重滤波器, 并利用特征矩阵法, 研究了缺陷层介质折射率的变化以及杂质吸收对滤波通带的影响, 为宽窄双重滤波器的设计提供理论参考。

## 1 1 维缺陷光子晶体宽窄双重滤波器的设计原理

为了同时实现窄带滤波和宽带滤波, 经过反复计

基金项目: 重庆市教委科技项目基金资助项目 (KJ080720)

作者简介: 胡莉 (1978-), 女, 硕士, 讲师, 从事光电子技术研究。

E-mail: huli@ctbu.edu.cn

收稿日期: 2009-04-14; 收到修改稿日期: 2009-06-11

算筛选,设计出一种正负折射率交替的1维缺陷光子晶体,结构如图1所示。杂质层C两边的光子晶体是

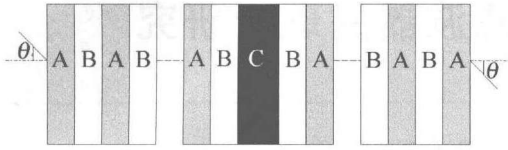


Fig.1 Model of doped 1-D photonic crystal with positive-negative index alternant multilayer

由A,B周期性叠加组成,介质层A是折射率为 $n_1$  ( $n_1 > 0$ )、厚度为 $d_1$ 的正折射率材料,介质层B是折射率为 $n_2$  ( $n_2 < 0$ )、厚度为 $d_2$ 的负折射率材料。两介质层的光学厚度相等,即 $|n_1 d_1| = |n_2 d_2|$ ,复周期数为 $N$ 。两个光子晶体中间是缺陷层C,其介质折射率和厚度分别为 $n_c, d_c$ 。即其结构为 $(AB)^N C (BA)^N$ 。该1维掺杂光子晶体置于空气中,空气的折射率为 $n_0$  ( $n_0 = 1.0$ )。

这里所选用的负折射率材料B是双负材料,即材料的介电系数和磁导率均为负数。由 $n = -\sqrt{\epsilon\mu}$  ( $n$ 为折射率, $\epsilon$ 为介电系数, $\mu$ 为磁导率),可知材料的折射率也为负数,故称为负折射率材料。双负材料可以利用基于等效电路模型的“左手”微带传输线来实现,该方法是根据电容、电感和介电常数、磁导率之间的等效性,在普通微带传输线上周期性加载电容及电感,但加载的位置与普通微带线上等效的电容和电感的位置正好互换(串联变并联,并联变串联)。在特定的频率范围,加载后的微带线就等效为双负材料,这样制备的双负材料损耗较小,并且得到的负折射率带较宽。

根据薄膜光学理论<sup>[11]</sup>,光在每层介质中的传输特性可用一个 $2 \times 2$ 的特征矩阵表示,单层介质的特征矩阵为:

$$M_s = \begin{vmatrix} \cos\delta & -i\sin\delta/\eta \\ -i\eta\sin\delta & \cos\delta \end{vmatrix} \quad (1)$$

式中, $\delta = (2\pi/\lambda)nd\cos\theta$ ,为介质层的相位厚度, $\theta$ 为入射光波与界面法线方向的夹角, $\lambda$ 为入射光的波长, $\eta$ 是介质层 $s$ 偏振光和 $p$ 偏振光的等效导纳 $\eta_s$ 和 $\eta_p$ ,为:

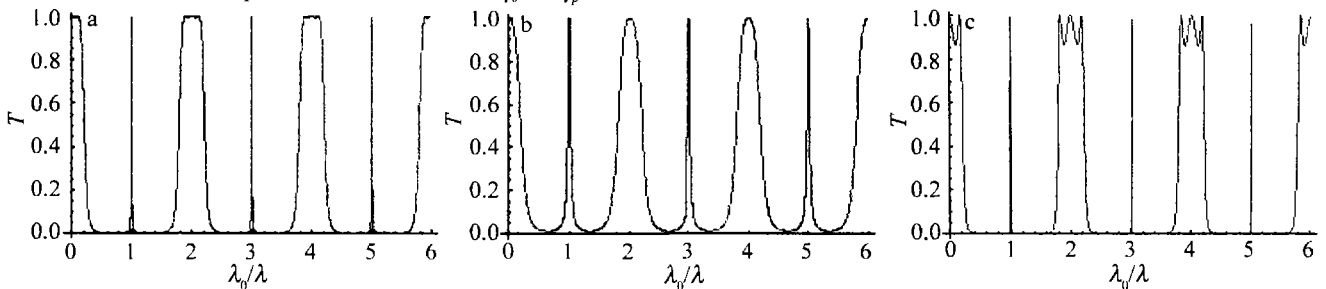


Fig.2 Transmission spectrum of 1-D photonic crystal

## 2.1 杂质层折射率 $n_c$ 对透射带的影响

为了研究杂质层折射率对透射谱的影响,由(1)

$$\eta = \begin{cases} \sigma n \cos\theta, (s \text{ 偏振}) \\ \sigma n / \cos\theta, (p \text{ 偏振}) \end{cases} \quad (2)$$

当 $\epsilon > 0, \mu > 0$ 时, $n = \sqrt{\epsilon\mu}, \sigma = 1$ ;当 $\epsilon < 0, \mu < 0$ 时, $n = -\sqrt{\epsilon\mu}, \sigma = -1$ 。

对于上述结构的正负交替1维掺杂光子晶体,可以逐层应用(1)式,则整个具有对称结构的光子晶体的传输矩阵为:

$$M = \begin{vmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{vmatrix} = (M_A M_B)^N M_C (M_B M_A)^N \quad (3)$$

式中, $M_A, M_B, M_C$ 分别是介质层A,B,C的特征矩阵。

光子晶体的透射系数 $t$ 为:

$$t = \frac{2n_0}{(M_{11} + M_{12}n_0)n_c + (M_{21} + M_{22}n_0)} \quad (4)$$

其透射率 $T$ 分别为:

$$T = |t|^2 \quad (5)$$

由(1)式~(5)式可以计算出正负交替1维掺杂光子晶体的特性。

## 2 1维掺杂光子晶体窄带双重滤波器的特性

对于图1所示的正负交替1维掺杂光子晶体,取光子晶体的光学厚度 $n_1 d_1 = -n_2 d_2 = \lambda_0/4$ , $\lambda_0$ 为入射光波长,正负折射率材料均为各同性,无耗非磁非色散介质( $\mu_1 = 1, \mu_2 = -1$ ,分别为介质层A和B的磁导率)。其中 $n_1 = 2.05, n_2 = -2.4, \lambda_0 = 1550\text{nm}, N = 20$ 。光束垂直入射到光子晶体上, $p$ 偏振光和 $s$ 偏振光传输矩阵相同。当掺入折射率 $n_c = 4.0$ 、光学厚度 $n_c d_c = \lambda_0$ 的杂质层后,得到图2a所示透射谱。由图2a可知,在 $\lambda_0/\lambda$ 为奇数处出现非常窄的通带,而在 $\lambda_0/\lambda$ 为偶数处出现特别宽的通带。因此,利用该结构同时实现了窄带和宽带双重滤波功能,这是传统光子晶体不能实现的。经数值模拟可知,当 $|n_2| < 2.4$ 时,在 $\lambda_0/\lambda$ 为偶数处形成尖锐的透射峰,如图2b所示,其中 $n_2 = -2.3$ ;当 $|n_2| > 2.4$ 时,在 $\lambda_0/\lambda$ 为偶数处的透射带的透射率降低,如图2c所示,其中 $n_2 = -2.5$ 。

式~(5)式进行数值模拟,得到光子晶体的透射率 $T$ 随杂质层折射率 $n_c$ 与入射光波长变化的立体图,如图

3所示。其中,杂质层的光学厚度不变,取  $n_c d_c = \lambda_0$ 。

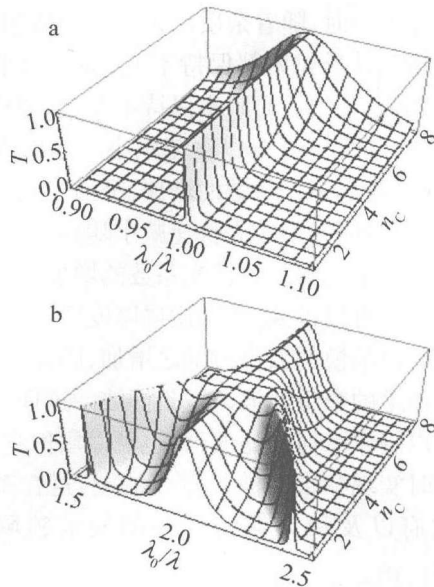


Fig. 3 The 3-D of transmission resulting from  $n_c$

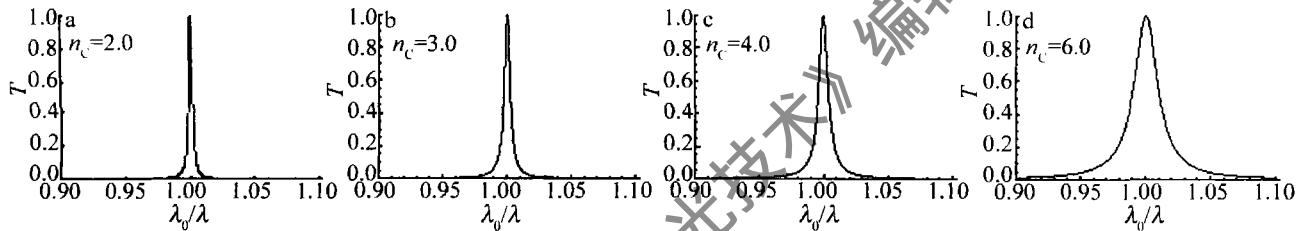


Fig. 4 The graph of the narrow band's transmission resulting from  $n_c$

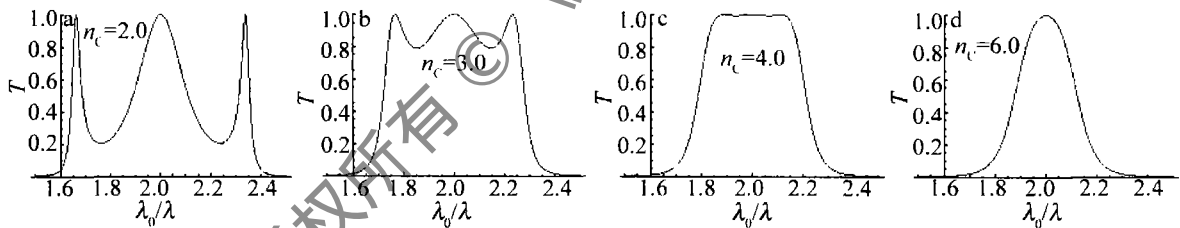


Fig. 5 The graph of the broad band's transmission resulting from  $n_c$

$\lambda_0/\lambda$  为偶数处出现的宽通带随着  $n_c$  的逐渐增加,其透射率逐渐增加,与此同时,其半峰全宽却逐渐减小。由计算可知,当  $n_c$  分别为 3.0, 4.0, 6.0 时,禁带中心缺陷模的半峰全宽分别为 1106.43nm, 939.72nm, 610.04nm。因此,实际应用中可以根据滤波的需要选择适当的材料。

### 2.2 消光系数对透射带的影响

以上数值研究中都是假设所用材料是理想介质,没有任何损耗,而实际材料总会有各种损耗存在。由电磁理论可知电介质的损耗最终表现为折射率是复数,介质损耗的大小体现在折射率的虚部。设杂质层的折射率  $n_c = 4.0(1 + ik)$ , 其中  $i$  是虚数的单位,  $k$  为消光系数。由(1)式~(5)式可以计算得到光子晶体的透射率  $T$  随杂质层消光系数  $k$  与入射光波长变化的立体图,如图6所示。

图3a和图3b中分别给出了窄通带和宽通带的透射率随缺陷层折射率与入射光波长的变化关系。掺入光学厚度为  $\lambda_0$  的杂质层后,随着杂质层折射率  $n_c$  的增加,由图3a可知,在  $\lambda_0/\lambda$  为奇数处出现的窄通带的中心频率及其透射率都保持不变,但通带的半峰全宽逐渐增加;由图3b可知,在  $\lambda_0/\lambda$  为偶数处出现的宽通带的中心频率保持不变,但两边的透射率逐渐增加,同时半峰全宽逐渐减小。

为了更清楚地反映杂质层折射率  $n_c$  对透射谱的影响,分别取  $n_c$  为 2.0, 3.0, 4.0, 6.0 作图3a的切面图,得到透射率  $T$  随波长的变化曲线,如图4所示。

如图4所示,由计算可知,当  $n_c$  为 2.0, 3.0, 4.0, 6.0 时,在  $\lambda_0/\lambda$  为奇数处出现的窄通带的半峰全宽分别为 4.64nm, 7.86nm, 12.91nm, 33.78nm, 即随着  $n_c$  的逐渐增加,其半峰全宽逐渐增加。如图5所示,在

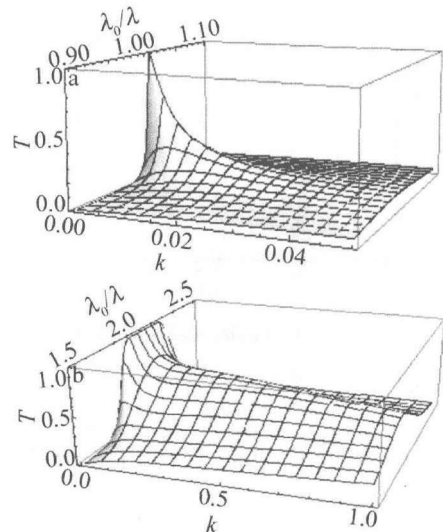


Fig. 6 The 3-D of transmission resulting from  $n_c d_c$  and  $k$

图6a和图6b中分别给出了窄通带和宽通带的透

射率随缺陷层介质消光系数与入射光波长的变化关系,由图 6a 可知,随着消光系数的增加,窄通带的透射率迅速减小,而半峰全宽随之增加。而由图 6b 可知,随着消光系数的增加,宽通带的透射率迅速减小,随后缓慢下降。

为了更清晰地反映光子晶体的消光系数对滤波峰值的影响,分别取  $\lambda_0/\lambda = 1$  和  $\lambda_0/\lambda = 2$  作图 6 的切面图,得到透射峰的峰值如图 7 所示。由计算可得,当  $k$  增加到 0.03 时,  $\lambda_0/\lambda = 1$  处的透射峰值迅速下降到 0.14,而  $\lambda_0/\lambda = 2$  处的透射峰值变为 0.85。

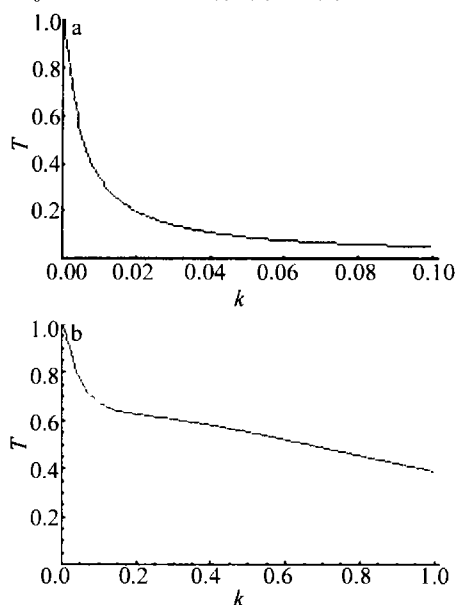


Fig. 7 The transmission resulting from  $k$

为了反映消光系数对滤波通道半峰全宽的影响,分别取  $k = 0.01, k = 0.02, k = 0.05$ , 得到透射峰宽度随波长变化曲线,如图 8 所示。由图可知,随着消光系数的增加,透射率逐渐减小,同时半峰全宽逐渐增加,且消光系数对窄通带的影响远远大于对宽通带的影响。

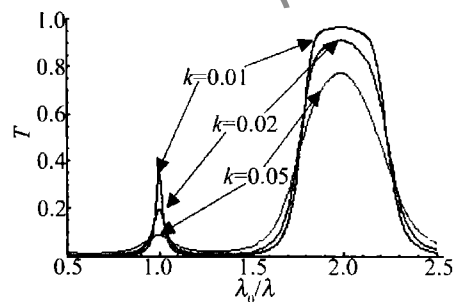


Fig. 8 The FWHM resulting from  $k$

### 3 结论

利用光学传输矩阵方法,研究了 1 维掺杂光子晶

体宽窄双重滤波器的相关特性。结果表明:当杂质层的光学厚度不变时,随着杂质层折射率的增加,窄通带的中心频率及其透射率都保持不变,通带的半峰全宽逐渐增加;宽通带的中心频率保持不变,但两边的透射率逐渐增加,同时半峰全宽逐渐减小。当考虑杂质层材料吸收时,随着消光系数的增加,窄通带的透射率迅速减小,宽通带的透射率先快速减小随后缓慢减小,两个通带的半峰全宽都随着消光系数的增加而增大。

经模拟还可以得到,当杂质层厚度增加时,在两个通带之间的缺陷模的数量也随之增加,因此,还可以同时实现多通道的窄带滤波与宽带滤波。这样同一个滤波器既可以用作窄通道滤波器,也可以用作宽带滤波,还可以同时实现窄带滤波与宽带滤波,这在军事保密通信和政府以及相关保密部门的通信领域中非常适用。

### 参考文献

- [1] JOHN S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices [J]. Phys Rev Lett, 1987, 58 (23): 2486-2489.
- [2] YABLONOVITCH E. Y. Inhibited spontaneous emission in solid state physics and electronics [J]. Phys Rev Lett, 1987, 58 (20): 2059-2061.
- [3] LIU Q N. Effect of impurity absorption on one-dimensional photonic crystal defect mode [J]. Chinese Journal of Lasers, 2007, 34 (6): 777-780 (in Chinese).
- [4] LIU Q N. The properties of defect mode and the properties of polarization of in doped one-dimensional photonic crystal [J]. Laser Journal, 2007, 28 (1): 37-38 (in Chinese).
- [5] FANG Y T, SHEN T G, TAN X L. Study on one-dimensional photonic crystal with impurity defects [J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24 (11): 1557-1560 (in Chinese).
- [6] CHEN H B, HU S M, GAO Y J. Properties of mirror symmetrical 1-D photonic crystals with an imaginary part of dielectric constant defect [J]. Laser Technology, 2008, 32 (5): 531-533 (in Chinese).
- [7] LIU Q N. Effect of absorption of dopant on design of photonic crystal filters [J]. Laser Technology, 2008, 32 (3): 327-329 (in Chinese).
- [8] XU X M, FANG L G, LIU N H. Unusual photonic tunneling in multilayer system with a negative refraction index layer [J]. Acta Optica Sinica, 2005, 25 (12): 1676-1681 (in Chinese).
- [9] ZHANG W F, FANG Q, CHENG Y H. Narrow band interleaver based on one-dimensional photonic crystal with positive-negative index alternant multilayer [J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27 (9): 1695-1699 (in Chinese).
- [10] LUO R H, LIANG R S, WEIZ C, et al. Symmetrical structural one-dimensional photonic crystal super narrow-band filter with positive-negative index alternant multilayer [J]. Laser & Infrared, 2008, 38 (10): 1015-1018 (in Chinese).
- [11] BORN M, WOLF E. Principles of optics [M]. 7th ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006: 51-61 (in Chinese).