

一种缓变结构一维光子晶体的缺陷模研究

武继江

(山东理工大学理学院计算物理研究所, 山东 淄博 255049)

摘 要:利用传输矩阵方法,研究了单折射率层缓变准周期结构一维光子晶体存在不同缺陷时的缺陷模。结果表明,当该准周期结构中存在缺陷时,引入了缺陷模,且缺陷模与缺陷层的位置和结构参数相关。缺陷层不同,缺陷模的位置及共振透射峰也不同。随着缺陷层光学厚度的增大,缺陷模波长向长波方向移动。

关键词:光子晶体;准周期结构;缺陷模;传输矩阵

中图分类号:TN252 **文献标识码:**A

Defect Modes of One - dimensional Photonic Crystals with Gradual Refractive Index Layer

WU Ji-jiang

(The Computing Physics Institute of College of Science, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China)

Abstract: The properties of defect modes in 1-D photonic crystals with gradual refractive index layer are investigated by means of the transfer-matrix method. When some defects are introduced into this quasiperiodic photonic crystal, the defect modes appear in the stop band. The properties of defect modes depend on the positions and structure parameters of defects. The positions and the resonant transmission peak of defect modes are different for different defects. The wavelength of defect modes shifts in the direction of long-wavelength with the optical thickness of the defect layer increasing.

Key words: photonic crystals; quasiperiodic structure; defect mode; transfer-matrix

1 引 言

介电常数周期分布的光子晶体由于具有与半导体中的电子态类似的带隙结构而成为近年来理论研究与应用研究的热点。最初人们所进行的大部分工作主要集中在二维或者三维光子晶体的研究上。一维光子晶体直到 1998 年前后由于 Fink 等人的研究工作才引起重视^[1]。研究表明,一维光子晶体同样具有全向带隙特性。因而,拥有完全带隙的三维光子晶体的某些性质能够通过一维光子晶体来实现,而一维光子晶体具有成熟制备技术优势,这使得一维光子晶体的研究获得了广泛的关注。受材料的限制,传统的周期结构的一维光子晶体的全向带隙一般来说相对较窄。为了获得较宽的光子带隙,人们提出各种准周期结构的一维光子晶体。准周期结构是介于周期结构和无序结构之间的结构。与周期结构类似,对准周期结构的研究开始于固体物理领域。

由于光子晶体和普通晶体的相似性,人们开始把准晶结构引入光子晶体中。与周期性结构相比较,准周期结构在设计过程中可以调节的参数更多,而周期结构光子晶体的许多性质,在准周期结构中也可以实现。因此利用准周期结构实现周期性结构的性质,成为一个十分活跃的研究领域,并进行了广泛的研究^[2-3]。

类似于半导体材料的掺杂,如果光子晶体原有的周期性或对称性受到破坏,就会在光子禁带出现频率极窄的缺陷态。在光子晶体中引入缺陷,可使光子局域化。利用掺杂光子晶体可以抑制或增强自发辐射,制造高效率 and 零阈值的激光器、高品质的激

作者简介:武继江(1973 -)男,讲师,主要从事光导波传输与传感方面的研究。E-mail:w9513110@163.com

收稿日期:2008-09-09

光谐振腔以及高效发光二极管等。尤其是引入非线性介质还可以使系统在光学响应中出现双稳态、多稳态及光学限制等特性。由于缺陷层的折射率、厚度以及位置等可以有各种各样的变化,因此光子禁带中出现的缺陷模的特征也会各不相同,研究缺陷层的性质对缺陷模的影响对于设计和制造出合乎需要的掺杂光子晶体有重要的意义。

目前人们对传统周期结构的一维光子晶体缺陷模特性的研究已经相当深入,但对准周期结构一维光子晶体缺陷模的研究只有少量报道^[4-5],并且也仅限于 Fibonacci 准周期结构。本文将就文献[6]中所研究的一种单折射率层缓变结构的一维光子晶体的缺陷模进行研究。

2 计算模型与传输矩阵

单折射率层缓变结构的一维光子晶体如图 1 所示,其由 N 个有差异的结构单元构成,每个单元分别由两高低折射率层构成。各单元中的某一折射率层的厚度保持不变,而另一折射率层的厚度缓慢发生变化。图 1 中所示的一维光子晶体中,低折射率层厚度保持不变,而高折射率层的厚度缓慢增加。设相邻单元的某种折射率层厚度的增加量或减小量为 Δ 。

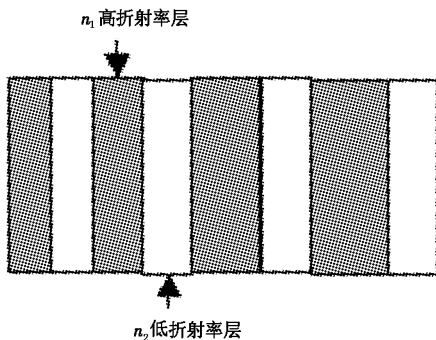


图1 准周期一维光子晶体结构示意图

对一维光子晶体带隙特性的分析,可以采用熟知的传输矩阵法。对如图 1 所示的一维光子晶体结构,光波在每一层介质中的传输特性可用一个 2×2 的特征矩阵表示:

$$M_m = \begin{bmatrix} \cos\delta_m & i\eta_m^{-1}\sin\delta_m \\ i\eta_m\sin\delta_m & \cos\delta_m \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, m 表示第 m 层介质; $\delta_m = (2\pi/\lambda) n_m d_m \cos\theta_m$; θ_m 为光线在该介质中与界面法线方向的夹角; η_m 为该介质层的有效导纳,对于 p 偏振光, $\eta_m = n_m / \cos\theta_m$, 对 s 偏振光, $\eta_m = n_m \cos\theta_m$; 而 n_m 和 d_m 分别为该介质层的折射率和厚度。

设一维光子晶体是由 N 层结构单元构成,则光子晶体的总的特征矩阵 M 为 $2N$ 个 M_m 的乘积:

$$M = M_1 M_2 \cdots M_{2N} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, $m_{ij} (i=1,2; j=1,2)$ 为 M 的矩阵元。当一维光子晶体处于折射率为 1 的空气中,可得一维光子晶体的组合导纳为:

$$y = (m_{21} + \eta_0 m_{22}) / (m_{11} + \eta_0 m_{12}) \quad (3)$$

式中, η_0 为光在空气中的有效导纳。则光波的反射系数为:

$$r = (\eta_0 - y) / (\eta_0 + y) \quad (4)$$

反射率为:

$$R = |r|^2 \quad (5)$$

透射率则为:

$$T = 1 - R \quad (6)$$

3 数值结果与分析

当给定一维光子晶体的结构参数及入射的光波情况,利用上述式(1)~式(6)就可以对一维光子晶体的带隙进行研究,对于高反射率的区域,就对应着光子带隙所在的区域。如图 2~图 5 所示为光波垂直于晶体表面入射时的计算结果,此时 p 偏振光和 s 偏振光的特征矩阵相同。

对文献[5]所提出的单折射率缓变结构一维光子晶体的缺陷模,这里主要就文中图 3(c)所示结构进行了研究。此时,保持低折射率介质层 n_2 的几何厚度不变,而高折射率层 n_1 的几何厚度发生变化。同文献[5],高低折射率介质分别为铋化铅 ($n_1=4.10$) 和冰晶石 ($n_2=1.35$)。整个结构的单元数 N 为 15,左边第 1 个单元的高低折射率层的厚度分别为 67.6147nm 和 207.6147nm,相邻单元之间的同种介电常数的介质层厚度变化量为 $\Delta=15$ nm。图 2 中虚线为文献[5]中慢变结构光子晶体的没有缺陷时的能带特性情况(这里用透射率表示),而图 2 中实线为在第 9 个结构单元后加入缺陷层时光子晶体的透过率曲线。计算中,缺陷层折射率 n_c 取为 3,厚度 d_c 取为 180nm。由图可以看出,类似于传统的周期结构光子晶体,在单折射率缓变结构一维光子晶体中引入缺陷层,同样有缺陷模的存在。

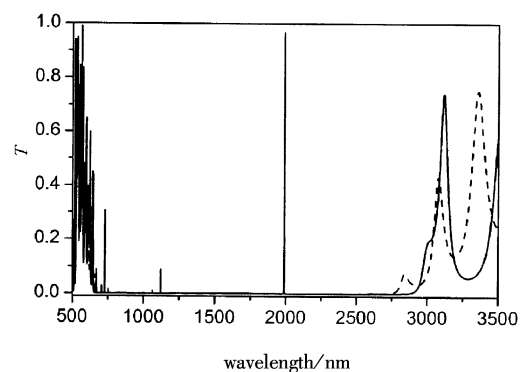


图2 有无缺陷时的透射率曲线

图 3 所示为缺陷层在不同位置时的透射峰曲

线。可以看出,当缺陷媒质处于不同的位置时,所引起的缺陷模的位置也不同。由图还可看出,对不同位置处的缺陷模,透射峰的大小相差较为显著,但无论透射峰大小如何,它们都非常尖锐。图中显示缺陷层位于第9个结构单元($n_c=9$)后时形成的透射峰相对最大。在传统的周期结构一维光子晶体中,缺陷层位于中心位置时透射峰最大,越偏离中心位置,透射峰就越小。由于单折射率缓变结构一维光子晶体为非对称的,也不是完全的周期结构,因而并不是引入的缺陷层在中心处时才对光子晶体结构影响最大。

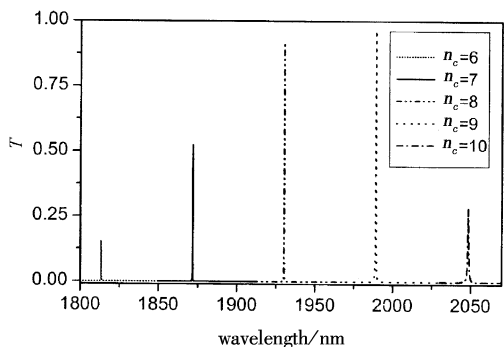


图3 缺陷层位置不同时的缺陷模透射峰

图4所示为单折射率缓变结构一维光子晶体在缺陷层位于第9个结构单元后时,缺陷模透射率随缺陷层厚度的变化情况,计算中厚度 d_c 变化,其他参数同图2。由图可以看出,随着缺陷层厚度的增加,缺陷模向长波方向移动。在整个变化过程中,缺陷模透射峰和宽度都发生变化。在缺陷层厚度约为180nm时,缺陷峰最大,当缺陷层厚度大于180nm时,随着缺陷层厚度的增加,缺陷峰峰值减小,当缺陷层厚度小于180nm时,随着缺陷层厚度的减小,缺陷峰也有类似的变化规律。由于在光子晶体中真正起作用的是介质层的光学厚度,因此,若保持缺陷层的厚度不变而改变介质层的折射率,缺陷模的透射率同样有类似的特点。

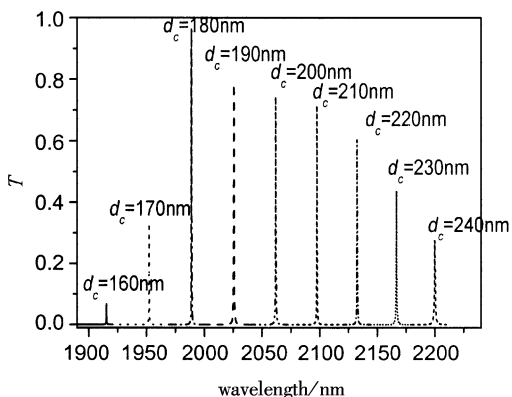


图4 不同缺陷层厚度时的缺陷模透射峰

为区别起见,图5给出了缺陷模中心波长随缺陷层折射率的变化情况,计算中缺陷层折射率 n_c 变化,其他参数同图2。可以看出,同图4,随着缺陷层折射率(光学厚度)增大,缺陷模波长向长波方向移动。由图5还可看出,缺陷模中心波长随着折射率的变化基本呈线性关系。

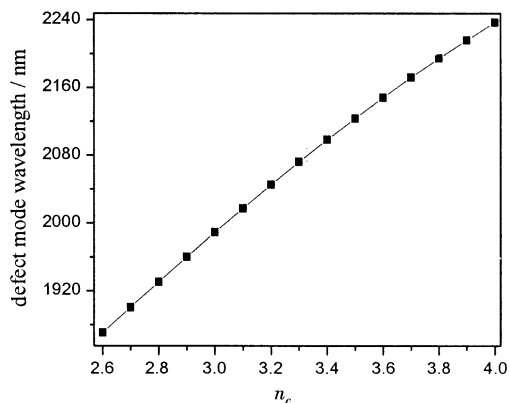


图5 缺陷模中心波长随缺陷层折射率的变化

4 结论

利用传输矩阵法研究了单折射率层缓变结构一维光子晶体引入缺陷层后的缺陷模特性。结果表明,同传统的周期结构,当在该准周期结构中引入缺陷时存在缺陷模。研究表明,缺陷的位置及其透射峰的大小随缺陷层的位置、缺陷层的光学厚度变化。因此我们可以根据需要,通过调节缺陷层位置和缺陷层光学厚度,来控制缺陷模的位置以及缺陷模透射率的大小。

参考文献:

- [1] Y Fink, J N Winn, S Fan, et al. A dielectric omnidirectional reflector [J]. Science, 1998, 282 (5394): 1679 - 1682.
- [2] E L Albuquerque, M G Cottam. Theory of elementary excitations in quasiperiodic structures [J]. Physics Reports., 2003, 376(4 - 5): 225 - 337.
- [3] W Steurer, D Sutter-Widmer. Photonic and phononic quasicrystals [J]. J. Phys. D: Appl. Phys., 2007, 40 (13): 229 - 247.
- [4] 伍清萍,刘正方,陈爱喜. 光在有缺陷存在的斐波那契准晶中的透射特性 [J]. 发光学报, 2006, 27 (6): 856 - 960.
- [5] 伍清萍,刘正方,陈爱喜. 不同偏振下 Fibonacci 准周期超晶格的传输特性 [J]. 量子电子学报, 2008, 25 (1): 105 - 108.
- [6] 武继江,石邦任,孔梅. 单折射率层缓变结构一维光子晶体的能带特性 [J]. 激光杂志, 2005, 26 (3): 33 - 34.