

文章编号: 0253-2239(2004)11-1557-4

一维光子晶体掺杂缺陷模研究

方云团¹ 沈廷根^{2,3} 谭锡林³

1 镇江船艇学院物理系, 镇江 212003
2 江苏大学物理系, 镇江 212003
3 南京师范大学江苏省光电中心实验室, 南京 210097

摘要: 用特征矩阵法计算了光波在包含多种掺杂缺陷的一维光子晶体中的传播规律, 与不包含缺陷的结构相比较, 在禁带中形成缺陷模。缺陷模的位置、数目和强度不仅和缺陷的产生方式有关, 还和缺陷位置处的光学厚度及折射率的变化有关。当掺杂缺陷的位置呈等间距时, 相应缺陷模也呈等间距排列。随着掺杂缺陷光学厚度的变化, 缺陷模的位置、数目也随之变化。保持掺杂缺陷光学厚度不变, 掺杂缺陷折射率的变化将会引起缺陷模强度的变化, 并存在一个最大值。缺陷模的出现一般使带隙加宽, 尤其是掺杂介质的折射率与周期介质的折射率差别较大时更加明显。掺杂空气介质时可使缺陷模的透射率近似为 1。

关键词: 光电子学; 波动光学; 光子晶体; 特征矩阵法; 缺陷模

中图分类号: O436 文献标识码: A

Study on One-Dimensional Photonic Crystal with Impurity Defects

Fang Yuntuan¹ Shen Tinggen^{2,3} Tan Xilin³

1 Department of Physics, Zhenjiang Watercraft College, Zhenjiang 212003
2 Department of Physics, Jiangsu University, Zhenjiang 212003
3 Photoelectricity Central Laboratory of Jiangsu Province, Nanjing Normal University, Nanjing 210097

(Received 9 July 2003; revised 10 March 2004)

Abstract The light wave propagation in one-dimensional photonic crystal with multiple defects is studied by eigen matrix method. There are defect modes in the bandgaps. The defect modes are greatly related with the generating form, optical thickness and refractive index of defect. With the optical thickness of impurity changing, the position and number of defect modes change. Keeping the optical thickness of impurity constant, the changing of refractive index of defect leads to the changing of intensity of defect mode, and there is a maximum among them. If the position of impurity arrange in equal distance, then the defect modes arrange in equal distance, too. The creation of defect modes can broaden the bandgaps, especially when refractive index of defect is much different from that of periodical medium. The defect of air can make transmission rate up to one.

Key words: optoelectronics; wave optics; photonic crystal; eigen matrix; defect mode

1 引 言

光子晶体是一种介质折射率周期性变化的人造光学材料。当光在这种介质中传播时, 某些频率范围内的光会受到抑制, 形成光子禁带, 类似于半导体

材料中电子的能带结构^[1~8], 在带隙中光传播是禁止的, 辐射模构成导带。光子禁带形成的机制是光子自发辐射的几率与光子所在频率态的数目成正比, 若自发辐射的光频率正好落在禁带中时, 该频率光子态的数目为零, 自发辐射也就被抑制。相对而言, 一维光子晶体在结构上最为简单, 易于制备, 也是人们研究得较多的一种结构。我们知道晶体中的

E-mail: fangyt432@sohu.com

收稿日期: 2003-07-09; 收到修改稿日期: 2004-03-10

杂质或缺陷会在禁带中形成杂质能级,如果在光子晶体中引入杂质或缺陷,对光子的能带产生怎样的影响将是一个有意义的课题。为此本文对一维光子晶体中多种形式的掺杂和缺陷对光波传播的影响进行了详细的研究。

2 模型和计算结果

先考虑有两种不同相对介电常量(ϵ_a, ϵ_b),厚度(a, b)周期分布的薄介质层 A, B 构成的一维层状结构(图 1),用文献[2]介绍的特征矩阵方法可以计算光波在此种介质中的透射系数,从而得到光子的能带结构。若在周期性介质结构中加入第三种介质 C,就会形成掺杂缺陷;或让其替代 A 或 B,就会形成替代缺陷,同样可用特征矩阵的方法计算光子的能带结构。

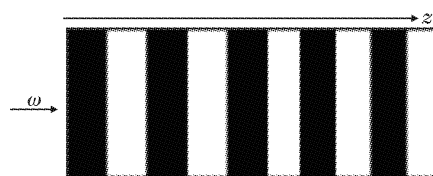


Fig. 1 The model of one-dimensional photonic crystals

先考虑无缺陷的情况,介质层 A: $n_a = 2.6$, 厚度 $a_0 = 740$ nm; 介质层 B: $n_b = 1.45$, 厚度 $b_0 = 1329$ nm。空间周期 $d_0 = a_0 + b_0 = 2069$ nm, 两介质层光学厚度相等($n_a a_0 = n_b b_0, n_a = \sqrt{\epsilon_a}, n_b = \sqrt{\epsilon_b}$)。选取基频 $\omega_0 = \frac{c\pi}{n_a a_0 + n_b b_0} = 244.8$ THz, 相对基频波, 每层介质均为 $1/4$ 波片。层数 $N = 20$ (周期数为 10), 在不同 ω 的条件下计算透射系数(T), 得到光子晶体的带隙结构, 禁带中心均位于基频的奇数倍频处, 而在基频的偶数倍频处禁带消失^[2]。

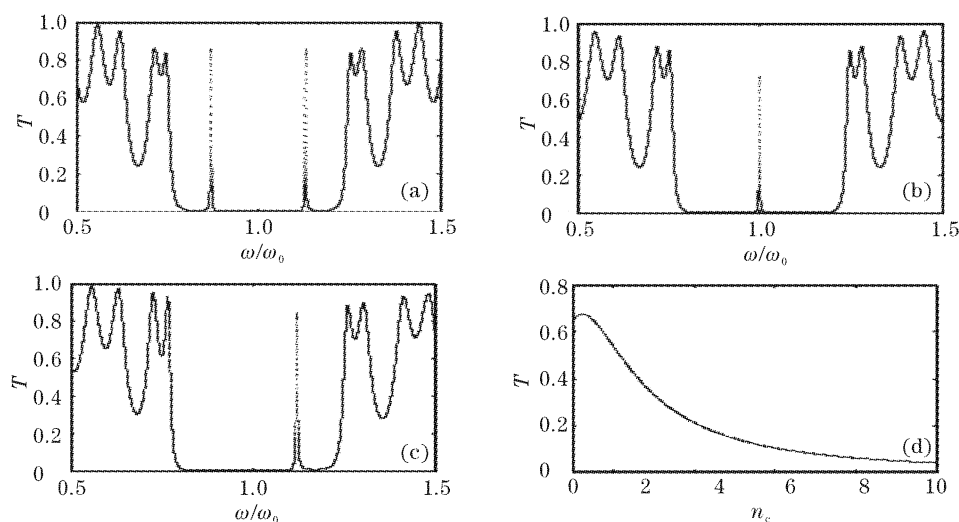


Fig. 2 The defect mode of an impurity

先计算第一种缺陷掺杂。在周期介质层的正中插入第三种介质 C, 其结构为 $(AB)_5 C (AB)_5$ 。取 $n_c = 1.8, \epsilon_c = 3.24$, C 光学厚度为 A 的 4 倍。图 2 (a) 是计算结果, 显示在每个很深的禁带背景区域均出现了两个呈对称分布的尖锐的共振透射模, 利用该透射模可实现选频滤波。为显示方便, 图 2(a) 只画出了第一禁带区。把 C 层介质光学厚度变为原来的 $1/4$, 即和 A, B 相等, 则在原来每个禁带区域缺陷模的个数由两个变为一个, 且正好位于基频 ω_0 的奇数倍处, 见图 2(b)。利用此结构做成滤波器, 就可以很方便地得到频率是基频 ω_0 奇数倍的光波信号。研究发现要在基频 ω_0 处出现透射模, C 层光学厚度必须为 A 的奇数倍。继续把 C 层介质光学厚度减小一半, 则单个缺陷模的频率向右偏移, 如

图 2(c) 所示。若保持 C 层介质光学厚度和 A, B 相等, 计算基频 ω_0 处透射率随 C 层介质折射率的变化, 结果如图 2(d) 所示。很明显, 当 $n_c = n_b$ 时, T 取得最大值, 此后 T 随着 n_c 的增加而单调地下降, 从而说明缺陷模的强度不仅和缺陷层的光学厚度有关, 还和缺陷层的折射率与相邻介质的对比有关。

改变缺陷的形式为替代形式, 即用介质 C 替代正中的介质 B, 其结构为 $(AB)_4 AC (AB)_5$ 。仍取 $n_c = 1.8, \epsilon_c = 3.24$, C 的光学厚度为 A 的 4 倍进行计算。与图 2(a) 比较有明显不同, 每个禁带区域缺陷模的个数由两个变为一个, 且正好位于基频处, 见图 3(a)。然后改变 C 层介质光学厚度, 结果发现只有在 C 层光学厚度为 A 或 B 的偶数倍时才会基频 ω_0 处出现缺陷模, 这种情况与掺杂式缺陷又有不

同。保持 C 层介质光学厚度为 A 的两倍,然后计算基频 ω_0 处透射率随 C 层介质折射率的变化,结果如图 3(b) 所示。缺陷模透射率曲线以 $n_a=2.6$ 为界明显分为两个区域,在 n_c 小于 n_a 时,透射率 T 几

乎成线性增加,而 n_c 大于 $n_a=2.6$ 后 T 增加变慢,特别是在 n_c 大于 5 以后几乎不再发生变化,这一点与图 2(d) 明显不同。

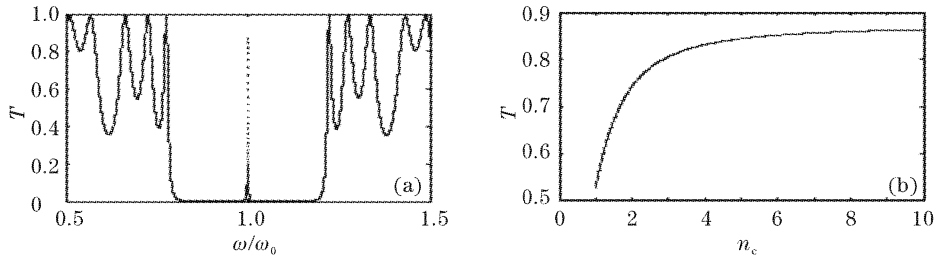


Fig. 3 The defect mode of a substitute

第三种缺陷的形式为改变周期结构中某层的厚度,例如中间 B 层。结果发现当中间 B 层光学厚度变为原来的偶数倍时,缺陷模出现在禁带正中,即基频 ω_0 的奇数倍处;而中间 B 层光学厚度为原来的奇数倍时,每个禁带区域缺陷模的个数为两个,且

在禁带区域呈对称分布。图 4(a) 表示的是中间 B 层光学厚度为原来的两倍时的情况,此种情况也等效于在周期结构中删去一层 A 后形成的缺陷;中间 B 层光学厚度为原来的三倍时的情况见图 4(b)。

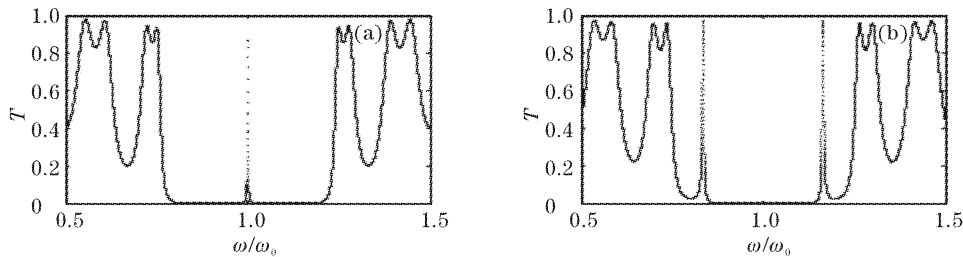


Fig. 4 The defect mode resulting from the changing of optical thickness of B layer

下面我们研究在周期结构中多处掺杂的情况,掺杂层 C 仍取 $n_c=1.8, \epsilon_c=3.24$, 光学厚度与 A, B 相等,其折射率大小在 A, B 之间。我们先采取隔一个周期掺杂的模式,其结构如下:

- (AB)₄ACBACB(AB)₄(2 层掺杂);
- (AB)₄CABCABC(AB)₄(3 层掺杂);
- (AB)₃(ACB)₄(AB)₃(4 层掺杂);
- 以下如此类推.

图 5 给出了 4 层和 5 层掺杂模式的计算结果。从所有的计算结果中我们得出了有意义的结论:禁带区域缺陷模的个数与掺杂层数相等呈等间距排列,且

随着掺杂层数的增多,原来的禁带区域也越来越宽。另外若掺杂间隔不相等,则缺陷模的频率位置也呈不等距排列,掺杂间隔越大,相应缺陷模频率间距也越大。图 6 是“(AB)₃CABCABABCABC(AB)₃”掺杂模式的计算结果,可以看出,由于中间两个掺杂层间距为两个周期,相应中间两个缺陷模间距就为其它的两倍。然后我们选择另外两种掺杂材料,一种是高折射率材料碲化铅,表示为 D, $n_d=4.1, \epsilon_d=16.81$ 光学厚度和 A, B 相等,掺杂模式为 (AB)₃(ADB)₄(AB)₃, 与 4 层 C 材料掺杂模式相同;另一种掺杂材料折射率最低,就取为空气 ($n=1$), 光学厚度和 A, B 相等,掺杂

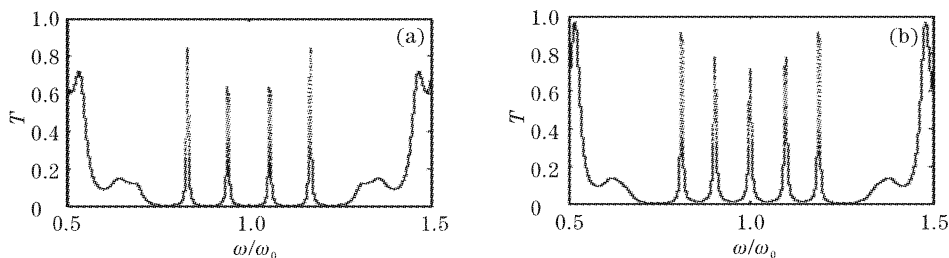


Fig. 5 The defect mode with the same space between two impurities. (a) 4-layer impurities, (b) 5-layer impurities

模式与 D 材料相同。两种情况的计算结果如图 7 所示。与 C 材料掺杂模式相比较,两者的共同之处是缺陷模使带隙大大加宽,约为 $0.5\omega_0 - 1.5\omega_0$, 缺陷模的频率位置呈等间距排列; 不同之处, D 材料掺杂缺陷模强度明显小于空气材料掺杂, 且 D 材料掺杂各缺陷模强度不等, 呈两侧大中间小分布, 而空气材料掺杂各缺陷模透射率达到最大值, 几乎均为 1。上述结果具有重要的实践意义, 可帮助我们根据需求控制掺杂的层数和位置, 设计出多通道滤波器, 从而有望在光波分复用通信系统中发挥作用。

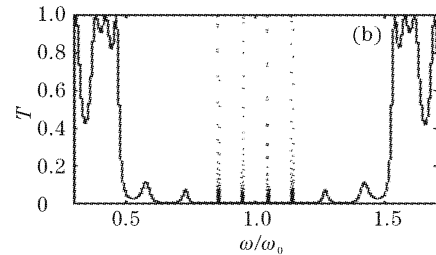
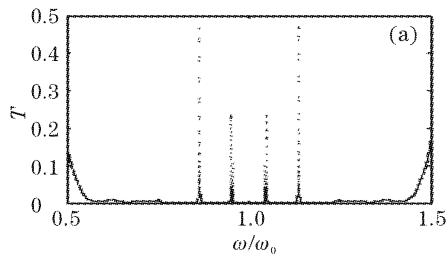


Fig. 7 The defect mode made by impurities of medium with high refractive index (a) and air (b)

结论 光子晶体一方面可以抑制自发辐射, 另一方面若在光子晶体中引入缺陷, 光子禁带中会出现品质因子非常高的杂质态, 具有很大的态密度, 实现自发辐射的增强, 形成了缺陷模。另外, 本文的研究还说明在一维光子晶体中不同的缺陷形式会产生不同的缺陷模, 缺陷的光学厚度, 折射率和位置都是影响缺陷模的重要因素。

参 考 文 献

- 1 Gu Guochang, Li Hongqiang, Chen Hongtao *et al.*. Properties of light propagation in 1-D periodic dielectric structure. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2000, **20**(6): 728~733 (in Chinese)
- 2 Wang Hui, Li Yongping. An eigen matrix method for obtaining the band structure of photonic crystals. *Acta Physica Sinica* (物理学报), 2001, **50**(11): 2172~2178 (in Chinese)
- 3 Thomas F Krauss, Richard M. De La Rue. Photonic crystals in the optical regime—past, present and future. *Progress in Quant. Electron.*, 1999, **23**: 51~96
- 4 Ouyang Zhengbiao, Li Jingzhen *et al.*. Investigation on multi-layer photonic-crystal optical-filters. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(1): 79~84 (in Chinese)
- 5 Jin Chongjun, Qin Bai, Yang Miao *et al.*. Two dimensional photonic band structure: triangular non-bravais lattice. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1997, **17**(4): 409~413
- 6 Zhu Zhihong, Ye Weimin, Yuan Xiaodong *et al.*. Study of transmission characteristics of 2-D photonic crystals by the finite-difference time-domain method. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2003, **23**(5): 522~525 (in Chinese)
- 7 Song Junfeng, Chang Yuchun, Wang Haisong *et al.*. Transmission characteristic of photonic crystal waveguide. *Chin. J. Lasers* (中国激光), 2002, **A29**(8): 711~713 (in Chinese)
- 8 Ni Yi, Peng Jiangde, Ke Yajie *et al.*. Single-mode photonic crystal fiber with a large core. *Chin. J. Lasers* (中国激光), 2003, **30**(10): 901~903

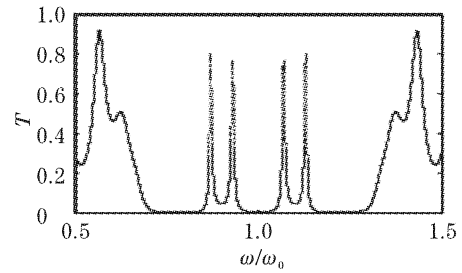


Fig. 6 The defect mode with different spaces between impurities