文章编号:1001-5078(2014)11-1253-05

光子晶体

## 两端对称缺陷对对称结构光子晶体透射谱的影响

苏 安1,蒙成举1,高英俊2,潘继环1

(1. 河池学院物理与机电工程学院,广西 宜州 546300;

2. 广西大学物理科学与工程技术学院,广西南宁 530004)

**摘 要:**通过传输矩阵法理论,研究两端对称缺陷 C 对一维光子晶体 AC<sub>m</sub>B(AB)<sub>n</sub>(BA)<sub>n</sub>BC<sub>m</sub>A 透射谱的影响,发现:当无缺陷 C 时,透射谱符合镜像对称结构光子晶体的透射谱特征。当引入缺陷 C 后,随着缺陷折射率  $n_c$  的增大,禁带中的透射峰逐渐变宽的同时向高频方向移动。缺陷周期 数 m 及其光学厚度  $D_c$  对透射谱的影响,在数值上具有明显的奇偶特性,m 为奇数或  $D_c$  为奇数倍时,禁带中心均出现一个较宽的通带,且通带宽度随着 m 或  $D_c$  的增大逐渐变窄,而且通带上方的振荡加快,但通带中心所处频率位置不变;m 为偶数或  $D_c$  为偶数倍时,禁带中心均出现一条细窄缺陷模,且缺陷模的宽度随着 m 或  $D_c$  的增大缓慢变窄,但其位置不变;两端对称缺陷对对称结构 光子晶体透射谱的调制规律,为光子晶体设计窄带、宽带光学滤波器或光开关等提供指导。 关键词:对称缺陷;光子晶体;透射谱;影响

中图分类号:0431 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2014.11.016

# Effect of bilateral symmetrical defect on symmetrical photonic crystal transmission spectrum

SU An<sup>1</sup>, MENG Cheng-ju<sup>1</sup>, GAO Ying-jun<sup>2</sup>, PAN Ji-huan<sup>1</sup>

(1. School of Physics and Mechanical & Electronic Engineering, Hechi University, Yizhou 546300, China;

2. College of Physical Science and Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China)

**Abstract**: The transmission matrix method theory is applied to study the effect of bilateral symmetrical defect C on the transmission spectrum of symmetrical photonic crystal  $AC_mB(AB)_n(BA)_nBC_mA$ . The result shows that when there is no defect C, transmission spectrum shows a characteristic of mirror symmetry photonic crystal. When the defect C is introduced, the transmission peak becomes wider and moves to higher frequency with the increasing of refractive index  $n_c$ . The effect of defect periodicity m and optical thickness  $D_c$  on the transmission spectrum obviously has a characteristic of numerical parity; when m is odd numbers or the optical thickness  $D_c$  is odd times, there is a wide transmission band appearing in gap center; it narrows down with the increasing of m or  $D_c$ , and the oscillation on it becomes intense but its center keeps in a stable frequency. When m is even numbers or the  $D_c$  is even times, there is a narrow defect mode appearing in gap center, and it slowly becomes narrower with the increasing of m or  $D_c$ , but its position stays the same. These properties can provide theoretical basis for design of width or narrow optical filter devices. **Key words**; symmetrical defect; photonic crystal; transmission spectrum; effect

1 引 言

光子晶体<sup>[1-2]</sup>概念提出近 30 年来,其潜在的应 用价值已经引起世人的广泛关注并取得了一系列的 研究成果。作为一种人工薄膜光学材料,其最奇异 的光学特性是存在光子带隙,这使光子替代电子传 输信息成为可能,并具有巨大的应用前景<sup>[3-12]</sup>。

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 51161003);广西自然科学基金重点项目(No. 2012GXNSFDA053001);广西高校科学技术研究重点项目(No. 2013ZD058,2013YB206);河池学院重点科研基金资助课题(No. 2013ZA - N003,2013B - N005)资助。

作者简介:苏 安(1973 - ),男,副教授,硕士学位,主要研究方 向为光子晶体。E-mail:suan3283395@163.com 收稿日期:2014-04-14

缺陷[7-11] 是破坏光子晶体周期性排列结构,即 在光子晶体组成介质间插入的不同介质。准周期性 排列的光子晶体透射谱一般由禁带和通带交替排列 形成,当光子晶体中插入缺陷后,可使禁带中出现缺 陷模---透射峰,调整缺陷的位置或参数即可改变 缺陷模的频率位置或性能<sup>[7-11]</sup>。在已有的文献报 道中,往往都是在光子晶体组成介质的某个部位插 入缺陷,而在两端特别是镜像对称结构的光子晶体 两侧插入对称缺陷的研究还很少见。当在镜像对称 结构的两侧加入缺陷时,缺陷就象光量子阱两侧的 垒层一样,可增强光子晶体对入射到其中光场的局 域限制作用,从而改变光子晶体透射谱的特 性[3-6,9-10]。基于这种思路,本文在构造镜像对称 结构光子晶体(AB),(BA),的基础上,在其两侧加 入缺陷层形成 AC<sub>m</sub>B(AB)<sub>n</sub>(BA)<sub>n</sub>BC<sub>m</sub>A 光子晶体结 构,并绘制出缺陷层取不同参数时光子晶体的透射 谱,找出两端对称缺陷对镜像对称结构光子晶体透 射谱的影响规律,为光子晶体的理论研究和实际设 计提供参考。

#### 2 研究模型和方法

研究模型为一维光子晶体结构  $AC_mB(AB)_n$ (BA)<sub>n</sub>BC<sub>m</sub>A,其中 C 是插入到镜像对称结构光子晶 体(AB)<sub>n</sub>(BA)<sub>n</sub> 两端的缺陷。各层介质的参数分别 为:折射率  $n_A = 4.1$ ,  $n_B = 2.35$ ,  $n_C = 1.35$ ,介质层 厚度  $d_A = 763$  nm,  $d_B = 1329$  nm,  $d_C = n_A d_A / n_C$ , 即缺陷层的的光学厚度  $D_c$ 等于 A 介质层的光学厚 度  $D_A$ 。

鉴于研究的主要对象是光子晶体的透射谱,所 以研究、计算方法采用比较直观且成熟的传输矩阵 法<sup>[3-12]</sup>。传输矩阵法最突出的优势就是可以用一 个传输矩阵描述光在每层介质中的行为,光在光子 晶体中的行为则可用一个总传输矩阵表示,总传输 矩阵为各分层矩阵之积,由该总传输矩阵即可计算 出光通过光子晶体后光的各种传输指标,如光场在 光子晶体内部的局域强度,光被光子晶体表面反射 的反射系数和反射率,光透过光子晶体的透射系数 和透射率等。传输矩阵法理论的详细介绍可见文献 [12],在此不再详述。

#### 3 计算结果与分析

#### 3.1 无缺陷时光子晶体的透射谱

在两侧插入缺陷之前,光子晶体(AB)<sub>n</sub>(BA)<sub>n</sub> 是普通的镜像对称结构模型,分别取周期数 n = 2、 3、4、5、6,考虑光正入射到光子晶体表面,通过计算 机数值计算模拟,得出光子晶体的透射谱,如图1 所 示,图中横坐标用归一化频率  $\omega/\omega_0$  表示单位。图 1 透射谱的特征符合镜像对称结构光子晶体透射谱的 特征,即在宽大的禁带中心出现一条透射带(或透 射峰),其形成原因是镜像对称结构光子晶体的周 期性排列中心总存在一个空位缺陷,(AB)<sub>n</sub>(BA)<sub>n</sub> 可排列成 ABAB···AB A BA···BABA,其中 A 就是 对称中心缺失 A 介质而形成的空位缺陷,所以在禁 带中心形成缺陷模。从图 1 还看到,随着对称周期 数 n 的增大,光子晶体禁带中的透射带会越来越窄 最终趋向于窄透射峰,但透射带(或透射峰)所处的 频率位置、透射峰数目及透射率等均不变。可见,此 镜像对称结构光子晶体的透射谱也具有镜像对称结 构的特征,而且透射谱的对称性不随光子晶体的周 期数变化而改变<sup>[9-11]</sup>。透射谱的这种特性可为设 计固定通道的光学滤波器件提供理论依据。



Fig. 1 Handmission spectrum of Filotonic Crystal  $(HD)_n$ 

3.2 缺陷折射率 n<sub>c</sub> 对透射谱的影响

为研究两端对称缺陷对镜像对称结构光子晶体 透射谱的影响,我们固定镜像对称结构光子晶体的 排列周期数 n = 5,即(AB)<sub>5</sub>(BA)<sub>5</sub>,然后在光子晶体 两端的 AB 介质中插入缺陷 C,形成两端对称缺陷 光子晶体结构 AC<sub>m</sub>B(AB)<sub>5</sub>(BA)<sub>5</sub>BC<sub>m</sub>A,模型中 *m* 是缺陷层 C 的排列周期数。显然,两端插入缺陷 C 后光子晶体仍然满足镜像对称结构,而其透射谱对 缺陷的响应如何,我们可作如下研究。

首先,保持光子晶体其他参数不变,取缺陷层 C 的介质折射率  $n_c = 1.15$ 、1.25、1.35、1.45、1.55,则 两端对称缺陷对称光子晶体 AC<sub>5</sub>B(AB)<sub>5</sub>(BA)<sub>5</sub>BC<sub>5</sub>A 的透射谱如图 2 所示。从图 2 可见,随着两端对称 缺陷折射率  $n_c$  增大,禁带中透射峰的带宽也随之变 宽,如以半高全宽描述透射峰或透射带的带宽(下 同),则当  $n_c$  = 1.15 时,透射峰带宽为  $\Delta \omega$  = 3.8 ×  $10^{-4}\omega/\omega_0$ ,  $n_c$  = 1.55 时,  $\Delta \omega$  = 1.7 ×  $10^{-3}\omega/\omega_0$ ; 而且 随着  $n_c$  增大禁带中心的透射峰会逐渐向高频方向 移动,  $n_c$  = 1.15 时,透射峰中心处于 0.999 $\omega/\omega_0$  频 率处,  $n_c$  = 1.55 时,透射峰中心则处于 1.004 $\omega/\omega_0$ 频率处。对比(AB)<sub>n</sub>(BA)<sub>n</sub> 的透射谱特性可知, 两 端插入对称缺陷后,随着缺陷折射率的变化,光子晶 体的透射谱不再具备镜像对称结构的特性。但利用 两端对称缺陷折射率对镜像对称结构光子晶体透射 谱的调制规律,可指导宽带滤波器和光学开关的 设备。



图 2  $n_c$ 对 AC<sub>5</sub>B(AB)<sub>5</sub>(BA)<sub>5</sub>BC<sub>5</sub>A 透射谱的影响 Fig. 2 Transmission spectrum of AC<sub>5</sub>B(AB)<sub>5</sub>(BA)<sub>5</sub>BC<sub>5</sub>A versus  $n_c$ **3.3** 缺陷光学厚度  $D_c$  对透射谱的影响

由光子晶体的模型参数可知,缺陷层的厚度  $D_c$ 是以A介质层的光学厚度  $D_A$ 来度量的,因此,保持 光子晶体 AC<sub>m</sub>B(AB)<sub>5</sub>(BA)<sub>5</sub>BC<sub>m</sub>A 的其他参数不 变,分别取两端缺陷层的光学厚度  $D_c = 1D_A \cdot 2D_A \cdot$  $3D_A \cdot 4D_A \cdot 5D_A \cdot 6D_A \cdot 7D_A \cdot 8D_A \cdot 9C_A \cdot 11$ 算绘制出光子 晶体的透射谱如图 3 所示。

从图 3 可见,两端对称缺陷光子晶体透射谱对 缺陷光学厚度奇偶倍数的响应不同,当 $D_c$ 为 $D_A$ 的 奇数倍时,禁带中心出现一条带宽比较宽的通带,而 且当 $D_c$ 奇数倍增大时,通带中心保持在1.0 $\omega/\omega_0$ 频 率位置不变,但通带迅速变窄,当 $D_c = 1D_A$ 时,  $\Delta\omega = 2.46 \times 10^{-2} \omega/\omega_0$ ,当 $D_c = 7D_A$ 时, $\Delta\omega = 1.16$  ×  $10^{-2}\omega/\omega_0$ 。同时,通带上方出现振荡,振荡峰的数 目等于3条,而且振荡峰随 $D_c$ 按 $D_A$ 奇数倍增大而快 速生长,如图 3(a)、(b)、(c)、(d)所示。可以预测, 当 $D_c$ 随 $D_A$  奇数倍增大到一定数值时,剧烈的振荡 将使通带变成3条透射峰。当 $D_c$ 为 $D_A$ 的偶数倍 时,禁带中心则出现一条窄透射峰,而且 $D_c$ 偶数倍 增大时,该窄透射峰中心保持在1.0 $\omega/\omega_0$ 频率位置 不变,但窄透射峰的带宽缓慢变窄,利用计算机程序 对图 3(e)~(h)中的各窄透射峰的半高全宽进行 测量得:当 $D_c = 2D_A$ 时, $\Delta\omega = 2.83 \times 10^{-4}\omega/\omega_0$ ,当  $D_c = 8D_A$ 时, $\Delta\omega = 2.61 \times 10^{-4}\omega/\omega_0$ 。



图 3  $D_C$  对 AC<sub>5</sub>B(AB)<sub>5</sub>(BA)<sub>5</sub>BC<sub>5</sub>A 透射谱的影响

Fig. 3 Transmission spectrum of  $AC_5B(AB)_5(BA)_5BC_5A$  versus  $D_C$ 

可见,两端对称缺陷光学厚度对光子晶体透射 谱对称性没有影响,但对透射谱的带宽影响明显,而 且影响具有奇偶性。如果要设计窄带光学滤波器件 时,可考虑以*D<sub>c</sub>*随*D<sub>A</sub>*偶数倍变化作为调制机制,而 如果要设计宽带光学器件时,则可选择*D<sub>c</sub>*随*D<sub>A</sub>*奇 数倍变化作为调制机制。

3.4 缺陷周期数 m 对透射谱的影响

在其他参数不变的条件下,取缺陷层的周期数 m = 1,2,3,4,5,6,7,8,通过计算机数值计算模拟,可得光子晶体  $AC_mB(AB)_5(BA)_5BC_mA$  的透射谱, 如图 4 所示。

从图 4 可见,对称缺陷层的周期数对光子晶体的透射谱影响同样具有奇偶性:当周期数 *m* 为奇数时,光子晶体的禁带中出现一条带宽较宽的透射通带,随着 *m* 奇数倍增大,该通带逐渐变窄,当 *m* = 1 时, $\Delta \omega$  = 3.22 × 10<sup>-2</sup> $\omega/\omega_0$ ,当 *m* = 7 时, $\Delta \omega$  = 2.22 × 10<sup>-2</sup> $\omega/\omega_0$ 。同时,通带上方出现振荡,振荡峰

的高度比较低,即振荡不剧烈。另外,随着周期数 m 为奇数倍增大,禁带中的通带中心保持在 1.0 $\omega/\omega_0$ 频率位置不变,如图 4(a)、(b)、(c)、(d)所示。当 周期数 m 为偶数时,光子晶体的禁带中则出现一条 窄带透射峰,随着 m 偶数倍增大,该窄带透射峰的透 射率和中心位置保持在 1.0 $\omega/\omega_0$  频率位置不变,但 窄透射峰的带宽非常缓慢的变窄,通过计算机程序 对图 3(e)~(h)中的各窄透射峰的半高全宽进行 测量得:当m = 2时, $\Delta\omega$  = 2.89×10<sup>-4</sup> $\omega/\omega_0$ ,当m = 8时, $\Delta\omega$  = 2.85×10<sup>-4</sup> $\omega/\omega_0$ 。由于透射峰带宽随 m 偶数倍增大时变化比较慢,所以出现图 4(e)~(h) 透射谱中的窄透射峰带宽不变的"假象"。





可见,两端对称缺陷排列周期数对光子晶体透 射谱对称性也没有影响,但对透射谱的带宽影响明 显,而且影响也具有奇偶性。当要设计窄带光学滤 波器件时,可考虑周期数 m 以偶数倍变化作为调制 机制,而如果要设计宽带光学器件时,则应选择周期 数 m 以奇数倍变化作为调制机制。

### 4 结 论

利用传输矩阵法理论,通过计算机数值计算模 拟的方式,研究两端对称缺陷对对称结构一维光子 晶体光子晶体 AC<sub>m</sub>B(AB)<sub>n</sub>(BA)<sub>n</sub>BC<sub>m</sub>A 透射谱的影 响,得出如下结论:

(1)当两端不存在缺陷时,光子晶体透射谱 具有镜像对称性,而且镜像禁带中心的单条透射 峰随着光子晶体(AB)<sub>n</sub>(BA)<sub>n</sub>周期数n的增大而 变得细窄,但周期数n不影响透射谱的对称性 结构。

(2) 随着两端对称缺陷层折射率 n<sub>c</sub> 的增大,光

子晶体透射谱不再具有对称性,透射峰向高频方向 移动的同时带宽逐渐变宽。

(3)两端对称缺陷的光学厚度和排列周期数对 光子晶体透射谱的对称性没有影响,但对带宽产生 影响,且影响具有奇偶性。随着缺陷光学厚度和排 列周期数奇数倍增大,禁带中心出现较宽的透射带, 而且透射带会逐渐变窄,同时透射带上方出现振荡 峰;随着缺陷光学厚度和排列周期数偶数倍增大,禁 带中心出现单条窄透射峰,而且透射峰带宽也会逐 渐变窄。

两端对称缺陷对对称结构一维光子晶体光子晶 体透射谱的影响规律,为光子晶体设计宽带、窄带光 学滤波器件或光学开关等提供指导。

#### 参考文献:

- Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solidstate physics and electronics [J]. Phys. Rev. Lett., 1987, 58(20):2059-2061.
- John S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices [J]. Phys. Rev. Lett, 1987, 58 (23):2486 2489.
- [3] SU An, GAO Yingjun. Light propagation characteristics of one-dimensional photonic crystal with double-barrier quantum well[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61 (23): 234208. (in Chinese)
  苏安,高英俊.双重势全一维光子晶体量子阱的光传 输特性研究[J]. 物理学报,2012,61(23):234208.
- [4] SU An, MENG Chenju, GAO Yingjun. Modulation of activated impurity on filter property of photonic crystal quantum well[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(3): 0306001. (in Chinese)
  苏安,蒙成举,高英俊. 激活性杂质对光子晶体量子阱 滤波器特性的调制[J].中国激光, 2014, 41 (3):0306001.
- [5] SU An, GAO Yingjun, MENG Chenju. Localized electric field of one-dimensional photonic crystal quantum well of double barrier[J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(2): 0216002. (in Chinese)
  苏安,高英俊,蒙成举.双重势垒一维光子晶体量子阱 内部局域电场分布[J].光子学报, 2014, 43 (2):0216002.
- [6] SU An, MENG Chengju, GAO Yingjun. Filter with one-dimensional photonic crystal quantum well possessing high-quality filtering functions [J]. Chinese Journal of Lasers, 2013,40(10):1006001. (in Chinese)
  苏安,蒙成举,高英俊. 实现高品质滤波功能的一维光子晶体量子阱滤波器[J].中国激光,2013,40

(11):1253-1257.

(10):1006001.

[7] SU An, LI Xianji. Defectmodes of one-dimensional photonic crystal for realizablemultiple channeled filter [J]. Laser & Infrared, 2010, 40 (5):0532 - 0536. (in Chinese)

苏安,李现基. 实现多种通道滤波功能的一维光子晶体缺陷模[J]. 激光与红外,2010,40(5):0532-0536.

- [8] YANG Fan, TANG Jiyu, YANG Shudong, et al. Doped modes of MgF<sub>2</sub>/CdSe one-dimensional photonic crystal with Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> in visible region[J]. Laser & Infrared, 2011, 41(11):1253-1257. (in Chinese)
  杨帆,唐吉玉,杨述东,等. 一维光子晶体 MgF<sub>2</sub>/CdSe 及其缺陷结构的反射性质[J]. 激光与红外, 2011, 41
- [9] PAN Jihuan, SU An, MENG Chengju, et al. Effect of barrier layer periodicity asymmetry on photonic crystal quantum well transmission spectrum [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(01):012701. (in Chinese) 潘继环,苏安,蒙成举,等. 垒层周期不对称度对光量

子阱透射谱的影响[J].激光与光电子学进展,2014, 51(01):012701.

- [10] SU An, QIN Zongding, GAO Yingjun. Transmission properties of one-dimension photonic crystal quantum well with mirror symmetry structure[J]. Laser & Infrared, 2011, 41 (8):0889-0993. (in Chinese)
  苏安,覃宗定,高英俊. 镜像对称结构—维光量子阱的光 传输特性[J]. 激光与红外,2011,41(8):0889-0993.
- [11] MENG Chengju, SU An. Absorption's influence on the transmission spectrum of mirror symmetry one-dimension photonic crystal [J]. Laser & Infrared, 2011, 41 (11): 1248 1252. (in Chinese)
  蒙成举,苏安. 吸收对镜像对称一维光子晶体透射谱的影响[J]. 激光与红外,2011,41(11):1248 1252.
- [12] WANG Hui, LI Yongping. An eigen matrix method for obtaining the band structure of photonic crystals [J]. Acta Physica Sinica, 2001, 50(11):2172-2178. (in Chinese) 王辉,李永平. 用特征矩阵法计算光子晶体的带隙结构[J]. 物理学报, 2001, 50(11):2172-2178.