

# 含负折射率介质的光子晶体量子阱的透射谱特性研究\*

## Transmission Spectra of Quantum Well of Photonic Crystals with Negative Dielectric

黄创高, 焦美娜, 卢强华, 高英俊

HUANG Chuang-gao, JIAO Mei-na, LU Qiang-hua, GAO Ying-jun

(广西大学物理学院, 广西南宁 530004)

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

**摘要:** 构建具有双量子阱结构的一维光子晶体  $(AB)_m(CD)_n(AB)_m(CD)_n(AB)_m$  的物理模型  $[(AB)_5(CD)_n]_2(AB)_5$ , 考虑介质为正折射材料或负折射材料情况, 利用传输矩阵法对不同的  $n$  取值及 C、D 材料进行色散关系和透射能带谱的数值计算与分析, 揭示光子逐穿多量子阱结构时谱线条数及其分裂的规律性。结果表明, 当重复周期数  $n$  相同时, C、D 介质均为相等的正材料或均为相等的负材料透射谱的条数不同, 相同的周期数  $n$  对应的正材料光子量子阱比负材料多 2 条双透射峰。而且无论 C 和 D 介质均为相等的正材料或为相等的负材料, 当周期数  $n$  为偶数时, 透射峰之间的距离较远, 当周期数  $n$  为奇数时, 透射峰的条数与周期数为  $n-1$  时相同, 而且透射峰之间距离较近。如果改变双负介质 C、D 材料的折射率, 透射谱的高度将随之改变。这些现象为光子晶体实现多通道滤波器和光通信超密集波分复用提供理论指导。

**关键词:** 光子晶体 量子阱 谱线分裂 透射谱

中图分类号: O431 文献标识码: A 文章编号: 1005-9164(2011)02-0140-04

**Abstract:** The transmission spectra and dispersion relationship of the model  $[(AB)_5(CD)_n]_2(AB)_5$  of one-dimensional photonic crystal  $(AB)_m(CD)_n(AB)_m(CD)_n(AB)_m$  is calculated by means of the transfer matrix method including negative refraction materials. The phenomenon of splitting is analyzed. The results show that at the same cycle period the transmission spectra numbers of C and D media with either all the equal right-handed materials or left-handed materials are different. The right-handed materials have two double transmission peak more than left-handed materials. No matter that C and D media are either all the equal right-handed materials or left-handed materials, when  $n$  is an even number, transmission peaks have long distance each other. When  $n$  is an odd number, transmission peak number equals to the periodicity of  $n-1$ . The transmission index changes with the change in refraction index of C and D media. These features can be used for the design of multi-channel tunable filter and ultra-dense wavelength division multiplexing.

**Key words:** photonic crystal, quantum well, splitting, transmission spectra

量子阱的概念是由 Esaki 和 Tsu 提出的<sup>[1]</sup>。类似于半导体中的量子阱结构<sup>[2]</sup>, 将具有不同光子带隙的光子晶体组合在一起即可形成光子晶体量子阱<sup>[3,4]</sup>。光子晶体量子阱结构是由光子势垒和光子势阱组

成的, 当光子晶体量子阱结构中的中间层光子晶体透射带处于两侧垒层光子晶体禁带时, 就形成了局域的光子态, 这也是量子阱最基本的特征, 根据这些局域光子态的具体情况可以设计新的光子器件<sup>[5-9]</sup>。光子晶体量子阱不仅具备非量子阱光子晶体的特性还具有非量子阱光子晶体所不具有的新异特性。

作者已对一些简单的一维光子晶体透射谱的量子特征作了初步研究, 本文则是针对一种具有双量子阱结构的一维光子晶体  $(AB)_m(CD)_n(AB)_m(CD)_n(AB)_m$  模型进行研究, 考

收稿日期: 2010-10-14

修回日期: 2011-01-20

作者简介: 黄创高(1978-), 男, 实验师, 主要从事材料微结构方面的研究。

\* 国家自然科学基金项目(50661001, 50061001), 广西科学基金项目(0832029, 0991026, 0639004)资助。

虑介质为正折射材料或负折射材料情况,利用传输矩阵法计算模拟光在传输过程中的透射谱结构,揭示透射谱结构的新特征,为设计新的光学器件提供理论指导意义。

## 1 理论与物理模型

### 1.1 光子晶体模型

选定的光子晶体模型为

$(AB)_m(CD)_n(AB)_m(CD)_n(AB)_m$ ,  $m, n$  为重复周期数,如图 1 所示。分别选取 A、B、C 和 D 层介质的厚度取值如下:  $d_A = \lambda_0/4n_A, d_B = \lambda_0/4n_B, d_C = \lambda_0/2n_C, d_D = \lambda_0/2n_C, n_A, n_B, n_C, n_D$  为折射率。

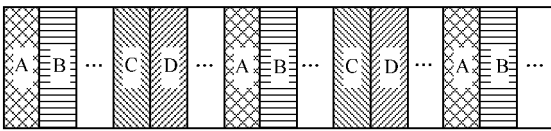


图 1 一维光子晶体  $(AB)_m(CD)_n(AB)_m(CD)_n(AB)_m$  的结构

Fig. 1 Structure of one-dimensional photonic crystal  $(AB)_m(CD)_n(AB)_m(CD)_n(AB)_m$

### 1.2 传输矩阵法

考虑由介质 A、B、C 和 D 交替排列形成的一维光子晶体  $(AB)_m(CD)_n(AB)_m(CD)_n(AB)_m$ ,  $m$  和  $n$  为周期数,介质 A、B、C 和 D 的介电常数分别为  $\epsilon_A, \epsilon_B, \epsilon_C$  和  $\epsilon_D$ , 介质 A、B、C 和 D 的磁导率分别为  $\mu_A, \mu_B, \mu_C$  和  $\mu_D$ , 相应的厚度分别为  $d_A, d_B, d_C$  和  $d_D$ 。又考虑一单频电磁波以一定角度入射进入光子晶体(图 1), 而且为 TE 波, 据传输矩阵理论<sup>[10~12]</sup>, 光波与介质层的相互作用由特征矩阵决定, 单介质层的特征矩阵可推导为<sup>[10~12]</sup>:

$$M_j(\Delta z, \omega) = \begin{pmatrix} \cos k_z^j \Delta z & -\frac{\mu_j}{\sqrt{\epsilon_j \mu_j - \sin^2 \theta}} \sin k_z^j \Delta z \\ \frac{\sqrt{\epsilon_j \mu_j - \sin^2 \theta}}{\mu_j} \sin k_z^j \Delta z & \cos k_z^j \Delta z \end{pmatrix} \quad (1)$$

其中

$$k_z^j = \pm \frac{\omega}{c} \sqrt{\epsilon_j \mu_j - \sin^2 \theta} \quad (2)$$

$\theta$  是入射角,  $\epsilon_i$  和  $\mu_i$  分别为各层介质的介电常数和磁导率常数, 当介质为正材料时,  $k$  取“+”号, 当介质为负介质时,  $k$  取“-”号。  $\Delta z$  为介质厚度。对于一维光子晶体, 当膜层包含  $N$  层时, 整个膜系的特征矩阵  $M$  可由各个膜系的特征矩阵  $M_j$  连乘求得。

$$M = \prod_{j=1}^N M_j = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \quad (3)$$

通过  $M$  可得出膜层的反射系数  $r$ 、反射率  $R$ 、透射系数  $t$  和透射率  $T$ :

$$r = \frac{[x_{11}(\omega) - x_{22}(\omega)] \cos \theta + i[x_{12}(\omega) \cos^2 \theta + x_{21}(\omega)]}{[x_{11}(\omega) + x_{22}(\omega)] \cos \theta + i[x_{12}(\omega) \cos^2 \theta - x_{21}(\omega)]} \quad (4)$$

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

$$t = \frac{2 \cos \theta}{[x_{11}(\omega) + x_{22}(\omega)] \cos \theta + i[x_{12}(\omega) \cos^2 \theta - x_{21}(\omega)]} \quad (6)$$

$$T = |t|^2. \quad (7)$$

由布洛赫定理我们可以得到色散方程:

$$\cos(Kd) = \frac{1}{2} \text{Tr}(M) \quad (8)$$

(8) 式中的  $M$  为 (3) 式中的矩阵  $M$ ,  $\text{Tr}$  为矩阵  $M$  的迹。

## 2 计算与分析结果

### 2.1 C 和 D 介质为正折射率材料的透射谱

光子晶体  $[(AB)_5(CD)_n]2(AB)_5$  的折射率为  $n_A = 4.4, n_B = 1.9, n_C = n_D = 1.12$  时, 从图 2 中的透射峰可以看出, 当  $n = 2$  时出现了 4 条双透射峰, 当  $n = 3$  时, 同样也是在禁带出现 4 条双透射峰, 但是透射峰的位置发生了变化, 峰之间靠得更近; 当  $n = 4$  时, 出现了 6 条双透射峰, 当  $n = 5$  时, 透射峰的条数也为 6 条双透射峰, 但是透射峰之间相距更近。依次类推, 当  $n$  为偶数倍的时候, 透射峰的条数都是依次增加 2 条, 当周期数为  $n + 1$  时, 透射峰的条数和对应  $n$  保持不变, 但是透射峰之间相距更近。

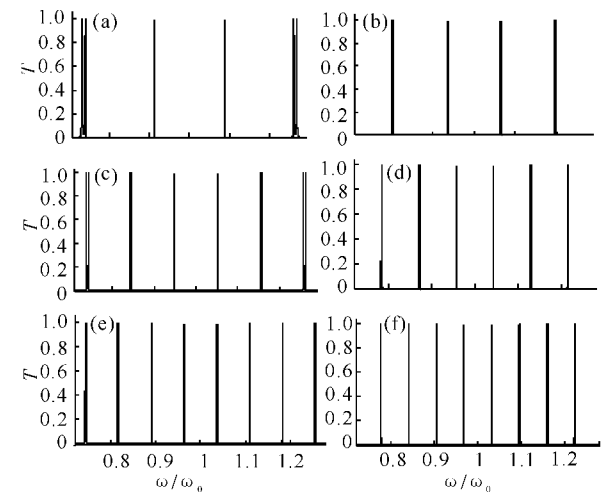


图 2  $n_C = n_D = 1.12$  时,  $[(AB)_5(CD)_n]2(AB)_5$  光量子阱的透射能带谱

Fig. 2 Transmission spectra of quantum well  $[(AB)_5(CD)_n]2(AB)_5$  at  $n_C = n_D = 1.12$  (a)  $n = 2$ , (b)  $n = 3$ , (c)  $n = 4$ , (d)  $n = 5$ , (e)  $n = 6$ , (f)  $n = 7$

## 2.2 C 和 D 介质为负折射率材料的透射谱

图 3(a)~(f) 为折射率  $n_A = 4.4$ 、 $n_B = 1.9$ 、 $n_C = n_D = -1.12$ ，光垂直入射介质表面， $m = 5$ ， $n = 2, 3 \dots 7$ ，用传输矩阵法计算模拟得到一维光子晶体  $[(AB)_5(CD)_n]_2(AB)_5$  量子阱的透射谱。

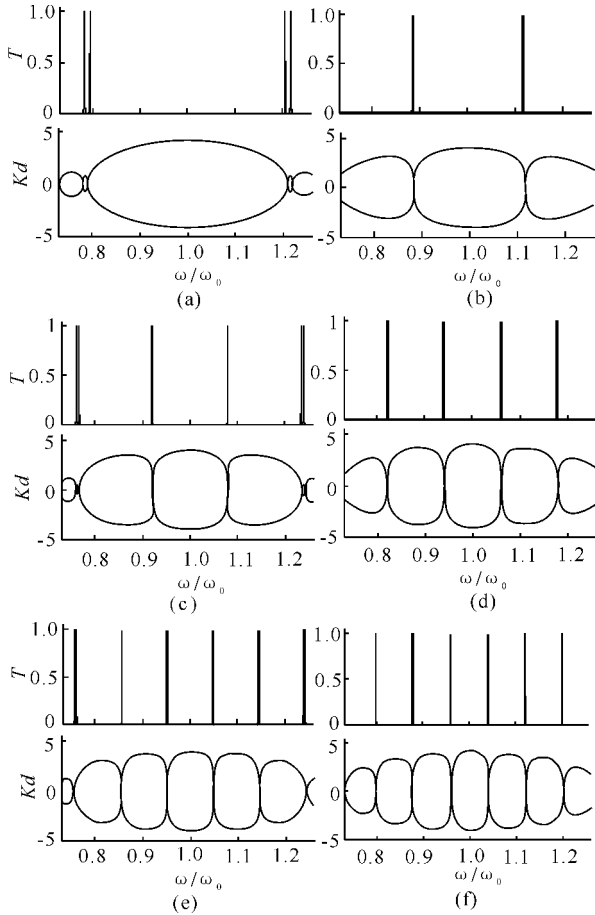


图 3 周期数  $n$  取不同值时一维光子晶体的透射谱及其色散曲线

Fig. 3 Transmission spectra and dispersion curve of one-dimensional photonic crystal at different value of  $n$

(a)  $n = 2$ , (b)  $n = 3$ , (c)  $n = 4$ , (d)  $n = 5$ , (e)  $n = 6$ , (f)  $n = 7$

从图 3 可知，当  $n = 2$  时，出现了 2 组透射谱线，而且每组透射谱线为双线。当  $n = 3$  时，也同样出现了 2 组透射谱，每组透射谱同样也为双线结构，但是每条透射峰靠得更近且透射谱线分裂的两双线比  $n = 2$  时的双线情况靠得更近。当  $n = 4$  时，出现了 4 组双透射峰，外侧的 2 组透射谱线分裂的双线离得较远，中间 2 组透射谱线分裂的双线靠得较近，从透射谱线中很难看出中间 2 条透射谱线为分裂的双线。当  $n = 5$  时，同样在禁带区域出现了 4 组双透射谱线，透射峰之间及分裂的双线之间均靠得很近。当  $n = 6$  时，出现了 6 组双透射峰，外侧的 2 条双透射谱线间距离较大，中间的 4 条双透射谱线分裂的双线间距离很近。当  $n = 7$  时，在禁带区域出现了 6 条双透射谱，同

样的现象是谱线分裂双线间距较  $n = 6$  时靠得更近。模拟得到在禁带区域出现很有规律的谱线分布，在  $n \geq 2$  开始，当  $n$  为偶数时，透射谱线条数和  $n$  是对应的，当  $n$  为奇数时，透射谱线的条数为  $n - 1$  条。

出现上述现象的原因可以看成  $(CD)_n$  是插入光子晶体内的缺陷，当  $n = 1$  时，则  $(AB)_5(CD)_1(AB)_5$  可以表示为  $(AB)_5(CC)_1(AB)_5$ ，当光子晶体结构插入 2 个 C 时，此时出现单个双线透射峰。当  $n = 2$  时，可以看出 AB 和 AB 光子晶体之间插入了 4 块 C 介质，4 块 C 介质缺陷层使得光子晶体结构出现 2 个透射峰，因为该光子晶体结构是  $(AB)_5(CD)_2(AB)_5$  和  $(AB)_5(CD)_2(AB)_5$  相互作用，所以出现 2 个双透射峰。当  $n = 3$  时，可以看出 AB 和 AB 光子晶体间插入 6 块 C 介质，此时 2 块 C 介质不会出现透射谱，所以当  $n = 3$  时，透射谱的条数和  $n = 2$  时相同。当  $n = 4, \dots, 7$  依次类推即可。

出现这种现象也可以由图 3 中 (a)~(f) 各图中的色散曲线来分析。各图中下方的色散曲线和上方的透射谱都是一一对应的。从色散谱可以看出，当  $|\frac{1}{2}Tr(M)| < 1$  时<sup>[11]</sup>，此时布洛赫波矢  $K$  只有实数解，对应透射谱中狭隘的通带；当  $|\frac{1}{2}Tr(M)| > 1$  时，此时布洛赫波矢  $K$  只有虚数解，对应透射谱中的光子带隙。从色散图 3 中可以发现，两侧透射的谱线分裂的双线间隔较宽，对应的色散图出现了 2 个小圆环，小圆环两端对应着分裂的两条精细谱线；透射谱分裂的精细双线结构间隔较窄，色散曲线 2 个圆环结合的也较紧密。

如果 C 和 D 介质均为相等的正折射率材料时，在周期数  $n$  相同的情况下比 C 和 D 介质均为相等的负折射率材料透射峰的条数增加，周期数  $n$  为偶数时透射范围比较宽，适合宽带的光滤波。每条透射谱分裂为 2 条是因为存在两组嵌套连续分布的量子阱结构，从而使单透射峰变成双透射峰。这一特性对多通道滤波器的设计具有指导意义。

由于谱线分裂的 2 条精细结构谱线在一些频率区域间距很近，很难看清楚，为了能更清晰的看到分裂的双线及其对应的色散曲线，图 4 给出对应于图 3 中  $n = 6$  时  $0.9 - 1(\omega/\omega_0)$  对应的透射谱及其色散曲线的局域放大图。从图 4 可以清晰地看到透射峰分裂的双线与色散曲线中小圆环的对应关系，以及透射谱双线结构对应于色散曲线的小圆环。同样，在透射谱其它区域透射峰分裂的双线及其对应的色散曲线情况也如同于图 4。

为了考查改变 C 和 D 介质折射率对透射谱变化规律的影响,图 5 给出了 C 和 D 层介质折射率分别取  $n_C = n_D = -1.12$ ;  $n_C = n_D = -1.88$ ;  $n_C = n_D = -2.25$ ;  $n_C = n_D = -2.6$  时的透射谱。从图 5 的透射谱可以看出,随着  $|n_C|$  折射率的增加,透射谱的位置没有发生变化,但是透射峰的高度却发生了变化,透射峰的透射率不再是全透射。随着折射率的变化,两侧透射谱下降的比较缓慢,中间的 2 条透射谱下降比较快,而且两侧透射谱的变化情况相同,中间的后条变化情况也一样。每条透射谱分裂的双线结构透射峰降低的程度也不相同。依据这个特性可以选择合适的参数控制光波的透过率。

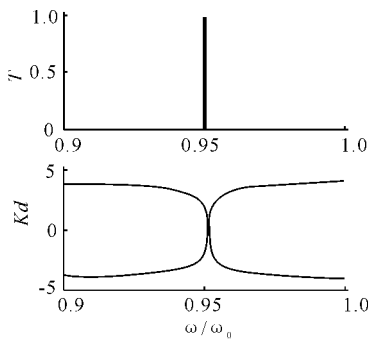


图 4  $n = 6$  时  $0.9 - 1(\omega/\omega_0)$  对应的透射谱及其色散曲线

Fig. 4 Transmission spectra and the corresponding dispersion curve at  $n = 6$

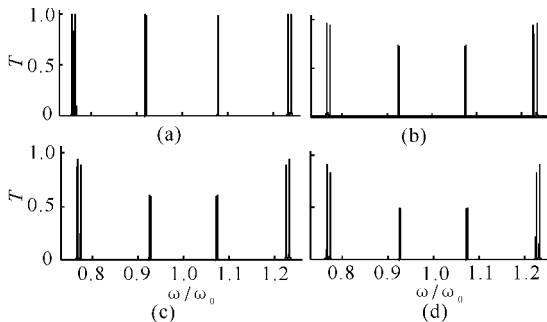


图 5 C 和 D 介质折射率对透射谱的影响

Fig. 5 Influence of refractive index of dielectric C and D on the transmission spectra

### 3 结论

利用传输矩阵法对一维光子晶体模型  $[(AB)_5(CD)_n]2(AB)_5$  的色散关系、透射能带谱进行计算模拟,得出如下结论。

(1)当介质层 C 和 D 是 2 个相同的负介质时,只有当周期数  $n$  为偶数时才可以提高透射谱的条数。当介质层 C 和 D 是 2 块相同的正材料时,同样也是

周期数  $n$  为偶数时才可以提高透射谱的条数,但是对于同样的周期数  $n$ ,正折射材料比负折射材料多出 2 条透射谱线。

(2)介质 C 和 D 均为正折射率材料时的透射频率范围较宽,可以用于稍微宽带的光滤波。C 和 D 介质均为相等的负折射率介质时,透射频率范围相比较而言较窄,尤其周期数  $n$  为奇数时更为明显,这说明缺陷为负折射率介质时,对频率的灵敏度相对较高,可以用于窄带滤波。

参考文献:

- [1] Esaki L, Tus R. Superlattice and negative differential conductivity semiconductors[J]. IBM J Res, 1970(14): 61-65.
- [2] Mendez E E, Vonklytzing K. Physics and applications of quantum wells and superlattices[M]. New York: Plenum Press, 1987: 15-16.
- [3] Qiao F, Zhang C, Wang J, et al. Photonic quantum-well structures: Multiple channeled filtering phenomena[J]. Appl Phys Lett, 2002, 77(23): 3698-3700.
- [4] Yano S, Segawa Y, Bae J S, et al. Quantized state in a single quantum well structure of photonic crystals[J]. Phys Rev B, 2001, 63(15): 1-4.
- [5] 葛祥友, 李平, 王效杰, 等. 不同晶格常数光子晶体构成的光子量子阱中的共振膜[J]. 应用光学, 2006, 27(5): 336-338.
- [6] 刘丹东, 陈光德, 徐忠锋. 基于量子阱效应的光开关[J]. 光子学报, 2006, 35(9): 1321-1323.
- [7] 胡水龙, 徐旭明, 于天宝. 光子量子阱单滤波、多通道开关[J]. 光子学报, 2004, 33(8): 1004-1005.
- [8] Dong H X, Jiang H T, Yang C Q, et al. Theoretical simulation and transmission properties of 1-D photonic QW structure containing defect layers with negative refractive index[J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(12): 5422-9422.
- [9] 袁彬彬, 蔡祥宝, 马骏, 等. 二维光子晶体光波导透射特性的研究[J]. 光学仪器, 2007, 29(4): 13-16.
- [10] 许桂雯, 欧阳征标, 安鹤男, 等. 光子晶体缺陷膜带宽与品质因子研究[J]. 光子学报, 2003, 32(9): 1079-1082.
- [11] Liu N H. Defect modes of stratified dielectric media [J]. Phys Rev B, 1997(55): 4097-4100.
- [12] 刘靖, 黄重庆, 孙军强, 等. 光子晶体多量子阱中的谱线分裂[J]. 量子电子学报, 2008, 25(2): 203-207.

(责任编辑: 邓大玉)