

不对称度对一维三元对称结构光子晶体透射特性的影响

韦吉爵¹, 苏安¹, 唐秀福¹, 高英俊², 欧阳志平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: 采用传输矩阵法理论, 通过模拟仿真的方式, 研究不对称度对一维三元对称结构光子晶体 $(C_m A_m B_m)^n (B_m A_m C_m)^n$ 透射特性的影响, 结果表明: 当光子晶体处于镜像对称结构 $(CAB)^n (BAC)^n$ 时, 透射谱的禁带中出现的单条透射峰随周期数 n 增大而变精细, 但透射峰的透射率及所处的波长位置不变。当光子晶体对称性受到破坏时, 随着周期不对称度 Δn 增大, 透射谱中单透射峰的透射率快速下降, 但所处的波长位置不变; 随着 A、B、C 介质层厚度不对称度增大, 透射谱中单透射峰的透射率出现不同程度的下降, 并向波长方向蓝移。其中 A、B、C 介质层厚度不对称度同时增大时, 透射率下降及蓝移速度最快, A 层介质不对称度 Δd_A 增大时透射率下降速度次之。不对称度对一维三元对称结构光子晶体透射特性的作用机制, 为光学滤波、光学开关及全反射器件等的研究和设计提供理论指导。

关键词: 光子晶体; 不对称度; 一维三元; 透射谱; 影响

中图分类号: O431 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.S221002

Effect of asymmetric on transmission properties of one-dimensional ternary photonic crystal

Wei Jijue¹, Su An¹, Tang Xiufu¹, Gao Yingjun², Ouyang Zhiping¹

(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 effect of asymmetric on the transmission properties of one-dimensional ternary photonic crystal $(C_m A_m B_m)^n (B_m A_m C_m)^n$ is studied by transfer matrix theory and numerical simulation method. The result shows that when the photonic crystal is a mirror symmetrical structure $(CAB)^n (BAC)^n$, the single transmission peak in the band of spectrum becomes fine with increase of cycle number n , but the transmittance and the wavelength position of transmission peak are unchanged. When the symmetry of the photonic crystal is destroyed, the transmittance of single peak is decrease rapidly, but the wavelength position of transmission peak is constant. The transmittance of single peak is decreasing in varying degrees with increase of asymmetry of the thickness of A, B or C medium layer, and the wavelength position of transmission peak is shifting to long wave direction. However, when the asymmetry of the thickness of A, B and C medium layer are increased at the same time, the transmittance of peak is

收稿日期: 2016-08-05; 修订日期: 2016-09-03

基金项目: 国家自然科学基金(51161003); 广西高校科学技术研究项目(KY2015YB258, YB2014323, KY2016LX287);

国家级、广西区级大学生创新训练计划项目(201610605011, 201610605056, 201610605065, 201510605013)

作者简介: 韦吉爵(1971-), 男, 讲师, 硕士, 主要从事光子晶体方面的研究。Email: weijijue@163.com

通讯作者: 苏安(1973-), 男, 教授, 硕士, 主要从事光子晶体方面的研究。Email: suan3283395@163.com

decreasing and the position of peak is fast blue-shift. The effect mechanism of asymmetry on the transmission properties of One-dimensional ternary photonic crystal can provide the theoretical guidance for research and design of optical filter, optical switch and total reflection device.

Key words: photonic crystal; asymmetry; one-dimensional ternary; transmission spectrum; effect

0 引言

最简单的光子晶体模型是由两种不同介电常数的 A、B 介质薄膜周期性排列而成 $(AB)^n$ 结构, 其中 n 是 AB 的重复排列周期数, 这种结构也称为标准周期结构。标准周期结构光子晶体的透射谱普遍由通带和禁带交替排列而成, 频率处于通带频率范围的光能透过光子晶体, 处于禁带频率范围的光则被禁止在光子晶体中传播, 这种带隙结构是光子晶体最突出的光学特性之一^[1-6]。如果由三种不同介电常数的 A、B、C 介质薄膜周期排列成 $(ABC)^n$ 结构, 则称一维三元结构光子晶体^[6-7]。当两块标准周期结构光子晶体头尾对接时, 可构成类似于 $(AB)^n \cdots (BA)^n$ 的镜像对称结构光子晶体模型^[6-9], 对于一维三元对称结构, 则类似于 $(ABC)^n (CBA)^n$ 模型。对称结构光子晶体的透射谱往往也对称分布于某个频率(波长)点, 而且禁带中普遍出现一条透射率很高的透射峰, 透射峰产生的原因是镜像对称结构光子晶体的结构中心存在一个空位缺陷^[3,9]。镜像对称结构光子晶体的透射特性可为设计、制备高品质高性能的光学滤波器提供理论依据。在实际研究和设计中, 通常遇到不对称结构的情况, 当对称结构光子晶体的整体或是局部对称性受到破坏时, 这种不对称因素被称为不对称度, 不对称度对对称结构光子晶体透射特性的影响近两年开始引起研究者的关注^[10-11], 如参考文献[10-11]报道周期不对称度能有效影响透射峰的透射率等。而对于一维三元对称结构光子晶体, 涉及对称因素的不仅有周期数, 且还有对称中心左右两侧介质的厚度、折射率、自身的周期数等等, 这些均还未见研究报道。

根据这个思路, 构造一维三元镜像对称结构光子晶体 $(C_m A_m B_m)^n (B_m A_m C_m)^n$ 模型, 通过科学计算软件 Matlab 编程, 计算模拟仿真出镜像对称情形下以及周期数不对称、各层介质厚度不对称情况下的透射

谱, 分析找出结构参数不对称度对一维三元镜像对称结构光子晶体透射特性的调制规律, 为光子晶体的理论研究和实际设计提供依据。

1 研究方法 with 对象

研究方法采用传输矩阵法, 传输矩阵法理论已经使用得很广泛且在很多文献中已经有详细报道^[1], 在此不再重述。研究基础模型为一维三元对称结构光子晶体 $(C_m A_m B_m)^n (B_m A_m C_m)^n$, 其中 A、B、C 是周期性排列的一维三元光子晶体的基元介质, 它们折射率分别为 $n_A=1.38, n_B=1.80, n_C=3.25$, 在研究中基础厚度取 $d_A=125 \text{ nm}, d_B=185 \text{ nm}, d_C=498 \text{ nm}$, 当不对称变化时, 厚度值可根据研究需要取值, 不同的取值对应相应的下标值 m 。 n 是左右两侧基元介质的排列周期数, 镜像对称结构时, 左右两侧的排列周期数 n 值相等。

2 计算结果与分析

2.1 对称结构一维三元光子晶体的透射谱

取一维三元光子晶体左右两侧的排列周期数 $n=2, 3, 4, 5, 6$, 在其他参数不变时, 此时光子晶体满足镜像对称结构, 通过传输矩阵法, 由科学计算软件 Matlab 编程计算, 即可模拟仿真出对称结构一维三元光子晶体 $(CAB)^n (BAC)^n$ 的透射谱, 如图 1 所示。

从图 1 可见, 光子晶体 $(CAB)^n (BAC)^n$ 的禁带中出现一条透射率为 100% 的透射峰, 而且随着左右两侧周期数 n 增大, 透射峰带宽越来越窄, 但透射峰的透射率保持 100%, 而且透射峰中心一直保持在 $\lambda_c=2170 \text{ nm}$ 波长位置处。若以半峰全宽 $\Delta\lambda$ 计量透射峰的品质(带宽)^[5,12], 则当 $n=2\sim 6$ 时, 禁带中单透射峰的带宽分别为 $\Delta\lambda_2=36.58 \text{ nm}, \Delta\lambda_3=8.970 \text{ nm}, \Delta\lambda_4=2.350 \text{ nm}, \Delta\lambda_5=0.625 \text{ nm}, \Delta\lambda_6=0.193 \text{ nm}$ 。可见, 随着对称两侧光子晶体排列周期数 n 的增大, 光子晶体禁带中出现的单透射峰的品质越来越高。对于普通镜像对称结构光子晶体, 其透射谱也分居某个波

长(频率)点的两侧,而且禁带中心也出现透射率很高的透射峰,即对称结构一维三元光子晶体透射谱的特征与普通对称结构光子晶体透射谱的特征类似。这种特性对研究和设计固定波长位置的单通道光学滤波器件具有重要参考意义。

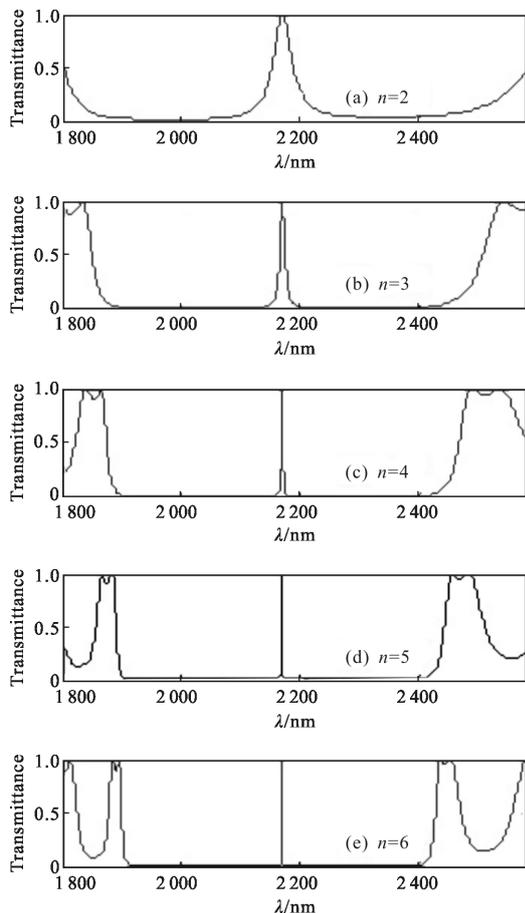


图 1 光子晶体(CAB)ⁿ(BAC)ⁿ的透射能带谱

Fig.1 Transmission spectrum for photonic crystals (CAB)ⁿ(BAC)ⁿ

2.2 周期不对称度对一维三元光子晶体透射特性的影响

在其他结构参数不变的情况下,当对称中心左右两侧的光子晶体的排列周期数不相等时,一维三元光子晶体的对称性受到破坏,这种不对称程度以左右两侧光子晶体的排列周期数之差衡量,称为周期不对称度。在此,保持左侧光子晶体的排列周期数 $n=6$,右侧光子晶体的周期数为 $n=6, 5, 4, 3, 2$ 依次递减,则不对称度 $\Delta n=0, 1, 2, 3, 4$,通过计算模拟,光子晶体(CAB)⁶(BAC)ⁿ的透射谱,如图 2 所示。

从图 2 可见,随着周期不对称度 Δn 的增大,一维三元光子晶体禁带中单透射峰的透射率快速下

降。当 $n=6$ 时,不对称度 $\Delta n=0$,此时光子晶体(CAB)⁶(BAC)⁶为镜像对称结构,禁带中单透射峰的透射率为 100%,当 $n=5$ 时,不对称度 $\Delta n=1$,光子晶体(CAB)⁶(BAC)⁵不再是镜像对称结构,透射峰的透射率也不再为 100%,而是下降到 66.22%,当 $n=4$ 时, $\Delta n=2$,光子晶体(CAB)⁶(BAC)⁴禁带中单透射峰的透射率下降到 24.65%,当 $n=3$ 时, $\Delta n=3$,光子晶体(CAB)⁶(BAC)³禁带中单透射峰的透射率仅为 7.22%,当 $n=2$ 时, $\Delta n=4$,光子晶体(CAB)⁶(BAC)²禁带中单透射峰几乎已经消失,透射率仅为 1.97%。然而通过测量发现,虽然禁带中单透射峰的透射率随着周期不对称度 Δn 增大快速下降,但单透射峰中心却一直固定在 $\lambda_c=2170$ nm 波长位置不变。

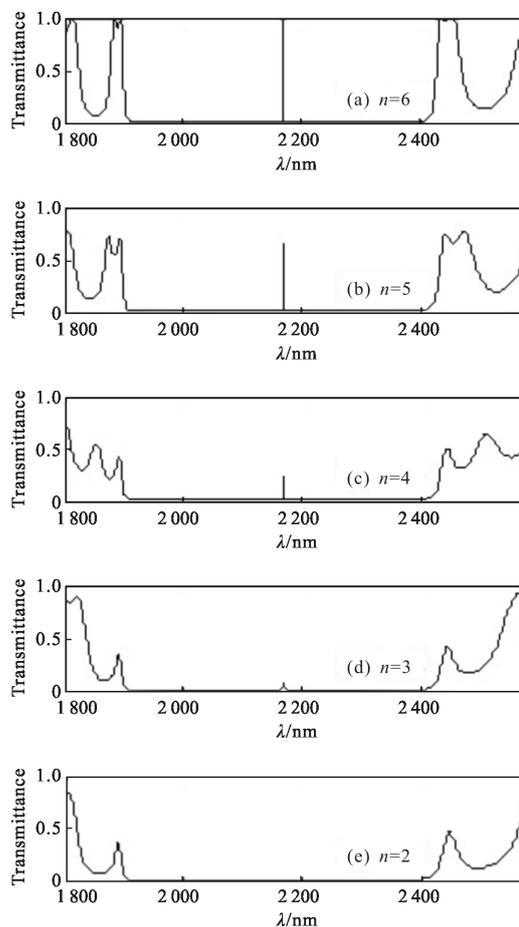


图 2 光子晶体(CAB)⁶(BAC)ⁿ的透射能带谱

Fig.2 Transmission spectrum for photonic crystals (CAB)⁶(BAC)ⁿ

综合 2.1~2.2 结果可知,对于对称结构一维三元光子晶体,左右两侧排列周期数对称变化时可对禁带中透射峰的带宽进行调制,不对称变化时周期不对称度可对透射峰的透射率进行调制。

2.3 介质厚度不对称度对一维三元光子晶体透射特性的影响

从结构上看, 当一维三元光子晶体 $(C_m A_m B_m)^n$ $(B_m A_m C_m)^n$ 处于镜像对称结构时, 不仅左右两侧光子晶体的排列周期数相等, 而且要求左右两侧相对应的 A、B、C 的结构参数也必须相等, 换句话说, 当左右两侧的这些参量不相等时, 光子晶体的对称结构将受到破坏, 即存在不对称度, 如当左右两侧的介质 A 或 B 或 C 的薄膜厚度不相等时, 就存在厚度的不对称度, 这种不对称度对光子晶体的透射特性影响又如何呢。固定光子晶体左右两侧的排列周期数 $n=6$, 并固定左侧 A、B、C 介质薄膜的厚度为 $d_A=125$ nm, $d_B=185$ nm, $d_C=498$ nm, 而右侧 A、B、C 介质薄膜的厚度分别取 $d_{A1}=125$ nm, $d_{A2}=145$ nm, $d_{A3}=165$ nm, $d_{A4}=185$ nm, $d_{A5}=205$ nm, $d_{B1}=185$ nm, $d_{B2}=205$ nm, $d_{B3}=225$ nm, $d_{B4}=245$ nm, $d_{B5}=265$ nm, $d_{C1}=498$ nm, $d_{C2}=518$ nm, $d_{C3}=538$ nm, $d_{C4}=558$ nm, $d_{C5}=578$ nm, 然后分别构造一维三元结构光子晶体 $(CAB)^6(BA_m C)^6$ 、 $(CAB)^6(B_m AC)^6$ 、 $(CAB)^6(BAC_m)^6$ 和 $(CAB)^6(B_m A_m C_m)^6$, 下标 $m=1, 2, 3, 4, 5$, 分别对应不同厚度的薄膜介质层。显然, 这四个光子晶体模型中的左右两侧对应的介质薄膜厚度不相等, 存在不对称度, 以左右两侧对应介质薄膜的厚度之差的绝对值表示这种不对称度, 以 $(CAB)^6(BA_m C)^6$ 模型为例, $m=1, 2, 3, 4, 5$ 时, 厚度不对称分别为 $\Delta d_A=0, 20, 40, 60, 80$ nm。对于 $(CAB)^6(B_m A_m C_m)^6$ 模型, $m=1, 2, 3, 4, 5$ 时, A、B 与 C 厚度不对称度 $\Delta d_A, \Delta d_B$ 与 Δd_C 同时存在, 以 $\Delta d_{A,B,C}$ 标记这种不对称度, 即 $\Delta d_{A,B,C}=0, 20, 40, 60, 80$ nm。通过计算模拟, 可得出以上四个光子晶体模型的透射谱, 如图 3 所示。

225 nm, $d_{B4}=245$ nm, $d_{B5}=265$ nm, $d_{C1}=498$ nm, $d_{C2}=518$ nm, $d_{C3}=538$ nm, $d_{C4}=558$ nm, $d_{C5}=578$ nm, 然后分别构造一维三元结构光子晶体 $(CAB)^6(BA_m C)^6$ 、 $(CAB)^6(B_m AC)^6$ 、 $(CAB)^6(BAC_m)^6$ 和 $(CAB)^6(B_m A_m C_m)^6$, 下标 $m=1, 2, 3, 4, 5$, 分别对应不同厚度的薄膜介质层。显然, 这四个光子晶体模型中的左右两侧对应的介质薄膜厚度不相等, 存在不对称度, 以左右两侧对应介质薄膜的厚度之差的绝对值表示这种不对称度, 以 $(CAB)^6(BA_m C)^6$ 模型为例, $m=1, 2, 3, 4, 5$ 时, 厚度不对称分别为 $\Delta d_A=0, 20, 40, 60, 80$ nm。对于 $(CAB)^6(B_m A_m C_m)^6$ 模型, $m=1, 2, 3, 4, 5$ 时, A、B 与 C 厚度不对称度 $\Delta d_A, \Delta d_B$ 与 Δd_C 同时存在, 以 $\Delta d_{A,B,C}$ 标记这种不对称度, 即 $\Delta d_{A,B,C}=0, 20, 40, 60, 80$ nm。通过计算模拟, 可得出以上四个光子晶体模型的透射谱, 如图 3 所示。

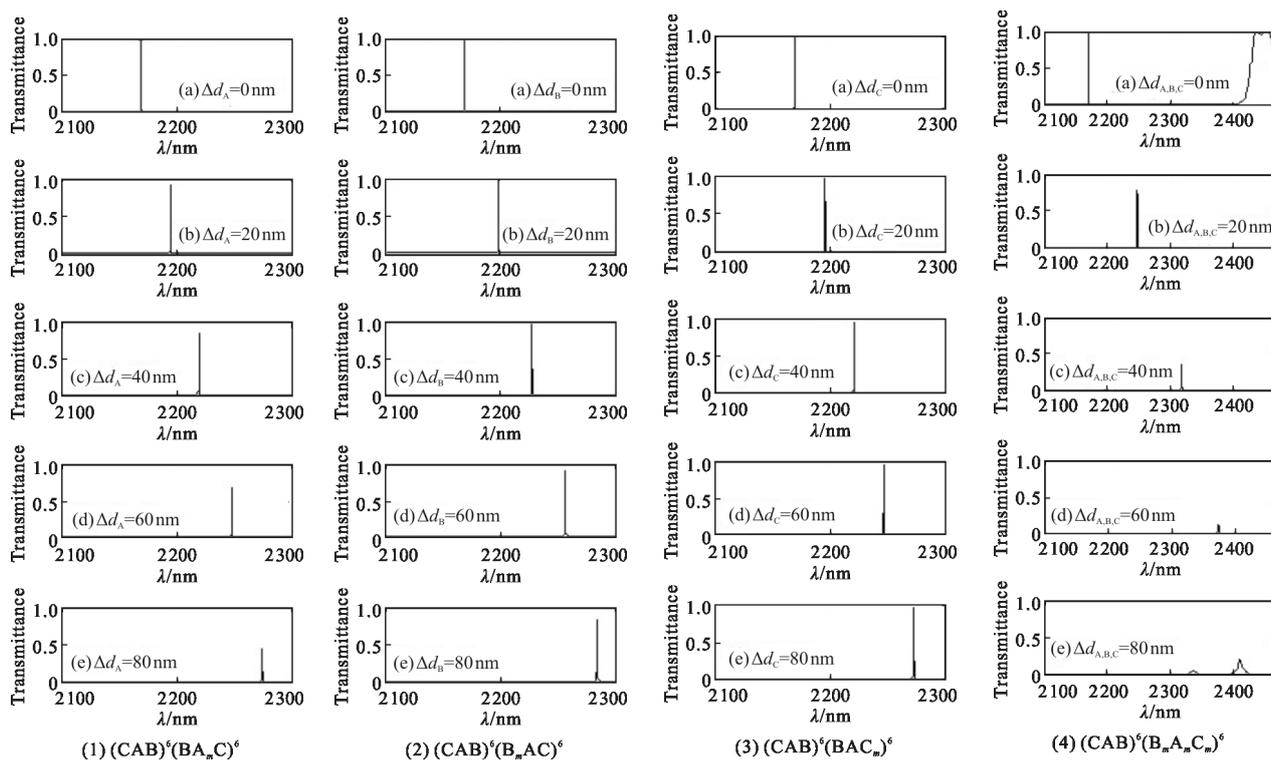


图 3 厚度不对称度对透射峰的影响 ($m=1\sim 5$)

Fig.3 Effect of medium thickness asymmetry on the transmission peak ($m=1\sim 5$)

从图 3 可见, 当 A 或 B 或 C 介质层厚度不对称度 Δd_A 或 Δd_B 或 Δd_C 单独增大, 或是三者同时 ($\Delta d_{A,B,C}$) 增大时, 光子晶体禁带中的单透射峰均向长波方向移动, 即出现蓝移现象, 但各介质层厚度不对称度增大方式不同, 蓝移的速度也不同。为形象直观地比较

各厚度不对称度对透射峰位置影响的程度, 以厚度不对称 Δd 为横坐标, 单透射峰所处的波长位置为纵坐标, 作各介质厚度不对称对透射峰位置的影响曲线 $\lambda-\Delta d$, 如图 4 所示。

从图 4 可见, 在不对称度相等的情况下, 当介质

层 A、B、C 介质层厚度同时存在不对称度即 $\Delta d_{A,B,C}$ 增大时,单透射峰蓝移的速度最快,B 层介质厚度存在不对称度 Δd_B 增大时影响次之,A 与 C 介质层厚度存在不对称度对透射峰蓝移的影响几乎相同,而且蓝移的速度最慢。当 $\Delta d_{A,B,C}=0, 20, 40, 60, 80$ nm 时,单透射峰的波长位置分别为 $\lambda_0=2170$ nm、 $\lambda_{20}=2248$ nm、 $\lambda_{40}=2316$ nm、 $\lambda_{60}=2373$ nm、 $\lambda_{80}=2410$ nm; 当 $\Delta d_B=0, 20, 40, 60, 80$ nm 时,单透射峰的波长位置分别为 $\lambda_0=2170$ nm、 $\lambda_{20}=2199$ nm、 $\lambda_{40}=2228$ nm、 $\lambda_{60}=2256$ nm、 $\lambda_{80}=2283$ nm; 而 $\Delta d_A=0, 20, 40, 60, 80$ nm 时,单透射峰的波长位置分别为 $\lambda_0=2170$ nm、 $\lambda_{20}=2195$ nm、 $\lambda_{40}=2219$ nm、 $\lambda_{60}=2248$ nm、 $\lambda_{80}=2274$ nm。如图 3(1~4)(a~e)和图 4 所示。

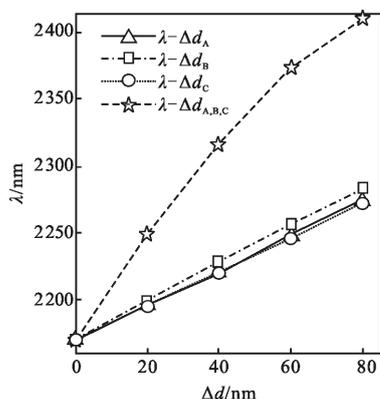


图 4 不对称度对透射峰位置的影响曲线

Fig.4 Position of transmission peak versus asymmetry

另外,从图 3 还可以看到,当各介质层不对称度 Δd_A 或 Δd_B 或 Δd_C 或 $\Delta d_{A,B,C}$ 增大时,一维三元光子晶体禁带中单透射峰的透射率也会出现不同程度的下降。为形象表现不对称度对透射峰透射率的影响程度,还是以厚度不对称 Δd 为横坐标,单透射峰透射率为纵坐标,作各介质厚度不对称对透射峰透射率的影响曲线 $T-\Delta d$,如图 5 所示。

从图 5 可见,在不对称度相等的情况下,当介质层 A、B、C 介质层厚度同时存在不对称度即 $\Delta d_{A,B,C}$ 增大时,光子晶体单透射峰透射率下降的速度最快,A 层介质厚度存在不对称度 Δd_A 增大时影响次之,而 B 与 C 介质层厚度存在不对称度对透射峰透射率的影响最弱,而且影响规律不是单调的。当 $\Delta d_{A,B,C}=0, 20, 40, 60, 80$ nm 时,单透射峰的透射率分别为 $T_0=100\%$ 、 $T_{20}=79.32\%$ 、 $T_{40}=36.48\%$ 、 $T_{60}=13.94\%$ 、

$T_{80}=19.78\%$; 当 $\Delta d_A=0, 20, 40, 60, 80$ nm 时,单透射峰的透射率分别为 $T_0=100\%$ 、 $T_{20}=93.42\%$ 、 $T_{40}=83.39\%$ 、 $T_{60}=68.59\%$ 、 $T_{80}=46.50\%$; 而 $\Delta d_B=0, 20, 40, 60, 80$ nm 时,单透射峰的透射率分别为 $T_0=100\%$ 、 $T_{20}=96.54\%$ 、 $T_{40}=97.51\%$ 、 $T_{60}=91.58\%$ 、 $T_{80}=83.03\%$; 而 $\Delta d_C=0, 20, 40, 60, 80$ nm 时,单透射峰的透射率分别为 $T_0=100\%$ 、 $T_{20}=94.09\%$ 、 $T_{40}=94.39\%$ 、 $T_{60}=96.73\%$ 、 $T_{80}=99.64\%$,如图 3(1~4)(a)~(e)和图 5 所示。

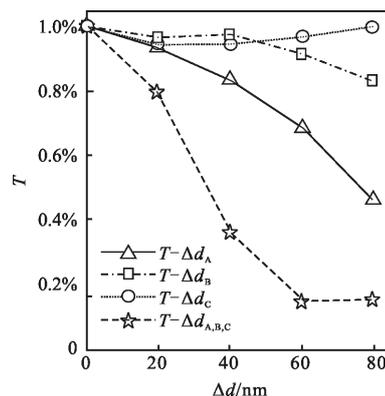


图 5 不对称度对透射率的影响曲线

Fig.5 Position of transmission peak versus asymmetry

综合可见,对于对称结构一维三元光子晶体,对称中心左右两侧的排列周期数的不对称度可以调制透射峰的透射率,但不影响透射峰所处的波长位置。而对称中心左右两侧相对应的介质厚度的不对称度,则可以调制透射峰所处的波长位置,而且不同的介质层厚度不对称度调制作用的大小不一样,其中所有介质层同时存在不对称度时,调制作用最灵敏,单层介质厚度不对称度调制作用灵敏度次之。此外,对称中心左右两侧相对应的介质厚度的不对称度对透射峰的透射率也具有调制作用,其中所有介质层或 B 层介质存在不对称度时,调制作用是单调变化的且很灵敏。一维三元对称结构光子晶体的这种透射特性,对光学开关和光学衰减器的研究和设计具有积极的指导意义。

3 结论

利用传输矩阵法理论,研究不对称度对一维三元对称结构光子晶体透射特性的影响规律,得出如下结论:

- (1) 对称变化的排列周期数,可对光子晶体透射

峰的带宽进行调制,但不能调制透射峰的透射率和所处的位置。排列周期数不对称变化时,周期数不对称度可调制光子晶体透射峰的透射率,但不能调制透射峰的位置。

(2) 各介质层厚度不对称度可对光子晶体透射峰的波长位置进行调制,其中各介质层厚度不对称度同时存在时调制作用最灵敏,B 层介质厚度不对称度调制灵敏度次之。

(3) 各介质层厚度不对称度对光子晶体透射峰的透射率也具有调制作用,但调制机制各不一样,其中各介质层厚度不对称度同时存在与 A 层介质厚度不对称度对透射率的调制具有单调性,且调制灵敏度比较高,而 B 层或 C 层介质厚度不对称对透射峰透射率的调制则不具有单调性,且调制灵敏度比较低。

不对称度对一维三元对称结构光子晶体透射特性的调制规律,可为研究和设计光学开关、光学滤波和光学衰减等器件提供理论指导。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Wei Jijue, Su An, Tang Xiufu, et al. Modulation effect of defect on filter properties of one-dimensional photonic crystal [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(S): 168-172. (in Chinese)
韦吉爵, 苏安, 唐秀福, 等. 缺陷对一维光子晶体滤波性能的调制 [J]. 红外与激光工程, 2015, 44(S): 168-172.
- [3] 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.
- [4] 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. 双重势垒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.
- [5] Su An, Meng Chengju, 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.
- [6] Deng Lier, Gong Lei. Reflection characteristics of one-dimensional polybasic photonic crystals by using heterostructure [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, 45(5): 0516002. (in Chinese)
邓立儿, 巩蕾. 一维三元异质结构光子晶体反射特性 [J]. 光子学报, 2016, 45(5): 0516002.
- [7] Su An. Transmission spectra and electrical field of the one-Dimensional three sects photonic crystal with symmetrical structure [J]. *Journal of Southwest University (Natural Science Edition)*, 2011, 33(7): 26-30. (in Chinese)
苏安. 对称结构一维三元光子晶体的透射谱和电场分布 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2011, 33(7): 26-30.
- [8] Li Wensheng, Zhang Qin, Huang Haiming, et al. Polarization properties of photonic crystal tunneling mode containing single-negative materials [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(8): 2033-2037. (in Chinese)
李文胜, 张琴, 黄海铭, 等. 含单负材料光子晶体隧穿模的偏振特性 [J]. 红外与激光工程, 2012, 41(8): 2033-2037.
- [9] Su An. Photonic crystal quantum well with function of multi-channel photonic filtering and amplifying [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(3): 727-732. (in Chinese)
苏安. 实现多通道光滤波与放大功能的光子晶体量子阱 [J]. 红外与激光工程, 2013, 42(3): 727-732.
- [10] Meng Chengju, Su An, Pan Jihuan, et al. Effect of periodicity asymmetry on photonic crystals transmission spectrum [J]. *Acta Sinica Quantum Optica*, 2014, 20(2): 154-158. (in Chinese)
蒙成举, 苏安, 潘继环, 等. 周期不对称度对光子晶体透射谱特性的影响研究 [J]. 量子光学学报, 2014, 20(2): 154-158.
- [11] 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(1): 012701. (in Chinese)
潘继环, 苏安, 蒙成举, 等. 垒层周期不对称度对光子晶体透射谱的影响 [J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(1): 012701.
- [12] 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(10): 1006001.