

二元级联结构光子晶体的全向反射镜功能

苏安¹, 欧阳志平¹, 王高峰¹, 罗家昌¹, 徐德胜¹, 高英俊²

(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: 利用传输矩阵法理论, 研究二元级联结构一维光子晶体的反射谱, 结果表明: 随着介质层物理厚度增大, 单块光子晶体(单级)的全反射带带宽增大, 并伴随蓝移现象; 当光子晶体为级联结构时, 其全反射带迅速向长波方向展宽, 而且级联数目越多, 全反射带展宽速度越快; 随着入射角的增大, 级联结构光子晶体的全反射带带宽迅速向短波方向展宽, 并伴随缓慢红移现象。二元级联结构一维光子晶体的反射谱特性及其调制规律, 为光子晶体设计新型全向反射镜和光学开关等器件提供理论依据。

关键词: 光子晶体; 级联结构; 全反射; 二元; 传输矩阵法

中图分类号: O431 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.S221001

Omnidirectional reflector function of two element cascade structure photonic crystal

Su An¹, Ouyang Zhiping¹, Wang Gaofeng¹, Luo Jiachang¹, Xu Desheng¹, Gao Yingjun²

(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 reflectance spectra of two element cascade structure photonic crystal was studied using transfer matrix method. It shows that total reflection bandwidth of single block photonic crystal (single stage) increases with the physical thickness of media layer increasing, and the band gap position also appears blue-shift. The total reflection bandwidth is rapidly broadening towards long wave as the photonic crystals composed of cascade structure, and the more number of cascades is, the faster broadening is. With the increase of incident angle, the total reflection bandwidth of two element cascades structure of photonic crystal quickly spread to the short-wave direction and with slow red-shift. The properties and modulation rules of reflection spectrum of two element cascade structure photonic crystal can be designed for new photonic crystal omnidirectional reflector and provide theoretical basis for optical switch device.

Key words: photonic crystal; cascaded structure; total reflection; two element; transfer matrix method

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, KY2016LX287);

国家级、广西区级大学生创新训练计划(201610605011, 201610605056, 201610605065, 201510605013, 201510605040, 201510605061)

作者简介: 苏安(1973-), 男, 教授, 硕士, 主要从事光电材料及器件方面的研究。Email: suan3283395@163.com

0 引言

光子晶体^[1-2]是一种不同介质薄膜在空间的周期性排列人工晶体材料。作为一种新型的人工光学微结构材料,光子晶体的主要且奇异的光学特性为存在光子带隙(或光子禁带)和导带。当入射光的频率处于禁带频率范围时,光将被阻止在光子晶体中传播,而处于导带频率的光则可以通过光子晶体。在光子禁带频率范围,光透过光子晶体的透射率为 0,亦即对入射光的反射作用达到 100%,实现完美的全反射功能,这个特性对设计制备某光学频率范围的全反射镜具有积极的意义和广阔的应用前景^[3-8]。因此,如何构造禁带频率范围更宽以及禁带性能调制灵敏的光子晶体结构模型是研究和设计的关键和前提。

从目前已经有的文献报道可知,提高光子禁带即反射带带宽的方法,一般是通过增大光子晶体两基元介质高低折射率的比值,或不同中心波长的光子晶体块合理叠加,或是以双负介质层替代双正介质层,或是由两块光子晶体块合理组成光子晶体量子阱结构等^[3-4,6,8-11]。这些模型、方法或多或少都会遇到一些不容忽视的实际困难,比如增大两基元介质高低折射率的比值,会遇到自然介质的折射率上限问题,构造光子晶体量子阱结构会遇到内外两块光子晶体的能带和禁带恰相匹配问题等^[3,6]。基于这种现状,文中利用 A、B 两种介质以不同的厚度构成不同的光子晶体块 $(A_1B_1)^{10}$ 、 $(A_2B_2)^{10}$ 、 \dots 、 $(A_nB_n)^{10}$,把这些光子晶体块首尾连接组成级联结构光子晶体 $(A_1B_1)^{10}$ 、 $(A_2B_2)^{10}$ 、 \dots 、 $(A_nB_n)^{10}$,这种光子晶体结构能很好地拓宽全反射带(光子禁带)的带宽,为设计制造新型光学全反射镜提供理论依据。而且目前文献对这种光子晶体结构模型报道还很少,因此研究对光子晶体的模型理论探索也具有一定的促进作用。

1 光子晶体模型与研究方法

研究所选取的两种基元薄膜介质 A、B 分别为二氧化钛(TiO₂)和氟化镁(MgF₂),它们的折射率分别为 $n_A=2.6$, $n_B=1.38$ 。当两者组成单个光子晶体(下称单级结构光子晶体)时,模型分别为 $(A_1B_1)^{10}$ 、 $(A_2B_2)^{10}$ 、 \dots 、 $(A_nB_n)^{10}$,由这些单级光子晶体首尾连接即可组成

级联光子晶体结构模型 $(A_1B_1)^{10}$ 、 $(A_2B_2)^{10}$ 、 \dots 、 $(A_nB_n)^{10}$ 。模型中 A_1 、 A_2 、 \dots 、 A_n 和 B_1 、 B_2 、 \dots 、 B_n 的折射率保持不变,介质薄膜厚度分别为 $d_{A1}=45\text{ nm}$ 、 $d_{A2}=50\text{ nm}$ 、 $d_{A3}=55\text{ nm}$ 、 \dots 、 $d_{B1}=98\text{ nm}$ 、 $d_{B2}=103\text{ nm}$ 、 $d_{B3}=108\text{ nm}$ 、 \dots ,即基元介质厚度分别每增大 5 nm 作为级联光子晶体的一级。另外,考虑到当光子晶体的重复排列周期达到 10 时能带结构已经比较完整稳定,所以各单级光子晶体和级联结构中单级结构光子晶体的排列周期数均取 10。

鉴于计算主要对象是光子晶体的反射谱,因此计算理论方法采用比较成熟且直观的传输矩阵法^[3-12],传输矩阵法理论在很多文献中已经有详细介绍,在此不再赘述。

2 计算结果与分析

2.1 单级光子晶体的反射谱

因为级联结构光子是由单个光子晶体(单级)首尾连接形成,因此先研究单级光子晶体的透射谱。A、B 两种介质的折射不变,取 A、B 介质薄膜的物理厚度分别以 5 nm 为增幅,即 $d_{A1}=45\text{ nm}$ 、 $d_{A2}=50\text{ nm}$ 、 $d_{A3}=55\text{ nm}$ 、 $d_{A4}=60\text{ nm}$ 、 $d_{A5}=65\text{ nm}$ 、 $d_{B1}=98\text{ nm}$ 、 $d_{B2}=103\text{ nm}$ 、 $d_{B3}=108\text{ nm}$ 、 $d_{B4}=113\text{ nm}$ 、 $d_{B5}=118\text{ nm}$,它们分别组合成单级结构光子晶体 $(A_1B_1)^{10}$ 、 $(A_2B_2)^{10}$ 、 $(A_3B_3)^{10}$ 、 $(A_4B_4)^{10}$ 、 $(A_5B_5)^{10}$ 。利用传输矩阵法理论,通过科学计算软件 Matlab 编程计算,可分别模拟出以上各单级光子晶体结构的反射谱,如图 1 所示。

从图 1 可见,由 A、B 基元介质薄膜组成的单级结构光子晶体时,反射谱中均出现一个反射率达 100%且带宽比较宽的禁带,而且随着 A、B 介质层厚度 d_A 、 d_B 的增大,单级光子晶体的全反射带带宽变宽,并且反射带中心向长波方向移动,即全反射带出现蓝移现象。由于这些反射带的透射率均达到 100%,为计算方便,以该反射带的半高全宽计量其带宽(下同)。当 $d_A=45\text{ nm}$ 、 $d_B=98\text{ nm}$ 时,全反射带带宽为 $\Delta\omega=216.15\text{ nm}$,全反射带中心处于 $\lambda_c=526.90\text{ nm}$ 位置处;当 $d_A=50\text{ nm}$ 、 $d_B=103\text{ nm}$ 时,全反射带带宽为 $\Delta\omega=234.10\text{ nm}$,全反射带中心处于 $\lambda_c=568.45\text{ nm}$ 位置处;当 $d_A=55\text{ nm}$ 、 $d_B=108\text{ nm}$ 时,全反射带带宽为 $\Delta\omega=251.53\text{ nm}$,全反射带中心处于 $\lambda_c=610.00\text{ nm}$ 位置处;当 $d_A=60\text{ nm}$ 、 $d_B=113\text{ nm}$ 时,全反射带带宽为 $\Delta\omega=268.85\text{ nm}$,全反射带中心处于 $\lambda_c=651.58\text{ nm}$ 位

置处；当 $d_A=65\text{ nm}$, $d_B=118\text{ nm}$ 时，全反射带带宽为 $\Delta\omega=286.05\text{ nm}$ ，全反射带中心处于 $\lambda_c=693.13\text{ nm}$ 位置处，如图 1(a)~(d)所示。显见，随着 A、B 介质层厚度增加，单级结构光子晶体的全反射带快速向长波方向移动的同时带宽变宽。因此，在设计制备不同波长范围、不同带宽的全反射镜时，可以通过调节单级光子晶体基元介质薄膜厚度来调整反射镜所需要反射的光频率范围。

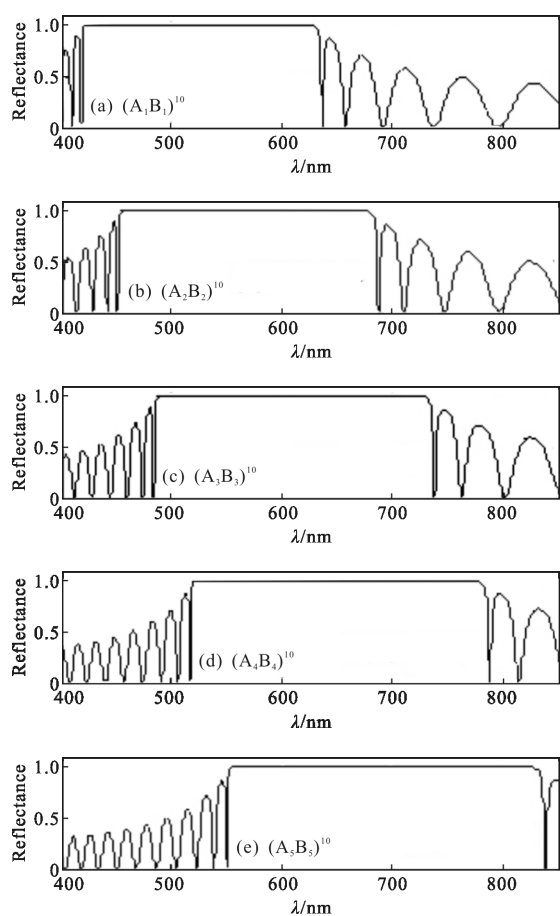


图 1 单级结构光子晶体 $(A_nB_n)^{10}$ 的反射谱

Fig.1 Reflectance spectrum for single cascaded structure photonic crystals $(A_nB_n)^{10}$

2.2 级联光子晶体的反射谱

仍然以 5 nm 为 A、B 介质薄膜的物理厚度增幅，即分别取 $d_{A1}=45\text{ nm}$ 、 $d_{A2}=50\text{ nm}$ 、 $d_{A3}=55\text{ nm}$ 、 $d_{A4}=60\text{ nm}$ 、 $d_{A5}=65\text{ nm}$ 、 $d_{A6}=70\text{ nm}$ 、 $d_{B1}=98\text{ nm}$ 、 $d_{B2}=103\text{ nm}$ 、 $d_{B3}=108\text{ nm}$ 、 $d_{B4}=113\text{ nm}$ 、 $d_{B5}=118\text{ nm}$ 、 $d_{B6}=123\text{ nm}$ ，然后分别把它们两两对应组合形成的单级结构光子晶体 $(A_1B_1)^{10}$ 、 $(A_2B_2)^{10}$ 、 $(A_3B_3)^{10}$ 、 $(A_4B_4)^{10}$ 、 $(A_5B_5)^{10}$ 和 $(A_6B_6)^{10}$

依次首尾连接形成各级联结构光子晶体模型 $(A_1B_1)^{10}(A_2B_2)^{10}$ 、 $(A_1B_1)^{10}(A_2B_2)^{10}(A_3B_3)^{10}$ 、 $(A_1B_1)^{10}(A_2B_2)^{10}(A_3B_3)^{10}(A_4B_4)^{10}$ 、 $(A_1B_1)^{10}(A_2B_2)^{10}(A_3B_3)^{10}(A_4B_4)^{10}(A_5B_5)^{10}$ 和 $(A_1B_1)^{10}(A_2B_2)^{10}(A_3B_3)^{10}(A_4B_4)^{10}(A_5B_5)^{10}(A_6B_6)^{10}$ 。通过计算模拟，可得各级联结构光子晶体的反射谱，如图 2 所示。

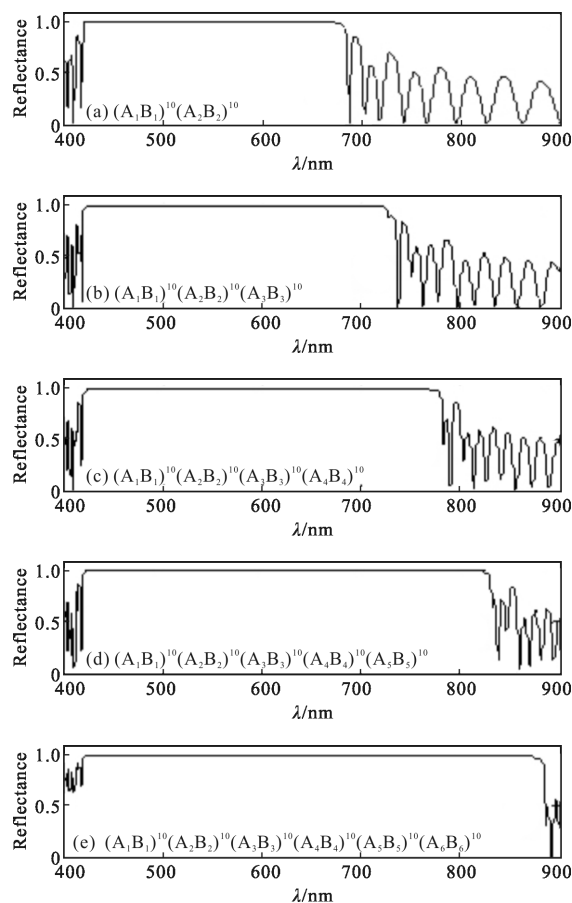


图 2 级联结构光子晶体的反射谱

Fig.2 Reflectance spectrum for cascaded structure photonic crystals

从图 2 可见，当单级结构光子晶体组成级联结构光子晶体时，各级联结构光子晶体的反射谱中也出现一条反射率为 100% 的全反射带，但该反射带的带宽明显宽于单级结构光子晶体全反射带的带宽，而且随着级联数目增大，级联结构光子晶体的全反射带带宽越宽，即全反射带迅速向长波方向展宽。当 $d_A=50\text{ nm}$ 、 $d_B=103\text{ nm}$ 时，二级联结构光子晶体 $(A_1B_1)^{10}(A_2B_2)^{10}$ 全反射带带宽为 $\Delta\omega=267.20\text{ nm}$ ，全反射带中心处于 $\lambda_c=552.40\text{ nm}$ 位置处；当 $d_A=55\text{ nm}$ 、 $d_B=108\text{ nm}$ 时，三级联结构光子晶体 $(A_1B_1)^{10}(A_2B_2)^{10}(A_3B_3)^{10}$ 全反射带带宽为 $\Delta\omega=318.20\text{ nm}$ ，全反射带中心处于 $\lambda_c=577.90\text{ nm}$ 位置处；当 $d_A=60\text{ nm}$ 、 $d_B=113\text{ nm}$

时,四级联结构光子晶体 $(A_1B_1)^{10}(A_2B_2)^{10}(A_3B_3)^{10}(A_4B_4)^{10}$ 全反射带带宽为 $\Delta\omega=369.70\text{ nm}$,全反射带中心处于 $\lambda_c=603.65\text{ nm}$ 位置处;当 $d_A=65\text{ nm}$, $d_B=118\text{ nm}$ 时,五级联结构光子晶体 $(A_1B_1)^{10}(A_2B_2)^{10}(A_3B_3)^{10}(A_4B_4)^{10}(A_5B_5)^{10}$ 全反射带带宽为 $\Delta\omega=419.00\text{ nm}$,全反射带中心处于 $\lambda_c=628.30\text{ nm}$ 位置处;当 $d_A=70\text{ nm}$, $d_B=123\text{ nm}$ 时,六级联结构光子晶体 $(A_1B_1)^{10}(A_2B_2)^{10}(A_3B_3)^{10}(A_4B_4)^{10}(A_5B_5)^{10}(A_6B_6)^{10}$ 全反射带带宽为 $\Delta\omega=465.98\text{ nm}$,全反射带中心处于 $\lambda_c=651.79\text{ nm}$ 位置处。另外,从图 2 还可看到,与单级光子晶体的全反射带不同的是,当级联结构数目不太大时,级联结构光子晶体的全反射带左侧保持在 $\lambda_{左}=418.80\text{ nm}$ 位置附近不变,而右侧则向长波方向展宽,当达到六级联结构时,才开始出现光子晶体全反射带左侧向短波方向缓慢展宽,即从一级联结构到五级联结构,在 $686\sim 418.8\text{ nm}$ 的波长范围内,带宽 $\Delta\omega=267.20\text{ nm}$ 的波长范围一直处于全反射状态,当需要更宽的固定波长全反射带时,提高级联光子晶体级联数目作为底层光子晶体即可。这个特性对设计固定光频率的全反射镜更加有意义。

为进一步比较级联结构光子晶体全反射带与单级结构光子晶体全反射带的区别,以两种结构光子晶体的全反射带带宽随级联数目(或介质层厚度)变化情况作图,如图 3 所示。图中带实心方格的实线(a)为单级结构光子晶体全反射带随介质层厚度的变化曲线,带实心三角形的点划线(b)为级联结构光子晶体全反射带随级联数目的变化曲线,纵坐标表示全反射带的带宽,横坐标分别表示级联结构光子晶体的级联数目或单级结构光子晶体的介质层厚度增量。例如:对于单级结构光子晶体,A、B 介质层的初始厚度 $d_A=45\text{ nm}$ 、 $d_B=98\text{ nm}$ 时,级联数目为 1,介质层厚度增量为 0 nm ,则在对应的横坐标刻度点分别标注为括号外内的数字 1 和 0;当 $d_A=50\text{ nm}$ 、 $d_B=103\text{ nm}$ 时,可组成级联结构光子晶体 $(A_1B_1)^{10}(A_2B_2)^{10}$,即级联结构为 2 级,A、B 介质层厚度增加量为 5 nm ,则在对应的横坐标刻度点分别标注为括号外内的数字 2 和 5,依次类推,当 $d_A=70\text{ nm}$ 、 $d_B=123\text{ nm}$ 时,级联结构为 6 级,A、B 介质层厚度增加量为 25 nm ,则在对应的横坐标刻度点分别标注为括号外内的数字 6 和 25。从图 3 显见,随着级联数目或介质厚度增大,级联或单级结构光子晶体的全反射带带宽均快速增大,但级联结构光子晶体的全反射带带宽增大的速度远大

于单级结构光子晶体,而且带宽随级联数目或介质厚度增大机制接近于线性变化关系,这对设计制作宽波长范围的全反射镜及其调制机制等具有重要理论指导价值。另外,从结构上看,级联结构光子晶体是厚度增大的各单级结构光子晶体首尾接连形成的,而单级结构光子晶体则是由介质层厚度不断增大的二元介质组成,从制备工艺角度讲,厚度越大制备将更加容易。因此,构造的级联结构光子晶体全反射特性及其调制规律,不仅具有可行性和实用性,且具有可操作,这对实际设计制备具有重要意义。

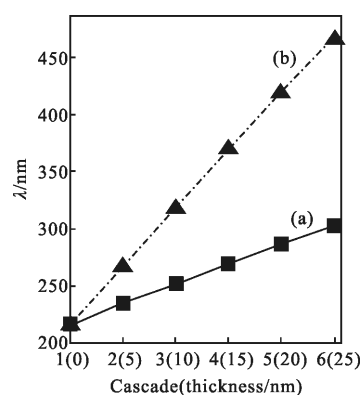


图 3 级联数对反射带宽度的影响曲线

Fig.3 Influence curve of the cascade on the reflection band width

2.3 级联光子晶体的全向反射镜功能

为研究入射角对级联结构光子晶体反射谱的影响,取三级联结构光子晶体 $(A_1B_1)^{10}(A_2B_2)^{10}(A_3B_3)^{10}$ 为研究对象,其中各级联中 A、B 介质层的厚度仍然取 $d_{A1}=45\text{ nm}$ 、 $d_{A2}=50\text{ nm}$ 、 $d_{A3}=55\text{ nm}$ 、 $d_{B1}=98\text{ nm}$ 、 $d_{B2}=103\text{ nm}$ 、 $d_{B3}=108\text{ nm}$ 。入射角 θ 分别取 0° 、 25° 、 50° 、 75° 、 85° 。计算模拟结果如图 4 所示。

从图 4 可见,随着入射角增大,级联结构光子晶体反射谱中也一直出现一条带宽很宽的全反射带,而且全反射带带宽随入射角增大向短波方向展宽,同时全反射带整体向短波方向缓慢移动。当 $\theta=0^\circ$ 时,全反射带带宽为 $\Delta\omega=318.03\text{ nm}$,全反射带中心处于 $\lambda_c=577.99\text{ nm}$ 位置处;当 $\theta=25^\circ$ 时,全反射带带宽为 $\Delta\omega=321.00\text{ nm}$,全反射带中心处于 $\lambda_c=562.80\text{ nm}$ 位置处;当 $\theta=50^\circ$ 时,全反射带带宽为 $\Delta\omega=330.85\text{ nm}$,全反射带中心处于 $\lambda_c=525.68\text{ nm}$ 位置处;当 $\theta=75^\circ$ 时,全反射带带宽为 $\Delta\omega=343.40\text{ nm}$,全反射带中心处于 $\lambda_c=505.50\text{ nm}$ 位置处;当 $\theta=85^\circ$ 时,全反射带带

宽为 $\Delta\omega=350.50\text{ nm}$, 全反射带中心处于 $\lambda_c=491.75\text{ nm}$ 位置处, 如图 4(a)~(d)所示。因此, 入射角从 $0^\circ\sim 85^\circ$ 变化时, 级联结构光子晶体不仅能保持反射率为 100%且带宽很宽的全反射带, 而且全反射带还随入射角增大而进一步展宽, 这给全向全反射镜的设计制备提供了重要的理论依据。

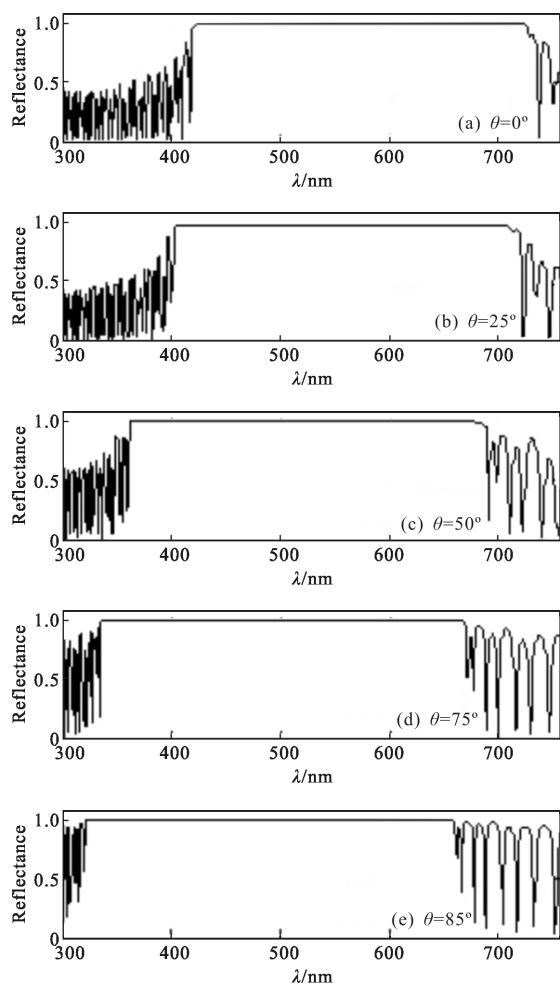


图 4 入射角 θ 对级联结构光子晶体 $(A_1B_1)^{10}(A_2B_2)^{10}(A_3B_3)^{10}$ 反射谱的影响

Fig.4 Effect of incident angle(θ) on the reflection spectrum of photonic crystal cascade structure $(A_1B_1)^{10}(A_2B_2)^{10}(A_3B_3)^{10}$

3 结论

利用传输矩阵法理论, 借助计算机程序计算和仿真绘图的方式, 研究二元单级结构及其组成的级联结构一维光子晶体的反射谱, 得出如下结论:

(1) 二元介质薄膜的物理厚度可有效调制单级结构光子晶体的全反射带带宽和全反射带的波长

位置。

(2) 级联结构光子晶体的全反射带带宽普遍宽于单级结构光子晶体的全反射带带宽, 而且级联数目可以非常灵敏的调制全反射带带宽, 当级联数目越多时, 全反射带向长波方向展宽的速度越快。

(3) 入射角变化不影响级联结构光子晶体反射带的反射率, 但对全反射带带宽具有调制作用, 随着入射角增大, 全反射带向短波方向展宽。

所构造的二元级联结构一维光子晶体的反射谱特性及调制规律, 对新型全向反射镜和光学开关等器件的研究和实际设计等, 具有一定的指导意义。

参考文献:

- [1] Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics[J]. *Physical Review Letters*, 1987, 58 (20): 2059–2061.
- [2] John S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices [J]. *Physical Review Letters*, 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.
- [4] 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.
- [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] Pan Jihuan, Su An, Meng Chengju. Modulation of medium refractive index on filter performance of photonic crystal quantum well [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43 (3): 833–837. (in Chinese)
潘继环, 苏安, 蒙成举. 介质折射率对光子晶体量子阱滤波性能的调制[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(3): 833–837.

- [7] 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.
- [8] Su An. Photonic crystal quantum well with function of multi-channel photonic filtering and amplifying [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(3): 726–732. (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): 726–732.
- [9] Xu Jiangyong, Su An, Pan Jihuan, et al. Effect of double negative medium on the transmission spectra of one-dimensional photonic crystal quantum well [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(8): 2156–2161. (in Chinese)
许江勇, 苏安, 潘继环, 等. 双负介质对一维光子晶体量子阱透射谱的影响[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(8): 2156–2161.
- [10] Pan Jihuan, Su An, Meng Chengju. Degeneracy effect of double negative medium on the transmission spectrum band of photonic crystal [J]. *Optical Technique*, 2014, 40(3): 245–248. (in Chinese)
潘继环, 苏安, 蒙成举. 双负介质对光子晶体透射能带谱的简并效应研究[J]. 光学技术, 2014, 40(3): 245–248.
- [11] Gong Yiling, Xu Zhenyu, Zhang Ruoqing. Analysis for photonic band gap property of one-dimensional photonic crystal [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2004, 32(7): 920–923. (in Chinese)
龚益玲, 许震宇, 张若京. 一维光子晶体的带隙分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2004, 32(7): 920–923.
- [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.