

四元异质结构光子晶体的光开关功能

唐秀福¹, 苏安¹, 何小超¹, 吕琳诗¹, 黎玉婷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: 构造和研究四元异质结构光子晶体 $(ABC)^6D(ABC)^6$ 的光传输特性, 发现 A、B、C 和 D 四种薄膜介质的物理厚度 d_A 、 d_B 、 d_C 和 d_D 可灵敏地调节光子晶体透射峰的波长位置, 实现短波和长波双通道的光开关功能, 而且不同通道光开关对相同薄膜介质光学厚度的响应灵敏度不同。对于短波通道光开关, 随着各薄膜介质层物理厚度 d_A 、 d_B 、 d_C 和 d_D 分别增大, 光开关的效应向长波方向移动, 其中光开关效应对 d_C 的响应最敏感, 对 d_B 响应次之, 对 d_A 响应最弱。对于长波通道光开关, 随着 d_A 、 d_B 、 d_C 和 d_D 分别增大, 光开关的效应也向长波方向移动, 其中光开关效应对 d_C 的响应最敏感, 对 d_D 响应次之, 对 d_A 响应最弱。四元异质结构光子晶体的这种光学传输特性为利用光子晶体设计高灵敏度的新型光学开关或滤波器件等提供参考。

关键词: 光开关; 光学滤波; 异质结构; 光子晶体; 传输矩阵法

中图分类号: O431 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.S121003

Photonic switch of quaternary heterostructure photonic crystal

Tang Xiufu¹, Su An¹, He Xiaochao¹, Lv Linshi¹, Li Yuting¹, Gao Yingjun²

(1. School of Physics and Mechanical & Electronic Engineering, Hechi University, Yizhou 546300, China;
2. School of Physical Science and Technology, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: This research constructed and studied the optical transmission characteristics of heterostructure photonic crystal $(ABC)^6D(ABC)^6$, that the physical thicknesses d_A , d_B , d_C and d_D of A, B, C and D can be used to adjust the transmission peak wavelength in the heterostructure photonic, to achieve short-wave and long-wave dual-channel optical switching, and the response sensitivity are different when the optical thin films thickness is changed by different dielectric medium. For short-wave channel optical switch, the transmission peak wavelength will be increased with the thickness of d_A , d_B , d_C and d_D become thicker, this change is most sensitive to the response of d_C , second to d_B , and weakest to d_A . For long-wave channel optical switch, with d_A , d_B , d_C and d_D increasing respectively, the transmission peak wavelength moves to the long wave direction, this change is most sensitive to the response of d_C , second to d_D , and weakest to d_A . The optical transmission characteristics of quaternary heterogeneous structure photonic

收稿日期: 2017-06-05; 修订日期: 2017-07-11

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项目(201710605012, 201710605065, 201710605066)

作者简介: 唐秀福(1985-), 男, 讲师, 硕士, 主要从事光子晶体方面的研究。Email: a5418921@126.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

crystal can provide a reference for the photonic crystal design of the new optical switch or filter devices.

Key words: photonic switch; optical filtering; heterostructure; photonic crystal; transfer matrix method

0 引言

光子晶体是一种人工光学材料,它是由不同介电常数的薄膜介质周期性排列形成的,它最奇异也是研究者们最感兴趣的特性是存在光子带隙,而且带隙结构可以通过周期性排列结构或是薄膜介质的参数来调整,于是人为剪裁和利用光频率为信息传输服务成为可能。当光频率处于光子带隙中的通带频率范围时,光就可以完全通过光子晶体,频率处于禁带范围时则被完全禁止通过光子晶体,通带和禁带的频率范围又可以通过结构周期来调节^[1-12]。因此,光子晶体的问世使光的传输可以根据人的意志进行控制,达到传输信息的目的,这也是光子晶体一直成为热门研究领域的主要原因。大量的研究成果表明,通过合理构造光子晶体结构即可有效操纵和利用光子晶体的光学传输特性,这对于设计高品质、高性能的光学滤波器、光学开关、光学波导和激光器等有积极的实际应用价值^[1-12]。在对光子晶体光传输特性的调制上,一般是通过调节排列方式、排列周期数、介质折射率、介质的物理厚度或光学厚度,或是通过设置不同缺陷等来完成,对于异质结构^[9-12]光子晶体,还可以通过多样性地调节介质本身排列周期数来完成。因为异质结构光子晶体不仅存在各种薄膜介质的合理周期排列,而且介质薄膜自身也存在周期性排列,这将使调制方式更加灵活。相比于标准周期二元光子晶体、三元结构光子晶体模型,四元异质结构光子晶体模型的介质元数更多,则其光学特性的调制方式也更加广泛和灵活,这对实际设计的参考作用也更加有意义,而且目前关于四元结构光子晶体的研究报道还不多。基于这个思路,文中在合理匹配参数构造四元异质结构光子晶体模型的基础上,通过计算机计算模拟仿真的方式找出该模型的光学开关特性及其调制规律,为高灵敏度的光学开关的理论研究和实际设计提供理论依据。

1 研究方法和模型

鉴于研究的主要任务是计算模拟四元异质结构光子晶体的透射能带谱,所以研究方法采用成熟且直观的传输矩阵法^[1-4,6-8],该方法已经被广泛使用,在此不再详述。构造和研究的一维四元异质结构光子晶体模型为 $(ABC)^mD^n(ABC)^m$,其中 A、B、C 和 D 分别为氟化镁、玻璃、砷化镓和碲化铅介质薄膜,各薄膜介质层相应的折射率和物理厚度分别为: $n_A=1.38, d_A=120\text{ nm}, n_B=1.8, d_B=200\text{ nm}, n_C=3.25, d_C=400\text{ nm}, n_D=4.1, d_D=580\text{ nm}$ 。 m, n 分别是(ABC)单元和 D 介质薄膜自身的排列周期数,在研究和计算中可取正整数。

2 计算结果与分析

2.1 光子晶体 $(ABC)^6D(ABC)^6$ 的透射谱

固定四元异质结构光子晶体 $(ABC)^mD^n(ABC)^m$ 模型中(ABC)单元和 D 自身的排列周期数 $m=6, n=1$,其他参数不变,通过科学计算软件 MATLAB 编程计算模拟,可得光子晶体 $(ABC)^6D(ABC)^6$ 透射谱,如图1所示。

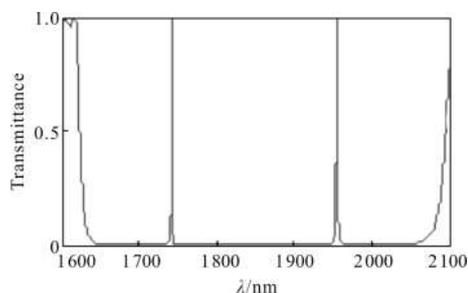


图 1 光子晶体 $(ABC)^6D(CBA)^6$ 的透射谱

Fig.1 Transmission spectrum for photonic crystals $(ABC)^6D(CBA)^6$

从图1可见,光子晶体的透射谱在1 625~2 096 nm 波长范围内出现了一条很宽的禁带,禁带中的1 742 nm 和 1 954 nm 波长位置出现了两条透射率为 100%的

分立共振透射峰,而且透射峰的带宽很窄,则所构造的四元异质结构光子晶体可以实现双通道光学滤波功能。如果以共振透射峰的半高全宽(FWHM)计量滤波通道的带宽^[4,8],则处于短波方向 1 742 nm 位置和处于长波方向 1 954 nm 位置的滤波通道的带宽分别为 0.758 nm 和 1.241 nm。即该四元异质结构光子晶体可实现品质很高的双通道光学滤波效果。

2.2 光学开关功能的实现

异质结构光子晶体(ABC)⁶D(ABC)⁶由 A、B、C、D 四种介质薄膜周期排列而成,当这些介质薄膜的参数发生变化时,光子晶体的光传输特性将随之改变。在所有参数中,介质薄膜的物理厚度是最重要也是最基础的参数。首先以 A 薄膜介质的物理厚度为研究对象,取 A 介质薄膜的物理厚度 $d_A=120、135、150、165、180$ nm 依次递增,固定其他参数不变,则可计算模拟出 d_A 对光子晶体 (ABC)⁶D(ABC)⁶ 透射谱的影响情况,结果如图 2 所示。

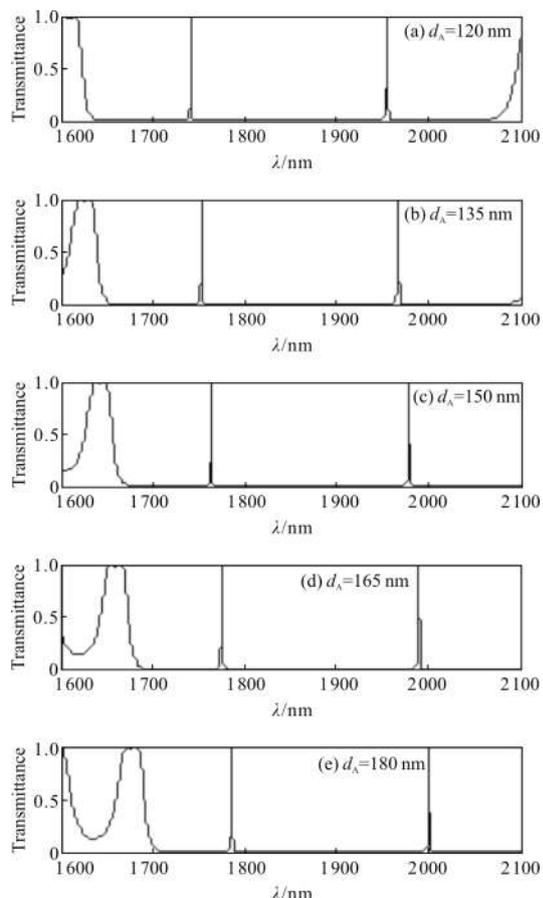


图 2 d_A 对(ABC)⁶D(CBA)⁶透射谱的影响

Fig.2 Transmission spectrum for photonic crystals (ABC)⁶D(CBA)⁶ versus d_A

由图 2 可见,随着 d_A 增大,无论是短波通道还是长波通道,均随禁带一起向长波方向移动,即左右光通道均出现了明显的红移现象。若以 λ_L 和 λ_R 分别表示左右光通道中心所处的波长位置,则当 $d_A=120、135、150、165、180$ nm 时, $\lambda_L=1 742、1 753、1 764、1 775、1 787$ nm, $\lambda_R=1 954、1 966、1 978、1 989、2 000$ nm。可见左右光通道所处的波长位置对 A 介质薄膜的物理厚度变化响应比较灵敏,这种特性可用于光学开关的设计和制作。

为了更加形象地呈现光学开关功能的实现,进一步细化 A 介质薄膜物理厚度变化,取 $d_A=120、120.5、121、121.5、122$ nm 依次递增,并把各物理厚度对应的左右光通道的透射谱分别绘制于同一个示意图中,如图 3 所示。图 3 中①、②、③、④和⑤曲线分别对应 $d_A=120、120.5、121、121.5、122$ nm 时左右光通道的光传输效果(透射峰)。

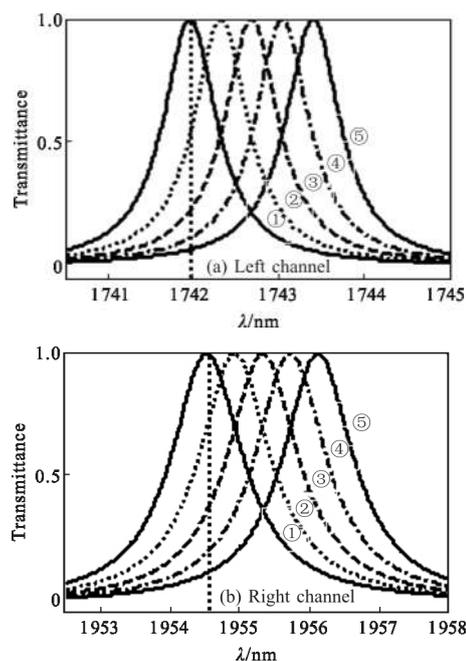


图 3 光开关功能的实现

Fig.3 Achievement of the optical switch function

从图 3 可见,当 d_A 增大时,无论是左光通道还是右光通道均向长波方向移动,则光通道(透射峰)原位置处的透射率急剧下降。图中竖直的虚线对应光通道原位置,当 $d_A=120、120.5、121、121.5、122$ nm 时,左光通道原位置的透射率分别为 100%、52.73%、22.60%、11.53%、6.71%,依次不断下降,右光通道原位置的透射率分别为 100%、73.40%、37.30%、20.50%、

12.43%, 依次不断下降。显然, 当 d_A 增大到一定程度数值时, 光通道原位置处的光透射率将下降到零, 即 A 介质薄膜的物理厚度对光子晶体光传输特性的调制规律, 很好地实现了光学开关的功能。但计算得到的数值显示, 左右光通道对 d_A 的响应速度是不一样的, 很明显短波通道响应速度快于长波通道。计算还发现, 左右光通道对 B、C、D 介质薄膜的物理厚度 d_B 、 d_C 和 d_D 变化响应也非常灵敏, 而且响应的速度不一样。

2.3 光学开关对各介质层物理厚度的响应

进一步地, 可计算并直观地呈现光子晶体左右通道光学开关对各介质薄膜物理厚度变化的响应情况: 以各介质薄膜的物理厚度 d_A 、 d_B 、 d_C 和 d_D 增加量 $\Delta d_A = \Delta d_B = \Delta d_C = \Delta d_D = 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90$ nm 为横坐标, 以对应各介质薄膜物理厚度时的左右通道光学开关所处波长位置为纵坐标, 分别作左右通道光学开关所处的波长位置随各介质薄膜物理厚度变化的响应曲线 $\lambda-d$, 计算结果如图 4 所示。

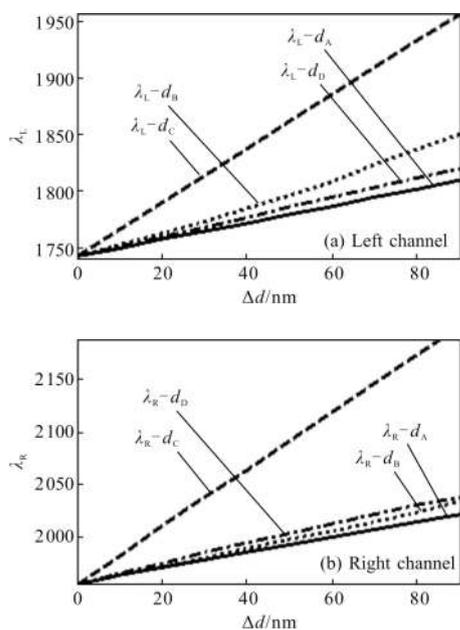


图 4 光开关对各介质层厚度 d 的响应曲线

Fig.4 Graph of optical switch versus d

从图 4 可见, 随着各薄膜介质层物理厚度增大, 光子晶体左右光通道光学开关所处位置均向长波方向移动, 但在增加相同物理厚度值的情况下, 左右光通道光学开关向长波方向红移的速度不一样, 而且同一光通道在增加相同物理厚度值情况下红移的速

度也不一样。以 λ_L 表示左光通道光学开关所处的波长位置, 随着 Δd_A 、 Δd_B 、 Δd_C 和 Δd_D 的等量增大, 左通道光学开关对 Δd_C 的响应最灵敏, 对 Δd_B 的响应速度次之, 对 Δd_A 的响应速度最弱。 $\Delta d_C = \Delta d_B = \Delta d_A = 0, 10, 30, 50, 70, 90$ nm 时, 左光通道光学开关所处的波长位置 $\lambda_{LC} = 1742, 1766, 1814, 1862, 1910, 1958$ nm, $\lambda_{LB} = 1742, 1752, 1773, 1796, 1823, 1851$ nm, $\lambda_{LA} = 1742, 1749, 1764, 1779, 1795, 1810$ nm, 如图 4(a) 中的 λ_L-d_C 、 λ_L-d_B 、 λ_L-d_A 曲线所示。以 λ_R 表示右光通道光学开关所处的波长位置, 随着 Δd_A 、 Δd_B 、 Δd_C 和 Δd_D 的等量增大, 右通道光学开关亦对 Δd_C 的响应最灵敏, 对 Δd_D 的响应速度次之, 对 Δd_A 的响应速度最弱。 $\Delta d_C = \Delta d_D = \Delta d_A = 0, 10, 30, 50, 70, 90$ nm 时, 右通道光学开关所处的波长位置 $\lambda_{RC} = 1954, 1982, 2037, 2092, 2147, 2203$ nm, $\lambda_{RD} = 1954, 1965, 1985, 2004, 2022, 2038$, $\lambda_{RA} = 1954, 1963, 1978, 1993, 2007, 2022$ nm, 如图 4(b) 中的 λ_R-d_C 、 λ_R-d_D 、 λ_R-d_A 曲线所示。对比图 4(a) 和图 4(b) 还看到, 无论是左通道还是右通道光学开关, 均对 C 介质薄膜的物理厚度变化响应最灵敏, 而对 A 介质薄膜的物理厚度变化响应最弱。这种调制机制对光学开关的设计具有指导意义。综合可见, 构造的四元异质结构光子晶体可实现高灵敏度的双通道光学开关功能, 而且双通道光学开关对各薄膜介质层的物理厚度变化大小响应灵敏, 但左右通道光学开关对不同介质层物理厚度变化响应速度不一样。

3 结论

所构造的四元异质结构光子晶体可实现光学开关功能, 而且其光学开关功能对光子晶体各薄膜介质的物理厚度变化灵敏, 但不同通道光学开关对各薄膜介质层物理厚度变化响应速度不同。

(1) 无论是短波通道光学开关还是长波通道光学开关, 开关效应对 C 介质薄膜的物理厚度变化响应最敏感, 对 A 介质薄膜的物理厚度变化响应速度最慢。

(2) 对处于短波方向的左通道光学开关, 开关效应对 Δd_C 的响应最灵敏, 对 Δd_B 的响应速度次之, 之后是 Δd_D , 而对 Δd_A 的响应速度最慢。

(3) 对处于长波方向的右通道光学开关, 开关效应对 Δd_C 的响应最灵敏, 对 Δd_D 的响应速度次之, 之

后是 Δd_B , 对 Δd_A 的响应速度最弱。

四元异质结构光子晶体所体现的这种光学开关特性及调制规律, 对新型双通道光学开关器件的研究和设计提供理论指导。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Wei Jijue, Su An, Gao Yingjun, et al. Degeneracy effect of defects on transmission spectrum band of photonic crystal[J]. *Lasers Technology*, 2017, 41(1): 56-70. (in Chinese)
韦吉爵, 苏安, 高英俊, 等. 缺陷对光子晶体透射能带谱的简并效应研究[J]. 激光技术, 2017, 41(1): 56-70.
- [3] Xu Jiangyong, Su An, Pan Jihuan, et al. Effect of double negative medium on the transmission spectra of onedimensional 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.
- [4] 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.
- [5] Zhou Jianwei, Liang Jingqiu, Liang Zhongzhu, et al. Tunable two-dimensional photonic crystal cavity all-optical switching infiltrated with liquid-crystal [J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(13): 134208. (in Chinese)
周建伟, 梁静秋, 梁中翥, 等. 光控液晶光子晶体微腔全光开关[J]. 物理学报, 2013, 62(13): 134208.
- [6] Dong Haixia, Jiang Haitao, Yang Chengquan, et al. Theoretical simulation and transmission properties of one-dimensional photonic quantum-well structure containing defect layers with negative refractive index [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(12): 2245-2249. (in chinese)
董海霞, 江海涛, 杨成全, 等. 含负折射率缺陷的光量子阱的透射特性及理论模拟 [J]. 光学学报, 2007, 27(12): 2245-2249.
- [7] 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.
- [8] Meng Chenju, Su An, Gao Yingjun. Photonic crystal quantum well with active impurity possessing highefficient optical filtering and amplifying functions [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(11): 3207-3212. (in Chinese)
蒙成举, 苏安, 高英俊. 实现高效光滤波与放大功能的掺杂杂质光量子阱 [J]. 红外与激光工程, 2013, 42(11): 3207-3212.
- [9] Zou Junhui, Zhang Juan. Photonic bandgap compensation and extension for hybrid quasiperiodic heterostructures [J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65(1): 014214. (in Chinese)
邹俊辉, 张娟. 混合准周期异质结构的带隙补偿与展宽 [J]. 物理学报, 2016, 65(1): 014214.
- [10] Deng Lier, Gong Lei. Reflection characteristics of one-dimensional polybasic photonic crystals by using heterostructure [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, 45(5): 516002. (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): 516002.
- [11] Chen Ying, Wang Wenyue, Fan Huiqing, et al. Achievement of multi-channel simultaneous adjustable filtering using hetero-structure photonic crystal cavities [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(10): 3399-3403. (in Chinese)
陈颖, 王文跃, 范卉青, 等. 异质结构光子晶体微腔实现多通道可调谐滤波[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(10): 3399-3403.
- [12] Li Lei, Liu Guiqiang, Chen Yuanhao. An optical switch based on coupled heterostructure photonic-crystal waveguides [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(2): 0123002. (in chinese)
黎磊, 刘桂强, 陈元浩. 光子晶体异质结构耦合波导光开关 [J]. 光学学报, 2013, 33(2): 0123002.