

四元异质结构光子晶体的可调通道滤波功能

潘继环¹, 苏安¹, 吕琳诗¹, 农慧霞¹, 韦爱珍¹, 钟发辉¹, 韦宇森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, 构造和研究四元异质结构光子晶体 $(A^{na}B^{mb}C^{mc})^m(D^{nd}B^{nb}D^{nd})^n(C^{mc}B^{mb}A^{ma})^m$ 的光学滤波特性。结果表明, 光子晶体可实现可调性多通道光学滤波功能: 当周期数 $m=6, n=1, ma=mb=mc=nb=nd=1$ 时, 光子晶体透射谱中出现两个分立的窄透射峰, 实现双通道光学滤波功能; 随着周期数 m 增大, 光子晶体保持双通道滤波功能, 而且双通道光学滤波的品质提高; 随着周期数 n 增大, 长波方向逐渐增加窄透射峰数目, 光子晶体实现 $n+1$ 通道光学滤波功能; 随着周期数 nd 增大, 窄透射峰数目成倍增加, 光子晶体实现多组双通道光学滤波功能。四元异质结构光子晶体的光学传输特性可为光子晶体设计新型可调通道光学滤波器件等提供理论依据。

关键词: 光学滤波; 异质结构; 光子晶体; 传输矩阵法

中图分类号: O431; O474 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.S121001

Tunable channel filter function of four-heterostructure photonic crystal

Pan Jihuan¹, Su An¹, Lv Linshi¹, Nong Huixia¹, Wei Aizhen¹, Zhong Fahui¹, Wei Yusen¹, 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: The four-heterostructure photonic crystal $(A^{na}B^{mb}C^{mc})^m(D^{nd}B^{nb}D^{nd})^n(C^{mc}B^{mb}A^{ma})^m$ optical filtering properties were structured and studied by using transfer matrix method. The results show that it can realize adjustable multi-channel optical filtering function in the photonic crystal. When the number of periods $m=6, n=1, ma=mb=mc=nb=nd=1$, there are two narrow separate transmission peak in the transmission spectrum of the photonic crystals and it can realize dual-channel optical filtering function; when the periods number m increases, photonic crystal keep two-channel filter function, but the quality of dual channel optical filtering will be increased. When the periods number n increases, the number of the narrow transmission peak for the long wave will gradually increase, the photonic crystal implement $n+1$ channel optical filtering function; when the periods number nd increases, the number of narrow transmission peak will be increased by times and it can realize multiple sets of dual channel optical filter

收稿日期: 2017-06-16; 修订日期: 2017-07-18

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);

河池学院重点科研基金资助课题(2014ZD-N001);

国家级、广西区级大学生创新训练计划(201610605058, 201710605012, 201710605065, 201710605066)

作者简介: 潘继环(1972-), 男, 副教授, 硕士, 主要从事光子晶体方面的研究。Email: panjihuan@163.com

function. The four-heterstructure photonic crystal optical transmission characteristics can provide theoretical basis for designing a new type of tunable channel in designing photonic crystal optical filter.

Key words: optical filter; heterostructure; photonic crystal; transfer matrix method

0 引言

大量的研究成果表明,光子晶体在设计激光器、光学开关、光学波导尤其是高品质、高性能的光学滤波器等方面具有巨大的应用前景,因此,研究者们认为光子晶体是光子替代电子进行信息传输的最佳载体材料^[1-10]。近年来,为了获取更高品质、更高性能的光学滤波效果,研究者们构造的光子晶体模型从简单的标准周期结构向更加复杂的光量子阱结构、多元结构、异质结构和对称结构等模型发展^[1-10]。对于简单的 $(AB)^n$ 标准结构模型,光子晶体的透射谱中普遍由光子能带和光子禁带交替形成,但这种带隙结构比较粗糙,对于光子晶体特性的实际应用价值不大。而对于不同薄膜介质排列形成对称结构模型 $(AB)^n(BA)^n$ 时,光子晶体的对称中心由于缺少一层 A 薄膜介质而形成缺陷,于是在禁带的中心出现带宽很窄的缺陷模(透射峰),这个特性为光学滤波的设计和实现提供理论依据和方法^[3,5]。于是研究者们根据这个特性在光子晶体不同的位置插入缺陷,或者是通过构造不同的光子晶体模型使其存在不同的缺陷,从而获得实际应用所需要的共振缺陷模,即实现实际应用所需的光学滤波功能。异质结构光子晶体是指在标准排列的某个位置突然出现另外一个有别于前排列周期的排列结构,之后又出现异于前两者的周期排列结构,这种结构中存在的缺陷位置各异且数目多,同时排列周期多样化,则在透射特性及其调节的方法上也表现出多样性,这对于光子晶体的设计和应用等具有指导意义。基于此,文中在选择恰当结构参数的基础上,构造四元异质结构光子晶体模型 $(A^{ma}B^{mb}C^{mc})^m(D^{nd}B^{nb}D^{nd})^n(C^{mc}B^{mb}A^{ma})^m$,通过计算机计算模拟,找出该光子晶体模型实现的光学滤波特性及其调制规律,为光学滤波器件的理论研究和实际设计提供指导。

1 研究模型和方法

构造和研究的一维四元异质结构光子晶体模型

为 $(A^{ma}B^{mb}C^{mc})^m(D^{nd}B^{nb}D^{nd})^n(C^{mc}B^{mb}A^{ma})^m$,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薄膜厚度分别为: $n_A=1.38, d_A=120 \text{ nm}, n_B=1.8, d_B=200 \text{ nm}, n_C=3.25, d_C=400 \text{ nm}, n_D=4.1, d_D=580 \text{ nm}$ 。 m, n 分别是(ABC)单元和(DBD)单元的排列周期数, ma, mb 和 mc 是(ABC)和(CBA)排列周期中 A、B、C 介质薄膜自身的周期数, nd 和 nb 分别为 (DBD)排列周期中 D 和 B 介质薄膜自身的周期数,这些周期数在计算和研究中均取正整数。研究方法为传输矩阵法^[2-10],即通过科学计算软件编程计算模拟,仿真可视化所构造的四元异质结构光子晶体的光传输特性及其调制规律,关于传输矩阵法的文献报道较多,在此不再详述。

2 计算结果与分析

2.1 双通道光学滤波功能的实现

首先,取四元异质结构光子晶体 $(A^{ma}B^{mb}C^{mc})^m(D^{nd}B^{nb}D^{nd})^n(C^{mc}B^{mb}A^{ma})^m$ 各薄膜介质自身的排列周期数 $ma=mb=mc=nd=nb=1$, (ABC)、(CBA)和(DBD)的排列周期数 $m=6, n=1$,并固定其他结构参数不变,则可以通过计算软件 MATALB 编程计算模拟,可得 $(ABC)^6(DBD)(CBA)^6$ 的透射谱,如图 1 所示。

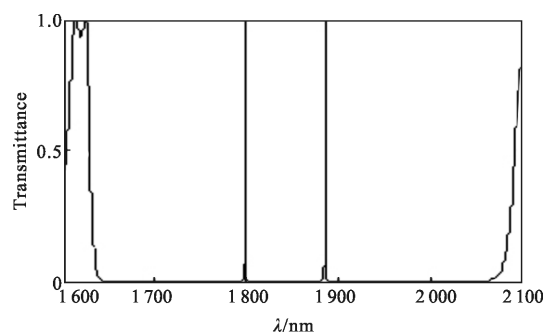


图 1 $(ABC)^6(DBD)(CBA)^6$ 的透射谱

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

从图 1 可见,有一条很宽的禁带分布在透射谱的 1639~2093 nm 波长范围内,最值得关注的是禁带中的 1799.1 nm 和 1885.9 nm 波长位置分别出现了两条透射率为 100%的分立窄共振透射峰,即构造

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(Full Width at Half Maximun, FWHM) 计量各滤波通道的带宽,并以共振透射峰的中心波长 λ_c 与共振透射峰的半高全宽 $\Delta\lambda$ 的比值($Q=\lambda_c/\Delta\lambda$)计量滤波通道的滤波品质,称为滤波品质因子^[5,7-8],则滤波器(ABC)⁶(DBD)(CBA)⁶左右双滤波通道的带宽分别为 0.398 1 nm 和 0.474 0 nm,对应的滤波品质因子分别为 4.5192×10^3 和 3.9787×10^3 。可见,该光子晶体实现了品质很高的双通道光学滤波效果。

2.2 周期数 m 对滤波特性的调制

仍然取各薄膜介质自身的排列周期数 $ma=mb=mc=nd=nb=1$,并固定(DBD)的排列周期数 $n=1$,取外侧(ABC)和(CBA)的排列周期数 $m=2,3,4,5,6,7$ 整数依次增大,其他结构参数不变,则可以通过计算软件 MATALB 编程计算模拟,可得(ABC) ^{m} (DBD)(CBA) ^{m} 透射谱,如图 2 所示。

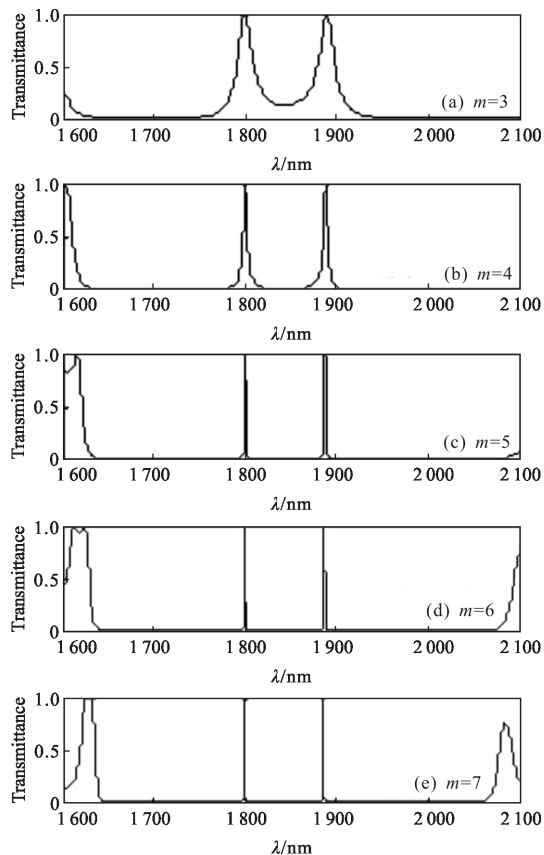


图 2 (ABC) ^{m} (DBD)(CBA) ^{m} 的透射谱

Fig.2 Transmission spectrum for photonic crystals(ABC) ^{m} (DBD)(CBA) ^{m}

从图 2 可见,随着(ABC)和(CBA)的排列周期数

m 增大,光子晶体(ABC) ^{m} (DBD)(CBA) ^{m} 透射谱中的双透射峰快速变得精细,即带宽越来越窄,但透射峰的透射率保持 100%不变,透射峰中心所处的波长位置也不变,亦即用此种光子晶体材料所构造的滤波器的双通道滤波品质越来越高,且滤波通道中心所处的波长位置不变。若以 λ_{cL} 和 λ_{cR} 分别表示左右滤波通道中心所处的波长位置,则当 $m=2,3,4,5,6,7$ 时,两者中心位置均保持在 $\lambda_{cL}=1799.1$ nm 波长位置处和在 $\lambda_{cR}=1885.9$ nm 波长位置处,如图 2(a)~(e)所示。同时,以左右滤波通道的半高全宽 W_L 和 W_R 分别计量滤波带宽,以 Q_L 和 Q_R 分别计量左右滤波通道的滤波品质因子,则当 $m=2,3,4,5,6,7$ 时, $W_L=19.1800,5.0340,1.4077,0.3981,0.1132$ nm, $W_R=19.9850,5.4500,1.5940,0.4740,0.1417$ nm,对应的滤波品质因子 $Q_L=9.3820\times 10^1,3.5735\times 10^2,1.2780\times 10^3,4.5192\times 10^3,1.5888\times 10^4, Q_R=9.4474\times 10^1,3.4621\times 10^2,1.1833\times 10^3,3.9787\times 10^3,1.3313\times 10^4$ 。从测算的结果可见,(ABC)和(CBA)的排列周期数 m 可以调节滤波器双通道的滤波品质,而且左侧滤波通道的品质对 m 的响应敏感于右侧滤波通道。周期数 m 对双通道滤波品质的调制规律为研究和设计固定滤波通道的光学滤波器件提供参考。

2.3 周期数 n 对滤波特性的调制

进一步地,可固定光子晶体各薄膜介质自身的排列周期数 $ma=mb=mc=nd=nb=1$, (ABC)和(CBA)的排列周期数 $m=6$,取(DBD)的排列周期数 $n=1,2,3,4,5$ 依次增大,其他结构参数固定不变,则通过计算模拟,可得光子晶体(ABC)⁶(DBD) ^{n} (CBA)⁶透射谱随 n 的变化情况,结果如图 3 所示。

由图 3 可见,随着(DBD)的排列周期数 n 增大,光子晶体滤波器的滤波通道数目逐渐增加,滤波通道数目与 $n+1$ 等值,而且随着 n 增大,在长波方向增加的滤波通道逐渐向短波方向移动,导致短波方向的滤波通道之间的波长间隔越来越短。以光子晶体滤波器初始的双通道为例,当 $n=1,2,3,4,5$ 时,左右两通道均向短波方向移动,通道中心所处的波长位置分别为 $\lambda_{c1}=1799.1,1792.7,1789.3,1787.3,1785.9$ nm, $\lambda_{c2}=1885.9,1843.6,1823.4,1811.9,1804.7$ nm,两通道之间的距离变化为 $\Delta\lambda=86.8,50.9,34.1,24.6,18.8$ nm。当 $n=2$ 时,在长波方向增加一条滤波通道,滤波通道总数为三条,随着 n 增大,该滤波通道也蓝移,且蓝移后与第二通道之间的距离逐渐变短,如当 $n=2,3,$

4、5 时, 该滤波通道中心所处的波长位置 $\lambda_{c3}=1921.1、1876.6、1853.0、1836.5\text{nm}$, 该通道与第二通道之间的距离 $\Delta\lambda=77.5、53.2、41.1、31.8\text{nm}$, 如图 3(a)~(e)所示。通过计算还发现, 滤波通道随 n 增大而蓝移的过程中带宽越来越窄, 即滤波品质越来越高, 当 $n=1、2、3、4、5$ 时, 从左到右三个滤波通道的带宽分别为 $W_1=0.3981、0.2560、0.1786、0.1309、0.0994\text{nm}$, $W_2=0.4740、0.3595、0.2915、0.2405、0.2007\text{nm}$, $W_3=0.3002、0.2599、0.2251、0.1995\text{nm}$, 对应的滤波品质因子 $Q_1=4.5192\times 10^3、7.0027\times 10^3、1.0019\times 10^4、1.3654\times 10^4、1.7971\times 10^4$, $Q_2=3.9787\times 10^3、5.1282\times 10^3、6.2550\times 10^3、7.5320\times 10^3、8.9920\times 10^3$, $Q_3=6.3995\times 10^3、7.2280\times 10^3、8.2320\times 10^3、39.2060\times 10^3$ 。可见, (DBD)的排列周期数 n 不仅可以调制光子晶体滤波器的通道数目, 而且还可以调制各滤波通道的滤波品质以及它们之间的距离。

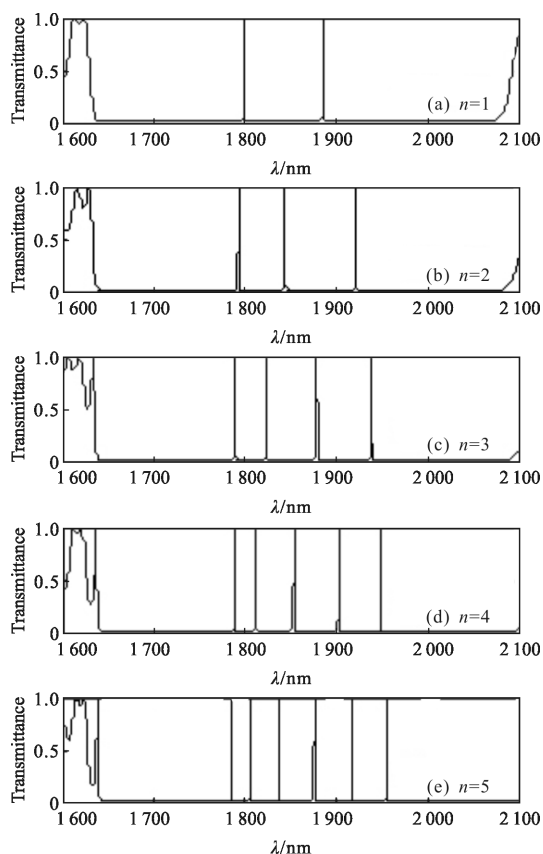


图 3 (ABC)⁶(DBD)ⁿ(CBA)⁶ 的透射谱

Fig.3 Transmission spectrum for photonic crystals (ABC)⁶(DBD)ⁿ(CBA)⁶

2.4 周期数 nd 对滤波特性的调制

因为异质结构光子晶体的特征之一就是各薄膜

介质层能够自身周期性排列变化, 即各薄膜介质层自身的周期也可以调制光子晶体滤波器的滤波特性。因此, 固定光子晶体各薄膜介质自身的排列周期数 $ma=mb=mc=nb=1$, (ABC)和(CBA)的排列周期数 $m=6$, (DndBDnd)的排列周期数 $n=1$, 取 D 薄膜介质自身周期数 $nd=1、2、3、4、5$ 依次增大, 则可计算模拟出 nd 对光子晶体滤波器(ABC)⁶(DndBDnd)(CBA)⁶ 滤波特性的调制作用, 结果如图 4 所示。

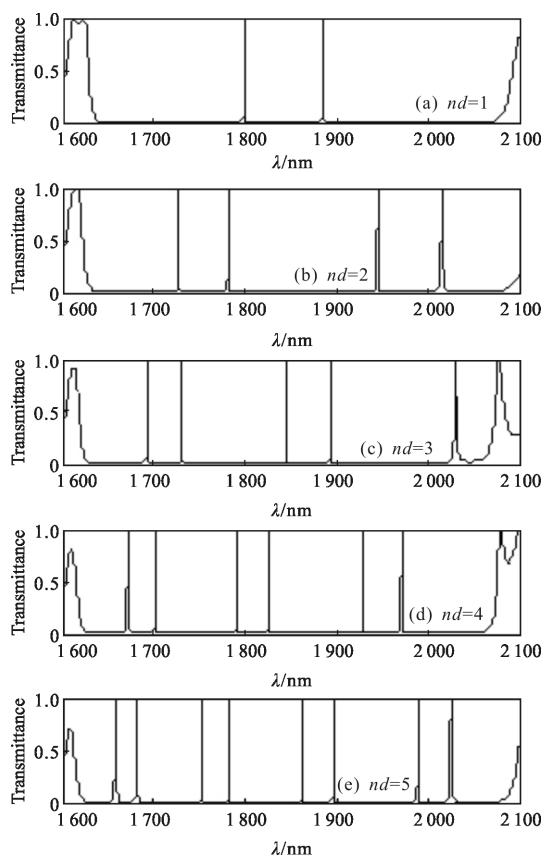


图 4 (ABC)⁶(DndBDnd)(CBA)⁶ 的透射谱

Fig.4 Transmission spectrum for photonic crystals

(ABC)⁶(DndBDnd)(CBA)⁶

从图 4 可见, 随着 D 自身排列周期数 nd 增大, 在长波方向上光子晶体滤波器的滤波通道数目成倍增加, 形成多组双通道滤波的现象, 如 $nd=1$ 时出现一组双滤波通道, $nd=2$ 时出现两组双滤波通道, $nd=4$ 时出现三组双滤波通道。而且随着 nd 增大, 各滤波通道向短波方向蓝移并出现滤波通道之间的波长间隔越来越短。以光子晶体滤波器初始的双通道为例, 当 $nd=1、2、3、4、5$ 时, 左右两通道均向短波方向移动, 通道中心所处的波长位置分别为 $\lambda_{c1}=1799.1、1728.3、$

1 693.2、1 672.4、1 658.7 nm, $\lambda_{c2}=1 885.9、1 781.5、1 731.3、1 701.8、1682.5$ nm, 两通道之间的距离变化为 $\Delta\lambda=86.8、53.2、38.1、29.4、23.8$ nm。当 $nd=2$ 时,在长波方向增加一组双滤波通道并随 nd 增大蓝移,且蓝移过程中两通道之间的距离也逐渐变短,如当 $nd=2、3、4、5$ 时,该组双滤波通道中心所处的波长位置 $\lambda_{c3}=1 945.1、1 846.1、1 790.2、1 754.1$ nm, $\lambda_{c4}=2 014.8、1 893.7、1 825.7、1 782.4$ nm,两滤波通道之间的距离 $\Delta\lambda=69.7、47.6、35.5、28.3$ nm,如图 4(a)~(e)所示。

通过计算还发现,滤波通道随 nd 增大而蓝移的过程中,初始的双滤波通道的滤波品质越来越低,而长波方向新增的双滤波通道的滤波品质则越来越高。如:当 $nd=1、2、3、4、5$ 时,第一组双滤波通道的左通道的带宽为 $W_1=0.398 1、0.468 2、0.658 0、0.920 5、1.239 0$ nm,第二组双滤波通道的左通道的带宽为 $W_2=0.562 3、0.209 4、0.177 1、0.155 6$ nm,对应的滤波品质因子 $Q_1=4.519 2\times 10^3、3.691 3\times 10^3、2.573 2\times 10^3、1.817 2\times 10^3、1.339 6\times 10^3、Q_2=3.459 1\times 10^3、8.816 1\times 10^3、1.010 8\times 10^4、1.944 9\times 10^4$ 。可见, D 自身排列周期数 nd 不仅可以调制光子晶体滤波器的通道数目,而且还可以调制各滤波通道之间的距离及滤波品质,同时它对不同滤波位置的滤波通道的滤波品质调制机制不同。计算还发现,其他薄膜介质的自身周期数对滤波器特性的调制与 nd 类似,在此不一一罗列。

3 结 论

利用传输矩阵法理论,研究基元介质排列周期数和介质薄膜自身排列周期数对四元异质结构光子晶体光学滤波器 $(A^{mc}B^{mb}C^{mc})^m (D^{nd}B^{nb}D^{nd})^n (C^{mc}B^{mb}A^{ma})^m$ 特性的调制规律,发现光子晶体可以实现可调性多通道光学滤波器的功能,而且滤波器的滤波通道数目和滤波品质对基元介质排列周期数和介质自身的排列周期数均响应比较灵敏。

(1) 基元介质排列周期数 m 可调制滤波器各滤波通道的滤波品质,但对滤波通道数目和滤波通道所处的长波位置不产生影响。

(2) 基元介质排列周期数 n 不仅可以调制光子晶体滤波器的滤波通道数目,而且还可以调制各滤波通道的滤波品质、各滤波通道所处的波长位置和各滤波通道之间的距离等。

(3) 各介质自身排列周期数不仅可以调制光子

晶体滤波器的通道数目,而且还可以调制各滤波通道的滤波品质、各滤波通道所处的波长位置和各滤波通道之间的距离等,而且对长波和短波位置滤波通道的滤波品质调制机制不同。

所构造的四元异质结构光子晶体的光学滤波特性,对新型可调性多通道光学滤波器件的研究和设计等具有积极的指导意义。

参考文献:

- [1] Zou Junhui, Zhang Juan. Photonic bandgap compensation and extension for hybrid quasiperiodic heterostructures [J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65(1): 014214. (in Chinese)
- [2] Chen Ying, Cao Huiying, Han Shuaitao, et al. Sensing property of photonic crystal Fabry-pérot heterogeneous structure with absorption medium [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(2): 0223033. (in Chinese)
- [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)
- [4] 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)
- [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)
- [6] 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)
- [7] 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)
- [8] 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)
- [9] Wei Jijue, Su An, Tang Xiufu, et al. Effect of asymmetric on transmission properties of one-dimensional ternary photonic crystal [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(S2): S221002. (in Chinese)
- [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)