

文章编号: 1001-3806(2018)02-0212-05

四元异质结构光子晶体的双通道光学滤波特性

韦应生¹, 苏安², 许江勇¹, 唐秀福², 蒙成举², 高英俊³

(1. 兴义民族师范学院 物理与工程技术学院, 兴义 562400; 2. 河池学院 物理与机电工程学院, 宜州 546300; 3. 广西大学 物理科学与工程技术学院, 南宁 530004)

摘要: 为了设计高品质的光学滤波器, 采用传输矩阵法研究四元异质结构光子晶体 $(ABC)^7D(CBA)^7$ 的双通道光学滤波特性。结果表明, 随着 A (或 C) 介质薄膜光学厚度 D_A (或 D_C) 的增大, 滤波器短波通道的滤波品质因子降低, 长波通道的滤波品质因子升高; 随着 B 介质薄膜光学厚度 D_B 增大, 滤波器短波通道和长波通道的滤波品质因子均下降; 随着 D 介质薄膜光学厚度 D_D 增大, 滤波器短波通道的滤波品质因子升高, 而长波通道的滤波品质因子降低; 随着各薄膜介质层光学厚度增大, 滤波器双通道均向长波方向红移, 但各滤波通道的光透射率均保持 100% 不变。该研究结果可为光子晶体设计新型光学滤波器件、光学开关等提供参考。

关键词: 材料; 光电子学; 传输矩阵法; 光学滤波; 异质结构; 光子晶体

中图分类号: O431; O474 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2018.02.014

Characteristics of dual-channel optical filter in quaternary heterostructure photonic crystal

WEI Yingsheng¹, SU An², XU Jiangyong¹, TANG Xiufu², MENG Chengju², GAO Yingjun³

(1. Department of Physics and Engineering, Xingyi Normal University for Nationalities, Xingyi 562400, China; 2. Department of Physics and Mechanical & Electronic Engineering, Hechi University, Yizhou 546300, China; 3. Department of Physical Science and Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: In order to design optical filter with high quality, dual-channel optical filter in quaternary-heterostructure photonic crystal $(ABC)^7D(CBA)^7$ was constructed by using transfer matrix method and the characteristics were studied. The results show that, with the increasing of D_A (or D_C), the filtering quality factor of short wave channel decreases and quality factor of long wave channel increases. With the increasing of D_B , both the filtering quality factors of short and long wave channels decrease. With the increasing of D_D , quality factor of short wave channel increases and quality factor of long wave channel decreases. With the increasing of optical thickness, both channels of the filter are red shifted toward long wave. Optical transmittances of each filter channel remain constant perfectly. The study can provide the reference for the design of new optical filters and optical switches of photonic crystals.

Key words: materials; optoelectronics; transmission matrix; optical filter; heterostructure; photonic crystal

引言

光子晶体^[1-2]作为一种人工微结构光学材料, 经过

多年盛行不衰的研究和实现, 其在通信领域中以光子替代电子进行信息传输已经呈现出巨大应用前景^[1-16]。由不同介电常数的薄膜介质周期排列形成的结构称为光子晶体, 当光在其中传播时, 光传输谱具有明显的光子带隙结构特征, 频率落在能带范围的光可以通过光子晶体, 而频率处于禁带范围的光则被禁止传播。另外, 在光子晶体中适当位置合理置入缺陷介质, 当光传播到缺陷位置时会被局域在其中, 使缺陷位置存在极强的局域电场, 因此缺陷位置光子态密度显著增强, 最终在宏观的透射能带谱中表现为透射率及品质因子都很高的窄缺陷模(共振透射峰)^[3,5-6]。通

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51161003); 贵州省科技厅科技计划基金资助项目(黔科合 LH 字 2016-7039 号); 贵州省黔西南州科技局科技计划基金资助项目(2014-3); 广西高校科学技术研究资助项目(KY2015YB258; KY2016LX287); 河池学院青年基金资助项目(XJ2015QN006)

作者简介: 韦应生(1974-), 男, 讲师, 主要从事光子晶体方面的研究。

E-mail: weiyingsheng74@163.com

收稿日期: 2017-04-18; 收到修改稿日期: 2017-05-22

过合理构造光子晶体结构,即可根据人的意志操纵和利用这些特性,用以设计光学波导、激光器、光学开关尤其是高品质、高性能的光学滤波器、光学开关、光学波导和激光器等,实现光子传输信息的目的,并有积极的实际应用价值^[7-16]。最初的光子晶体模型由 A、B 两种不同介电常数的介质薄膜周期性排列形成(AB)ⁿ结构,该模型的透射能带谱特征为通带和禁带的交替排列。后来研究者们构造了含缺陷的结构模型、对称结构模型、三元结构模型、异质结构模型等,既丰富了光子晶体的研究模型,并透射能带谱的禁带中出现品质很高的透射峰,从而实现光传输行为被人为所控制和利用^[4,12-16]。随着研究的深入,人们开始关注四元结构光子晶体模型,这种模型有 4 种不同的介质薄膜按一定的周期结构排列而成,构造时对结构参量匹配的要求将更加严格,然而一旦匹配成功,该光子晶体光传输特性的调试将更加灵活,因为不仅可以对 4 种介质的周期性排列方式和周期数进行调节,还可以对各介质本身的参量和排列周期进行调节,故对实际设计的参考作用也更加有意义。基于这个思路,本文中在合理匹配参量构造四元异质结构光子晶体模型(ABC)^mDⁿ(CBA)^m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 1 维四元异质结构光子晶体模型为(ABC)^mDⁿ(CBA)^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光学厚度分别为: $n_A = 1.38, n_B = 1.8, n_C = 3.25, n_D = 4.1, D_A = 165\text{nm}, D_B = 360\text{nm}, D_C = 1300\text{nm}, D_D = 2380\text{nm}$ 。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。研究方法为传输矩阵法理论^[3,5,8,12-14],即通过科学计算软件编程计算模拟,仿真可视化光子晶体的透射能带谱,找出四元异质结构光子晶体实现光学滤波的功能与特性,以及调制滤波性能的机制等。传输矩阵法已经使用得很广泛,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

固定四元异质结构(ABC)^mDⁿ(CBA)^m模型中(ABC)单元和 D 自身的排列周期数 $m = 7, n = 1$,其它参量不变,则可以通过计算软件 MATALB 编程计算模

拟,可得(ABC)⁷D(CBA)⁷透射谱,如图 1 所示。

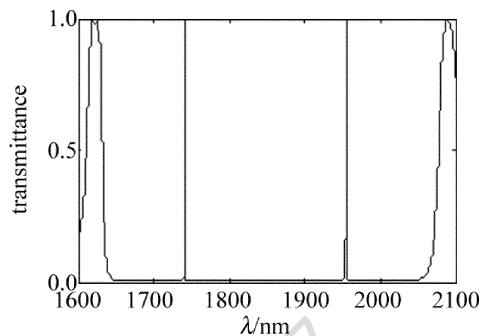


Fig. 1 Transmission spectrum for photonic crystals (ABC)⁷D(CBA)⁷

从图 1 可见,在透射谱的 1632nm ~ 2078nm 波长范围内出现了一条很宽的禁带,禁带中的 1742.2nm 和 1954.3nm 波长位置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峰全宽(full width at half maximum, FWHM)计量滤波通道的带宽,并以共振透射峰的中心波长 λ_c 与共振透射峰的半峰全宽 $\Delta\lambda$ 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^[12-14],则左右双滤波通道的带宽分别为 0.2469nm 和 0.4775nm,对应的滤波品质因子分别为 7.0564×10^3 和 4.0927×10^3 。即实现了品质很高的双通道光学滤波效果。

2.2 A 介质光学厚度 D_A 对滤波特性的调制

异质结构光子晶体滤波器(ABC)⁷D(CBA)⁷由 A、B、C、D 这 4 种介质薄膜周期排列而成,当这些介质薄膜的参量发生变化时,滤波器的特性将随之变化。在所有参量中,光学厚度是重要的参量之一,而且 4 种介质薄膜的光学厚度均可以分别改变。首先,固定其它参量不变,取 A 介质薄膜的光学厚度 D_A 分别为 165nm, 185nm, 205nm, 225nm, 245nm 依次递增,则可计算模拟出 D_A 对光子晶体滤波器(ABC)⁷D(CBA)⁷滤波特性的影响,结果如图 2 所示。

由图 2 可见,随着 D_A 增大,滤波器的左右双通道随禁带一起向长波方向移动,即滤波双通道均出现了明显的红移现象。若以 $\lambda_{c,l}$ 和 $\lambda_{c,r}$ 分别表示左右滤波通道中心所处的波长位置,则当 D_A 分别为 165nm, 185nm, 205nm, 225nm, 245nm 时, $\lambda_{c,l}$ 为 1742.2nm, 1752.7nm, 1763.4nm, 1774.2nm, 1785.4nm, $\lambda_{c,r}$ 为 1954.3nm, 1965.8nm, 1977.0nm, 1987.9nm, 1998.5nm。同时,通过软件计算还发现,随着 D_A 的增大,滤波器的左右双通道的滤波品质均发生变化,但左右通道滤波品质变化趋势不同。以左右滤波通道的半峰全宽 W_l

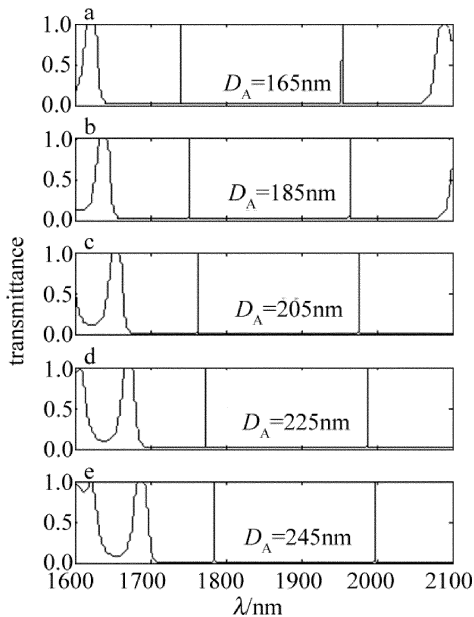


Fig. 2 Transmission spectrum for photonic crystals $(ABC)^7D(CBA)^7$ under different D_A

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 D_A 为 165nm, 185nm, 205nm, 225nm, 245nm 时, W_l 为 0.2469nm, 0.2699nm, 0.3013nm, 0.3435nm, 0.3981nm, W_r 为 0.4775nm, 0.4102nm, 0.3593nm, 0.3217nm, 0.2944nm, 对应的滤波品质因子 Q_l 为 7.0564×10^3 , 6.4940×10^3 , 5.8526×10^3 , 5.1652×10^3 , 4.4847×10^3 , Q_r 为 4.0927×10^3 , 4.7923×10^3 , 5.5023×10^3 , 6.1793×10^3 , 6.7885×10^3 。即短波方向的滤波通道品质因子随 D_A 增大而下降,而长波方向的滤波通道品质因子随 D_A 增大则升高。另外,经过计算还发现,C 介质薄膜光学厚度 D_C 对双滤波通道特性的调制规律与 D_A 调制规律相似,鉴于文章的篇幅及调制作用机制的相同性,在此不重复罗列。

2.3 B 介质光学厚度 D_B 对滤波特性的调制

进一步地,可固定光子晶体的其它结构参量不变,而取 B 介质薄膜的光学厚度 D_B 为 360nm, 380nm, 400nm, 420nm, 440nm 依次递增,则可计算模拟出 D_B 对光子晶体滤波器 $(ABC)^7D(CBA)^7$ 滤波特性的影响,结果如图 3 所示。

由图 3 可见,随着 D_B 增大,滤波器的左右双通道随禁带一起往长波方向红移,但红移的速度与 D_A (或 D_C) 作用下的速度不同。仍以 $\lambda_{c,l}$ 和 $\lambda_{c,r}$ 分别表示左右滤波通道中心所处的波长位置,则当 D_B 为 360nm, 380nm, 400nm, 420nm, 440nm 时, $\lambda_{c,l}$ 为 1742.2nm,

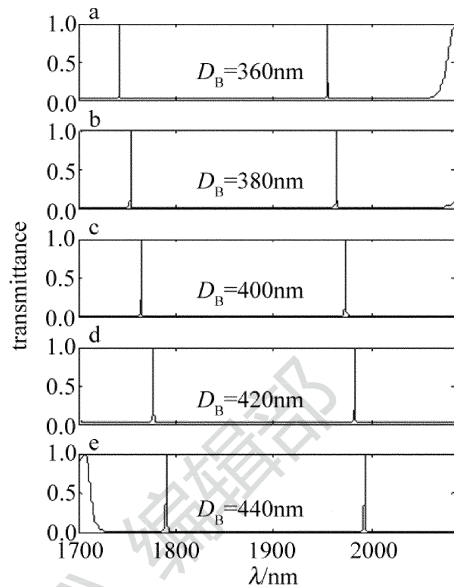


Fig. 3 Transmission spectrum for photonic crystals $(ABC)^7D(CBA)^7$ under different D_B

1753.1nm, 1764.6nm, 1776.9nm, 1790.0nm, $\lambda_{c,r}$ 为 1954.3nm, 1963.7nm, 1973.1nm, 1982.6nm, 1992.1nm。同时,随着 D_B 增大,滤波器的左右双通道的滤波品质也发生变化,但左右通道滤波品质变化趋势 D_A (或 D_C) 作用下变化趋势不同。仍以半峰全宽 W_l 和 W_r 分别计量左右滤波通道的滤波带宽,以 Q_l 和 Q_r 计量滤波品质因子,则当 D_B 为 360nm, 380nm, 400nm, 420nm, 440nm 时, W_l 为 0.2469nm, 0.3330nm, 0.4535nm, 0.6199nm, 0.8505nm, W_r 为 0.4775nm, 0.4908nm, 0.5200nm, 0.5643nm, 0.6285nm, 对应的 Q_l 为 7.0564×10^3 , 5.2645×10^3 , 3.8911×10^3 , 2.8664×10^3 , 2.1047×10^3 , Q_r 为 4.0927×10^3 , 4.0010×10^3 , 3.7944×10^3 , 3.5133×10^3 , 3.1696×10^3 。可见,随着 D_B 增大,无论是短波通道还是长波通道的滤波品质因子均下降。

2.4 D 介质光学厚度 D_D 对滤波特性的调制

最后,取 D 介质薄膜的光学厚度 D_D 为 2380nm, 2400nm, 2420nm, 2440nm, 2460nm 依次递增,同样固定光子晶体的其它结构参量不变,则可计算模拟出 D_D 对光子晶体滤波器 $(ABC)^7D(CBA)^7$ 滤波特性的影响,结果如图 4 所示。

从图 4 可见,随着 D_D 增大,滤波器的左右双通道随禁带一起往长波方向红移,但红移的速度与 D_A (或 D_C)、 D_B 作用下的速度不同。仍以 $\lambda_{c,l}$ 和 $\lambda_{c,r}$ 分别表示左右滤波通道中心所处的波长位置,则当 D_D 为 2380nm, 2400nm, 2420nm, 2440nm, 2460nm 时, $\lambda_{c,l}$ = 1742.2nm, 1750.7nm, 1759.2nm, 1767.7nm, 1776.2nm,

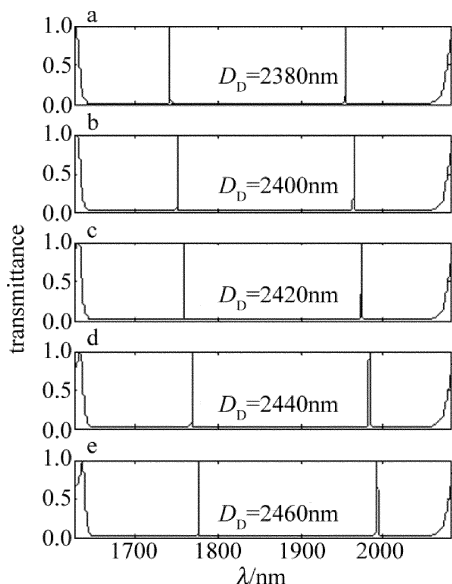


Fig. 4 Transmission spectrum for photonic crystals $(ABC)^7D(CBA)^7$ under different D_D

$\lambda_{c,r}$ 为 1954.3nm, 1964.0nm, 1973.6nm, 1983.1nm, 1992.3nm。同时,随着 D_D 增大,滤波器的左右双通道的滤波品质也发生变化,但左右通道滤波品质变化趋势 D_A (或 D_C)、 D_B 作用下变化趋势不同。仍以半峰全宽 W_l 和 W_r 分别计量左右滤波通道的滤波带宽,以 Q_l 和 Q_r 计量滤波品质因子,则当 D_D 为 2380nm, 2400nm, 2420nm, 2440nm, 2460nm 时, W_l 为 0.2469nm, 0.2190nm, 0.1977nm, 0.1807nm, 0.1678nm, W_r 为 0.4775nm, 0.5756nm, 0.7037nm, 0.8730nm, 1.0950nm, 对应的 Q_l 为 0.70564×10^4 , 0.7994×10^4 , 0.8898×10^4 , 0.9782×10^4 , 1.0585×10^4 , Q_r 为 4.0927×10^3 , 3.4121×10^3 , 2.8047×10^3 , 2.2716×10^3 , 1.8195×10^3 。可见,短波方向的滤波通道品质因子随 D_D 增大而升高,而长波方向的滤波通道品质因子随 D_D 增大却降低,这与 D_A 的作用趋势刚好相反。

为更加直观反映各薄膜介质层光学厚度 D 对左右双通道滤波品质 Q 的调制规律,进一步地,以各薄膜介质层的光学厚度增加量为横坐标,左滤波通道的品质因子 Q_l 和右滤波通道的滤波品质因子 Q_r 为纵坐标,作 $Q-D$ 变化曲线图,如图 5 所示。

从图 5a 显见,对处于短波方向的左侧滤波通道,随着 A, B 和 C 层介质的光学厚度 D_A , D_B 和 D_C 增大,滤波品质因子 Q 均下降,而且滤波品质因子下降速度以对 D_B 的响应最灵敏, D_A 次之, D_C 最弱。而随着 D 层介质的光学厚度 D_D 增大,滤波品质因子则快速提高。

从图 5b 可见,对处于长波方向的右侧滤波通道,

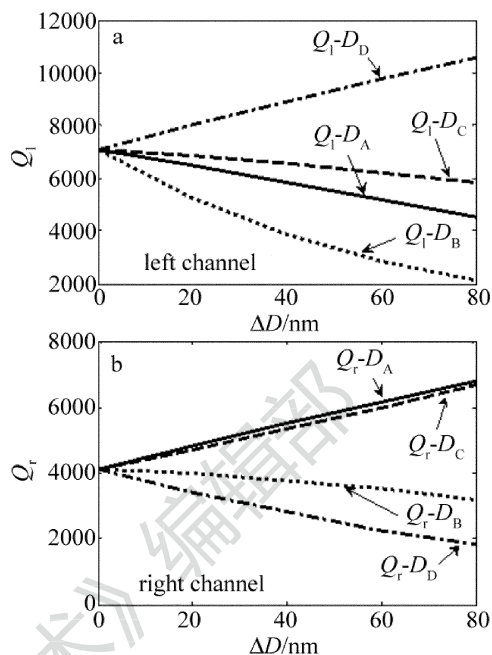


Fig. 5 Relationship between filter quality factor and ΔD under D_A , D_B , D_C , D_D

随着 A, C 层介质的光学厚度 D_A , D_C 增大,滤波品质因子 Q 快速提升,而且滤波品质因子提升速度以对 D_A 的响应灵敏于 D_C 。而随着 B, D 层介质的光学厚度 D_B , D_D 增大,滤波品质因子则快速下降,而且滤波品质因子下降速度以对 D_D 的响应更加灵敏。

对比图 5b 和图 5a 还可以看到,短波方向的左侧滤波通道的滤波品质因子初始值明显高于长波方向的右侧滤波通道。当 $D_A = 165\text{nm}$, $D_B = 360\text{nm}$, $D_C = 1300\text{nm}$, $D_D = 2380\text{nm}$ 时, $Q_l = 7.0564 \times 10^3$, 而 $Q_r = 4.0927 \times 10^3$ 。

综合可见,构造的四元异质结构光子晶体可以实现高品质的双通道光学滤波功能,而且双通道的滤波品质对各薄膜介质层的光学厚度变化大小响应灵敏,但左右滤波通道对不同介质层光学厚度变化响应机制不一样,以及同一通道对不同介质层光学厚度变化响应机制也不一样。这种特性是异质结构光子晶体光传输特性的主要特征之一,也正是因为这样特性及其调制规律的多样性,为光子晶体设计制备新型光学滤波器件提供丰富的理论依据。

3 结论

所构造的四元异质结构光子晶体光学滤波器,其滤波特性对光子晶体各介质薄膜的光学厚度变化灵敏,但不同滤波通道对各薄膜介质层光学厚度变化响应机制不一样,同一滤波通道对各薄膜介质层光学厚

度变化的响应机制也不同。

(1)各薄膜介质层的光学厚度可调节各光学滤波通道所处的波长位置,但调制的灵敏度不同。

(2)对处于短波方向的左侧滤波通道,随着 A, B 和 C 薄膜介质层光学厚度 D_A , D_B 和 D_C 增大,光学滤波品质因子 Q 均下降,其中 D_B 增大时品质因子下降速度最快, D_A 增大次之。但随着 D 薄膜介质层光学厚度 D_D 增大,滤波品质因子却快速提高。

(3)对处于长波方向的右侧滤波通道,随着 A, C 薄膜介质层光学厚度 D_A , D_C 增大,光学滤波品质因子 Q 快速提高,其中 D_A 增大时品质因子 Q 提高速度快于 D_C 增大时 Q 提高的速度。但随着 B, D 薄膜介质层光学厚度 D_B , D_D 增大,滤波品质因子 Q 却快速下降,而且 D_D 增大时滤波品质因子下降速度快于 D_B 增大时 Q 下降的速度。

四元异质结构光子晶体所体现的这种光学滤波特性,对新型双通道光学滤波器件以及新型光学开关等的研究和设计等提供理论指导。

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 A, GAO Y J. Light propagation characteristics of one-dimensional photonic crystal with double-barrier quantum well [J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(23): 234208 (in Chinese).
- [4] ZOU J H, ZHANG J. Photonic bandgap compensation and extension for hybrid quasiperiodic heterostructures [J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65(1): 014214 (in Chinese).
- [5] WEI J J, SU A, GAO Y J, *et al.* Degeneracy effect of defects on transmission spectrum band of photonic crystal [J]. Laser Technology, 2017, 41(1): 56-70 (in Chinese).
- [6] PENG J K, HAN Y L, WANG H, *et al.* Defect-mode splitting in 1-D mirror magneto-optical photonic crystal [J]. Laser Technology, 2016, 40(1): 78-81 (in Chinese).
- [7] LIU Y F, LIU B, CHEN J, *et al.* Study on filtering characteristics based on tooth-shaped photonic crystal waveguide [J]. Laser Technology, 2016, 40(2): 237-240 (in Chinese).
- [8] XU J Y, SU A, PAN J H, *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).
- [9] ZHANG Zh X, XIAO J. Analysis of energy band structure of 1-D photonic crystal [J]. Laser Technology, 2015, 39(4): 525-527 (in Chinese).
- [10] LIU W K, SUN Y, DONG X W. Investigation on slow light in composite-structure photonic crystal coupled-cavity waveguide [J]. Laser Technology, 2017, 41(4): 591-595 (in Chinese).
- [11] LIU J, TIE Sh N, LU H D. Multi-channel drop filter based on two-dimensional photonic crystal [J]. Optic and Precision Engineering, 2016, 24(5): 1021-1027 (in Chinese).
- [12] SU A, MENG Ch J, GAO Y J. Modulation of activated impurity on filter property of photonic crystal quantum well [J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(3): 0306001 (in Chinese).
- [13] SU A, MENG Ch J, GAO Y J. Filter with one-dimensional photonic crystal quantum well possessing high-quality filtering functions [J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(10): 1006001 (in Chinese).
- [14] MENG Ch J, SU A, GAO Y J. Photonic crystal quantum well with active impurity possessing high efficient optical filtering and amplifying functions [J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(11): 3207-3212 (in Chinese).
- [15] DENG L E, GONG L. Reflection characteristics of one-dimensional polybasic photonic crystals by using heterostructure [J]. Acta Photonica Sinica, 2016, 45(5): 516002 (in Chinese).
- [16] CHEN Y, WANG W Y, FAN H Q, *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).