

缺陷对一维光子晶体滤波性能的调制

韦吉爵¹, 苏安¹, 唐秀福¹, 高英俊², 梁祖彬¹, 陈颖川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: 采用传输矩阵法通过数值计算模拟的方式, 研究缺陷对一维光子晶体滤波性能的调制作用, 结果表明: 当含缺陷单元位于光子晶体周期性排列结构中间时, 缺陷数目可改变光子晶体的滤波通道(缺陷模)数目和滤波品质, 但不改变透射率; 当含缺陷单元偏离光子晶体结构中心越远, 光子晶体各滤波通道的透射率就越低, 但滤波通道之间的距离保持不变; 随着两个含缺陷的单元之间距离增大, 光子晶体各滤波通道的滤波品质升高并出现简并趋势; 当缺陷的厚度成倍数增大时, 各滤波通道滤波品质升高并出现多系多通道滤波现象。缺陷对一维光子晶体滤波特性的影响规律, 为光子晶体设计新型光学滤波器件及其调制机制提供理论参考。

关键词: 光子晶体; 缺陷; 滤波性能; 透射谱; 影响

中图分类号: O431 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)S-0168-05

Modulation effect of defect on filter properties of one-dimensional photonic crystal

Wei Jijue¹, Su An¹, Tang Xiufu¹, Gao Yingjun², Liang Zubin¹, Chen Yingchuan¹

(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 modulation effect of defect on the filter properties of one-dimensional photonic crystal was studied by transfer matrix theory and numerical simulation method. The result shows that when the defect unit is located in the center of the periodically arranged structure of photonic crystal, defect modes number and filtering quality are changed with the number of defect, but the transmittance remains the same; with the increasing deviation of defect unit from the photonic crystal center, the transmittance of each filter channel in photonic crystal will be lower, but the distance between the filter channels is unchanged; the filtering quality of each filter channel is improving with the increasing distance between two defect units, and the defect modes are degenerating; when defect thickness multiply increases, filtering quality of each channel is improving and multi-channel filtering appears. Effect of defect on filter properties of one-dimensional photonic crystal can provide theoretical guidance and modulation

收稿日期: 2015-10-25; 修订日期: 2015-11-12

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); 2015 年国家级、广西区级大学生创新创业训练计划项目(20110605013, 201510605040)

作者简介: 韦吉爵(1971-), 男, 讲师, 硕士, 主要研究方向为光子晶体。Email: weijijue@163.com

通讯作者: 苏安(1973-), 男, 教授, 主要研究方向为光子晶体。Email: suan3283395@163.com

mechanism to design high quality optical filters and optical switches

Key words: photonic crystal; defects; filter; transmission spectrum; effect

0 引言

光子晶体从概念的提出到成为学者们经久不衰的研究热点,一直都是光通信领域的新期盼,尤其是它具备实现光子替代电子进行信息传输的潜在应用价值,更是研究者的兴奋点。光子晶体是由不同介电常数的分层介质周期性排列而成,这种人工光学材料存在明显的禁带和导带结构,这种带隙结构对光传播具有抑制和选择功能。当光频率处于禁带范围中时,则被限制传播,而频率处于导带范围时则可以允许传播^[1-9]。另外,大量的研究表明,当在周期性排列的介质层之间的恰当位置插入缺陷时,又可以增强光子晶体尤其是缺陷位置的自发辐射,这种增强的自发辐射在宏观上表现为禁带中出现品质因子很高的缺陷模,即很精细的透射峰^[2-7,8-9]。光子晶体的这种特性为人为意识控制和利用光的行为提供理论依据,特别是在光学滤波传输领域具有潜在的积极应用价值。

光学滤波器件滤波通道的可选性及其滤波品质高低往往决定器件的性能高低和实际应用价值^[2-6]。插入合理的缺陷能使光子晶体禁带中出现缺陷模而实现光学滤波功能,因此在光子晶体中怎样合理地插入缺陷以提高光子晶体滤波器的性能是必须研究和解决的问题。基于这个思路,文中在构建普通结构一维光子晶体模型 $(AB)_{m_1}(AB)_{m_2}$ 的基础上,通过在不同的位置或以不同的方式插入缺陷 C,或是以不同的参数调制缺陷 C,计算模拟出含缺陷的光子晶体透射能带谱,观察分析光子晶体在缺陷 C 的作用下实现光学滤波功能及其性能的调制规律,目的是以研究结果指导光子晶体的理论研究和实际设计。

1 研究对象与方法

研究基础模型为一维光子晶体 $(AB)_{m_1}(AB)_{m_2}$,其中 A、B 是周期性排列的光子晶体基元介质, m_1 、 m_2 是光子晶体两侧基元介质 A、B 的排列周期数,计算时,A、B 介质层的取值参数(折射率和厚度)分别为:

$n_A=2.6, n_B=1.45, d_A=740 \text{ nm}, d_B=1329 \text{ nm}, m_1, m_2$ 取正整数。C 是插入 A、B 介质周期性排列中的缺陷,以不同的方式插入可形成含不同缺陷结构的光子晶体模型。如, $(AB)_5(ACB)(AB)_5$ 就是在一个 (AB) 单元中插入 C 形成含一块缺陷的光子晶体结构。缺陷 C 的取值参数为 $n_C=4.1, d_C=469 \text{ nm}$, 计算中根据实际需要可调节 C 的参数。

研究采用数值计算和仿真模拟结合的方式进行,主要对象为一维光子晶体的透射谱,由于计算量不大,因此计算方法主要采用比较直观且相对较成熟的研究方法——传输矩阵法。传输矩阵法详细可见参考文献[10]。另外,用半高全宽 $\Delta\lambda$ 或 $\Delta\omega$ 计量透射峰(缺陷模)的带宽,并以半高全宽 $\Delta\omega$ 除透射峰中心对应的频率 ω_c 即 $Q=\omega_c/\Delta\omega$ 衡量透射峰的滤波品质,亦称品质因子,当 Q 越大,滤波性能越好^[2-6]。

2 计算结果与分析

2.1 缺陷数对滤波性能的调制

固定光子晶体两侧基元介质排列周期数 $m_1=m_2=5$,并在结构中间插入若干个含缺陷 C 的 (AB) 单元,形成 $(AB)_5(ACB)_n(AB)_5$ 结构。 $n=1$ 时,光子晶体结构模型可表示为 $(AB)_5ACB(AB)_5$,即有一个 (AB) 单元插入缺陷 C,也就是周期性排列的光子晶体分层介质中存在一块缺陷 C;当 $n=2$ 时,光子晶体结构模型可表示为 $(AB)_5ACBACB(AB)_5$,即有 2 个 (AB) 单元插入缺陷 C,亦即周期性排列的光子晶体分层介质中存在 2 块缺陷 C, $n=3\sim 5$ 时存在的缺陷数目可依次类推。所以 (AB) 单元数 n 数值也等于缺陷的数目。由传输矩阵法,通过 MATLAB 科学计算软件编程计算模拟,可绘制出 $n=1\sim 5$ 时光子晶体 $(AB)_5(ACB)_n(AB)_5$ 的透射谱,如图 1 所示。图中横坐标频率用归一化单位 ω/ω_0 。

从图 1 可见,随着缺陷数 n 的增大,光子晶体禁带中出现的缺陷模(透射峰)也增多,而且缺陷模条数等于缺陷数目 n 数值,亦即当利用光子晶体设计光学滤波器件时,可以通过调节缺陷数目来调控滤波通道数。另外,从图中还看到,随着缺陷数 n 的增

大,缺陷模增多的同时变得越来越精细,即各通道的滤波品质越来越高。从左至右,通过计算可得:当 $n=3$ 时,3 条透射峰的半高全宽 $\Delta\omega$ 分别为 $0.5520 \times 10^{-3} \omega/\omega_0$, $0.4260 \times 10^{-3} \omega/\omega_0$, $0.5600 \times 10^{-3} \omega/\omega_0$, 各透射峰中心对应的频率 ω_c 分别为 $0.8872 \omega/\omega_0$, $1.0004 \omega/\omega_0$, $1.1137 \omega/\omega_0$, 利用 $Q=\omega_c/\Delta\omega$ 得出它们的品质因子 Q 分别为 1.6072×10^3 , 2.3484×10^3 和 1.9887×10^3 ; 当 $n=5$ 时,5 条透射峰的半高全宽 $\Delta\omega$ 分别为 $0.3950 \omega/\omega_0$, $0.3350 \omega/\omega_0$, $0.2970 \omega/\omega_0$, $0.3390 \omega/\omega_0$, $0.4040 \omega/\omega_0$, 各透射峰中心对应的频率 ω_c 分别为 $0.8504 \omega/\omega_0$, $0.9215 \omega/\omega_0$, $1.0005 \omega/\omega_0$, $1.0794 \omega/\omega_0$, $1.1506 \omega/\omega_0$, 它们的品质因子 Q 分别为 2.1530×10^3 , 2.7508×10^3 , 3.3685×10^3 , 3.1841×10^3 , 2.8479×10^3 。即随着 n 增大,各滤波通道的滤波品质明显提高。因此,插入光子晶体周期性排列介质中的缺陷数,不仅可以调制光子晶体滤波器件的滤波通道数,且还可以调制滤波通道的滤波品质。

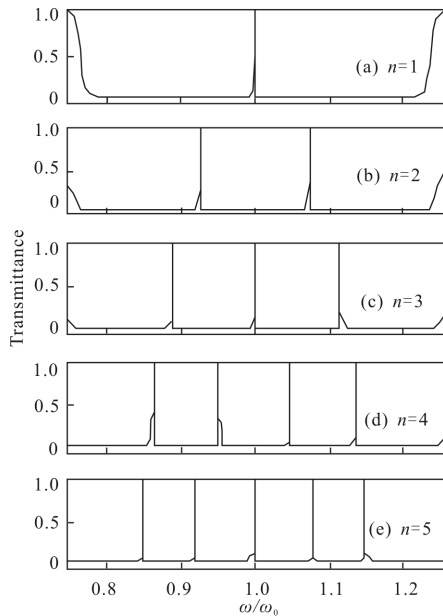


图 1 缺陷数目对 $(AB)_5(ACB)_n(AB)_5$ 滤波特性的影响

Fig.1 Filter properties of $(AB)_5(ACB)_n(AB)_5$

versus number of defects

2.2 缺陷偏离结构中心对滤波性能的调制

2.1 中光子晶体左右两侧基元介质周期性排列的周期数相等,含缺陷 C 的 (AB) 单元处于周期性排列结构的中间,当两侧的基元介质周期数不同时,含缺陷 C 的 (AB) 单元将偏离结构中心,这种情况下光子晶体的滤波性能会产生什么变化呢? 固定插入缺

陷 C 的 (AB) 单元数为 2、光子晶体右侧基元介质排列周期为 $m_2=5$, 左侧基元介质排列周期为 $m_1=5, 6, 7, 8, 9$ 。则由结构模型 $(AB)_{m_1}(ACB)_2(AB)_5$ 可知,当 m_1 越大时,缺陷单元 $(ACB)_2$ 离中心向右移动就越远,计算模拟结果如图 2 所示。

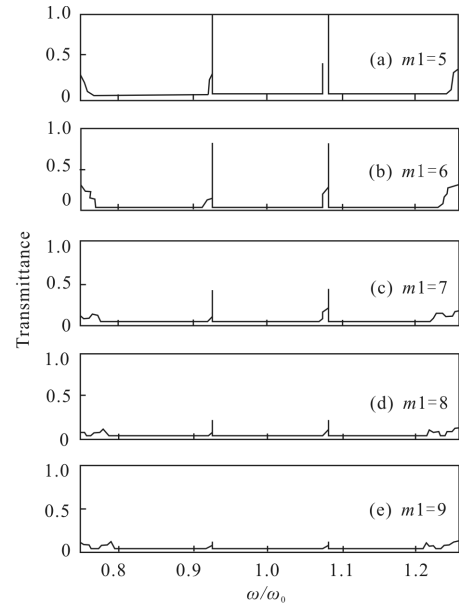


图 2 缺陷偏离中心距离对 $(AB)_{m_1}(ACB)_2(AB)_5$

滤波特性的影响

Fig.2 Filter properties of $(AB)_{m_1}(ACB)_2(AB)_5$ versus distance of deviation defect center

从图 2 可见,当 $m_1=m_2=5$,即左右两侧基元介质排列周期数相等时,禁带中处于 $0.9266 \omega/\omega_0$ 和 $1.0750 \omega/\omega_0$ 频率处的两条缺陷模的透射率均为 100%,当 m_1 增大时,两条缺陷模所处的频率位置不变,但缺陷模变精细的同时透射率迅速降低,当 $m_1=7$ 时,两缺陷模的透射率下降到 41.74%、41.32%,当 $m_1=9$ 时,两缺陷模的透射率已经趋近于 0。因此,当 m_1 越大,即含缺陷单元 $(ACB)_2$ 偏离结构中心越远时,虽然各滤波通道所处的频率位置不变,但各滤波通道的透射率却迅速降低。在实际设计中,应该尽量减小含缺陷单元偏离结构中心的距离,以获取高品质高透射率的滤波效果。

2.3 缺陷间距对滤波性能的调制

固定光子晶体两侧基元介质排列周期数 $m_1=m_2=5$,然后以 $(AB)_5(ACB)(AB)_k(ACB)(AB)_5$ 的方式插入 2 块含缺陷 C 的 (AB) 单元,即 $(AB)_k$ 把 2 个含缺陷 C 的 (AB) 单元隔开使缺陷之间存在相对距

离,亦即 k 越大两缺陷之间的距离就越大。为方便讨论,以下近似地以周期数 k 描述两缺陷的间距。光子晶体滤波性能随着缺陷间距 k 的变化,如图 3 所示。

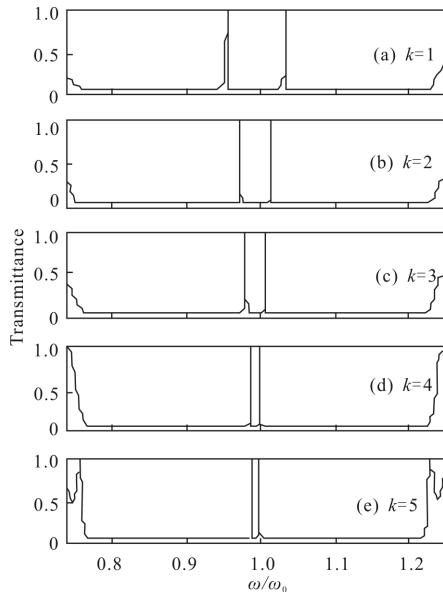


图 3 缺陷间距对 $(AB)_5(ACB)(AB)_k(ACB)(AB)_5$ 滤波特性的影响

Fig.3 Filter properties of $(AB)_5(ACB)(AB)_k(ACB)(AB)_5$ versus distance of defect

从图 3 可知,存在间隔的两块缺陷在透射谱中仍然出现两条透射率均为 100% 的缺陷模,随着缺陷间距 k 的增大,两缺陷模透射率不变,但带宽变窄并且迅速地向禁带中心靠拢,出现简并的趋势^[4,9]。 $k=1$ 时,从左至右两缺陷模分别处于禁带中的 $0.9618\omega/\omega_0$ 和 $1.0390\omega/\omega_0$ 频率处,两者间距为 $\Delta S=0.0772\omega/\omega_0$;当 $k=3$ 时,两者分别移动到 $0.9888\omega/\omega_0$ 和 $1.0119\omega/\omega_0$ 频率位置处,两者间距缩短为 $\Delta S=0.0231\omega/\omega_0$;当 $k=5$ 时,处于 $0.9968\omega/\omega_0$ 和 $1.0039\omega/\omega_0$ 频率位置处,两者间距仅为 $\Delta S=0.0071\omega/\omega_0$,已经接近简并重叠^[4,9]。从左至右,计算可得:当 $k=1$ 时,2 条缺陷模的半高全宽 $\Delta\omega$ 分别为 $0.4480\times 10^{-3}\omega/\omega_0$, $0.4460\times 10^{-3}\omega/\omega_0$,各透射峰中心对应的频率 ω_c 分别为 $0.9618\omega/\omega_0$, $1.0390\omega/\omega_0$,由 $Q=\omega_c/\Delta\omega$ 可得它们的品质因子 Q 分别为 2.1469×10^3 、 2.3295×10^3 ;当 $k=3$ 时,2 条缺陷模的半高全宽 $\Delta\omega$ 分别为 $0.3900\times 10^{-3}\omega/\omega_0$, $0.3930\times 10^{-3}\omega/\omega_0$,各透射峰中心对应的频率 ω_c 分别为 $0.9888\omega/\omega_0$, $1.0119\omega/\omega_0$, Q 分别为 2.5354×10^3 、 2.5749×10^3 ;当 $k=5$ 时,2 条缺陷模的半高全宽 $\Delta\omega$ 分别为 $0.3876\times 10^{-3}\omega/\omega_0$, $0.3872\times 10^{-3}\omega/\omega_0$,各透射峰中心对应的频率 ω_c 分别为 $0.9968\omega/\omega_0$, $1.0039\omega/\omega_0$, Q 分别为 2.5717×10^3 、 $2.5928\times$

10^3 ,即品质因子明显提高。

因此,在设计光子晶体光学滤波器件时,可以通过调节光子晶体中两缺陷之间的距离,达到调制各滤波通道之间距离及其滤波品质的目的。同时,利用缺陷间距对滤波通道间距的调制功能,也可以设计高灵敏度的光学开关。

2.4 缺陷厚度对滤波性能的调制

以含两个缺陷单元的光子晶体结构模型 $(AB)_5(ACB)_2(AB)_5$ 为研究对象,然后以整数倍增大缺陷 C 的厚度 d_c ,即分别取 $D_c=1d_c, 2d_c, 3d_c, 4d_c, 5d_c, 6d_c, 7d_c, 8d_c, 9d_c, 10d_c$,计算和模拟结果如图 4 所示。

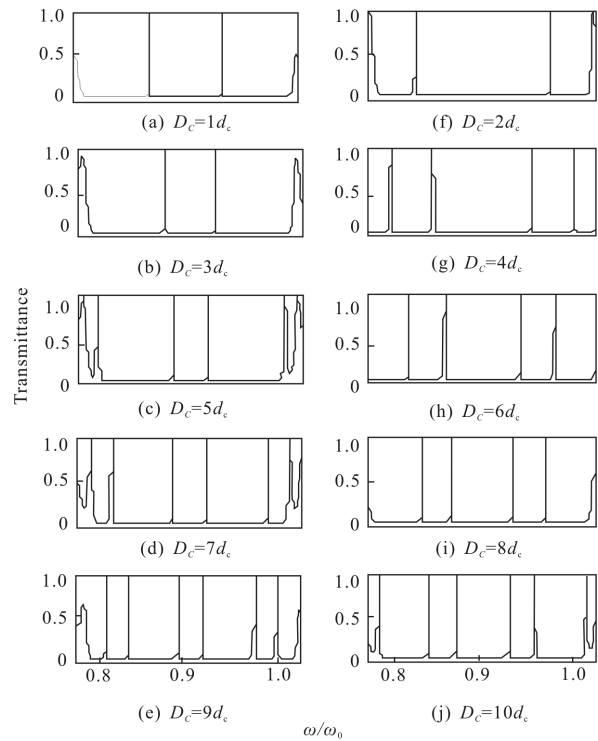


图 4 D_c 对 $(AB)_5(ACB)_2(AB)_5$ 滤波特性的影响

Fig.4 Filter properties of $(AB)_5(ACB)_2(AB)_5$ versus D_c

从图 4 可见,随着缺陷 C 厚度 d_c 整数倍增大,透射率为 100% 的两条缺陷模越来越精细且不断地向禁带中心靠拢,当缺陷 C 厚度 D_c 增大到一定倍数时,禁带中出现新的缺陷模,而且新缺陷模出现的先后和数量与厚度 d_c 的奇偶数倍有关。当 d_c 按奇数倍增大, $D_c=7d_c$ 时,原 2 个缺陷模的两侧各出现 1 条新的缺陷模,禁带中缺陷模总数为 4 条, $D_c=9d_c$ 时,原两缺陷模的两侧各出现 2 条新的缺陷模,禁带中缺陷模总数为 6 条,形成 3 系双通道的滤波效果,如图 4(a)~(e)所示;而当 d_c 按偶数倍增大, $D_c=4d_c$ 时,

原两缺陷模的两侧各出现 2 条新的缺陷模, 禁带中缺陷模总数为 4 条, 形成两系双通道的滤波效果, 而且当 D_c 偶数倍增大到 $6d_c$ 、 $8d_c$ 、 $10d_c$ 时, 一直保持 2 系双通道的滤波效果, 如图 4(f)~(j) 所示。进一步可计算得, 当 $D_c=1d_c$, 2 缺陷模半高全宽 $\Delta\omega$ 分别为 $0.2120 \times 10^{-3} \omega/\omega_0$, $0.2130 \times 10^{-3} \omega/\omega_0$, 其透射峰中心对应的频率 ω_c 分别为 0.9265, 1.0743, 品质因子 Q 分别为 4.3702×10^3 、 5.0439×10^3 ; 当 $D_c=9d_c$ 时, 2 个缺陷模半高全宽 $\Delta\omega$ 分别为 $0.5800 \times 10^{-4} \omega/\omega_0$, $0.2130 \times 10^{-4} \omega/\omega_0$, 各透射峰中心对应的频率 ω_c 分别为 0.9748, 1.0273, 它们的品质因子 Q 分别为 1.6807×10^4 、 1.7712×10^4 ; 1.6807×10^4 、 1.7712×10^4 ; 当 $D_c=2d_c$, 2 个缺陷模半高全宽 $\Delta\omega$ 分别为 $0.4510 \times 10^{-3} \omega/\omega_0$, $0.4600 \times 10^{-3} \omega/\omega_0$, 各透射峰中心对应的频率 ω_c 分别为 0.8706, 1.1305, 它们的品质因子 Q 分别为 1.9304×10^3 、 2.4576×10^3 ; 当 $D_c=10d_c$ 时, 2 个缺陷模半高全宽 $\Delta\omega$ 分别为 $0.6080 \times 10^{-4} \omega/\omega_0$, $0.6130 \times 10^{-4} \omega/\omega_0$, 各透射峰中心对应的频率 ω_c 分别为 0.9501, 1.0521, 它们的品质因子 Q 分别为 1.5626×10^4 、 1.7163×10^4 。可见, 缺陷厚度按奇数倍或偶数倍增大, 不仅可以改变滤波通道的数量, 而且可以使各通道滤波品质以数量级的速度提高。在设计光子晶体光学滤波器件时, 不仅可以通过调节缺陷的厚度来调节通道数量及滤波的频率, 而且还可以通过缺陷厚度调节来提升滤波品质。同样, 利用滤波通道频率对缺陷厚度的响应功能, 亦可设计高灵敏度的光学开关。

3 结 论

根据传输矩阵法理论, 通过计算机数值计算模拟的方式, 研究缺陷对光子晶体滤波性能的调制规律, 结论如下:

(1) 处于光子晶体周期性排列结构中间的缺陷数, 可调制光子晶体的滤波通道(缺陷模)数目和滤波品质, 但对各滤波通道的透射率不产生影响。

(2) 含缺陷单元偏离光子晶体结构中心的距离, 可影响各滤波通道的透射率, 但对各滤波通道之间的距离不产生影响。

(3) 2 个含缺陷单元之间的距离, 可对各滤波通

道的滤波品质及滤波频率进行调制。

(4) 缺陷厚度的整数倍, 可对滤波通道的数量、滤波品质及滤波频率进行调制。

缺陷对光子晶体滤波特性的调制规律, 为光子晶体设计新型光学滤波器件、光学开关及其调制机制等提供理论指导。

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)
- [2] 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)
- [3] 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)
- [4] 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)
- [5] 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)
- [6] Su An, Meng Chengju, Gao Yingjun. Effect of structure period number on the transmission quality of photonic crystal quantum well [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(1): 012302. (in Chinese)
- [7] Chen Ying, Wang Wenyue, Fan Huiqing, et al. Effect of double negative medium on the transmission spectra of one-dimensional photonic crystal quantum well [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(10): 3399-3403. (in Chinese)
- [8] Su An, Meng Chengju, Gao Yingjun, et al. Effect of bilateral symmetrical defect on symmetrical photonic crystal transmission spectrum [J]. *Laser & Infrared*, 2014, 44(11): 1253-1257. (in Chinese)
- [9] 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)
- [10] 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)