

晶格常数对光子晶体量子阱透射谱的影响

苏 安

(河池学院 物理与电子工程系, 广西 宜州 546300)

摘 要: 为设计高品质光学滤波器、光开关等量子光学器件, 用传输矩阵法理论研究晶格常数对一维光子晶体量子阱 $(AB)_5(CD)_2(BA)_5$ 透射谱的影响, 结果发现: 当 A、B 介质层的晶格常数偶数倍增加时, 禁带中心频率处的窄透射峰变成宽透射带, 透射带两侧对称分布着 2 条透射率为 100% 的窄透射峰; 当 A 介质层的晶格常数奇数倍增加时, 禁带中心频率处出现透射率为 100% 单条窄透射峰; 当 B 介质层的晶格常数奇数倍增加, 或 D 介质层的晶格常数按整数倍增加时, 禁带中心频率处恒定出现 3 条透射率为 100% 的窄透射峰, 且三者之间距离随着 B、D 介质层晶格常数的增大而逐步向禁带中心靠拢; 当 D 介质层晶格常数按整数增加时, 不仅禁带中心频率处恒定出现 3 条透射率为 100% 的窄透射峰, 同时两侧对称出现与晶格常数倍数密切相关的双透射峰结构, 且双透射峰的透射率随晶格常数倍数增大而增高。这些特性可实现可调通道光滤波和光开关功能, 并为实验制备工作提供理论指导。

关键词: 高品质滤波; 晶格常数; 光子晶体量子阱; 透射谱

中图分类号: O411.9; O431 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)01-0200-06

Effect of lattice constants on transmission spectra of photonic crystal quantum well

Su An

(Department of Physics and Electronic Engineering, Hechi University, Yizhou 546300, China)

Abstract: To design high-quality optical devices, such as filters and switches, the effect of lattice constant on the transmission spectra of one-dimensional optical crystal quantum well $(AB)_5(CD)_2(BA)_5$ was studied with transfer matrix method. The result shows that when the lattice constants of layer A and layer B separately increase with even times, the narrow transmission peaks at center frequency of band gap turns into wide transmission band, both sides of which are symmetrically distributed with two narrow transmission peaks of 100% transmittance; when lattice constants of layer A increases with odd times, a single transmission peak of 100% transmittance appears at the center frequency; when the lattice constants of layer B increases with odd times or that of layer D increases with integral multiple, three transmission peaks of 100% transmittance constantly turn up at the center frequency of band gap, and the three ones draw closer to the center of band gap as lattice constants of layer B and D are increasing; when lattice constant of layer D increases with integral multiple, three transmission peaks of 100% transmittance constantly present at the center frequency of band gap, besides, double-transmission-peak structure, which

收稿日期: 2012-05-12; 修订日期: 2012-06-11

基金项目: 国家自然科学基金(51161003, 50661001); 广西自然科学基金(2011GXNSFA018145); 广西教育厅科研(201012MS206); 广西
高校优秀人才资助计划项目(桂教人[2011]40号)

作者简介: 苏安(1973-), 男, 副教授, 硕士, 主要从事光子晶体方面的研究。Email: suan3283395@163.com

is closely related to the lattice constants, symmetrically appears on its two sides. Meanwhile, the transmittances of each double-transmission-peak enlarge with the integral multiple of lattice constants increasing. All these features can be applied to adjustable-channel optical filtering and switching, and can offer theoretical direction for experiment preparation.

Key words: high-quality filters; lattice constant; photonic crystal quantum well; transmission spectrum

0 引言

光子晶体^[1-2](photonic crystals-PCs)是一种介电常量周期性排列的人工光学微结构材料,其主要的特性是光子禁带。自从 20 世纪 80 年代出现光子晶体概念以来,其优异的光学特性已经引起世人的广泛关注和研究,部分研究成果已经表明,光子晶体材料将会在光通信领域扮演着光子替代电子的革命性角色,如利用光子晶体材料的禁带和局域特性,可以制作全新的光子晶体全反射镜、光子晶体光纤、光子晶体波导、光子晶体宽带滤波器和超窄带滤波器等^[3-8]。随着研究的不断深入和发展,为寻求更高品质和更高性能的光子放大器、光子超窄带滤波器和光子开关,对光子晶体超晶格材料提出了更高的要求,于是需要深入研究光在光子晶体量子阱(photonic crystal quantum well-PQW)中的传输特性,因此这一研究领域又成为设计新型光子器件的关键和新的研究热点之一。类似于半导体量子阱,当适当选择光子晶体结构参量时,可以把两块不同禁带结构的光子晶体合理地组合在一起,使其中的一块光子晶体的通带完全处于另一块的禁带中,这种特殊能带结构的光子晶体称为光子晶体量子阱结构^[7-12]。利用光子晶体量子阱对光的局域作用和频率量子化特性,可以设计更高品质的光学滤波器、放大器和光开关等^[7-12]。

对于普通结构光子晶体,周期数、介质折射率、中心波长、入射角和光学厚度等均对透射谱产生不同程度的影响,而研究光子晶体量子阱时,通常以晶格常数^[7,11-13]为单位来度量光子晶体介质层晶格的大小,当光子晶体介质层的晶格常数变化时,将直接引起介质层结构(光学厚度)的变化,进而影响光子晶体量子阱的整体晶格结构的变化^[7,11-13]。因此,可以推测,晶格常数的变化也将影响透射谱的结构特性。

基于目前还没有看到相关研究报道,文中以晶格常数为单位发生倍数变化时,对一维光子晶体量子阱 $(AB)_5(CD)_n(BA)_5$ 透射谱的影响展开研究,得出一些有实际参考价值的现象和结果,这些发现对光子晶体设计新型光学滤波器、光开关等有一定的指导意义。

1 光子晶体模型及量子阱结构

选择一维光子晶体模型 $(AB)_5(CD)_m(BA)_5$ 为研究对象,其中介质 A, B, C, D 的折射率和厚度分别为 $n_A=3.0, n_B=1.0, n_C=4.0, n_D=1.0, d_A=d_B=0.5a, d_C=d_D=a, m$ 为重复周期数,可为任意正整数, a 为晶格常数,不同的 a 介质的晶格结构不同。

研究理论和方法采用传输矩阵法^[3,7-11],鉴于该方法已经比较成熟且报道文献很多,此处不在重述,详细可见作者的相关论文^[3,7,9-10]介绍。通过 Matlab 编程,可以分别数值计算、模拟出光子晶体 $(CD)_{10}$ 、 $(AB)_5(BA)_5$ 的能带结构,如图 1(a)、(b)所示。图中频率以归一化单位 $\omega a/2\pi c$ 表示。

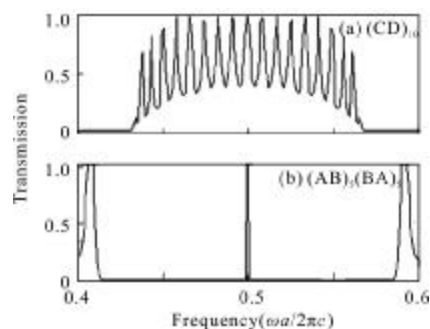


图 1 一维光子晶体透射能带谱

Fig.1 Transmission spectrum for one-dimensional PCs

从图 1 可见, $0.41 \sim 0.59 \omega a/2\pi c$ 频率范围内,光子晶体 $(CD)_{10}$ 的中心能带完全处于光子晶体 $(AB)_5(BA)_5$ 的禁带中,构成光子晶体量子阱结构,则在光子晶体中传播的光频率刚好处于这一区域时,光子晶体 $(AB)_5(BA)_5$ 起着关卡的作用而限制光在其内传

播,形成光局域。内层光子晶体(CD)₁₀相当于光量子阱的阱,外层光子晶体(AB)₅(BA)₅相当于光量子阱的垒。处于光量子阱频率范围内的电磁波,将被约束而产生频率量子化,宏观上表现为透射中分立的透射峰^[7-12]。图 1(b)禁带中心频率处的单透射峰是镜像对称结构光子晶体的透射谱特性^[9-10,13]。

2 光量子阱结构的透射谱

取 $m=2$,其他参数不变的情况下,可计算模拟出光子晶体量子阱结构(AB)₅(CD)₂(BA)₅的透射谱,如图 2 所示。即当 $m=2$ 时,在光量子阱结构频率范围(0.41~0.59 $\omega a/2\pi c$)内,透射谱中出现 3 条透射率为 100%的透射峰,其中一条处于中心频率 0.50 $\omega a/2\pi c$ 处,另两条对称分布于中心频率处两侧。当 m 继续增大时,透射谱中的透射峰数目将随之增多。究其原因,是因为光通过光子晶体时,受到光量子阱强局域作用而被限制在阱中,被局域于量子阱中的光将产生量子化效应,导致频率量子化,此时光要继续通过光子晶体,一般只能以共振隧穿的方式^[7-11]。光频率的量子化及隧穿效果表现为透射谱中高透射率的分立窄透射峰。

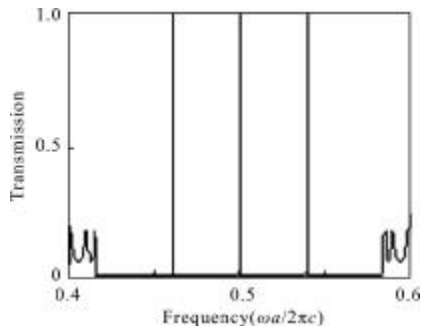


图 2 一维光量子阱(AB)₅(CD)₂(BA)₅的透射谱

Fig.2 Transmission spectrum for one-dimensional PQW

为研究介质晶格常数对光量子阱隧穿效果(透射谱)的影响规律,分别在 A、B、C、D 层介质晶格常数不同取值的情况下,计算模拟出光量子阱结构(AB)₅(CD)₂(BA)₅的透射谱,具体如下。

3 晶格常数对光量子阱透射谱的影响

3.1 介质 A、B 晶格常数对透射谱的影响

当 A 层介质的晶格常数 a_A 从 a 增大到 $2a$ 、 $4a$,即按 2 倍、4 倍偶数倍增加时,则 A 层介质厚度 $d_A=a$ 、

$2a$,可计算模拟光量子阱结构(AB)₅(CD)₂(BA)₅的透射谱如图 3 所示。与图 2 比较发现:当 A 介质层晶格常数 a_A 以偶数倍增大时,禁带中心频率处不再是分立的窄透射峰,而是一条很宽的透射带,透射带两侧则出

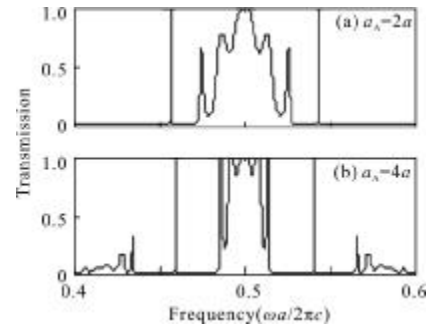


图 3 晶格常数 a_A 偶数倍增加对光量子阱透射谱的影响

Fig.3 Transmission spectrum versus lattice constant a_A increase with even times

现对称分布的 2 条透射率为 100%的窄透射峰;随着晶格常数偶数倍地增大,禁带中心的透射带宽度变小,透射带两侧的透射也逐渐向中心靠拢,但透射率仍然保持 100%。计算还发现,当 B 介质层晶格常数按 $a_B=2a$ 、 $4a$ 增大时,透射谱的规律特点与 a_A 偶数倍变化出现的结果相似,鉴于篇幅,此处不再重复作图和描述。可见,当光子晶体量子阱介质层 A、B 的晶格常数按偶数倍增大时,透射谱由图 2 的单系三通道变(3 条透射峰)为双系单通道,而且通道所在的频率位置及通道之间的距离也随之变化。此特性为光子晶体设计可调性超窄带光学滤波器、光开关提供参考。

再以奇数倍增加 A 介质层晶格常数 a_A 的大小,如使其变为原来的 3 倍、5 倍,即 $a_A=3a$ 、 $5a$, $d_A=1.5a$ 、 $2.5a$ 时,则光量子阱的透射谱如图 4 所示。相对于图 2,中心禁带发生了分裂,由原来的单禁带分裂成 3 个

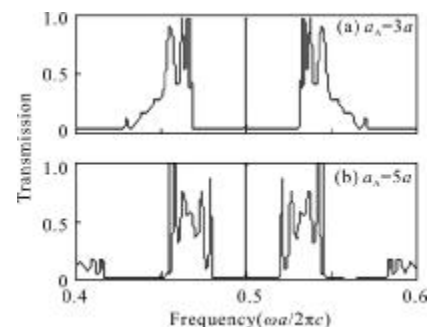


图 4 晶格常数 a_A 奇数倍增加对光量子阱透射谱的影响

Fig.4 Transmission spectrum versus lattice constant a_A increase with odd times

禁带,其中中心频率处的禁带中心仍然出现一条透射率为 100%的窄透射峰,而两侧对称分布的小禁带中则不出现透射峰。同时,随着 a_A 的晶格常数奇数倍增加,分裂成的两侧禁带和通带逐步向中心拓展,即禁带和通带逐渐变宽,而中心禁带则随之变窄。此特性可实现恒定单通道超窄带光学滤波功能。

而当 B 层介质晶格常数 a_B 按奇数倍递增,即 $a_B=3a, 5a, a_B=1.5a, 2.5a$ 时,光子晶体量子阱结构 $(AB)_5(CD)_2$ $(BA)_5$ 的透射谱,则如图 5 所示。相对于图 2 可知,当晶格常数 a_B 按奇数倍增加时,光子晶体量子阱结构的透射谱结构与特点不变,中心禁带仍出现 3 条透射峰,透射峰透对称分布于中心频率 $0.50 \omega a/2\pi c$ 处两侧且透射率为 100%,但是随着晶格常数倍数的增大,中心禁带的宽度变窄,且透射峰之间的距离也随之逐渐变短。于是可以利用这个特性,实现三通道超窄带滤波及光开关功能。

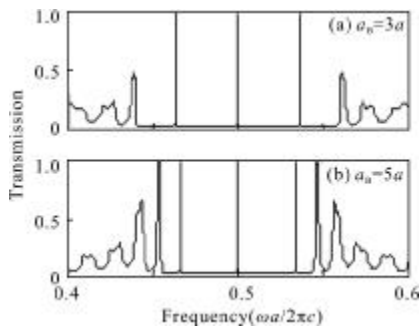


图 5 晶格常数 a_B 奇数倍增加对光子晶体量子阱透射谱的影响
Fig.5 Transmission spectrum versus lattice constant a_B increase with odd times

3.2 介质 C、D 的晶格常数对透射谱的影响

现进一步观察 C、D 介质层晶格常数 a_C 、 a_D 变化对光子晶体量子阱透射谱的影响。

首先,当 C 介质层晶格常数以偶数倍增加,即 $a_C=2a, 4a, d_C=2a, 4a$ 时,光子晶体量子阱的透射谱如图 6 所示。与图 2 比较可见:当 a_C 按偶数倍增大时,中心禁带的中心频率处仍然出现 3 条透射率为 100%的透射峰,这组透射峰的左右两侧则对称出现两组双透射峰系,当 $a_C=2a$ 时出现 2 组,如图 6(a)所示,当 $a_C=4a$ 时出现 4 组,如图 6(b)所示。随着 a_C 的增大,双透射峰系增加的同时,各透射峰均向禁带中心靠拢,即不仅中心频率处的 3 透射峰之间的距离减短,且双透射峰之间的距离也在缩小,同时双透射

峰的透射率随之上升,接近甚至达到 100%。可以预见,当 a_C 继续按偶数倍增大时,中心禁带中将出现透射峰条数越来越多,但频率差却越来越小现象,即光子晶体量子阱结构的频率量子化效应越来越明显。

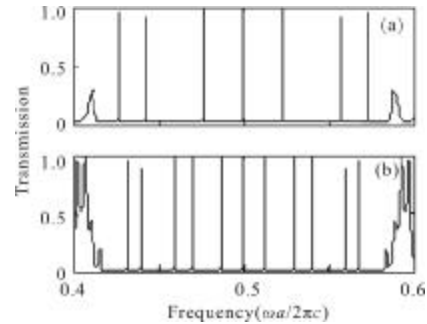


图 6 晶格常数 a_C 偶数倍增加对光子晶体量子阱透射谱的影响
Fig.6 Transmission spectrum versus lattice constant a_C increase with even times

当 C 介质层晶格常数以奇数倍增加,即 $a_C=3a, 5a, d_C=3a, 5a$ 时,光子晶体量子阱结构的透射谱如图 7 所示。从图 7 得出: a_C 按奇数倍增加时,透射谱呈现的现象与按偶数倍增加的现象相似,不同的是当 $a_C=3a$ 时,中心频率透射组两侧对称分布出现 4 组双透射峰系,当 $a_C=5a$ 时,出现 6 组,这些双透射峰系的透射率亦随着晶格常数倍数的增加而升高,同时向禁带中心靠拢。

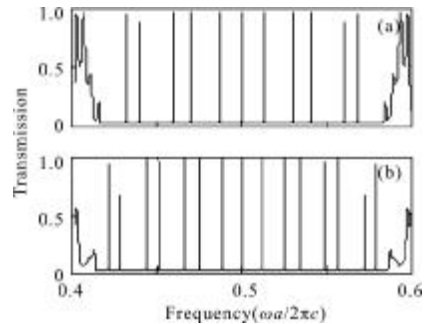


图 7 晶格常数 a_C 奇数倍增加对光子晶体量子阱透射谱的影响
Fig.7 Transmission spectrum versus lattice constant a_C increase with odd times

可见,晶格常数 a_C 不论按偶数倍还是奇数倍增加,光子晶体量子阱透射谱禁带中心频率处保持三通道(透射峰)滤波功能不变,但通道之间的频率差(透射峰之间距离)减小;随着 a_C 增大,中心频率对称两侧的通道数随之成倍数增加,同时通道之间的频率差也随晶格常数倍数的增加而减小,即向禁带中心

靠拢。这些特性对实现可调多通道光学滤波、光开关等功能有一定参考作用。

当以整数倍方式改变 D 层介质的晶格常数,即 $a_D=2a, 3a, 4a, d_D=2a, 3a, 4a$ 时,光子晶体量子阱结构 $(AB)_5(CD)_2(BA)_5$ 的透射谱如图 8(a)~(c)所示。从图 8 可见,当 D 介质层晶格常数 a_D 按整数倍增大时,量子阱透射谱的结构与特点基本上不变,阱中心(禁带中心)还是以中心频率处为对称中心出现 3 条透射率为 100% 的透射峰,但随着 a_D 的整数倍增加,三者之间的距离变小且向禁带中心靠拢,同时禁带也逐渐向中心靠拢。

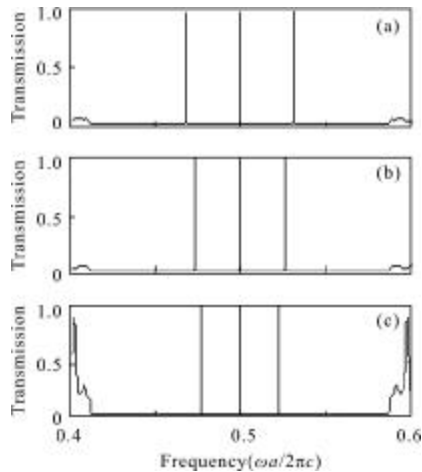


图 8 晶格常数 a_D 整数倍增加对光子晶体透射谱的影响

Fig.8 Transmission spectrum versus lattice constant a_D increase with integer times

进一步计算还发现,当 D 介质层晶格常数以半奇数倍的方式增大,即 $a_D=1.5a, 2.5a, 3.5a, d_D=1.5a, 2.5a, 3.5a$ 时,光子晶体量子阱结构 $(AB)_5(CD)_2(BA)_5$ 的禁带不出现分裂,禁带中心也出现 3 个透射峰,且中心频率处的透射峰透射率为 100%,而两侧对称的两条透射峰的透射率却比较低,但随着 a_D 晶格常数半奇数倍地增加,两侧对称的透射峰的透射率会慢慢增高。另外,随着 a_D 增加到一定数值,禁带两侧逐渐分裂出新的透射峰,且透射峰随 a_D 的增加而变窄。

因此,通过整数倍调节 C、D 层介质层晶格常数 a_C, a_D 的大小,可以实现恒定通道滤波、可调多通道滤波及光开关的功能等。

4 结 论

用传输矩阵法理论研究晶格常数对一维光子晶

体量子阱 $(AB)_5(CD)_2(BA)_5$ 的影响,得出:当介质晶格常数改变时,光子晶体的量子化效应也随之改变,表现为光子晶体透射谱的分立透射峰的改变。

(1) 在 $0.41 \sim 0.59 \omega a / 2\pi c$ 禁带频率范围内,出现对称分布于中心频率 $0.50 \omega a / 2\pi c$ 处两侧的 3 条窄透射峰,且透射的透射率为 100%。

(2) 当 A、B 介质层的晶格常数 a_A, a_B 分别以偶数倍增加时,中心禁带出现分裂,中心频率处的窄透射峰变成宽透射带,透射带两侧对称分布着 2 条透射率为 100% 的窄透射峰,且分别随着 a_A 与 a_B 的增加,透射带和透射峰向中心频率处移动,使中心透射带宽度变窄。

(3) 当 A 介质层的晶格常数 a_A 以奇数倍增加时,中心禁带亦出现分裂,中心频率处出现单条透射率为 100% 的窄透射峰,两侧交替出现透射带和禁带。

(4) 当 B 介质层的晶格常数 a_B 以奇数倍增加,或 D 介质层的晶格常数 a_D 以整数倍增加时,光子晶体的禁带结构和特点不变,中心禁带仍出现 3 条透射率为 100% 的透射峰,且三者之间距离随着 a_B 或 a_D 的增大而逐步向禁带中心靠拢,但 a_D 的增大情况下向中心靠拢的速度较 a_B 增大情况下的快,且禁带宽度也相应较宽。

(5) 不论 C 介质层晶格常数按偶数倍还是奇数倍增加,光子晶体透射谱中心频率处恒定出现 3 条透射率为 100% 的窄带透射峰,两侧则对称出现双透射峰结构的多组透射谱,双透射峰组随着 a_C 倍数增加而成倍数增多,且双透射峰的透射率随之增高,透射峰之间距离也随之减小而向禁带中心靠拢。

光子晶体介质层晶格常数大小变化对光子晶体透射谱影响的规律和特性,对于设计恒定或可调性单通道、多通道窄带光学滤波器或是光开关等,有一定的指导价值,并对光子晶体的理论研究有一定的参考意义。

参 考 文 献:

- [1] Yablonoitch E. Inhibited spontaneous emission in solid state physics and electronics [J]. Phys Rev Lett, 1987, 58 (20): 2059-2062.
- [2] John S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric super-lattices [J]. Phys Rev Lett, 1987, 58 (23):

- 2486-2489.
- [3] Su An. Transmission spectrum of one-dimensional photonic crystal for realizing high-performance optical transmission function [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(6): 1101-1105. (in Chinese)
苏安. 实现高效光传输功能的一维光子晶体透射谱[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(6): 1101-1105.
- [4] Li Wensheng, Huang Haiming, Fu Yanhua, et al. Properties of one-dimensional photonic crystal tunneling mode containing single-negative materials with symmetrical structure [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(1): 69-72. (in Chinese)
李文胜, 黄海铭, 付艳华, 等. 含单负材料对称型一维光子晶体隧穿模的特性[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(1): 69-72.
- [5] Wu Rina, Yan Bin, Wang Yanhua, et al. Photonic band gap in one-dimensional $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ multilayer photonic crystal [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(5): 872-875. (in Chinese)
乌日娜, 闫彬, 王彦华. $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ 多层膜结构一维光子晶体光子禁带研究[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(5): 872-875.
- [6] Tian Yi, Li Qi, Zhang Li, et al. One-dimensional photonic crystal infrared space light modulator imagination [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(9): 2333-2338. (in Chinese)
田义, 李奇, 张励, 等. 一维光子晶体红外空间光调制器的构想[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(9): 2333-2338. (in Chinese)
- [7] Su An, Gao Yingjun. The multi-channel filtering for three-quantum-well structure of the one-dimensional photonic crystal [J]. *Journal of Wuhan University (Natural Science Edition)*, 2011, 57(3): 191-195. (in Chinese)
苏安, 高英俊. 实现多通道滤波功能的一维光子晶体三量子阱结构[J]. *武汉大学学报(理学版)*, 2011, 57(3): 191-195.
- [8] Su An, Gao Yingjun. Light propagation characteristics of one-dimensional photonic crystal with double-barrier quantum well [J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(23): 4208-4217. (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): 4208-4217.
- [9] Su An, Gao Yingjun. One dimensional photonic crystal quantum well structure containing complex dielectric constant [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, 39(5): 842-846. (in Chinese)
苏安, 高英俊. 含复介电常量一维光子晶体量子阱结构研究[J]. *光子学报*, 2010, 39(5): 842-846.
- [10] Su An, Gao Yingjun. Transmission spectra of one-dimensional photonic crystal quantum well with double negative medium [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2010, 27(5): 596-601. (in Chinese)
苏安, 高英俊. 含双负介质一维光子晶体量子阱的透射谱研究[J]. *量子电子学报*, 2010, 27(5): 596-601.
- [11] Qiao Feng, Zhang Chun, Wan Jun, et al. Photonic quantum-well structures: multiple channeled filtering phenomena [J]. *Appl Phys Lett*, 2000, 77(23): 3698-3700.
- [12] Ge Xiangyou, Li Ping, Wang Xiaojie, et al. Resonant modes in quantum well structure composed of photonic crystals with different lattice constants [J]. *Journal of Applied Optics*, 2006, 27(5): 376-379. (in Chinese)
葛祥友, 李平, 王效杰, 等. 不同晶格常数光子晶体构成的光子量子阱中的共振模[J]. *应用光学*, 2006, 27(5): 376-379.
- [13] Zhang Zhengren, Long Zhengwen, Yuan Yuqun, et al. Optical transmission spectra of one-dimensional photonic crystals with a mirror symmetry [J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(1): 587-591. (in Chinese)
张正仁, 隆正文, 袁玉群, 等. 对称型单负交替一维光子晶体的能带结构[J]. *物理学报*, 2010, 59(1): 587-591.