

# 结构周期数对光量子阱透射品质的影响研究

苏安<sup>1</sup> 蒙成举<sup>1</sup> 高英俊<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>河池学院物理与电子工程系, 广西 宜州 546300  
<sup>2</sup>广西大学物理科学与工程技术学院, 广西 南宁 530004)

**摘要** 用传输矩阵法理论研究结构周期数对单势垒和双重势垒一维光量子阱透射品质的影响。结果表明:随着阱层周期数的增加,单势垒和双重势垒光量子阱的透射峰均变窄,即品质因子提高,且双重势垒光量子阱透射品质因子提高的速度更快;随着垒层周期数的增加,单势垒、双重势垒光量子阱的透射峰迅速变精细,即透射品质因子迅速提高,且双重势垒光量子阱透射品质因子提高速度快;垒层周期数影响强度明显高于阱层周期数,当垒层周期数增大到一定数值后,双重势垒光量子阱的透射峰品质因子趋于无穷大,亦即光量子阱的各透射峰趋于某个频率点。这些特性可为光子晶体设计新型高品质的光学滤波器等量子光学器件提供指导。

**关键词** 光子晶体;透射品质;光量子阱;周期数

中图分类号 O431 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP50.012302

## Effect of Structure Period Number on the Transmission Quality of Photonic Quantum Well

Su An<sup>1</sup> Meng Chengju<sup>1</sup> Gao Yingjun<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>Department of Physics and Electronic Engineering, Hechi University, Yizhou, Guangxi 546300, China)  
(<sup>2</sup>Department of Physical Science and Engineering, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004, China)

**Abstract** The effect of structure period number on the transmission quality of one-dimensional photonic crystal with single-and double-barrier quantum well is studied with the transfer matrix method. The result shows that the transmission peaks of the photonic crystal with both single-barrier and double-barrier quantum well turn narrower with increase of the period number of well layer. So to speak, quality factors increase under this circumstance and the one of photonic crystal with double-barrier quantum well increases faster. Transmission peaks rapidly sharpen when the period number of barrier layer becomes greater. That is to say, quality factors rise quickly and the one of photonic crystal with double barrier quantum well rises fastest. The effect of the periodicity of barrier layer on the transmission quality is obviously stronger than the one of well layer. When the periodicity of barrier layer keeps increasing and reaches a certain value, the quality factor of transmission peaks at the double barrier well tends to be infinity. In other words, the transmission peaks become sharp to a certain frequency. These characteristics provide guidance for designing new quantum devices such as optical filter of high quality.

**Key words** photonic crystal; transmission quality; photonic quantum well (PQW); periodicity

**OCIS codes** 230.5298; 250.5590

## 1 引言

光子晶体<sup>[1,2]</sup>自问世以来,因它具备奇异的光学特性且应用潜力巨大而备受科研工作者的关注。光子晶体一般都是由不同介电常量的薄膜介质周期性排列形成的人工微结构光学材料,其最根本的光学特性是存在光子带隙和局域态,处在禁带频率范围内的光不能通过光子晶体,处于通带频率范围内的光则可完全通

收稿日期: 2012-08-30; 收到修改稿日期: 2012-10-15; 网络出版日期: 2012-11-21

基金项目: 国家自然科学基金(51161003)、广西自然科学基金(2011GXNSFA018145)和广西高校优秀人才资助计划(桂教人[2011]40号)资助课题。

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

过,即光子晶体可实现人为控制光的行为。大量的研究表明,这些奇异的光学特性为信息技术材料的发展提供了新的发展方向 and 动力。例如制作全新的光子晶体宽带滤波器、超窄带滤波器、光子晶体光纤、光子开关器件、光子晶体全反射镜和光子晶体激光二极管等<sup>[3~7]</sup>。近年来,为设计更高品质和性能的光子超窄带滤波器和光子开关,人们开始把光前投向光子晶体超晶格材料所构成的光量子势阱。目前这一研究领域已成为设计新型光子器件的关键和研究热点<sup>[8~10]</sup>。

不同于普通的光子晶体结构,光量子阱(PQW)结构是由两种光子禁带不同的光子晶体合理地组合在一起,当中间层光子晶体的能带完全处于两侧光子晶体的禁带中时,中间光子晶体块可看成光量子阱结构的阱,两侧光子晶体块则可看成光量子阱结构的垒<sup>[8~14]</sup>。由于光量子势阱的存在,使得在光子晶体中传播的光被限制在阱层光子晶体中,形成局域光子态,这些被束缚的光子态将导致光频率的量子化。量子化频率的光在宏观上表现为分立的共振透射峰。光量子阱的这些奇特性为设计高品质的光学滤波器、光学开关等量子光学器件<sup>[8~14]</sup>提供了新的设计思想。对普通结构光子晶体而言,当排列周期数改变时,它的禁带和透射峰品质均发生变化。因而可以推测,当光量子阱的阱层、垒层周期数发生改变时,其透射峰品质也一定会发生变化,至于结构周期数对透射品质影响的程度则有待研究,这方面的研究报道目前也还未见。本文构造单势垒光量子阱结构 $(AB)_m(BAB)_n(BA)_m$ 、 $(GH)_k(BAB)_n(HG)_k$  和双重势垒光量子阱结构 $(GH)_k(AB)_m(BAB)_n(BA)_m(HG)_k$  光子晶体结构模型,研究排列周期数  $n$ 、 $m$ 、 $k$  对透射峰品质的影响规律,为光子晶体理论研究和实际设计、应用等提供参考。

## 2 研究对象与理论

研究模型是一维光子晶体 $(GH)_k(AB)_m(BAB)_n(BA)_m(HG)_k$ ,介质层 A 为硫化砷(AsS),介质层 B 为二氧化硅( $SiO_2$ ),介质层 G 为碲化铅(PbTe),介质层 H 为二氧化硅( $SiO_2$ ),各介质层折射率及厚度分别为: $n_a=2.6, d_a=741\text{ nm}; n_b=1.45, d_b=1329\text{ nm}; n_g=4.1, d_g=n_a d_a/n_g; n_h=1.45, d_h=n_a d_a/n_h$ ,即 G 层和 H 层介质的光学厚度与 A 层介质的光学厚度相等。 $k$ 、 $m$ 、 $n$  分别是光子晶体周期性排列的周期数,可取任意正整数。该模型可看成由 $(BAB)_n$ 、 $(AB)_m(BA)_m$  和 $(GH)_k(HG)_k$  3 块不同周期结构的一维光子晶体嵌套而成的结构模型。

研究理论和方法采用传输矩阵法<sup>[3,5,9~14]</sup>,在此不再赘述。

## 3 光量子阱结构及其共振透射特性

通过数值计算模拟,可得一维光子晶体 BAB, AB 或 BA 和 GH 或 HG 的带隙结构,如图 1 所示。图 1 中实线是光子晶体 BAB 的带隙结构,虚线是光子晶体 AB 的带隙结构,间断线是光子晶体 GH 的带隙结构。

由图 1 可见,光子晶体 BAB 的中心通带(836~878 nm)、光子晶体 AB 的中心禁带(834~879 nm)和 GH 的中心禁带(824~891 nm)均对称分布于 856.4 nm 波长两侧,光子晶体 BAB 的中心通带完全处于光子晶体 AB 和 GH 的中心禁带之中,同时光子晶体 AB 的中心禁带又完全处于光子晶体 GH 的中心禁带之中。则当光子晶体 BAB、AB 和 GH 周期性排列分别构成光子晶体 $(BAB)_n$ 、 $(AB)_m(BA)_m$  和 $(GH)_k(HG)_k$  时,可分别构成单势垒光量子阱结构 $(AB)_m(BAB)_n(BA)_m$  和 $(GH)_k(BAB)_n(HG)_k$ 。而光量子阱 $(AB)_m(BAB)_n(BA)_m$  又完全处于 $(GH)_k(HG)_k$  的禁带之中,因此光子晶体 $(BAB)_n$  的中心通带和 $(AB)_m(BA)_m$  及 $(GH)_k(HG)_k$  的中心禁带三者联合构成一个双重势垒的一维光子晶体量子阱结构 $(GH)_k(AB)_m(BAB)_n(BA)_m(HG)_k$ ,其中光子晶体 $(BAB)_n$  可看成是双重势垒光量子阱结构的阱,光子晶体 $(AB)_m(BA)_m$  看成是双重势垒光量子阱

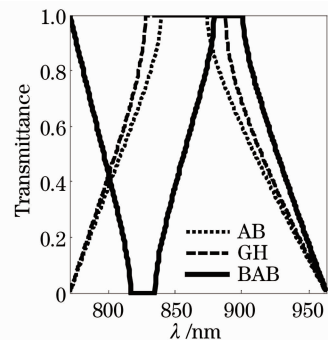


图 1 一维光子晶体的带隙结构

Fig. 1 Band gap structure of the investigated 1D photonic crystal

结构的内垒,而光子晶体 $(GH)_k(HG)_k$ 则是双重势垒光子量子阱结构的外垒,此双重势垒光子晶体量子阱也可以看成由两个单势垒光子量子阱组成。

当光子晶体构成光子量子阱结构时,若在光子晶体中传播的光频率处于阱层频率范围,将由于受到势垒的限制作用而被禁止传播,并被局域于阱层光子晶体中。在这种强的局域作用下,光要想通过光子晶体,一般以共振隧穿的方式通过<sup>[8~14]</sup>,而且共振隧穿透出光子晶体的共振透射峰往往是分立的,这是因为光被强局域于量子阱中时频率被量子化。图2为光子量子阱 $(AB)_3(BAB)_n(BA)_3$ 的透射谱。

由图2可见,光子量子阱结构 $(AB)_3(BAB)_n(BA)_3$ 出现了明显的量子化效应,体现为透射谱中分立的共振透射峰,而且透射峰的数目和位置与周期数 $n$ 有关,即条数与 $n+1$ 数值相等,并对称分布于856.4 nm波长两侧。计算还发现,光子量子阱 $(GH)_k(BAB)_n(HG)_k$ 和 $(GH)_k(AB)_m(BAB)_n(BA)_m(HG)_k$ 的共振透射谱与 $(AB)_3(BAB)_n(BA)_3$ 的共振透射谱结构特点相似,共振透射峰的数目和位置亦与周期数 $n$ 有关,条数也等于 $n+1$ ,位置同样对称分布于856.4 nm波长两侧。形成这种共振透射峰数目与阱层周期数关联现象的原因可从光子量子阱量子化效应或缺陷模理论得到解释<sup>[9~11,14]</sup>。因此,为取得明显的对比效果,在研究各周期数对透射品质的影响时,取位置相对固定的中心波长(频率)856.4 nm处透射峰作为研究对象。例如,研究阱层周期数对透射品质的影响时,保持垒层周期数不变,取阱层周期数 $n=2,4,6,8,\dots$ ,研究垒层周期数对透射品质的影响时,固定阱层周期数 $n=2$ 不变,取垒层周期数 $m,k=2,3,4,5,6$ 。

## 4 结构周期数对透射品质的影响

衡量光子晶体透射品质的重要指标是品质因子 $Q = \lambda_c / \Delta\lambda$ ,其中 $\lambda_c$ 是透射峰(缺陷模)的中心波长, $\Delta\lambda$ 是透射峰的半峰全宽(FWHM)<sup>[15,16]</sup>。

### 4.1 阱层周期数 $n$ 对透射品质的影响

保持光子量子阱其他参数不变,当重复周期数 $n=2,4,8$ 时,在透射谱对称中心波长856.4 nm附近,单势垒光子量子阱 $(AB)_3(BAB)_n(BA)_3$ 、 $(GH)_3(BAB)_n(HG)_3$ 和双重势垒光子量子阱结构和 $(GH)_3(AB)_3(BAB)_n(BA)_3(HG)_3$ 的透射峰宽度变化,分别如图3(a)~(c)所示。

由图3可见,当光子量子阱结构的阱层光子晶体周期数 $n$ 整数倍增大时,共振透射谱中的透射峰宽度变窄,其中双重势垒量子势阱 $(GH)_3(AB)_3(BAB)_n(BA)_3(HG)_3$ 透射峰随 $n$ 增大变窄的速度最快, $(GH)_3(BAB)_n(HG)_3$ 次之。而且随着 $n$ 的增大,光子量子阱结构 $(GH)_3(BAB)_n(HG)_3$ 、 $(GH)_3(AB)_3(BAB)_n(BA)_3(HG)_3$ 在透射峰变窄的同时,还向右(长波)方向移动,如图3(b)、(c)所示。

当 $n=2,4,6,8,10$ 时,根据公式 $Q = \lambda_c / \Delta\lambda$ 计算出光子量子阱的透射品质因子,并定量绘制光子量子阱透射品质

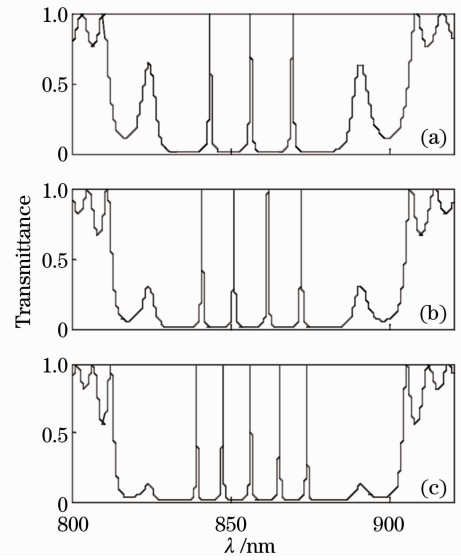


图2 光子量子阱 $(AB)_3(BAB)_n(BA)_3$ 透射谱。

(a)  $n=2$ ; (b)  $n=3$ ; (c)  $n=4$

Fig. 2 Transmission spectrum for PQW  $(AB)_3(BAB)_n(BA)_3$ . (a)  $n=2$ ; (b)  $n=3$ ; (c)  $n=4$

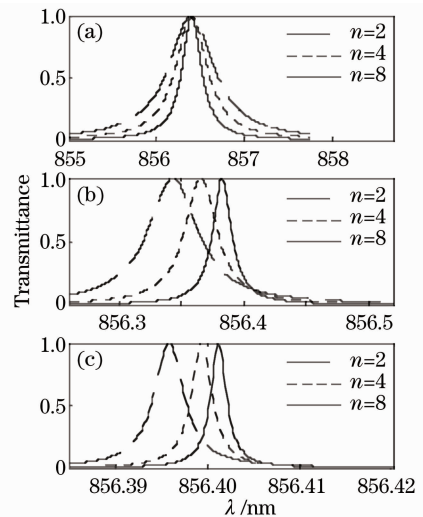


图3  $n$ 对光子量子阱透射品质的影响。(a)  $(AB)_3(BAB)_n(BA)_3$ ; (b)  $(GH)_3(BAB)_n(HG)_3$ ; (c)  $(GH)_3(AB)_3(BAB)_n(BA)_3(HG)_3$

Fig. 3 Effect of  $n$  on transmission quality of PQW. (a)  $(AB)_3(BAB)_n(BA)_3$ ; (b)  $(GH)_3(BAB)_n(HG)_3$ ; (c)  $(GH)_3(AB)_3(BAB)_n(BA)_3(HG)_3$

因子与阱层周期数的变化关系曲线,结果如图4所示。由图4可知,当阱层周期数 $n$ 增大时,无论是单势垒还是双重势垒光子量子阱,它们的透射品质因子均有提高,尤其以双重势垒光子量子阱结构 $(GH)_3(AB)_3(BAB)_n(BA)_3(HG)_3$ 的透射品质提高最快。

可见,随着阱层周期数 $n$ 的增大,光子量子阱结构内部的频率量子化亦有所加剧,导致透射谱中的共振透射峰条数增加,同时共振透射峰的品质因子也随之提高,尤其以双重势垒光子量子阱结构的透射品质因子提高速度最快。

#### 4.2 垒层周期数 $m, k$ 对透射品质的影响

保持光子量子阱结构的其他参数不变,当垒层重复周期数 $m=2,3,4, k=2,3,4$ 时,在透射谱对称中心波长856.4 nm附近,单势垒、双重势垒光子量子阱结构 $(AB)_m(BAB)_2(BA)_m, (GH)_k(BAB)_2(HG)_k$ 和 $(GH)_k(AB)_m(BAB)_2(BA)_m(HG)_k$ 的透射峰宽度变化,分别如图5(a)~(c)所示。

从图5可知,无论是单势垒还是双重势垒光子量子阱结构的共振透射峰均随垒层周期数的增大而变窄,尤其是当内、外垒的周期数 $m, k$ 同时增大时,双重势垒光子量子阱透射峰变窄的速度更快。计算发现,当 $m=6, k=6$ 时, $(GH)_6(AB)_6(BAB)_2(BA)_6(HG)_6$ 中心波长856.4 nm附近的透射峰半峰全宽仅为 $\Delta\lambda=3.1200 \times 10^{-7}$  nm,即半峰全宽趋于很窄的波长范围,此时透射峰变得超精细(极窄),几乎趋于某个频率点。

进一步计算出单势垒、双重势垒光子量子阱透射品质因子随垒层周期数变化曲线,如图6所示。由图6可知,当垒层周期数增大时,无论是单势垒还是双重势垒光子量子阱的透射品质因子均迅速提高,尤其以双重势垒光子量子阱结构 $(GH)_k(AB)_m(BAB)_2(BA)_m(HG)_k$ 的透射品质因子提高最快:当 $m, k=2$ 时, $Q=0.274 \times 10^6$ ,当 $m, k=3$ 时, $Q=0.7137 \times 10^6$ ,当 $m, k=5$ 时, $Q$ 则趋于无穷大。而光子量子阱结构 $(AB)_m(BAB)_2(BA)_m$ 的透射品质因子提高相对比较慢:当 $m=2$ 时, $Q=0.0487 \times 10^4$ ,当 $m=5$ 时, $Q=1.7384 \times 10^4$ 。

另外,对比图4和图6可知,垒层光子晶体周期数的增大对量子阱结构共振透射品质的影响明显大于阱层周期数增大对透射品质的影响,亦即垒层周期数增大更加显著地加剧量子阱结构对光的局域、量子化等。因此,要想获得更加精细超窄的光学滤波通道,可以在构造光子晶体量子势阱结构的基础上,通过增加垒层光子晶体周期数的方法来实现。

## 5 结论

构造一维光子晶体单势垒光子量子阱结构模型 $(AB)_m(BAB)_n(BA)_m$ 和 $(GH)_k(BAB)_n(HG)_k$ 、双重势垒光子

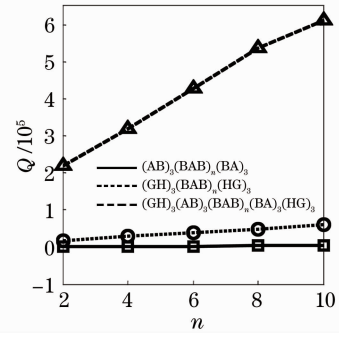


图4 光子量子阱透射品质因子随 $n$ 变化曲线

Fig. 4 Transmission quality factor of PQW versus  $n$

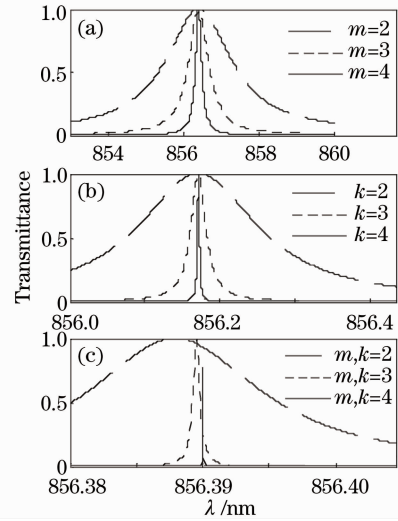


图5  $m, k$ 对光子量子阱透射品质的影响。(a)  $(AB)_m(BAB)_2(BA)_m$ ; (b)  $(GH)_k(BAB)_2(HG)_k$ ; (c)  $(GH)_k(AB)_m(BAB)_2(BA)_m(HG)_k$

Fig. 5 Effect of  $m, k$  on transmission quality of PQW. (a)  $(AB)_m(BAB)_2(BA)_m$ ; (b)  $(GH)_k(BAB)_2(HG)_k$ ; (c)  $(GH)_k(AB)_m(BAB)_2(BA)_m(HG)_k$

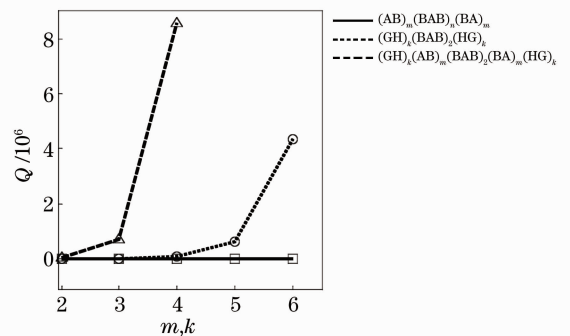


图6 一维光子量子阱透射品质因子随 $m, k$ 变化曲线

Fig. 6 Transmission quality factor of PQW versus

$m$  and  $k$

子阱结构模型 $(GH)_k(AB)_m(BAB)_n(BA)_m(HG)_k$ 模型,通过传输矩阵法理论研究结构周期数对它们透射品质的影响,得出如下结论:

1) 随着阱层周期数的增加,单势垒、双重势垒光量子阱的共振透射峰均变窄,即品质因子提高,且双重势垒光量子阱透射品质因子提高的速度快,并伴随有共振透射峰频率位置向长波方向移动的现象。

2) 随着垒层周期数的增加,单势垒、双重势垒光量子阱的透射峰迅速变精细,即透射品质因子迅速提高,且双重势垒光量子阱透射品质因子提高速度最快,并伴随有共振透射峰频率位置往长波方向移动的现象;当垒层周期数增大到一定数值后,双重势垒光量子阱的透射峰品质因子趋于无穷大,此时光量子阱的透射峰趋于某个频率点。

3) 结构周期数对光量子阱共振透射品质的影响,垒层周期数影响强度明显高于阱层周期数。

结构周期数对单势垒、双重势垒光子晶体量子阱透射品质影响的规律可为光子晶体设计高品质的光学滤波器、光学开关等新型量子光学器件提供参考,并对光子晶体的理论研究有一定的促进作用。

### 参 考 文 献

- 1 E. Yablonovitch. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(20): 2059~2061
- 2 S. John. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(23): 2486~2489
- 3 Liu Qihai, Hu Dongsheng, Yin Xiaogang *et al.*. Defect mode in one-dimensional photonic crystal consisting of single-negative materials with an impurity layer [J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, **60**(9): 094101  
刘其海, 胡冬生, 尹小刚 等. 由单负材料组成的含有缺陷层的一维光子晶体结构中的缺陷模 [J]. *物理学报*, 2011, **60**(9): 094101
- 4 Su An, Gao Yingjun. Filter characteristics of one-dimensional photonic crystal with complex dielectric constant [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(6): 1535~1538  
苏 安, 高英俊. 含复介电常数一维光子晶体的滤波特性 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(6): 1535~1538
- 5 Su An. Transmission spectrum of one-dimensional photonic crystal for realizing high-performance optical transmission function [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, **40**(6): 1101~1106  
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): 1101~1106
- 6 Liu Qineng. Analytical study on total reflection tunnel effect of 1-D photonic crystal [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(2): 0219002  
刘启能. 一维光子晶体的全反射隧穿效应的解析研究 [J]. *光学学报*, 2012, **32**(2): 0219002
- 7 Yu Haixia, Du Chunmei, Liang Guangdong. Tunable wavelength filter based on photonic crystal with complex periodical structure [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, **46**(3): 44~48  
于海霞, 杜春梅, 梁广东. 复周期结构光子晶体波长可调谐滤波器的研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2009, **46**(3): 44~48
- 8 Fei Hongming, Zhou Fei, Yang Yibiao *et al.*. Resonance tunneling through photonic double quantum well system [J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, **60**(7): 074225  
费宏明, 周 飞, 杨毅彪 等. 光子晶体双量子阱的共振隧穿 [J]. *物理学报*, 2011, **60**(7): 074225
- 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  
苏 安, 高英俊. 含复介电常数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]. *Chin. J. Quant. Electron.*, 2010, **27**(5): 596~601  
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 Su An, Gao Yingjun, Jiao Meina *et al.*. Transmission spectrum of photonic crystal quantum-well structure for realizable odd-passage filter [J]. *Chinese J. Luminescence*, 2009, **30**(3): 71~75  
苏 安, 高英俊, 焦美娜 等. 可实现奇数通道滤波功能的光量子阱透射谱 [J]. *发光学报*, 2009, **30**(3): 71~75
- 12 Dong Haixia, Jiang Haitao, Yang Chengquan *et al.*. Theoretical simulation and transmission properties of 1D photonic QW structure containing defect layers with negative refractive Index [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(12): 2245~2249  
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

- 13 Chen Haibo, Hu Sumei, Gao Yingjun. Complex dielectric photonic quantum well structure; multiple channeled filtering and efficient optical amplification[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, **46**(6): 39~43  
陈海波, 胡素梅, 高英俊. 复介电光量子阱结构:多通道滤波和高效光放大[J]. 激光与光电子学进展, 2009, **46**(6): 39~43
- 14 Qiao Feng, Zhang Chun, Wang Jun *et al.*. Photonic quantum-well structures;multiple channeled filtering phenomena[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2000, **77**(23): 3698~3700
- 15 Wang Yuanyuan, He Xiaodong, Hu Guijun *et al.*. Tuning characteristics and quality factor of one-dimension photonic crystal mcro-cavity[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(2): 285~288  
王媛媛, 何晓东, 胡贵军 等. 一维光子晶体微谐振腔的调谐特性与品质因子[J]. 光子学报, 2009, **38**(2): 285~288
- 16 Deng Xinhua, Liu Nianhua, An Liping. Tunable multiple-channel filters based on photonic heterostructures using single-negative materials[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2009, **54**(10): 1409  
邓新华, 刘念华, 安丽萍. 基于单负材料光子晶体异质结构的可调多通道滤波器[J]. 科学通报, 2009, **54**(10): 1409