

文章编号:1004-4213(2010)05-0842-5

含复介电常量一维光子晶体量子阱结构研究*

苏安^{1,2}, 高英俊²

(1 广西大学 物理科学与工程技术学院, 南宁 530004)

(2 河池学院 物理与电子工程系, 广西 宜州 546300)

摘要:利用传输矩阵法研究了实介电常量和含复介电常量时一维光子晶体的透射谱. 结果表明: 两种情况下均构成光量子阱结构, 并且光量子阱结构的透射能带谱位置和结构相同, 但在含复介电常量负虚部情况下共振透射峰出现很强的增益现象, 而在含复介电常量正虚部情况下共振透射峰则呈现明显的衰减现象.

关键词:光子晶体; 量子阱; 复介电常量; 共振透射

中图分类号: O431

文献标识码: A

doi: 10. 3788/gzxb20103905. 0842

0 引言

自 20 世纪 80 年代末提出光子晶体(Photonic Crystals, PCs)概念以来^[1-2], 人们对光子晶体进行了大量的研究. 光子晶体最根本的特征是具有类似于电子半导体能带结构的禁带——光子禁带, 频率落在禁带中的光被禁止传播^[3-5]. 量子阱的概念是由 Esaki 和 Tsu 提出的^[6], 利用量子阱结构可以“裁剪”半导体中电子能带的特性, 许多基于量子阱结构的新器件被制造出来, 在现代科学技术领域中发挥着重要的作用^[7-8]. 类似于半导体中的量子阱结构, 将具有不同光子带隙的光子晶体组合在一起即可形成光子晶体量子阱^[5,7-10], 当组成光量子阱结构的中间阱层光子晶体能带处于两侧垒层光子晶体禁带中时, 可形成局域的光子态, 这些局域光子态的光学传输特性可用于设计高效的量子光学器件. 如果在光子晶体中掺入激活杂质, 增加相应频率光子的态密度, 对应频率处的受激辐射将得到增强, 利用这些新异的物理特性, 可设计出滤波器、激光二极管、激光器和光放大器^[10-14].

目前对一维光子晶体量子阱的研究大都集中于实介电情况, 而在复介电情况下还很少见. 本文在实介电常量和含复介电常量的情况下对一维光子晶体(One-Dimensional Photonic Crystals, 1D PCs)及其构成的光量子阱(Photonic Quantum Well, PQW)结构的透射谱进行数值计算模拟. 发现两种情况下的光量子阱结构的透射能带谱结构相同, 但在含复

介电负虚部情况下透射峰出现很强的增益现象, 而在复介电正虚部情况下则呈现明显的衰减现象. 这些特性对设计光子晶体光学器件有着重要的参考价值.

1 光子晶体模型及其能带结构

选定一维光子晶体模型 $(AB)_m(AABAA)_n(BA)_m$, 即在镜像对称的光子晶体 $(AB)_m(BA)_m$ 中间插入 $(AABAA)_n$ 光子晶体形成“三明治”状光子晶体结构. 介质层 A 为碲化铅(PbTe), 折射率 $n_a = 4.1$ ^[15], 厚度 $d_a = 750$ nm; 介质层 B 为 ZnS, 折射率 $n_b = 2.35$, 厚度 $d_b = 1329$ nm. 本模型和参量对应的光子晶体禁带中心波长和中心频率分别为: $\lambda_0 = 2(n_a d_a + n_b d_b) = 12396$ nm, $\omega_0 = 1.521 \times 10^{14}$ rad/s, 属于红外波范围. 当介质层 B 中掺入激活杂质后, $n_b = 2.35 + ki$; k 为吸收系数. m 和 n 可为任意正整数.

应用传输矩阵法^[3,8,11,13,16]理论通过 Matlab 编程, 分别计算模拟光子晶体 $(AABAA)_{10}$ 与光子晶体 $(AB)_5(BA)_5$ 在实介质 ($n_b = 2.35$) 和含复介质 ($n_b = 2.35 - 0.00077i$) 两种情况下的光子透射能带谱如图 1. 图中频率用归一化单位 ω/ω_0 . 显然, 光子能带结构具有由于布喇格散射产生的透过带的特征.

从图 1 可知, 适当地选择光子晶体组成介质的介电常量和厚度后, 无论是在实介质还是在含复介质情况下, 光子晶体 $(AABAA)_n$ 的中心频率 $1.0\omega/\omega_0$ 处能带都处于光子晶体 $(AB)_m(BA)_m$ 的中心频率禁带之中, 则当在光子晶体 $(AABAA)_n$ 内传播的电磁波频率刚好处于这一区域内时, 光子晶体 $(AB)_m(BA)_m$ 起着关卡的作用而禁止电磁波在其内传播, 形成光约束. 另一方面, 光子晶体

* 国家自然科学基金(50661001, 50061001)和广西科学基金(0832029, 0991026, 0639004)资助

Tel: 0778-3142855

Email: suan3283395@163.com

收稿日期: 2009-05-11

修回日期: 2009-07-06

$(AABAA)_n$ 在此频率范围起着势阱的作用^[5,7-8,10,17]. 因此,两种情况下光子晶体 $(AB)_m$ $(AABAA)_n(BA)_m$ 均构成一维光子晶体量子阱结构,光子晶体 $(AB)_m(BA)_m$ 是光子晶体量子阱结构的垒,光子晶体 $(AABAA)_n$ 是光子晶体量子阱结构的阱. 光子晶体 $(AABAA)_n$ 也可看成是插入光子晶体 $(AB)_m(BA)_m$ 内的缺陷组. 在实介电常量情况下,光子晶体 $(AABAA)_n$ 和 $(AB)_m(BA)_m$ 的透射能带透射率均为 1; 而在含复介电常量情况下光子晶体 $(AABAA)_n$ 的能带谱中的禁带边缘出现微小的增益现象,且光子晶体 $(AB)_m(BA)_m$ 在能带谱中的禁带边缘出现微小的增益现象的同时,在中心频率处的透射峰则出现透射率衰减现象.

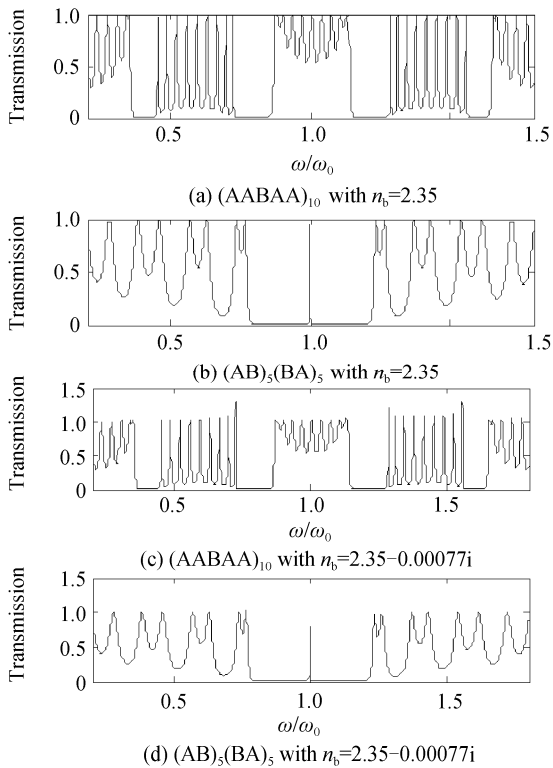


图 1 n_b 为 2.35 和 $2.35 - 0.00077i$ 时,一维光子晶体的光子透射能带谱

Fig. 1 Transmission spectrum for 1D PCs with $n_b = 2.35$ and $n_b = 2.35 - 0.00077i$

图 1(b)和(d)中光子晶体 $(AB)_m(BA)_m$ 的光子透射能带谱中心频率 $1.0\omega/\omega_0$ 处出现一窄完全透射峰. 这是因为光子晶体 $(AB)_5(BA)_5$ 是镜像对称结构之缘故所形成的单缺陷模^[18-20].

2 光子晶体量子阱的透射谱结构与分析

2.1 实介电常量光子晶体量子阱的透射谱

在实介电常量($n_b = 2.35$)情况下,固定光子晶体量子阱垒层光子晶体 $(AB)_m(BA)_m$ 的重复周期数 $m = 5$,其它各参量保持上述值不变,随着阱层光子晶体 $(AABAA)_n$ 重复周期数 n 从 1~5 递增,计算模拟

得光子晶体量子阱结构 $(AB)_5(AABAA)_n(BA)_5$ 在实介电常量情况下的光子透射能带谱,如图 2. 从透射能带谱图可知:在实介电常量情况下,光子晶体量子阱结构的透射能带谱的中心频率处 $1.0\omega/\omega_0$ 周围,于 $0.87 \sim 1.14\omega/\omega_0$ 频率范围内出现一组透射率为 100% 的完全透射峰,透射峰数目与阱层光子晶体 $(AABAA)_n$ 重复周期数 $n+1$ 数值相等. 其形成原因如下:由图 1(a)、(b)可见,在 $0.80 \sim 1.20\omega/\omega_0$ 频率区域处,光子晶体 $(AABAA)_n$ 的能带处于光子晶体 $(AB)_m(BA)_m$ 的禁带中,且两频率区域几乎都以中心频率处为对称中心,则当在光子晶体 $(AABAA)_n$ 内传播的电磁波频率刚好处于这两区域内时, $(AB)_m(BA)_m$ 光子晶体起着关卡的作用而禁止电磁波在其内传播,形成光约束,产生量子阱效应. 即垒层光子晶体 $(AB)_m(BA)_m$ 不能持续频率处于禁带内的电磁波的传播,此频率范围内的光被限制在阱层光子晶体 $(AABAA)_n$ 内,光子晶体量子阱中由于量子限制效应而产生光子的束缚态,类似于半导体量子阱中的电子,对光子的限制效应将导致频率的量子化,这种情况下电磁波只能以共振隧穿方式通过光子晶体量子阱^[5,7-8,10,17]. 这个量子效应现象从

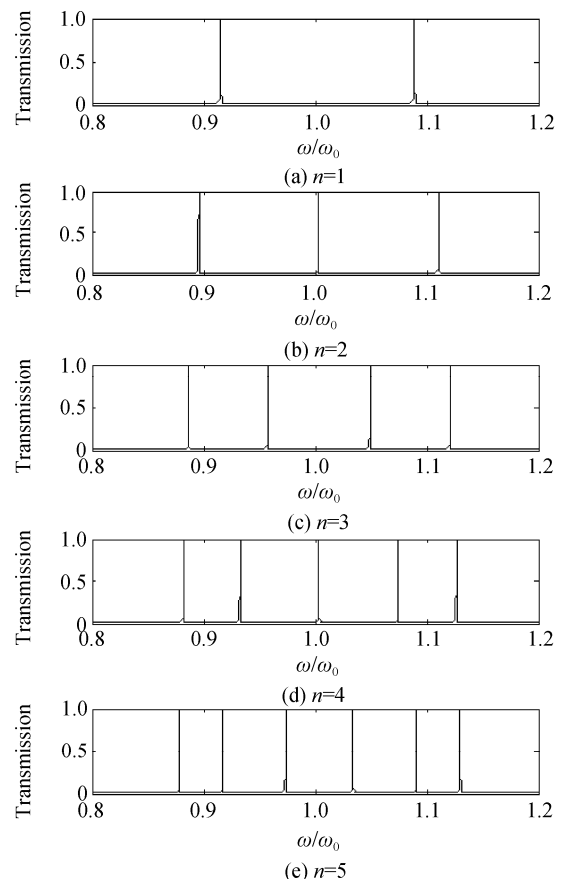


图 2 $n_b = 2.35$ 时, $(AB)_5(AABAA)_n(BA)_5$ 光子晶体量子阱的透射能带谱

Fig. 2 Transmission spectrum for $(AB)_5(AABAA)_n(BA)_5$ PQW with $n_b = 2.35$

图中尖锐的透过峰可以看出. 这些峰与光子晶体中的缺陷态所对应的峰是类似的, 但是这些峰对应的是光子晶体量子阱中由于量子限制效应而产生的光子的束缚态. 有趣的是, 所有的峰对应的透射率都是 100%, 就是说, 在这些束缚态中, 光可以完全透射. 这些束缚态与光波的可传输性密切相关, 分别表现为光子晶体中 $0.87 \sim 1.14\omega/\omega_0$ 频率区域分布的与光子晶体 $(AABAA)_n$ 重复周期数 n 密切相关的一组完全窄透过峰, 透过峰数目都分别等于 $n+1$ 数值. 于是可以通过调节阱层光子晶体 $(AABAA)_n$ 的重复周期数 n 来控制透过峰的数目及位置, 在红外波范围内形成可调节控制的高效多通道光滤波器.

也可以把 $(AABAA)_n$ 看成是插入光子晶体 $(AB)_m(BA)_m$ 内的一组缺陷, 当 $n=1$ 时, 光子晶体 $(AB)_5(AABAA)_1(BA)_5$ 可表示为 $(AB)_5 \boxed{AA} (BA)_5$, 其中两处带边框介质层形成增厚缺陷 (由于 A 厚度增加一倍而破坏原周期性而形成缺陷), 于是在透射谱上出现两条透射峰 (缺陷模), 当此两处以 A 替换后计算得一个完整的禁带, 不出现透射峰可验证; 当 $n=2$ 时, 光子晶体可表示为 $(AB)_5 \boxed{AA} B \boxed{AAAA} B \boxed{AA} (BA)_5$, 即形成三处增厚缺陷; $n=3, 4, 5 \dots$ 可依次类推. 出现透射峰的数目恒等于光子晶体 $(BACAB)_n$ 的重复周期数 $n+1$.

2.2 含复介电负虚部光子晶体的透射谱

在 2.1 结构参量的基础上, 当介质层 B 的折射率以 $n_b = 2.35 - 0.00077i$ 代入, 即光子晶体介质层 B 的折射率含负虚部时, 则计算模拟得光子晶体结构 $(AB)_5(AABAA)_n(BA)_5$ 的光子透射能带谱, 如图 3.

从图 3 可知, 在含复介电负虚部, 即当光子晶体中的介质层 B 掺入激活杂质后, 光子晶体的透射谱结构与实介电常量情况下的透射谱结构相同, 出现

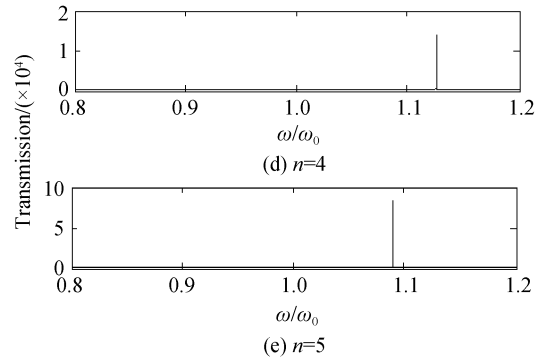
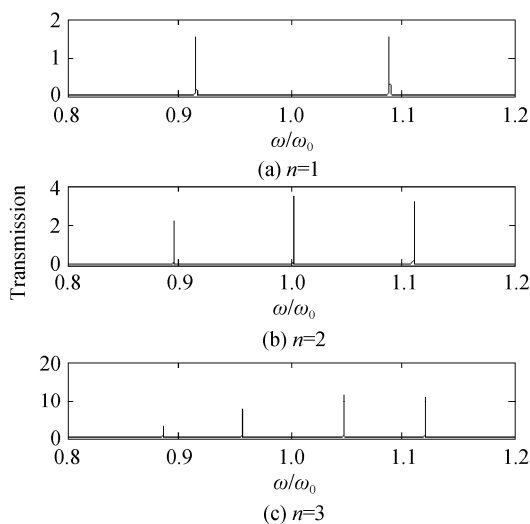


图 3 $n_b = 2.35 - 0.00077i$ 时, $(AB)_5(AABAA)_n(BA)_5$ 光子晶体量子阱的透射能带谱

Fig. 3 Transmission spectrum for $(AB)_5(AABAA)_n(BA)_5$ PQW with $n_b = 2.35 - 0.00077i$

共振透射峰的位置也不变, 但所有的透射峰都出现了不同程度的透射增益现象, 当 $n=5$ 时增益达到最强, 表现为 $1.091\omega/\omega_0$ 频率处的透射峰增益近 10^5 数量级, 增益幅度最小的是 $n=2$ 时 $0.896\omega/\omega_0$ 频率处的透射峰, 但增益的强度也达 2.166 倍. 之所以图 3(d) 和图 3(e) 中的部分透射峰没显示出来, 原因是这部分透射峰的增益幅度相对显示出来的透射峰幅度小得多而造成的, 当对透射能带谱进行局部放大后可显现: $n=4$ 时从左至右 5 条透射峰透射率依次为 5.757, 11.63, 546.5, 53.02, 0.140×10^5 , 分别对应 $0.882\omega/\omega_0$, $0.933\omega/\omega_0$, $1.004\omega/\omega_0$, $1.075\omega/\omega_0$ 和 $1.091\omega/\omega_0$ 频率处; $n=5$ 时从左至右 6 条透射峰透射率依次为 15.26, 16.25, 24.10, 10.72, 0.825×10^5 和 8.754, 分别对应 $0.879\omega/\omega_0$, $0.918\omega/\omega_0$, $0.973\omega/\omega_0$, $1.034\omega/\omega_0$, $1.091\omega/\omega_0$ 和 $1.130\omega/\omega_0$ 频率处. 进一步计算还发现, 当 $n \geq 6$ 后, 光子晶体结构的部分共振透射峰透射率会随之下降, 当 $n=7$ 时, 开始出现个别透射峰的透射率小于 1 ($1.135\omega/\omega_0$ 频率处透射峰透射率为 $0.679\omega/\omega_0$), 当 $n=8$ 时, 透射峰高值和最低值分别为 208.4 和 0.324, 对应 $0.895\omega/\omega_0$ 和 $1.136\omega/\omega_0$ 频率处. 造成这种透射峰增益强度不同的原因从图 1(c), (d) 可知, 构成光子晶体量子阱结构的能带和禁带中心并不严格重合 (能带中心微右移, 禁带中心微左移), 即在中心频率 $1.0\omega/\omega_0$ 处不构成镜像对称分布的量子阱结构, 所以其透射谱亦不呈现镜像对称分布状态.

因此, 当该光子晶体模型介质中含有复介电负虚部常量 (含增益性杂质) 时, 其所构成量子阱结构的透射能带谱特性可实现多通道光滤波功能的同时, 还具有光放大的效果, 但当 $n \geq 7$ 后, 开始出现个别透射峰透射衰减现象.

2.3 含复介电正虚部光子晶体的透射谱

在 2.1 结构参量的基础上, 当介质层 B 的折射率为 $n_b = 2.35 + 0.00077i$ 时, 即光子晶体量子阱结

构中的介质层 B 的折射率含正虚部时,计算模拟得光子量子阱结构 $(AB)_5(AABAA)_n(BA)_5$ 的光子透射能带谱,如图 4.

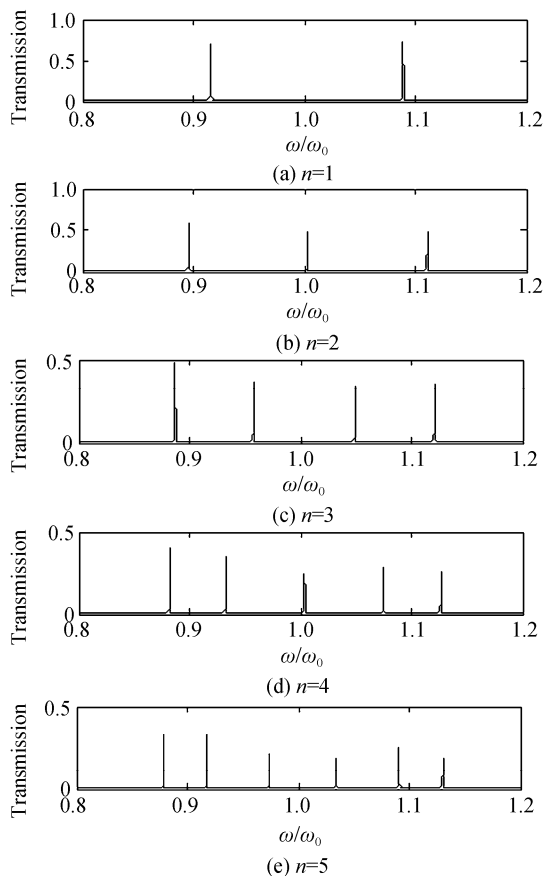


图 4 $n_b = 2.35 + 0.00077i$ 时, $(AB)_5(AABAA)_n(BA)_5$ 光子晶体量子阱的透射能带谱

Fig. 4 Transmission spectrum for $(AB)_5(AABAA)_n(BA)_5$ PQW with $n_b = 2.35 + 0.00077i$

可见,在含复介电正虚部(含吸收杂质)时,光子量子阱的透射谱结构和实介电常量情况下的透射谱结构相同,出现共振透射峰的位置亦不变,但所有的透射峰都出现了不同程度的透射衰减,即吸收现象,其中 $n=5$ 时,在 $1.13\omega/\omega_0$ 频率处的透射峰衰减到 0.183,当 $n=8$ 时,透射峰高值和最低值仅为 0.268 和 0.071(对应 $0.895\omega/\omega_0$ 和 $1.136\omega/\omega_0$ 频率处),呈现很强的衰减效果.可以预测,随着 n 的继续增大,将出现透射峰透射率趋于 0 现象.

3 结论

1)在实介电常量和含复介电常量负虚部、正虚部三种情况下,光子晶体 $(AB)_m(AABAA)_n(BA)_m$ 都形成光子量子阱结构,在该晶体中传播的光被强烈的局域于阱中并产生局域量子化,于是在光子量子阱透射谱上都分别出现结构和位置相同的共振透射峰,透射峰数目与 $n+1$ 数值相等.

2)在实介电常量情况下透射峰的透射率均为

1,位置和数目可以通过阱层光子晶体 $(AABAA)_n$ 的重复周期数 n 来控制调节.

3)在含复介电常量负虚部情况下,透射峰出现极强的透射增益现象,增益最强近达 10^5 倍.

4)在含复介电常量正虚部情况下,透射峰出现透射衰减现象,且随 n 增大衰减越加明显.

在不同介电常量情况下的该光子晶体量子阱结构的透射谱特性,可实现光子晶体在微波范围内,为设计可调性高效多通道光学滤波、光学放大、衰减等光子器件提供理论指导,并具有巨大的应用潜力.

参考文献

- [1] YABLONOVITCH E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics[J]. *Phys Rev Lett*, 1987, **58**(20): 2059-2061.
- [2] JOHN S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices[J]. *Phys Rev Lett*, 1987, **58**(23): 2486-2489.
- [3] AN Li-ping, LIU Nian-hua. Impurity band in one-dimensional photonic crystal containing defect layers with negative refractive index[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(2): 289-292.
安丽萍,刘念华.含负折射率缺陷的一维光子晶体的杂质带[J]. *光子学报*, 2009, **38**(2): 289-292.
- [4] CHEN Hai-bo, GAO Ying-jun, HAN Jun-ting. Effect of optical thickness on characteristics of photonic forbidden band of 1D three element photonic crystal[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(11): 2210-2212.
陈海波,高英俊,韩军婷.光学厚度对一维三元光子晶体禁带特性的影响[J]. *光子学报*, 2008, **37**(11): 2210-2212.
- [5] TANG Bing-shu, SHEN Ting-gen, WANG Gang. Research on transmission spectra of superlattice with multilayer two-dimensional photonic crystal[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(5): 948-951.
汤炳书,沈廷根,王刚.二维光子晶体层状超晶格透射特性研究[J]. *光子学报*, 2008, **37**(5): 948-951.
- [6] ESAKI L, TUS R. Superlattice and negative differential conductivity semiconductors[J]. *IBM J Res Dev*, 1970, **14**: 61-65.
- [7] SU An, GAO Ying-jun, JIAO Mei-na, et al. Study on odd-passage filter photonic crystal quantum-well structure[J]. *Laser & Infrared*, 2009, **39**(3): 311-314.
苏安,高英俊,焦美娜,等.具有奇数通道滤波功能的光子晶体量子阱结构研究[J]. *激光与红外*, 2009, **39**(3): 311-314.
- [8] 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.
- [9] MOUSSA R, FOTEINOPOULOU S, ZHANG Lei, et al. Negative refraction and superlensing in a 2D photonic crystal structure[J]. *Phys Rev: B*, 2005, **71**(8): 125.
- [10] DONG Hai-xia, JIANG Hai-tao, YANG Cheng-quan, 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子量子阱的透射特性及理论模拟[J]. *光子学报*, 2007, **27**(12): 2245-2249.
- [11] XU Yu-long, HAO Qing-mei, SU Xi-yu. The research on the properties of one-dimension photonic crystal with the imaginary part of complex dielectric constant[J]. *Acta Sinica*

- Quantum Optica*, 2006, **12**(2):109-112.
许玉龙,郝清梅,苏希玉.具有复介电常量一维光子晶体的特性研究[J].量子光学学报,2006,**12**(2):109-112.
- [12] LOU Shu-qin, WANG Zhi, REN Guo-bin, *et al.* The research on the properties of two-dimensional photonic with the imaginary part of dielectric constant[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(3):313~317.
娄淑琴,王智,任国斌,等.具有复介电常量二维光子晶体的特性研究[J].光学学报,2004,**24**(3):313-317.
- [13] CHEN Xian-feng, SHEN Xiao-ming, JIANG Mei-ping, *et al.* Studies on the defect mode properties of 1D photonic crystal [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(12):1877-1880.
陈宪锋,沈小明,蒋美萍,等.一维光子晶体的缺陷模式特性研究[J].光子学报,2005,**34**(12):1877-1880.
- [14] SU An, Gao Ying-jun. Filter characteristics of one-dimensional photonic crystal with complex dielectric constant [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, **36**(6):1535-1538.
苏安,高英俊.含复介电常量一维光子晶体的滤波特性[J].中国激光,2009,**36**(6):1535-1538.
- [15] OU-YANG Zheng-biao, YANG Lin-ling, XU Gui-wen, *et al.* Mode properties of one-dimensional photonic crystals with defect[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2005, **16**(1):63-66.
欧阳征标,杨琳玲,许桂雯,等.一维缺陷光子晶体的模式特性研究[J].光电子·激光,2005,**16**(1):63-66.
- [16] WANG Hui, LI Yong-ping. An eigen matrix method for obtaining the band structure of photonic crystals [J]. *Acta Physica Sinica*, 2001, **50**(11):2172-2174.
王辉,李永平.用特征矩阵法计算光子晶体的带隙结构[J].物理学报,2001,**50**(11):2172-2178.
- [17] LIU Jing, HUANG Chong-qing, SUN Jun-qiang, *et al.* Spectral splitting in multiple quantum well structures composed of photonic crystals [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2008, **25**(2):203-207.
刘靖,黄重庆,孙军强,等.光子晶体多量子阱中的谱线分裂[J].量子电子学报,2008,**25**(2):203-207.
- [18] DU Gui-qiang, LIU Nian-hua. Optical transmission spectra of one-dimensional photonic crystals with a mirror symmetry [J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, **53**(4):1905-1908.
杜桂强,刘念华.具有镜像对称结构的一维光子晶体的透射谱[J].物理学报,2004,**53**(4):1905-1908.
- [19] DU Gui-qiang, LIU Nian-hua. Complete transmission and application of one-dimensional photonic crystals with multiple defects [J]. *Acta Sinica Quantum Optica*, 2004, **10**(3):98-101.
杜桂强,刘念华.含有多缺陷的一维光子晶体的完全透射及应用[J].量子光学学报,2004,**10**(3):98-101.
- [20] GAO Ying-jun, WANG Yu-ling. Transmission band of photonic crystals with a defect layer [J]. *Physica Scripta*, 2007, **T129**:349-352.

One-dimensional Photonic Crystal Quantum-well Structure Containing Complex Dielectric Constant

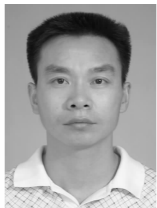
SU An^{1,2}, GAO Ying-jun²

(1 Department of Physical Science and Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China)

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

Abstract: The transfer matrix method is used to research the transmission spectra for one-dimensional photonic crystal of the solid dielectric constant and when containing the complex dielectric constant. The results show that the photonic quantum-well structure can be made up in both circumstances, and the position and struct of the transmission band spectra of the photonic quantum-well structure are the same. But the resonance transmission peak arises strong gain phenomenon in the circumstance that contains the negative imaginary part of the complex dielectric constant, and evident attenuating phenomenon in the circumstance that contains the positive imaginary part of the complex dielectric constant.

Key words: Photonic crystal; Quantum-well; Complex dielectric constant; Resonance transmission



SU An was born in 1973. As an associate professor, he is pursuing for his M. S. degree, and his research interests focus on photonic crystals and photonic quantum well structure.



GAO Ying-jun was born in 1962. He works as a professor, and his research interests focus on optoelectronic materials and physical properties.