

单负材料组成一维光子晶体双量子阱结构的共振模

康永强 高鹏 刘红梅 张淳民 石云龙

Resonant modes in photonic double quantum well structures with single-negative materials

Kang Yong-Qiang Gao Peng Liu Hong-Mei Zhang Chun-Min Shi Yun-Long

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 064207 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.064207

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.064207>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I6>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于磁光效应的二维三角晶格光子晶体模分复用器

Mode division multiplexing of two-dimensional triangular lattice photonic crystal based on magneto-optical effect

物理学报.2015, 64(6): 064210 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.064210>

量子受限效应对称性效应对硅光子晶体禁带的影响

Effects of quantum confinement and symmetry on the silicon photonic crystal band gap

物理学报.2015, 64(6): 064208 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.064208>

低对称性光子晶体超宽带全角自准直传输的机理研究

Physical mechanism of super-broadband and all-angle self-collimation transmission in photonic crystal with low rotational symmetry

物理学报.2015, 64(6): 064209 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.064209>

覆盖 X 和 Ku 波段的低雷达散射截面人工磁导体反射屏

A low radar cross-section artificial magnetic conductor reflection screen covering X and Ku band

物理学报.2015, 64(2): 024219 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.024219>

带多孔硅表面缺陷腔的半无限光子晶体 Tamm 态及其折射率传感机理

Tamm state of semi-infinite photonic crystal based on surface defect cavity with porous silicon and its refractive index sensing mechanism

物理学报.2014, 63(24): 244207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.244207>

单负材料组成一维光子晶体双量子阱结构的共振模^{*}

康永强^{1)2)†} 高鹏³⁾ 刘红梅¹⁾ 张淳民²⁾ 石云龙¹⁾

1)(山西大同大学固体物理研究所, 大同 037009)

2)(西安交通大学空间光学所, 西安 710049)

3)(青岛科技大学数理学院, 青岛 266061)

(2014年9月14日收到; 2014年10月16日收到修改稿)

通过传输矩阵方法, 计算模拟了两种单负材料组成一维光子晶体双量子阱结构的透射谱. 研究发现: 由于双量子阱结构双阱之间的相互耦合作用, 共振模发生双重劈裂, 共振峰之间的距离可以通过调节双阱之间的耦合强度控制, 共振模的品质因子可以通过调节外部障碍光子晶体的周期数控制. 并且, 共振模受入射角和光偏振模式的影响都比较小, 适合全方向滤波. 当考虑两种单负材料不同损耗的影响时, 研究结果表明, 电损耗对低频处的共振模影响大, 而磁损耗对高频和低频处的共振模影响都比较大.

关键词: 单负材料, 双量子阱, 光子晶体

PACS: 42.70.Qs, 41.20.Jb, 73.21.Fg

DOI: 10.7498/aps.64.064207

1 引言

近年来, 含特异性材料 (metamaterials) 的光子晶体引起了人们越来越多的关注^[1-8]. 由于特异性材料的结构周期长度越小于电磁波波长, 有利于器件的小型化和集成化, 这是普通材料光子晶体无法比拟的. 目前研究较多的特异性材料有双负材料 (double-negative materials) 和单负材料 (single-negative materials)^[9,10]. 把介电常数和磁导率均为负数的材料命名为双负材料, 又称左手材料, 把介电常数和磁导率只有一个为负数的材料命名为单负材料, 其中包括负介电常数材料 (ENG, 介电常数为负, 磁导率为正) 和负磁导率材料 (MNG, 磁导率为负, 介电常数为正).

众所周知, 基于半导体量子阱的各类新型装置已经成功研制且投入使用, 由于光子晶体中光子的运动规律和半导体中电子的运动规律类似, 光子

量子阱结构的研究也引起了人们的重视^[11-13]. 传统的光子量子阱结构是由正折射率材料 (介电常数和磁导率均为正) 排列而成, 是基于布拉格带隙^[10] (Bragg gap), 该结构产生的共振隧穿模受入射角、光偏振模式和晶格比例常数缩放或涨落的影响较大. 近来, Lin等^[14]提出了一类由正折射率材料和双负材料交替排列组成一维光子晶体的量子阱结构, 研究结果表明该结构能实现产生全方向共振模和全方向多通道滤波. 然而, 由于双负材料的构造要比单负材料复杂得多, 而且Fredkin等^[15]近来发现组合在一起的两种单负材料在一定条件下可以等效为双负材料. 所以由磁单负材料 (MNG) 和电单负材料 (ENG) 交替排列组成的一维光子晶体引起了人们的重视^[16-22]. 研究结果表明, 由两种单负材料交替排列组成的一维光子晶体结构能形成一种零有效相位带隙^[13] (zero effective phase gap), 该带隙受晶格常数缩放、入射角变化和光偏振模式的影响都比较小, 这有利于设计全方向滤波

* 国家自然科学基金 (批准号: 61307121, 11274207, 60278019) 和博士科研启动基金 (批准号: 2012-B-04) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: kyq_2000@sohu.com

器. Jiang 等^[13]提出了一类由MNG和ENG周期排列组成的一维光子晶体单量子阱结构,研究了其隧穿谱.然而,由于光子晶体单量子阱结构的隧穿谱数目不容易通过结构参数来调节.本文基于该零有效相位带隙^[13],提出了由两种单负材料交替排列组成的光子晶体双量子阱结构模型,计算模拟了其共振隧穿模,发现了两套量子化的共振隧穿模结构,并且研究了损耗对共振隧穿模的影响.

2 理论模型

选取单负材料介电参数和磁导率为Drud模型^[20-22].对于负磁导率材料($\mu < 0, \epsilon > 0$)表示为

$$\epsilon_1 = 3, \quad \mu_1 = 1 - \frac{\omega_{mp}^2}{\omega^2}. \quad (1)$$

对于负介电常数材料($\epsilon < 0, \mu > 0$)表示为

$$\epsilon_2 = 1 - \frac{\omega_{ep}^2}{\omega^2}, \quad \mu_2 = 3, \quad (2)$$

其中, $\omega_{ep} = \omega_{mp} = 10$ GHz是电等离子频率和磁等离子频率; ω 是角频率,单位GHz.由上式可以看到,当 $\omega < 10$ 时, μ_1, ϵ_2 是负值,是两种单负材料.文献^[11]中报道,负磁导率材料和负介电常数材料组成的无限周期结构,如果满足相位匹配条件 $k_1 d_1 = k_2 d_2$ (k_1, k_2 , 和 d_1, d_2 是两种单负材料对应的波矢和厚度),光子带隙闭合;如果不满足相位匹配条件,光子带隙形成,带隙宽度可以通过调节两种材料的厚度比率进行调节.根据本文所取材料参数(本文满足波矢 $k_1 = k_2$),得到的负磁导率材料和负介电常数材料组成无限周期结构光子晶体的色散关系,如图1所示.图中实线对应相位匹配结构($d_1 = d_2$)形成通带,虚线对应相位不匹配结构($d_1/d_2 = 3$)形成零有效相位带(3.5—6.5 GHz),

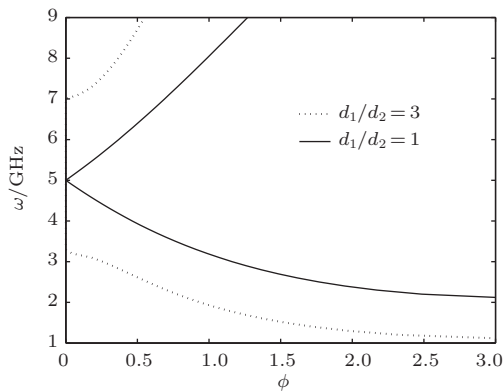


图1 负磁导率材料和负介电常数材料组成无限周期结构的色散图

并且可以看到两条通带夹在两条禁带中间.当阱层的光子晶体能带处于两侧垒层光子晶体的禁带中时,可以形成局域的光子态,这些光子态可以设计光滤波和光开关.

3 计算结果与讨论

考虑一个置于空气中的双量子阱结构 $(AB)^L(CD)^m(AB)^n(CD)^m(AB)^L$, 如图2(a)所示,其中A, C表示负磁导率材料, B, D表示负介电常数材料, m, n, L 是周期数,相应的材料几何厚度为 d_A, d_B, d_C, d_D .在下面的计算中,选取厚度 $d_A = 12$ mm, $d_B = 4$ mm, $d_C = d_D = 7$ mm.根据图1所示,光子晶体CD形成相位匹配结构,作为量子阱,光子晶体AB形成相位不匹配结构,作为量子障碍.图2(b)为相应等效该双量子阱结构的示意图.

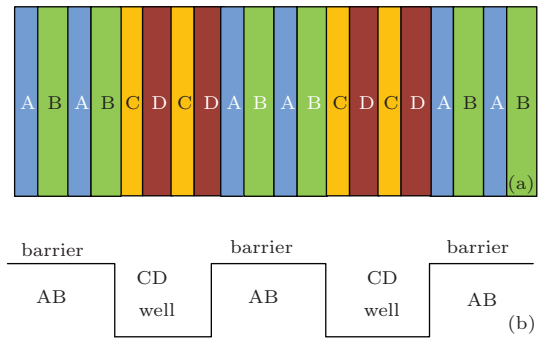


图2 (网刊彩色)由单负材料组成的光子双量子阱结构 (a) 双量子阱几何结构; (b) 等效双量子阱结构

假定一单色平面波沿正 z 方向以入射角 θ 从空气入射到该双量子阱结构,对于每一层,相应的传输矩阵^[3-6]为

$$M_j(\Delta z, \omega) = \begin{bmatrix} \cos(k_z^j \Delta z) & \frac{i}{q_j} \sin(k_z^j \Delta z) \\ iq_j \sin(k_z^j \Delta z) & \cos(k_z^j \Delta z) \end{bmatrix}, \quad (3)$$

其中 $k_z^j = \omega/c\sqrt{\epsilon_j\mu_j}\sqrt{1 - (\sin^2\theta/\epsilon_j\mu_j)}$ 是 z 方向任意一层对应的波矢, c 是真空中光速.对于TE偏振模, $q_j = \sqrt{\epsilon_j}/\sqrt{\mu_j}\sqrt{1 - (\sin^2\theta/\epsilon_j\mu_j)}$, 对于TM偏振模, $q_j = \sqrt{\mu_j}/\sqrt{\epsilon_j}\sqrt{1 - (\sin^2\theta/\epsilon_j\mu_j)}$.双量子阱结构的透过率可以通过传输矩阵法计算得到^[18-20].

首先,在单负材料组成的双量子阱结构 $(AB)_L(CD)_m(AB)_n(CD)_m(AB)_L$ 中,取周期数 $L = 8$,

$m = 5$, 通过改变中间障碍的周期数 n 研究该结构透射谱的变化, 如图 3 所示. 材料的结构参数取为 $d_A = 12$ mm, $d_B = 4$ mm, $d_C = 7$ mm, $d_D = 7$ mm. 可以观察到在零有效相位带隙 (3.5—6.5 GHz) 对应出现了两套共振透射峰, 一套位于高频, 一套位于低频. 随着 $n = 2, 4, 6, 16$ 增大, 双峰劈裂的间距逐渐减小, 这是因为随着 n 的增大, 双阱之间的耦合逐渐减小, 当 n 增大到 16 时, 两阱之间的耦合消失, 双峰吞并在一起, 不发生分裂, 简并消失. 此时类似光子晶体单量子阱中的透射谱. 利用这种特性, 可以设计新类型的光转换装置.

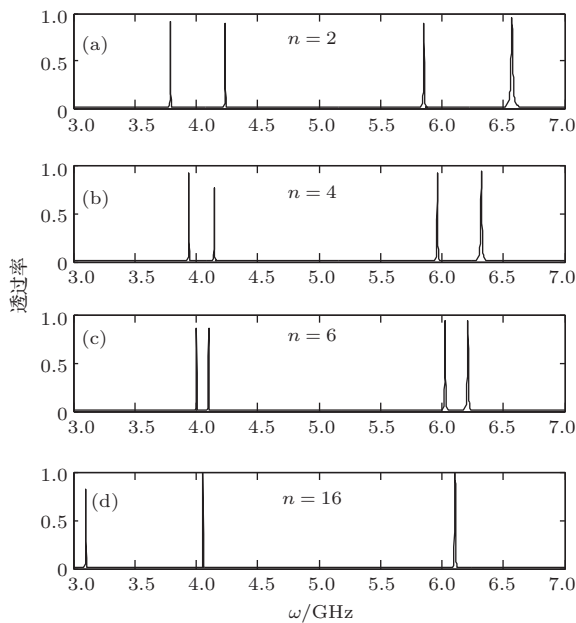


图 3 双量子阱结构中 $L = 8, m = 5, n = 2, 4, 6, 16$

接着, 研究双量子阱结构 $(AB)_8(CD)_m(AB)_5(CD)_m(AB)_8$ 中, 改变阱光子晶体的周期数 $m = 4, 6, 9, 12$ 对透射谱的影响, 材料所取的几何厚度与图 3 中一致. 如图 4 所示, 可以看到透射谱中随着 m 增大, 隧穿化共振模的数量增多, 双峰劈裂的间距减小. 这种特性可以解释为: 随着阱的周期数增多, 阱变宽, 双阱之间的耦合相互作用增强. 利用这一特性, 可以制作频率可调的多通道滤波器. 双量子阱结构的此特性对滤波器的设计具有重要的应用价值.

进一步, 研究双量子阱结构 $(AB)_L(CD)_8(AB)_4(CD)_8(AB)_L$ 中, 通过改变外部障碍的周期数 $L = 4, 6, 8, 16$, 研究透射谱的变化, 材料厚度与图 3 中一致. 计算模拟结果如图 5 所示, 可以发现,

随着外部障碍 L 的增加, 共振化透射谱的频率间减小, 透射谱的品质因子显著提高. 当外部障碍增加到 $L=16$ 层时, 发现共振隧穿消失, 透过率为零. 这可以解释为: 如果外部障碍变的太厚, 入射光子不能发生共振隧穿.

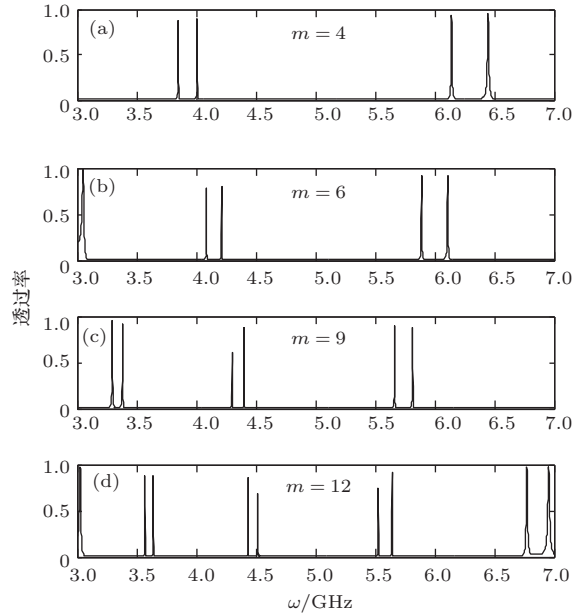


图 4 双量子阱结构中 $L = 8, n = 5, m = 4, 6, 9, 12$

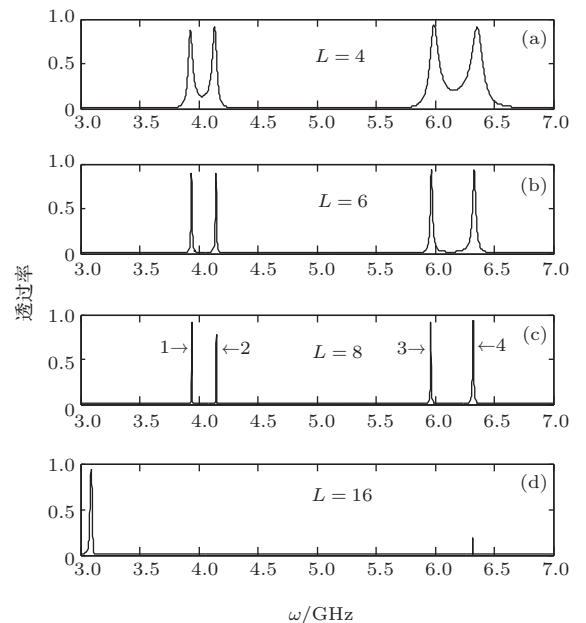


图 5 双量子阱结构中 $m = 8, n = 4, L = 4, 6, 8, 16$

众所周知, 在单负材料中, 损耗是难免的 [20,21], 但考虑损耗时, 上式 Drud 模型改写为如下形式:

$$\begin{aligned} \mu_1 &= \mu_a - \omega_{mp}^2 / (\omega^2 + i\omega\gamma_m), \\ \epsilon_2 &= \epsilon_b - \omega_{ep}^2 / (\omega^2 + i\omega\gamma_e), \end{aligned} \quad (4)$$

其中, γ_m, γ_e 分别为磁损耗和电损耗因子. 下面研究损耗对双量子阱结构透射谱的影响. 可以发现, 随着损耗增大, 共振化透过率降低. 我们对电损耗和磁损耗分别进行了研究, 当研究电损耗影响时, 磁损耗取为0, 发现电损耗对低频率区的透射峰影响较大, 而对高频率区域的透射峰影响较小, 如图6所示. 当使电损耗为0, 研究磁损耗的影响时, 发现磁损耗对高频率和低频率处的透射峰影响都比较大, 如图7所示.

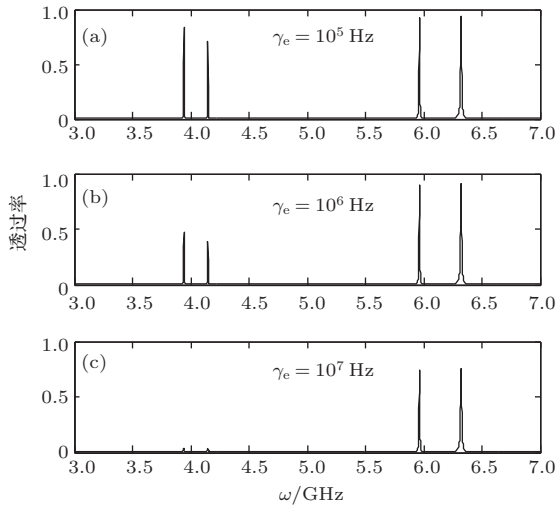


图6 双量子阱结构中电损耗的影响, 磁损耗为0

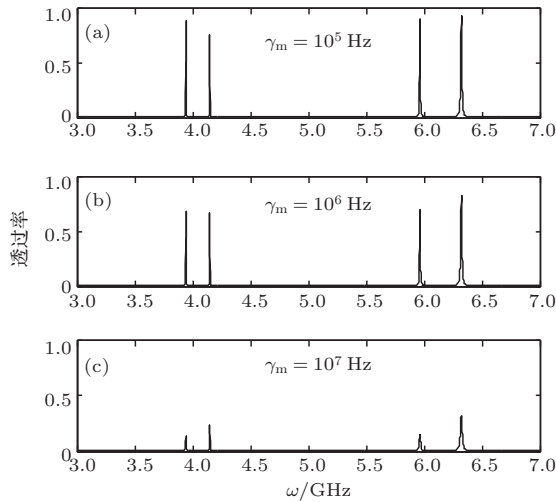


图7 双量子阱结构中磁损耗的影响, 电损耗为0

在图8中, 研究入射角变化对双量子阱结构中共振化透射谱的影响, 所取结构参数与图5(c)中一致. 为了准确反映共振透射峰在入射角变化时引起的频率移动, 定义 $\Delta\nu = \nu - \nu_0, \nu_0 = \omega_0/2\pi$ 为正入射时的频率. 从图8可以看到, 随着入射角的增大,

频率较低的模(对应图5(c)中共振隧穿模1和2)表现为正色散, 频率较大的模(对应图5(c)中共振隧穿模3和4)表现为负色散. 进一步观察图8可以看到, 随入射角的变化, 在TE和TM两偏振态中, 频率的移动都很小 ($|\Delta\nu/\nu| < 0.015$). 与之相反, 而在Bragg带隙内, 随着入射角的变化, 频率的移动却很大[13]. 利用两种单负材料组成双量子阱中透射模对入射角依赖比较弱的性质, 可以设计全向多通道滤波器.

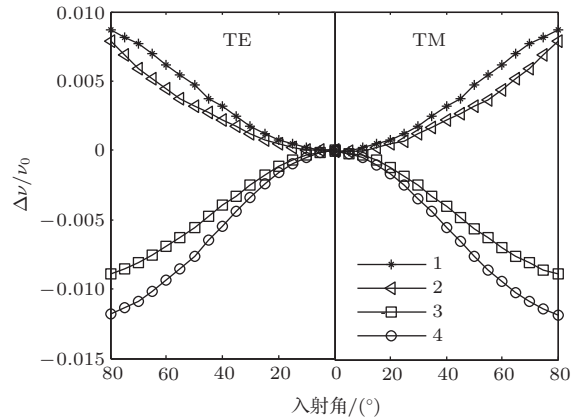


图8 不同偏振下共振峰随入射角的相对移动

4 结 论

通过传输矩阵法对由两种单负材料组成光子晶体双量子阱的隧穿特性进行了研究. 研究结果表明: 由于双量子阱之间的相互耦合作用, 导致共振隧穿峰发生双重劈裂, 通过调整双阱之间的耦合强度, 可以控制共振峰的距离和数量. 通过调节外部障碍光子晶体的周期数, 可以有效地控制共振峰的品质因子. 由于本文双量子阱结构的设计是基于单负材料的零有效相位带隙, 在该带隙中产生的共振隧穿模不同于常规的布拉格带隙, 其受入射角和光偏振模式的影响较弱. 因此, 该理论将会在全向和多通道滤波器的设计中具有重要的应用价值.

参考文献

- [1] Pendry J B 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 3966
- [2] Smith D R, Padilla W J, Vier D C, Nemat-Nasser S C, Schultz S 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 4184
- [3] Du J, Yang N, Ren D M, Chen Z L, Liu Y Y, Jiang Y Y 2011 *J. Opt. Soc. Am. B* **28** 2611
- [4] Zhang L W, Fang K, Du G Q, Jiang H T, Zhao J F 2011 *Opt. Commun.* **284** 703

- [5] Xiang Y J, Dai X Y, Wen S C, Fan D Y 2007 *J. Opt. Soc. Am. A* **24** 28
- [6] Dong L J, Jiang H T, Yang C Q, Shi Y L 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 4657 (in Chinese) [董丽娟, 江海涛, 杨成全, 石云龙 2007 物理学报 **56** 4657]
- [7] Lu C, Li W, Jiang X Y, Cao J C 2014 *Chin. Phys. B* **23** 097802
- [8] Francesco M, Andrea A 2014 *Chin. Phys. B* **23** 047809
- [9] Veselago V G 1968 *Sov. Phys. Usp.* **10** 509
- [10] Yin C P, Dong J W, Wang H Z 2009 *Eur. Phys. J. B* **67** 221
- [11] Jiang Y, Niu C, Lin D L 1999 *Phys. Rev. B* **59** 9981
- [12] Fei H M, Zhou F, Lin Y B, Liang J Q 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 074225 (in Chinese) [费宏明, 周飞, 林毅彪, 梁九卿 2011 物理学报 **60** 074225]
- [13] Jiang H T, Chen H, Li H Q, Zhang Y W, Zi J, Zhu S Y 2004 *Phys. Rev. E* **69** 066607
- [14] Lin M, Ouyang Z B, Xu J, Qiu G X 2009 *Opt. Express* **17** 5681
- [15] Fredkin D R, Ron A 2002 *Appl. Phys. Lett.* **81** 1753
- [16] Wang L G, Chen H, Zhu S Y 2004 *Phys. Rev. B* **70** 245102
- [17] Li P N, Liu Y W 2009 *Phys. Lett. A* **373** 1870
- [18] Chen Y H 2008 *J. Opt. Soc. Am. B* **25** 1794
- [19] Li W S, Luo S J, Huang H M, Zhang Q, Fu Y H 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 174101 (in Chinese) [李文胜, 罗时军, 黄海铭, 张琴, 付艳华 2012 物理学报 **61** 174101]
- [20] Kang Y Q, Zhang C M 2013 *Optik* **124** 5430
- [21] Kang Y Q, Zhang C M, Gao P, Ren W Y 2013 *J. Mod. Opt.* **60** 1021
- [22] Kang Y Q, Zhang C M, Xue C H, Cao Q Z, Ren W Y 2013 *J. Opt.* **42** 335

Resonant modes in photonic double quantum well structures with single-negative materials*

Kang Yong-Qiang^{1)2)†} Gao Peng³⁾ Liu Hong-Mei¹⁾ Zhang Chun-Min²⁾ Shi Yun-Long¹⁾

1) (Institute of Solid State Physics, Shanxi Datong University, Datong 037009, China)

2) (Department of Physics, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

3) (Tsingtao University of Science and Technology, College of Mathematical and Physical Sciences, Qingdao 266061, China)

(Received 14 September 2014; revised manuscript received 16 October 2014)

Abstract

The transmission spectra of the model of photonic double quantum well consisting of two photonic crystals with two different single-negative materials are calculated by the transfer matrix method. It is found that these resonance modes split into pairs, owing to a coupling between two photonic wells. The distance of resonant modes can be controlled by the coupling strength between the two wells. It is observed that when two photonic quantum wells are far from each other, resonance modes appear as single peak. And the quality factors of the transmittance resonance peaks can be greatly improved by increasing the period number of outer barriers. The resonance modes are affected weakly by the incident angle and polarization. The effects of the losses coming from epsilon-negative and mu-negative materials on the resonance modes are also specifically explored, respectively.

Keywords: single-negative material, double quantum well, photonic crystal

PACS: 42.70.Qs, 41.20.Jb, 73.21.Fg

DOI: 10.7498/aps.64.064207

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61307121, 11274207, 60278019) and Launching Scientific Research Funds for Doctors, China (Grant No. 2012-B-04).

† Corresponding author. E-mail: kyq_2000@sohu.com