

文章编号: 1000-7032(2014)12-1495-05

单负材料组成光子晶体的多量子阱结构

康永强*, 杨春花, 杨成全, 姜晓云, 康占成

(山西大同大学 固体物理研究所, 山西 大同 037009)

摘要: 通过传输矩阵法,对负介电常数材料和负磁导率材料组成一维光子晶体的多量子阱结构的共振隧穿特性进行了研究。结果表明,该结构中存在不受入射角和偏振模式影响的全方向共振隧穿模,其数量可以通过调节结构周期数来实现。共振峰的品质因子可以由外部障碍光子晶体的厚度比例调整。在研究单负材料损耗时,发现电损耗对低频处共振模影响大,而磁损耗对高频和低频处都有较大影响。

关键词: 单负材料; 多量子阱结构; 光子晶体

中图分类号: O431

文献标识码: A

DOI: 10.3788/fgxb20143512.1495

Photonic Crystal Multiple Quantum Well Structure with Single Negative Materials

KANG Yong-qiang*, YANG Chun-hua, YANG Cheng-quan, JIANG Xiao-yun, KANG Zhan-cheng

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

* Corresponding Author, E-mail: kyq_2000@sohu.com

Abstract: The photonic crystal multiple quantum well structure made of two kinds of single-negative materials was investigated by transfer matrix method. It is demonstrated that the resonance tunneling modes are weak dependence on incident angle and polarization. The number of the resonance modes can be controlled by adjusting the periodic structure of the constituents, and the quality factors of the resonance peaks can be greatly improved by increasing the scaling of the barrier photonic crystals. When the losses of two kinds of single negative media are taken into account, the effects on the resonance modes are striking difference.

Key words: single-negative material; multiple quantum well structure; photonic crystal

1 引 言

近年来,超材料的研究越来越引起人们的重视^[1-9]。超材料包括双负材料和单负材料^[6-7]。介电常数和磁导率均为负数的材料为双负材料,又由于其电场矢量、磁场矢量和波矢量形成左手螺旋关系,所以又称左手材料。介电常数和磁导率只有一个为负数的材料为单负材料,其中包括

负介电常数材料(ENG, $\epsilon < 0, \mu > 0$)和负磁导率材料(MNG, $\epsilon > 0, \mu < 0$)。

众所周知,基于半导体量子阱结构的各类新型装置已经投入使用。由于光子的运动具有与半导体中电子类似的性质,光子量子阱结构的研究引起了人们的重视。传统的光子量子阱是基于布拉格带隙^[10],其共振隧穿模受入射角、晶格比例和光偏振模式的影响较大,不利于实现全方向滤

收稿日期: 2014-09-25; 修订日期: 2014-10-16

基金项目: 国家自然科学基金(61307121, 11274207)资助项目

波。近来, Lin 等^[11]提出了一类由正折射率材料和双负材料组成一维光子晶体的量子阱结构,能够实现全方向多通道滤波。但是,由于双负材料的构造要比单负材料复杂得多,而且 Lakhtakia 和 Fredkin 近来发现,组合在一起的负介电常数和负磁导率材料在一定条件下可以等效为双负材料^[12],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^[13-18]。

有文献报道,负磁导率和负介电常数交替排列组成的一维光子晶体结构能形成零有效相位带隙^[15](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,有利于设计全方向滤波器。同济大学江海涛等^[15]提出了一类由磁单负材料(MNG)和电单负材料(ENG)周期排列组成的一维光子晶体单量子阱结构,并研究了其隧穿谱。但是,光子晶体单量子阱结构的隧穿峰数目不易通过结构参数来调节。本文基于零有效相位带隙^[15],提出了负介电常数和负磁导率材料组成的光子晶体多量子阱结构模型,计算了其共振隧穿模,发现该结构共振隧穿模的数量由结构的周期数控制,可以实现多通道滤波。最后,研究了单负材料损耗对共振隧穿模的影响。

2 理论模型和方法

单负材料的介电参数和磁导率通常取为 Drud 模型^[13-15]。负磁导率材料($\mu < 0, \varepsilon > 0$)表示为

$$\varepsilon_1 = 3, \mu_1 = 1 - \frac{\omega_{\text{mp}}^2}{\omega^2}, \quad (1)$$

负介电常数材料($\varepsilon < 0, \mu > 0$)表示为

$$\varepsilon_2 = 1 - \frac{\omega_{\text{ep}}^2}{\omega^2}, \mu_2 = 3, \quad (2)$$

其中, $\omega_{\text{ep}} = \omega_{\text{mp}} = 10$ GHz 是电等离子频率和磁等离子频率,是角频率。由式(1)和(2)可知,当 $\omega < 10$ 时, μ_1, ε_2 是负值,构成单负材料。文献[15]中报道,对于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,带隙宽度可以通过两种材料的厚度比例调节。根据本文所取

材料参数($k_1 = k_2$),计算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。图中实线对应于相位匹配结构($d_1 = d_2$),在中心频率 $v_c = 0.7958$ GHz 处形成两条通带;虚线对应于相位不匹配结构($d_1 \neq d_2$),形成零有效相位带(0.5 ~ 1.1 GHz)。从图中可以看到,两条通带夹在两条禁带中间。

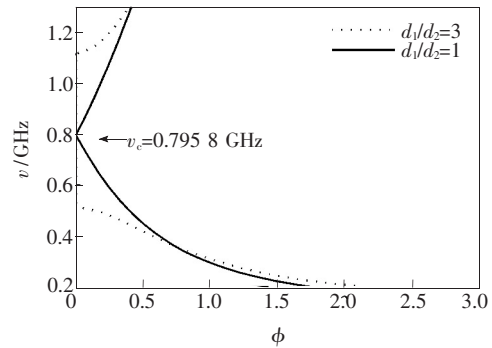


图 1 负磁导率材料(d_1)和负介电常数材料(d_2)组成的无限周期结构的色散图

Fig. 1 PBG of the infinite period repetition composed by MNG and ENG layers with the thickness of d_1 and d_2

如果将光子晶体 $(AB)_N$ 和 $(CD)_L$ 排列形成一维多量子阱结构 $((AB)_N (CD)_L)^m (AB)_N$, 其中 $(AB)_N$ 选择相位不匹配 ($d_A/d_B = 3$) 作为量子障碍,光子晶体 $(CD)_L$ 选择相位匹配结构 ($d_C = d_D$) 作为量子阱。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 。

设一单色平面波沿正 z 方向以入射角 θ 从空气入射到该多量子阱结构,对于每一层,相应的传输矩阵^[13-18]为

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

其中 $k_z^j = \omega/c \sqrt{\varepsilon_j \mu_j} \sqrt{1 - (\sin^2 \theta / \varepsilon_j \mu_j)}$ 是 z 方向上任意一层对应的波矢, c 是真空中光速。对于 TE 偏振模, $q_j = \sqrt{\varepsilon_j / \mu_j} \sqrt{1 - (\sin^2 \theta / \varepsilon_j \mu_j)}$; 对于 TM 偏振模, $q_j = \sqrt{\mu_j / \varepsilon_j} \sqrt{1 - (\sin^2 \theta / \varepsilon_j \mu_j)}$ 。一维多量子阱结构的透过率可以由传输矩阵法计算得到。

3 结果与讨论

将材料的结构参数取为 $d_A = 12 \text{ mm}$, $d_B = 4 \text{ mm}$, $d_C = d_D = 6 \text{ mm}$, 单负材料组成的多量子阱结构 $((AB)_8(CD)_5)^m(AB)_8$ 正入射时的透射谱如图 2 所示。从图中可以发现, 在零有效相位带隙 ($0.5 \sim 1.1 \text{ GHz}$) 中出现了两套共振透射峰, 一套位于高频, 一套位于低频, 并且随着周期数 $m = 1, 2, 3, 4$ 增长, 每一套透射谱分裂成 1, 2, 3, 4 条。这样我们就可以通过简单地调整周期数 m , 产生任意需要的通道数量, 来实现多通道滤波。

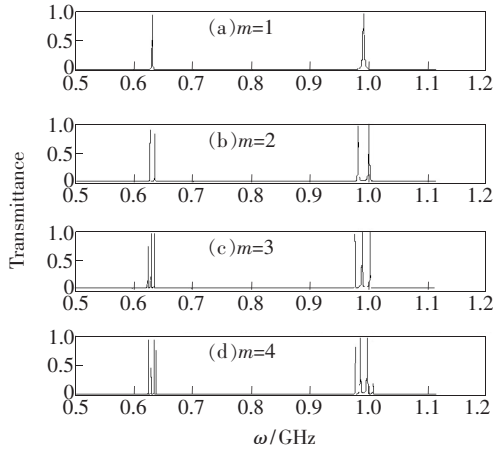


图 2 单负材料多量子阱结构 $((AB)_8(CD)_5)^m(AB)_8$ 的透射谱。(a) $m=1$; (b) $m=2$; (c) $m=3$; (d) $m=4$ 。

Fig. 2 Transmittance spectra of $((AB)_8(CD)_5)^m(AB)_8$. (a) $m=1$. (b) $m=2$. (c) $m=3$. (d) $m=4$.

图 3 所示为单负材料组成光子多量子阱结构 $((AB)_8(CD)_5)^3(AB)_8$ 受入射角和偏振的影响。从图中可以看到, 在入射角从 $0^\circ \sim 60^\circ$ 的变化过程中, 无论是 TE 偏振还是 TM 偏振, 其共振隧穿模的位置几乎不变。利用零有效相位带隙内的这种全向模特性, 可用来设计全向多通道滤波器。

为了研究障碍光子晶体缩放比例对共振透射谱的影响, 我们定义比例因子 $\rho = d/d_0$ 。其中, d_0 对应缩放前障碍光子晶体的尺寸 ($d_A = 12 \text{ mm}$, $d_B = 4 \text{ mm}$), d 对应缩放后障碍光子晶体的尺寸。正入射条件下, 单负多量子阱结构 $((AB)_8(CD)_5)^3(AB)_8$ 的透射谱随障碍光子晶体尺寸的变化如图 4 所示。可以发现, 障碍光子晶体的厚度比例变化对透射峰的位置几乎没有影响, 仅仅影响的是透射峰的品质因子。随着障碍光子晶体厚度比例减小, 品质因子变低。而由常规电介质材料构成的

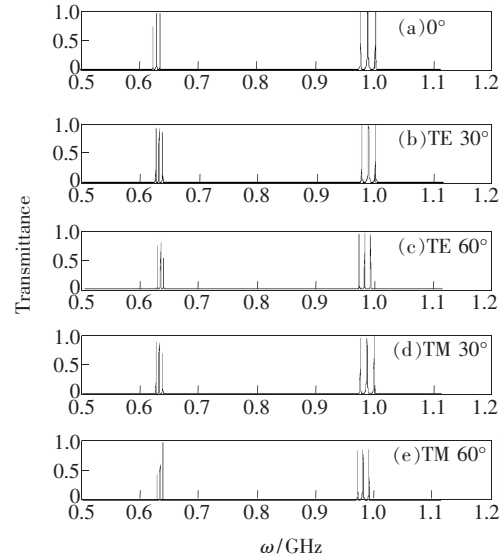


图 3 单负材料多量子阱结构 $((AB)_8(CD)_5)^3(AB)_8$ 受入射角和偏振的影响。(a) $\theta = 0^\circ$; (b) TE 偏振下, $\theta = 30^\circ$; (c) TE 偏振下, $\theta = 60^\circ$; (d) TM 偏振下, $\theta = 30^\circ$; (e) TM 偏振下, $\theta = 60^\circ$ 。

Fig. 3 Transmittance spectra of $((AB)_8(CD)_5)^3(AB)_8$ at different incident angle for TE and TM modes. (a) $\theta = 0^\circ$. (b) $\theta = 30^\circ$ for TE modes. (c) $\theta = 60^\circ$ for TE modes. (d) $\theta = 30^\circ$ for TM modes. (e) $\theta = 60^\circ$ for TM modes.

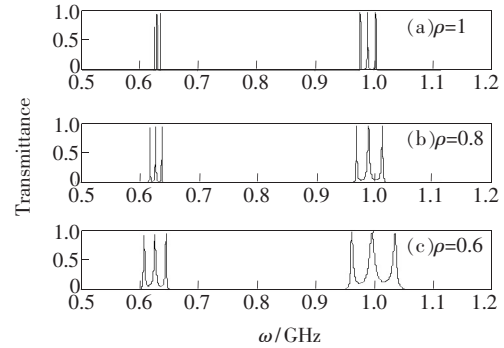


图 4 正入射时, 单负材料光子晶体多量子阱结构 $((AB)_8(CD)_5)^3(AB)_8$ 的透射谱随障碍光子晶体厚度比例的变化。(a) $\rho = 1$; (b) $\rho = 0.8$; (c) $\rho = 0.6$ 。

Fig. 4 Transmittance spectra of $((AB)_8(CD)_5)^3(AB)_8$ at different scaling of barrier PC for normal incidence. (a) $\rho = 1$. (b) $\rho = 0.8$. (c) $\rho = 0.6$.

光子晶体量子阱结构的共振模受障碍光子晶体尺寸缩放的影响较大^[12]。

在单负材料中, 损耗是不可避免的。对于多量子阱结构 $((AB)_8(CD)_5)^3(AB)_8$, 考虑损耗时的材料参数的 Drud 模型^[13-14] 为

$$\begin{aligned} \mu_1 &= \mu_a - \omega_{mp}^2 / (\omega^2 + i\omega\gamma_m) \\ \varepsilon_2 &= \varepsilon_b - \omega_{ep}^2 / (\omega^2 + i\omega\gamma_e) \end{aligned} \quad (4)$$

其中, γ_m 、 γ_e 分别为磁损耗和电损耗因子。图 5 和图 6 所示为电损耗和磁损耗对多量子阱结构 $((AB)_8(CD)_5)^3(AB)_8$ 透射谱的影响。当研究电损耗影响时,磁损耗取为 0,如图 5 所示,发现电损耗越大,透过率越低,而且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。当研究磁损耗的影响时,电损耗取为 0,如图 6 所示,发现磁损耗对高频率和低频率处的透射峰影响都比较大,同样磁损耗越

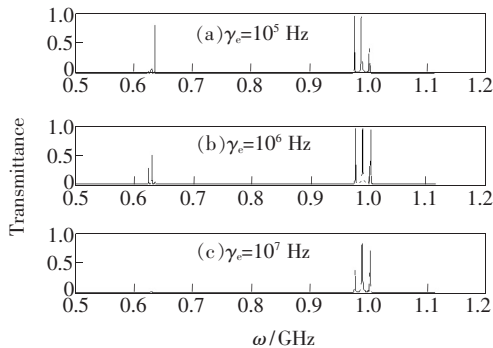


图 5 正入射时,电损耗对单负材料多量子阱结构 $((AB)_8(CD)_5)^3(AB)_8$ 透射谱的影响,磁损耗取为 0。(a) $\gamma_e = 10^5$ Hz; (b) $\gamma_e = 10^6$ Hz; (c) $\gamma_e = 10^7$ Hz。

Fig. 5 Transmittance spectra of $((AB)_8(CD)_5)^3(AB)_8$ at different values of the electric losses factor, $\gamma_m = 0$. (a) $\gamma_e = 10^5$ Hz. (b) $\gamma_e = 10^6$ Hz. (c) $\gamma_e = 10^7$ Hz.

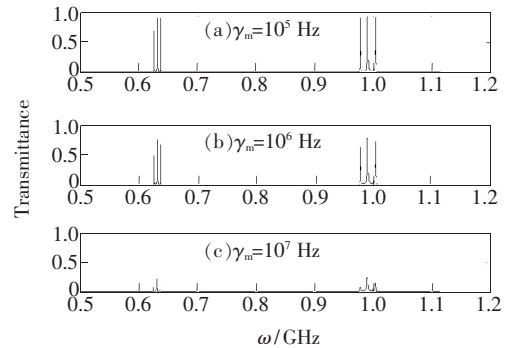


图 6 正入射时,磁损耗对单负材料多量子阱结构 $((AB)_8(CD)_5)^3(AB)_8$ 透射谱的影响,电损耗取为 0。(a) $\gamma_m = 10^5$ Hz; (b) $\gamma_m = 10^6$ Hz; (c) $\gamma_m = 10^7$ Hz。

Fig. 6 Transmittance spectra of $((AB)_8(CD)_5)^3(AB)_8$ at different values of the magnetic losses factor, $\gamma_e = 0$. (a) $\gamma_m = 10^5$ Hz. (b) $\gamma_m = 10^6$ Hz. (c) $\gamma_m = 10^7$ Hz.

大,透过率越低。

4 结 论

负介电常数材料和负磁导率材料组成的光子晶体多量子阱结构是基于零有效相位带隙,其共振隧穿模受入射角和偏振模式影响较弱,可以实现全方向多通道滤波。通过调整外部障碍光子晶体的厚度比例,可以改变共振模的品质因子。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都有较大影响,且不论哪种损耗都使得透过率降低。

参 考 文 献:

- [1] Pendry J B. Negative refraction makes a perfect lens [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, 85(18):3966-3969.
- [2] Smith D R, Padilla W J, Vier D C, et al. Composite medium with simultaneously negative permeability and permit [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, 84(18):4184-4187.
- [3] Zhang C M, Gao P, Sun M Z, et al. Analysis of the resonant frequency of the octagonal split resonant rings with metal wires [J]. *Appl. Opt.*, 2010, 49(29):5638-5644.
- [4] Veselago V G. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ε and μ [J]. *Sov. Phys. Usp.*, 1968, 10(4):509-514.
- [5] Zhang S, Fan W, Malloy K J, et al. Near-infrared double negative metamaterials [J]. *Opt. Express*, 2005, 13(13):4922-4930.
- [6] Pendry J B, Holden A J, Stewart W J, et al. Extremely low frequency plasmons in metallic mesostructures [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1996, 76(25):4773-4766
- [7] Su A, Zhang N. Transmission spectrum characteristics of single negative materials with one dimensional photonic crystal [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2010, 31(3):439-443 (in Chinese).
- [8] Hang J F, Yuan X D, Qin S Q. Tunable terahertz and optical metamaterials [J]. *Chin. Opt.* (中国光学), 2014, 7(3):349-364 (in Chinese).

- [9] Pan X C, Yao Z H, Xu X L, *et al.* Fabrication, design and application of THz metamaterials [J]. *Chin. Opt.* (中国光学), 2013, 6(3):283-296 (in Chinese).
- [10] Qiao F, Zhang C, Wan J, *et al.* Photonic quantum-well structures: Multiple channeled filtering phenomena [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2000, 77(23):3698-370.
- [11] Lin M, Ouyang Z B, Xu J, *et al.* Omnidirectional and multi-channel filtering by photonic quantum wells with negative-index materials [J]. *Opt. Express*, 2009, 17(7):5681-5866.
- [12] Fredkin D R, Ron A. Effectively left-handed (negative index) composite material [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, 81(10):1753-1755.
- [13] Kang Y Q, Zhang C M, Gao P, *et al.* Electromagnetic resonance tunneling in a single-negative sandwich structure [J]. *J. Mod. Opt.*, 2013, 60(13):1021-1026.
- [14] Kang Y Q, Zhang C M, Xue C H, *et al.* Wannier stark ladder in one-dimensional photonic crystal coupled microcavity containing indefinite metamaterials [J]. *J. Opt.*, 2013, 42(4):335-340.
- [15] Jiang H T, Chen H, Li H Q, *et al.* Properties of one-dimensional photonic crystals containing single-negative materials [J]. *Phys. Rev. E*, 2004, 69(6):066607-1-5.
- [16] Wang L G, Chen H, Zhu S Y. Omnidirectional gap and defect mode of one-dimensional photonic crystals with single-negative materials [J]. *Phys. Rev. B*, 2004, 70(24):245102-1-6.
- [17] Li P N, Liu Y W. Multichannel filtering properties of photonic crystals consisting of single-negative materials [J]. *Phys. Lett. A*, 2009, 373(21):1870-1873.
- [18] Chen Y H, Dong J W, Wang H Z. Omnidirectional resonance modes in photonic crystal heterostructures containing single-negative materials [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2006, 23(10):2237-2240.



康永强(1979 -),男,山西大同人,博士,讲师,2014年于西安交通大学获得博士学位,主要从事光子晶体、超材料等方面的研究。

E-mai: kyq_2000@sohu.com