

单负材料一维光子晶体的透射谱特性

苏 安, 张 宁

(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单负材料一维光子晶体 $(AB)_m(ADBDB)_n(AB)_m A$ 的透射谱, 发现: 透射谱中出现 2 个共振隧穿模, 其位置和间距可由周期数 m 或 n , 以及介质层厚度 d 调节控制。改变 m , 会出现 2 个恒定间距的共振隧穿模; 改变 d_A , 共振隧穿模间距增大, 且当 $d_A \geq 25$ nm 时, 间距增大加剧; 改变 n , 共振隧穿模逐渐趋于简并, 当 $n \geq 6$ 时, 两隧穿模合二为一; 改变 d_D , 两共振隧穿模亦逐渐趋于简并, 当 $d_D \geq 20$ nm 时, 两隧穿模亦合二为一。这些特性可为利用光子晶体设计可调性高品质单通道、双通道滤波器提供参考。

关键词: 单负材料; 传输矩阵; 共振隧穿; 滤波

中图分类号: O431; O437

PACS: 42.70.Qs

PACC: 4270Q

文献标识码: A

1 引 言

光子晶体^[1,2]是一种介电常量周期性排列的人工微结构光学材料, 它的最根本特性是存在光子带隙^[1~4]。这种特异材料 (metamaterials) 的光子晶体由于具有特殊的电磁性质和潜在的应用价值, 已经成为当前研究的热点^[5~11]。特异材料一般有双负材料和单负材料: 双负材料由于同时具有负的介电常量和负的磁导率 ($\epsilon < 0, \mu < 0$), 因此具有负的折射率^[12]。电磁波在其中传播, 波矢方向和能流方向相反, 因而双负材料又称为左手材料, 这种材料能够克服光的衍射极限, 可实现超透镜聚焦, 制作完美透镜^[13]。另外, 这种材料还具有共振隧穿效应。单负材料的磁导率 μ 和介电常量 ϵ 其中有一个为负值的材料, 其中 $\epsilon < 0$ 的材料称为负 ϵ 材料 (epsilon-negative material, ENG), 而 $\mu < 0$ 的材料称为负 μ 材料 (mu-negative material, MNG)^[14]。由于在单负材料中的波矢为复数, 因而单负材料中只存在迅衰场, 它对电磁波是不透明的。然而, 由负 ϵ 材料和负 μ 材料交替生长形成一维光子晶体却存在与入射角和极化无关的共振隧穿模^[2,7,15~17]。

基于单负材料组成光子晶体的这种特殊物理特性, 本文针对由两种单负材料构成的一维光子

晶体 $(AB)_m(ADBDB)_n(AB)_m A$ 模型, 利用传输矩阵法^[18] 理论通过 Matlab 软件编程计算模拟其透射能带谱, 发现它的透射谱具有 2 个共振隧穿模, 两个共振隧穿模随着重复周期数 m, n 和介质厚度 d 的变化而发生简并或分裂, 即共振隧穿模的位置、间距和条数可调。另外, 在各种参量变化过程中, 两共振隧穿模的对称中心频率位置只产生微小移动。此光子晶体模型的透射谱特性为单负材料光子晶体在光学滤波器的设计和实际应用提供了理论参考, 并具有巨大的应用前景。

2 光子晶体模型和传输矩阵法

2.1 光子晶体模型

由负磁导率 μ 和负介电常量 ϵ 交替生长形成一维光子晶体 $(AB)_m(ADBDB)_n(AB)_m A$, 其中 A 和 B (或 D) 分别表示负磁导率材料和负介电常量材料, 此处把 D 看作缺陷, m, n 均表示重复周期数。采用传输线模型^[19] 来描述各向同性单负材料, 则负 μ 材料 A 的介电常量和磁导率分别为

$$\epsilon_A = \epsilon_a, \mu_A = \mu_a - \frac{\alpha}{\omega^2}, \quad (1)$$

负 ϵ 材料 B (或 D) 的介电常数和磁导率分别为

$$\epsilon_{B(D)} = \epsilon_b - \frac{\beta}{\omega^2}, \mu_{B(D)} = \mu_b, \quad (2)$$

收稿日期: 2009-11-25; 修订日期: 2010-01-24

基金项目: 国家自然科学基金(50661001); 广西自然科学基金(桂科自 0832029); 河池学院科研基金(2008A-N005)资助项目

作者简介: 苏安(1973-), 男, 广西都安人, 主要从事光子晶体的研究。

E-mail: suan3283395@163.com

以上的色散关系可以在特殊的集总电容-电感结构上实现^[19],在式(1)、(2)中, ω 为频率,单位为GHz, α 和 β 为可调的电路参数, ε_a, μ_a 和 ε_b, μ_b 为常量。针对 $(AB)_m(ADBDB)_n(AB)_m A$ 光子晶体模型,各参量分别取值为 $\varepsilon_a = \mu_b = 4, \mu_a = \varepsilon_b = 1, \alpha = \beta = 100, d_A = 18 \text{ mm}, d_B = 6 \text{ mm}, d_D = 13 \text{ mm}$ 。

2.2 传输矩阵法

考虑一电场 E 沿 y 轴的横电波(TE波)从空气中以入射角为 θ 入射到光子晶体上,则入射电磁波的波矢 k 位于 xz 平面内,位于 z 和 $z + \Delta z$ 处的电场分量和磁场分量可以通过下面的传输矩阵来连接

$$\mathbf{M}_j(\Delta z, \omega) = \begin{pmatrix} \cos(k_z^{(j)} \Delta z) & -\frac{1}{\eta_j} \sin(k_z^{(j)} \Delta z) \\ \eta_j \sin(k_z^{(j)} \Delta z) & \cos(k_z^{(j)} \Delta z) \end{pmatrix}, \quad (3)$$

其中 $j = A, B(D)$ 分别代表负 μ 材料层和负 ε 材料层, $k_z^{(j)} = (\omega/c) \sqrt{\varepsilon_j \sqrt{\mu_j} \sqrt{1 - \sin^2 \theta / \varepsilon_j \mu_j}}$ 为第 j 层波矢 $k^{(j)}$ 的 z 分量, c 为真空中的光速, $\eta_j = \sqrt{\varepsilon_j} / \sqrt{\mu_j} \sqrt{1 - \sin^2 \theta / \varepsilon_j \mu_j}$ 。利用电磁场的切向分量在界面上连续的条件,并考虑光子晶体置于空气中($n_0 = 1$),由此可以得到透射系数^[18]为

$$t(\omega) = \frac{2 \cos \theta}{(u_{11} + u_{22}) \cos \theta + i(u_{12} \cos^2 \theta - u_{21})}, \quad (4)$$

其中 $u_{ab} (a, b = 1, 2)$ 是连接入射端和出射端总的传输矩阵 $U(z_n, \omega) = \prod_{i=1}^n \mathbf{M}_j(d_j, \omega)$ 的矩阵元。

3 计算结果与分析

3.1 周期数 $m = 1 \sim 6$ 时的透射谱

考虑光垂直入射的情况,固定内层光子晶体(ADBDB)_n的周期数 $n = 3$,外层光子晶体(AB)_m的周期数 $m = 1 \sim 6$ 递增,其他参量保持上述值不变,通过Matlab编程计算,可模拟出一维光子晶体(AB)_m(ADBDB)₃(AB)_mA的透射能带谱,结果如图1所示。

由图1可知,当 $m = 1$ 时,在禁带中 $0 \sim 1.6$ GHz频率范围内出现了一条很宽的部分透射通带,且随着 m 的递增,透射带的透射率迅速增加到1并出现分裂的趋势。当 $m = 3$ 时,透射带以 0.7117972 GHz频率处为对称中心分裂为两个较宽的透射峰,若 m 继续增大,两透射峰逐渐变

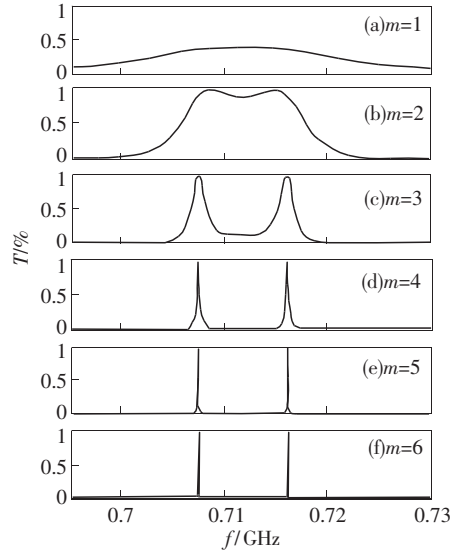


图1 $m = 1 \sim 6$ 时光子晶体 $(AB)_m(ADBDB)_3(AB)_m A$ 的透射能带谱

Fig. 1 Transmission spectra for photonic crystals $(AB)_m - (ADBDB)_3(AB)_m A$ with $m = 1 \sim 6$

得尖锐,形成了两共振隧穿模;当 $m \geq 5$,两共振隧穿模的频宽(粗细)和位置趋于稳定,分别处于 0.7074402 GHz和 0.7161561 GHz频率处,间距恒为 0.0087159 GHz。利用透射谱的这种特性可用来设计微波范围内的高品质的宽带单通道、双通道滤波器和超窄带双通道滤波器等。

此透射谱中出现的共振隧穿模源于单负材料中迅衰场的界面局域模式^[20]。由于在两种单负材料构成的异质结构界面的两侧介电常数和磁导率都发生异号,为了满足边界条件,电磁场必然大部分局域在界面上,故形成特殊的界面模式。在图1中,当重复周期数 $m = 1$ 时, $(AB)_1$ 与(ADBDB)₃,(ADBDB)₃与 $(AB)_1 A$ 分别形成界面局域模,但由于介质层 $(AB)_1$ 或 $(AB)_1 A$ 相对光子晶体(ADBDB)₃而言非常薄,所形成的界面模局域程度非常小,因此两界面模处于一种简并状态,如图1(a)所示的一条很宽的部分透射带。当 m 逐渐增加时,则两界面局域模的逐渐增强,如图1(b)的 $m = 2$ 时,通带透射率剧增到1并出现分裂趋势,至图1(c)的 $m = 3$ 时分裂成两条通带,即出现共振隧穿现象。当 $m \geq 6$ 时两界面模局域已经非常强,故两个共振隧穿模变得尖锐。另外,如图1(c)~(f)所示,两共振隧穿模的位置保持不变,且它们之间的距离恒为 0.0087159 GHz,由此可见,共振隧穿模的频率位置不随着 m 值改变而改

变,原因是 $(AB)_m$ 的厚度随着 m 递增而增大,但 $(ADBDB)_3$ 没有发生变化,由此仅导致界面模本身的强度增强,而不影响界面模之间的相互作用,故两界面的间距保持不变。

3.2 介质 A 的厚度 d_A 变化的透射谱

固定光子晶体 $(AB)_m$ 与 $(ADBDB)_n$ 的周期数分别为 $m=5$ 和 $n=3$,其他参量不变的情况下,介质 A 层的厚度 d_A 分别为 10, 13, 15, 18, 20, 25 mm 时,计算模拟得光子晶体 $(AB)_5(ADBDB)_3-(AB)_5A$ 的透射能带谱如图 2 所示。

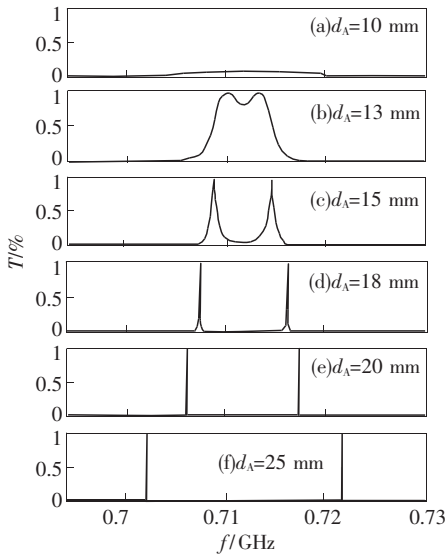


图2 $d_A = 10 \sim 25$ mm 时光子晶体 $(AB)_5(ADBDB)_3-(AB)_5A$ 的透射能带谱

Fig. 2 Transmission spectra for photonic crystals $(AB)_5-(ADBDB)_3(AB)_5A$ with $d_A = 10 \sim 25$ mm

从图 2 可知,当 $d_A = 10$ mm,在禁带中出现了—个透射率较低的宽透射通带,且透射率比图 1 (a) 的低;随着 d_A 的增大,透射带产生分裂亦形成两个共振隧穿模,且隧穿模以 0.711 910 7 GHz 频率处为对称中心向两侧移动,当 $d_A = 20$ mm 时,形成两个频宽超窄的共振隧穿模,当 d_A 的再继续增大时,两共振隧穿模的间距随之变宽。

形成此透射谱的原因与 3.1 类似,当 $d_A \leq 10$ mm 时, $(AB)_5$ 、 $(ADBDB)_3$ 和 $(AB)_5A$ 的厚度都较小,故形成的两个界面局域模局域程度也较小,所以形成图 2(a) 所示简并的能级;随着 d_A 的增大,界面局域模也随之增强,于是能级产生了分裂,从而形成共振隧穿模,并且两个共振隧穿模随着局域的增强逐渐变得锋锐。当 $d_A \geq 25$ mm 时,由于 A 层厚度的增加致使两界面模强度快速增

加,因此两界面模之间的相互作用也随之快速增强,于是出现两共振隧穿模的间距逐渐增大。

3.3 周期数 $n=1 \sim 6$ 时的透射谱

固定光子晶体 $(AB)_m$ 的周期数 $m=5$,其他参量不变,当 $n=1 \sim 6$ 时光子晶体 $(AB)_5(ADBDB)_n(AB)_5A$ 的透射能带谱如图 3 所示。

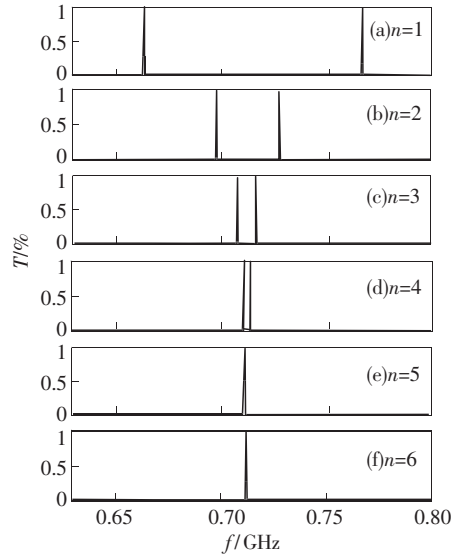


图3 $n=1 \sim 6$ 时光子晶体 $(AB)_5(ADBDB)_n(AB)_5A$ 的透射能带谱

Fig. 3 Transmission spectra for photonic crystals $(AB)_5-(ADBDB)_n(AB)_5A$ with $n=1 \sim 6$

从图 3 可知,当 $n=1$ 时,带隙中出现两个分布于禁带中心(0.711 762 5 GHz)两侧的共振隧穿模,两者间距为 0.102 397 0 GHz;随着 n 增加,共振隧穿模向禁带中心靠拢呈现简并的趋势,当 $n \geq 6$ 时,两模在禁带中心 0.711 762 5 GHz 处简并成单模,而且从双模演变为单模的过程中,共振隧穿模即透射峰都是超精细的,占的频带极窄。利用该光子晶体的这种特性,可设计具有可调性的单、双通道转换功能的超窄带光学滤波器,具有较高的理论和应用价值。

此透射谱中两共振隧穿模的出现源于 $(AB)_5$ 与 $(ADBDB)_n$ 的界面和 $(ADBDB)_n$ 与 $(AB)_5A$ 界面的局域共振耦合作用。共振隧穿模的简并可以用固体物理中的紧束缚模型理论^[7,20,21]来解释,根据固体物理的紧束缚模型理论可知,固体的能带是由近邻原子波函数的交叠积分决定,交叠越少,能带就越窄,相反,交叠越多,能带就越宽^[21~23]。类似的,在单负材料光子晶体中,两种异质结构的波函数交叠程度就决定了能带的宽

度,进而影响共振隧穿模的简并与分裂。由此可知,当 $n=1$,与结构 ADBDB 相邻的两个界面模距离较小,两界面模的波函数交叠程度较大,导致耦合作用较大,所以两隧穿模之间的距离较大。随着 n 的递增,界面模距离增大,而波函数交叠程度减少,致使耦合作用减小,故两共振隧穿模的发生简并,形成了单通道共振隧穿模。

3.4 介质 D 的厚度 d_D 变化的透射谱

固定光子晶体 $(AB)_m$ 与 $(ADBDB)_n$ 的周期数分别为 $m=5$ 和 $n=3$,其他参量不变的情况下,介质层 D 的厚度 d_D 分别为 3, 6, 10, 13, 20, 25 mm 时,计算模拟得光子晶体 $(AB)_5 (ADBDB)_3 - (AB)_5 A$ 的透射能带谱如图 4 所示。

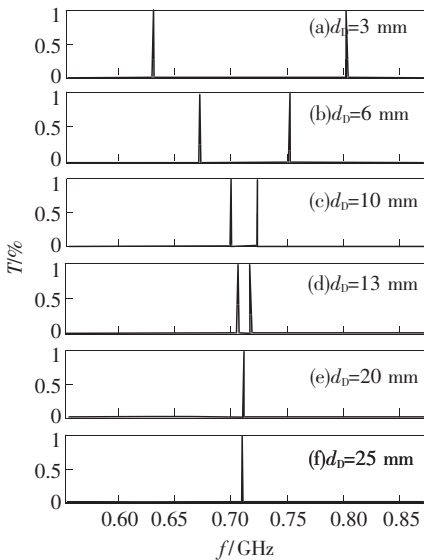


图 4 $d_D = 3 \sim 25$ 时光子晶体 $(AB)_5 (ADBDB)_3 (AB)_5 A$ 的透射能带谱

Fig. 4 Transmission spectra for photonic crystals $(AB)_5 - (ADBDB)_3 (AB)_5 A$ with $d_D = 3 \sim 25$ mm

从图 4 可知,当 $d_D = 3$ mm 时,禁带中亦出现两个分布于禁带中心(0.711 810 0 GHz)两侧的共振隧穿模,两者的位置与图 3(a)中两隧穿模的位置不同,其模间距为 0.172 650 GHz。随着 d_D 的增大,两共振隧穿模同样出现简并的趋势,当

$d_D \geq 20$ mm,双模简并成单模,同样具备单、双通道可转换并具可调性的光学滤波特性。

出现此透射谱的原因与 3.3 相似,当 $d_D = 3$ mm 时, $(AB)_5$ 与 $(ADBDB)_3$ 的界面模和 $(ADBDB)_3$ 与 $(AB)_5 A$ 的界面模间距就很小,波函数产生严重交叠,导致两界面模耦合作用较大,故出现两分立的共振隧穿模。随着 d_D 的增大,两界面模之间的距离增大,与 3.3 类似,亦引起两界面模的波函数交叠程度减小,耦合作用减弱,导致双共振隧穿模简并为单共振隧穿模。

另外,在单负材料光子晶体 $(AB)_m (ADBDB)_n (AB)_m A$ 随重复周期数 m 、介质 A 的厚度 d_A 、重复周期数 n 以及介质 D 的厚度 d_D 变化的透射能带谱研究过程中,还发现不论是单透射带还是双透射带,或是在双共振隧穿模的透射谱中,禁带中心频率位置随上述参量的改变而在 0.71 GHz 附近微小移动。如图 1 和图 2 的对称中心(禁带中心)位于 0.71 GHz 频率附近,而图 3 和图 4 中两共振隧穿模简并于 0.71 GHz 附近。

4 结 论

由两类单负材料构成的光子晶体 $(AB)_m - (ADBDB)_n (AB)_m A$ 的透射能带谱,当独立改变重复周期数 m 或介质层 A 的厚度 d_A 时可分别得到一个简并透射带,随两参数的增加出现两个分立的共振隧穿模,且当参数增大到一定数值后,共振隧穿模的频宽(尖锐程度)不再变化;当独立改变重复周期数 n 或介质 D 的厚度 d_D 时,可分别得到两个分立的共振隧穿模,且随此两参数的增大两隧穿模逐步简并为单隧穿模;在各参量变化过程中,不论出现分裂还是简并现象,透射谱的中心仅在 0.71 GHz 附近微小移动。该单负材料光子晶体展现的透射谱分裂、简并的隧穿模可调性特性,为光子晶体设计微波范围内的可调性单通道、双通道及宽带、窄带光学滤波器提供理论指导,并具有潜在的应用前景。

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] Su An, Gao Yingjun, Jiao Meina, *et al.* Transmission spectrum of photonic crystal quantum-well structure for realizable odd-passage filter [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2009, **30**(3):394-398 (in Chinese).
- [4] Su An, Gao Yingjun. Filter characteristics of one-dimensional photonic crystal with complex dielectric constant [J]. *Chin. J. Lasers* (中国激光), 2009, **36**(6):1535-1538 (in Chinese).
- [5] Shelby R A, Smith D R, Schultz S. Experimental verification of a negative index of refraction [J]. *Science*, 2001, **292**(5514):77-79.
- [6] Alù A, Engheta N. Guided modes in a waveguide filled with a pair of single-negative (SNG), double-negative (DNG), and/or double-positive (DPS) layers [J]. *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, 2004, **52**(1):199-210.
- [7] Deng Xinhua, Liu Nianhua, Liu Genquan. Frequency response of photonic hetero structures consisting of single-negative materials [J]. *Acta Phys. Sinica* (物理学报), 2007, **56**(12):7280-7285 (in Chinese).
- [8] Wang Zhengping, Wang Cheng. Transmission spectrum of one-dimensional “Chirped” photonic crystals containing negative refraction materials [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2008, **29**(2):221-224 (in Chinese).
- [9] Li Hongtao, Shao Mingzhu, Luo Shiyu. Band structure of one-dimensional photonic crystal with dielectric constant as a sine-squared function in coordinate space [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2008, **29**(2):229-232 (in Chinese).
- [10] Chen Haibo, Gao Yingjun, Hu Sumei. Properties of mirror symmetrical photonic crystals of dielectric constant defect layer with imaginary part [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2008, **29**(2):233-236 (in Chinese).
- [11] Wang Daobin, Hou Shanglin, Ren Guodong, *et al.* Band structure of Suzuki-phase photonic crystal [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2008, **29**(5):885-889 (in Chinese).
- [12] Smith D R, Kroll N. Negative refractive index in left-handed materials [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, **85**(14):2933-2936.
- [13] Pendry J B. Negative refraction makes a perfect lens [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, **85**(14):3966-3969.
- [14] Chen Xianfeng, Shen Xiaoming, Jiang Meiping, *et al.* The transmission properties of periodic slabs compose of single-negative materials [J]. *Laser Journal* (激光杂志), 2008, **29**(4):73-74 (in Chinese)
- [15] Guan G S, Jiang H T, Li H Q, *et al.* Tunneling modes of photonic heterostructures consisting of single-negative materials [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **88**(21):211112-1-3.
- [16] Jiang H T, Chen H, Zhu S Y. Localized gap-edge fields of one-dimensional photonic crystals with an ϵ -negative and a μ -negative defect [J]. *Phys. Rev. E*, 2006, **73**(4):046601-1-5.
- [17] Dong Lijuan, Jiang Haitao, Yang Chengquan, *et al.* Impurity modes of one-dimensional photonic crystals containing single-negative materials [J]. *Acta Photonica Sinica* (光子学报), 2007, **36**(12):2248-2251 (in Chinese).
- [18] Liu N H, Zhu S Y, Chen H, *et al.* Superluminal pulse propagation through one-dimensional photonic crystals with a dispersive defect [J]. *Phys. Rev. E*, 2002, **65**(4):046607-1-8.
- [19] Eleftheriades G V, Iyer A K, Kremer P C. Planar negative refractive index media using periodically L3/C loaded transmission lines [J]. *IEEE Trans. Microwave Theory Techn.*, 2002, **50**(12):2702-2712.
- [20] 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.
- [21] Huang Kun. *Solid-state Physics* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2003, 189-202.
- [22] Cai Xuhong, Lin Xusheng, Shi Quan, *et al.* Resonant frequency shift in coupled photonic crystal defects described by the tight-binding method [J]. *Acta Physica Sinica* (物理学报), 2007, **56**(5):2742-2746 (in Chinese).
- [23] Huang Zhihong, Xie Yingmao. Defect modes in photonic crystals with negative refractive index structural defects [J]. *J. Nanchang University* (Natural Science) (南昌大学学报,自然科学版), 2006, **30**(5):459-462 (in Chinese).

Transmission Spectrum Characteristics of Single-negative Materials with One-dimensional Photonic Crystal

SU An, ZHANG Ning

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

Abstract: By means of the transfer matrix method, transmission spectra characteristics of single-negative materials with one-dimensional photonic crystal $(AB)_m(ADBDB)_n(AB)_m A$ was researched, and the results showed that the location and space of two resonant tunneling modes can be adjustably controlled by the number of period m or n , and the thickness d of medium layers. Changing m , two resonant tunneling modes of constant space show up; changing d_A , the space of them increases, and the space increases more severely when $d_A \geq 25$ nm; changing n , the two resonant tunneling modes tend to degenerate and become one unit when $n \geq 6$; changing d_D , they tend to degenerate and become one unit when $d_D \geq 20$ nm. These characteristics can provide references for designing the adjustable high-quality single-channel and double-channel filters.

Key words: single-negative materials; transfer matrix; resonant tunneling modes; filter

CLC number: O431; O437

PACS: 42.70.Qs

PACC: 4270Q

Document code: A