

文章编号: 1000-7032(2018)04-0541-06

含各向异性左手材料一维光子晶体微腔的 Wannier-Stark 态

康永强^{1,2}

(1. 山西大同大学 固体物理研究所, 山西 大同 037009; 2. 西安梦溪笔谈信息科技有限公司, 陕西 西安 710049)

摘要: 通过传输矩阵方法,研究了含各向异性左手材料的一维光子晶体耦合微腔结构。结果表明,该结构中存在两类微带,一类位于常规的 Bragg 带隙,另一类位于零均值折射率带隙。当腔的厚度发生调制时,两类微带变成两类 Wannier-Stark 态。耦合微腔厚度梯度因子增大时,两类带隙中 Bragg 振荡周期都减小,而且透过率降低。

关键词: 各向异性; 左手材料; 光子晶体

中图分类号: O431

文献标识码: A

DOI: 10.3788/fgxb20183904.0541

Wannier-Stark Ladder in One Dimension Photonic Crystal Couple Microcavity with Anisotropic Left Handed Materials

KANG Yong-qiang^{1,2}

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

2. Xi'an Mengxibitan Information Technology Limited Company, Xi'an 710049, China)

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

Abstract: One dimension photonic crystal coupled microcavity structure with anisotropic left handed materials is investigated by means of the transfer matrix method. It is shown that two kinds of minibands are formed in the structure. One is conventional Bragg miniband, the other is zero mean refractive index miniband. When modulating the thickness of the cavity, two type minibands turn into two type of Wannier-Stark ladder. The transmission and period of oscillation are found to decrease with the increasing gradient factor.

Key words: anisotropic; left handed materials; photonic crystal

1 引 言

2000年,Smith成功制造出来第一块左手材料^[1-4],使得左手材料迅速成为科学家们的研究热点^[5-6]。但实际中,各向同性的左手材料制作起来比较困难,因为人工制备的特异性材料多是由两种子结构(金属谐振环阵列和金属细导线阵列)组合在一起实现负的介电常数和负的

磁导率,所以人工制备的左手材料多是各向异性的,或者说是单轴各向异性的。1968年,Veselago在其论文中首次提到各向异性左手材料概念^[7]。Smith对各向异性左手介质进行了系统的描述,并命名主轴上不同符号的介质为不确定媒质(Indefinite media),将不确定媒质分为4类,来表征其切向波矢量,从而代表不同的电磁波传播特性^[8]。各向异性左手材料要描述其

收稿日期: 2017-08-15; 修订日期: 2017-10-12

基金项目: 山西省自然科学基金(201701D221096); 大同市基础 Research 计划(2017131); 博士科研启动基金(2014-B-04)资助项目 Supported by Shanxi Provincial Natural Science Foundation(201701D221096); Science and Technology Project of Datong City (2017131); Launching Scientific Research Funds for Doctors(2014-B-04)

介电常数和磁导率需要用张量形式表示。相对于各向同性左手材料,各向异性左手材料更容易制作。在特定条件下,各向异性左手材料可以代替各向同性左手材料呈现出奇特的电磁特性^[9-11],例如含各向异性左手材料的光子晶体中存在类似于各向同性左手材料和右手材料组成光子晶体的零均值折射带隙^[12-15]。

光子晶体中存在有许多与电子晶体中类似的现象^[16-17]。跟电子相比,光子具有更多的优点,如光子不带电且无相互作用,具有较长的相干时间。理论研究报道光子中存在类似电子晶体中的 Wannier-Stark 态^[18-19],实验中在线性啁啾 Moire 光栅中也观察到了 Wannier-Stark 态。光子的 Bloch 振荡也成为近几年的研究热点。Malpuech 等理论上研究了光子晶体结构中的光学 Bloch 振荡^[20-21]。人们还在实验上对不同结构中的光学 Bloch 振荡进行研究,例如多孔硅光学超晶格、介质与特异性材料交替排列的准周期结构、Bose-Einstein 凝聚体等。但是含各向异性左手材料一维光子晶体耦合微腔结构中的 Wannier-Stark 态,至今未见报道。本文提出了含各向异性左手材料一维光子晶体耦合微腔结构,计算结果表明 Wannier-Stark 态存在于该结构的两类微带中。

2 理论模型

众所周知,在普通的光子晶体中,如果含有一个缺陷,在它的带隙中会出现一个透射峰,如果光子晶体中包含一系列相等的微腔,它的禁带中会出现一系列透射峰,形成微带^[6,8]。在由正常材料和各向异性左手材料组成的一维光子晶体中周期性地插入一系列微腔,由于存在两个带隙^[8,16],一个是零均值折射带隙,一个是 Bragg 带隙,所以会在这两个带隙中,同时出现一系列微带。图 1 是一维光子晶体耦合微腔结构示意图,其中, A 为正常材料, B 为各向异性左手材料, C 为正常材料,且和材料 A 具有相同的介电常数和磁导率,但是厚度不同。这样光子晶体 BABA 和微腔 C 交替排列,整个结构可以表示成 $(B(AB)_m C)_n B(AB)_m$, m 和 n 表示光子晶体和微腔的周期数。

假设电磁波由真空垂直入射到一维光子晶体耦合微腔 $(B(AB)_m C)_n B(AB)_m$, 材料 A 电介质参数和磁导率为 $\epsilon_A = 4, \mu_A = 1$, 材料层 C 和材料层 A 有相同的介电常数和磁导率,描述各向异性

左手材料层 B 的介电常数和磁导率取下列对角化的张量形式^[17]:

$$\epsilon_B = \begin{pmatrix} \epsilon_{Bx} & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{By} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{Bz} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

$$\mu_B = \begin{pmatrix} \mu_{Bx} & 0 & 0 \\ 0 & \mu_{By} & 0 \\ 0 & 0 & \mu_{Bz} \end{pmatrix},$$

材料 C 的厚度变化满足 $dC_{n+1} = \delta dC_n$, δ 为厚度变化的梯度因子。对于厚度梯度因子 $\delta = 1$ 时,无厚度梯度调制,这时整个结构可以看作由电介质材料和各向异性左手材料组成的一维光子晶体与一系列等厚的微腔交替排列。

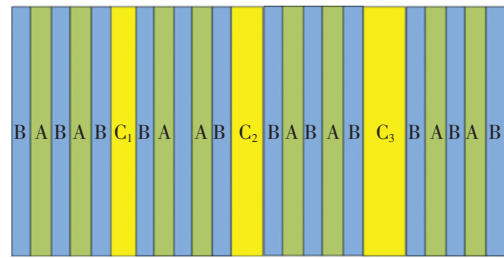


图 1 一维光子晶体耦合微腔结构示意图,其中 A 为常规电介质材料, B 为各向异性左手材料, C 为常规电介质材料。

Fig 1 Schematic representation of the photonic crystal photonic crystal coupled microcavity (CMC) structure. B and A are anisotropic left handed material (ALHM) and conventional material, respectively. C has the same permittivity and permeability as A.

各向异性左手材料的电介质参数和磁导率的态矢量用传输线模型描述^[16], TE 偏振为

$$\epsilon_{By} = 1 - 100/\omega^2, \mu_{Bx} = 1.21 - 100/\omega^2, \mu_{Bz} = 2, \quad (2)$$

TM 偏振为

$$\mu_{By} = 1.21 - 100/\omega^2, \epsilon_{Bx} = 1 - 100/\omega^2, \epsilon_{Bz} = 2, \quad (3)$$

式中 $\omega = 2\pi f$ 为角频率。从式(2)、(3)可以发现,对于 TE 模,当 $f < 1.447$ GHz 时,材料参数 ϵ_{By} 、 μ_{Bx} 是负的;当 $f > 1.5915$ GHz 时,材料参数是正值。对于 TM 模,材料参数 ϵ_{Bx} 、 μ_{By} 也类似。我们所得的材料参数与参考文献[12]一致,在文献[12]中曾提到由正常材料和各向异性左手材料组成的一维光子晶体中存在两类带隙,一类是普

通的 Bragg 带, 大约出现在 5 GHz 附近; 另一类为零平均折射率, 带隙大约出现在 1 GHz 附近。该零均值折射率带隙在入射角为 $0^\circ \sim 90^\circ$ 范围内变化时, 受入射角和偏振的影响不敏感。本文只考虑 TE 波的情形, 即电场 E 沿 y 方向; 对于 TM 波的情形, 只需通过对偶原理, 简单的代换就可以得到。

实验中通常通过测量高斯脉冲在光子晶体耦合多微腔中传输时的透射系数来证明光学的 Bloch 谐振存在。为了研究高斯脉冲通过该光子晶体耦合微腔的动力学行为, 假定一高斯脉冲入射到该光子晶体耦合微腔结构, 其谱函数形式为^[19-21]:

$$g(\omega) = \frac{1}{\sqrt{\pi}\Delta\omega} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\omega - \omega_0}{\Delta\omega}\right)^2\right), \quad (4)$$

其中, $\Delta\omega$ 为脉冲宽度, ω_0 为高斯脉冲的中心频率。透射系数可通过下面的公式计算^[20]:

$$T(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} g(\omega) a(\omega) \exp(-i\omega t) d\omega, \quad (5)$$

式中, $a(\omega)$ 是通过传输矩阵计算的频率为 ω 时的透射系数, t 是时间。

3 结果与讨论

3.1 Bragg 带隙中的 Wannier-stark 态

首先考虑频率范围位于 4.65 ~ 4.8 GHz, 该带隙位于 Bragg 带隙中^[11], 通过传输矩阵法计算的光子晶体耦合多微腔的散射态图(电磁波在传播方向上对应不同频率的电场分布)和传输谱如图 2 所示。一维光子晶体耦合微腔 $(B(AB)_m C)_n B(AB)_m$ 的周期数取 $m=6, n=5$ 。其中, 图 2(a) 和图 2(b) 为厚度梯度 $\delta=1$ 的散射态图和对应的透射谱。从图 2(b) 看到有 5 条传输峰位于 Bragg 带隙中, 并且 5 条传输峰的最大值近似相等, 进一步可以发现传输谱中透射峰的数目等于结构中微腔的数目。图 2(a) 中的亮线是 5 条透射峰对应的散射态图。图 2(c) 和图 2(d) 是厚度梯度 $\delta=1.005$ 的散射态图和对应的透射谱。为了使透射峰清晰, 在图 2(d) 中将传输谱取对数表示。可以发现图 2(d) 中的传输谱相对图 2(b) 中的传输谱发生了明显的变化, 在透射谱中, 中间的传输峰值明显高于两边的传输峰值。

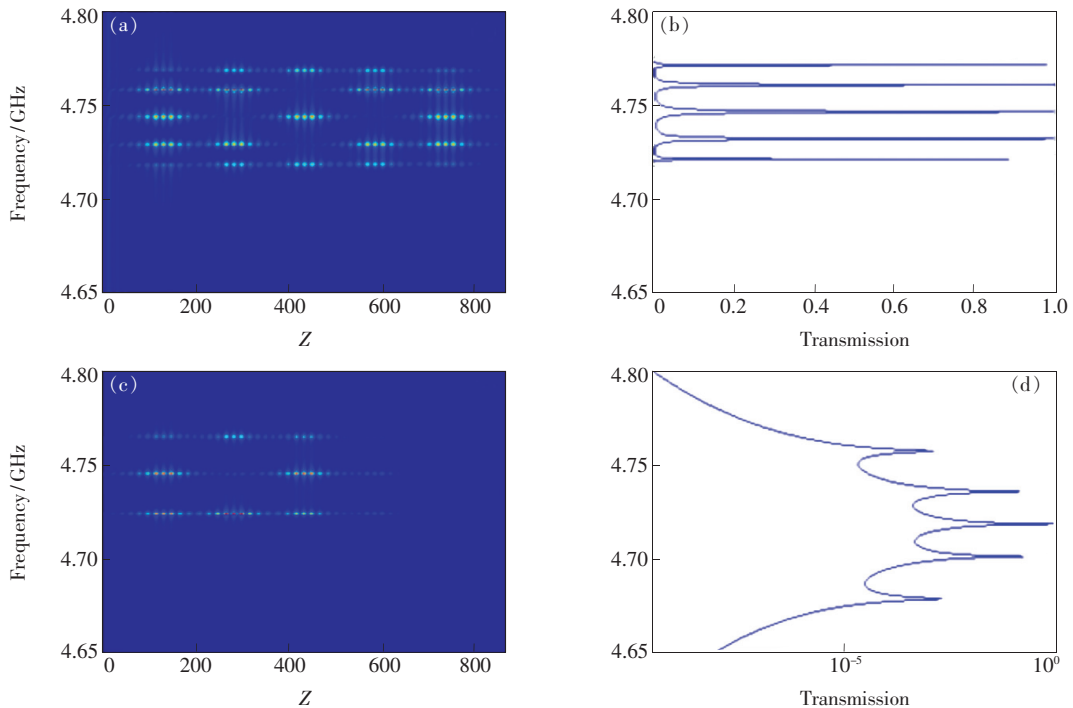


图 2 Bragg 带隙内光子晶体耦合微腔的电场分布和透射谱。(a) 和 (b) 为厚度梯度 $\delta=1.0$ 的散射态图和对应的透射谱; (c) 和 (d) 为厚度梯度 $\delta=1.005$ 的散射态图和对应的透射谱。

Fig. 2 Electric field distribution and transmission spectrum in the Bragg gap. (a) and (b) are the scattering state map and transmission spectrum for $\delta=1.0$. (c) and (d) are the scattering state map and transmission spectrum for $\delta=1.005$.

3.2 Bragg 带隙中的 Bloch 振荡

图 3 给出了由式 (5) 计算的在 Bragg 带隙 (4.65 ~ 4.8 GHz) 内高斯脉冲通过该光子晶体耦合微腔结构时透射系数的绝对值随时间的变化行为;取高斯脉冲的中心频率 $\omega_0 = 4.75$ rad/s, 高斯

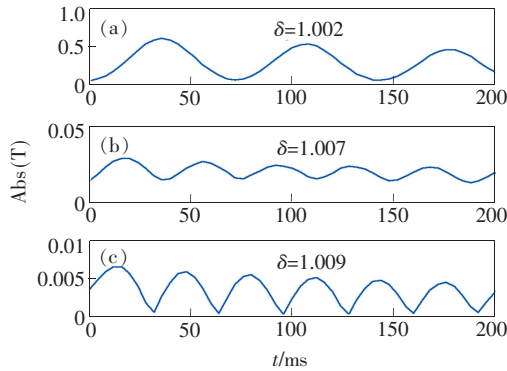


图 3 Bragg 带隙中, 高斯光束通过光子晶体耦合微腔时透射系数随时间的变化。(a) 微腔厚度梯度 $\delta = 1.002$; (b) 微腔厚度梯度 $\delta = 1.007$; (c) 微腔厚度梯度 $\delta = 1.009$ 。

Fig. 3 Calculated time-resolved transmissions in the Bragg gap with different thicknesses gradient δ . (a) $\delta = 1.002$. (b) $\delta = 1.007$. (c) $\delta = 1.009$.

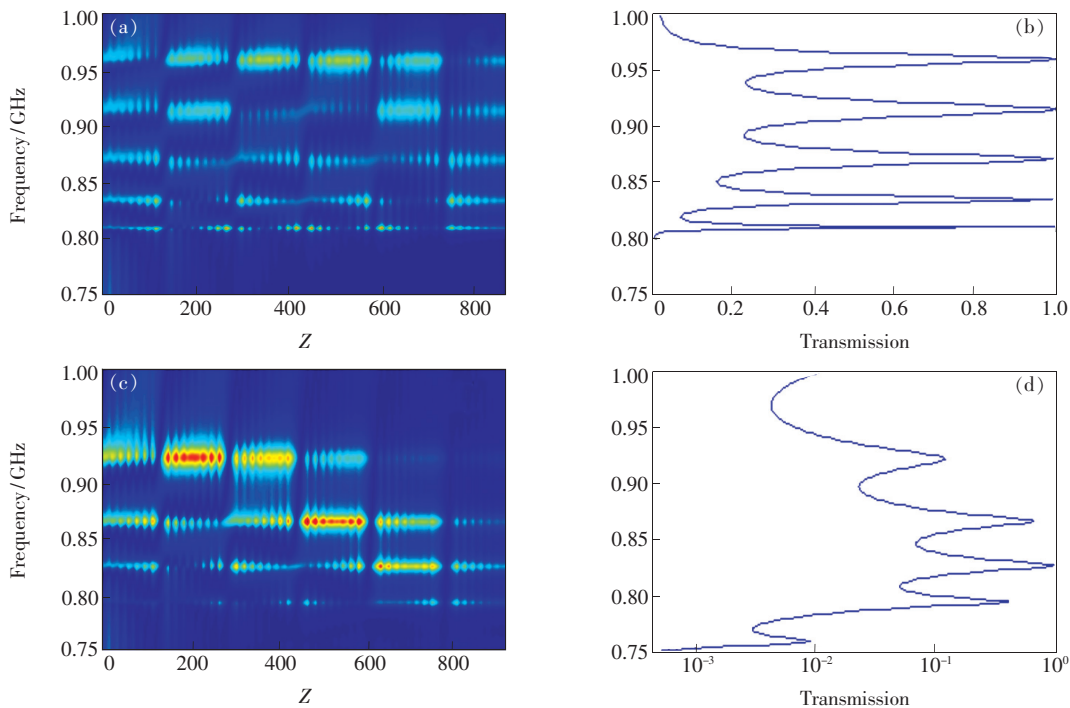


图 4 零均值折射率带隙内光子晶体耦合微腔的电场分布和透射谱。(a) 和 (b) 为厚度梯度 $\delta = 1.0$ 的散射态图和对应的透射谱; (c) 和 (d) 为厚度梯度 $\delta = 1.12$ 的散射态图和对应的透射谱。

Fig. 4 Electric field distribution and transmission spectrum in the zero mean refractive index gap. (a) and (b) are the scattering state map and transmission spectrum for $\delta = 1.0$. (c) and (d) are the scattering state map and transmission spectrum for $\delta = 1.12$.

脉冲宽度 $\Delta\omega = 0.015$ rad/s。从图 3 中可以看到, 随着微腔厚度梯度的增加, Bloch 振荡的周期缩短, 并且随着耦合微腔厚度梯度的增加透过率减小。

3.3 零均值折射带隙中的 Wannier-Stark 态

含各向异性左手材料的零平均折射带隙大约位于 0.75 ~ 1.1 GHz 范围内, 该带隙对入射角变化和偏振不敏感^[12], 材料 B 的结构参数 ϵ_{By} 和 μ_{Bx} 在该范围内是负值。对于光子晶体耦合微腔结构, 一系列微带出现在零均值折射率带隙中。图 4(a) 和 4(b) 为零均值折射率带隙内光子晶体耦合微腔厚度梯度 $\delta = 1$ 时的散射态图和传输谱; 4(c) 和 4(d) 为对应的调制指数 $\delta = 1.12$ 时的散射态图和传输谱。从图 4(d) 看到接近中心部位的透射峰能量间隔近似相等, 位于边缘处透射峰的能量间隔明显比中心部位的透射峰能量间隔大。众所周知, 传统的 Wannier-Stark-ladder 能量间隔是相等的, 而我们得到的透射峰能量间隔不一致, 这可以解释为我们的光子晶体耦合微腔结构是有限的, 而经典的 Wannier-Stark-ladder 要求满足周期性边界条件。

3.4 零均值折射带隙中的 Bloch 振荡

图5给出了由式(5)计算的在零均值折射率带隙(0.75~1.1 GHz)内高斯脉冲通过该光子晶体耦合微腔结构时透射系数的绝对值随时间的变化,其中,图5(a)微腔厚度梯度 $\delta=1.12$;图5(b)

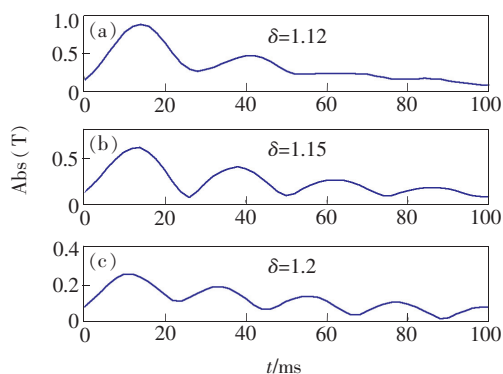


图5 零均值折射率带隙中高斯光束通过光子晶体耦合微腔时透射系数随时间的变化。(a)微腔厚度梯度 $\delta=1.12$;(b)微腔厚度梯度 $\delta=1.15$;(c)微腔厚度梯度 $\delta=1.2$ 。

Fig. 5 Calculated time-resolved transmissions in the zero mean refractive index gap with different thicknesses gradient δ . (a) $\delta=1.12$. (b) $\delta=1.15$. (c) $\delta=1.2$.

微腔厚度梯度 $\delta=1.15$;图5(c)微腔厚度梯度 $\delta=1.2$ 。计算中取高斯脉冲的中心频率 $\omega_0=0.861$ rad/s,高斯脉冲宽度为 $\Delta\omega=0.015$ rad/s。从图中同样看到,随着微腔厚度梯度因子的增加,Bloch 振荡的周期缩短,并且透过率减小。这个特性与传统的 Bragg 带隙内的 Bloch 振荡一致。这是预料之中的,因为光子晶体微腔厚度梯度调制类似于超晶格中的直流电场调制,在超晶格中,随着外部直流电场的增大,Bloch 振荡的周期减小。该结果论证了 Bloch 谐振能发生在电介质材料和各向异性左手材料组成一维光子晶体的耦合微腔中。

4 结 论

通过传输矩阵法研究了各向异性左手材料和常规电介质材料组成的一维光子晶体耦合微腔结构,结果表明该结构在常规的 Bragg 带隙和零均值折射率带隙中,同时形成两类 Wannier-Stark 态。当高斯脉冲通过该耦合微腔结构时,随着耦合微腔厚度梯度因子的增大,两类带隙中 Bloch 振荡周期都减小,并且透过率降低。

参 考 文 献:

- [1] RAO X S, ONG C K. Amplification of evanescent waves in a lossy left-handed material slab [J]. *Phys. Rev. B*, 2003, 68:113103.
- [2] RAMAKRISHNA S A. Physics of negative refractive index materials [J]. *Rep. Prog. Phys.*, 2005, 68(2):449.
- [3] 罗黎平, 刘念华. 含负折射率材料的 Thue-Morse 序列结构的光学透射谱 [J]. *光子学报*, 2005, 34(11): 1615-1619.
LUO L P, LIU N H. Transmittance in Thue-Morse quasicrystal containing negative-index materials [J]. *Acta Photon. Sinica*, 2005, 34(11):1615-1619. (in Chinese)
- [4] SMITH D R, PADILLA W J, VIER D C. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, 84:4184.
- [5] GAO P, ZHANG C M, AI J J, et al. Multiple frequency bands of squares split resonant rings and metal wire metamaterials [J]. *Appl. Opt.*, 2013, 25:6309-6315.
- [6] KANG Y Q, ZHANG C M, MU T K. Resonance modes and inter-well coupling in photonic double quantum well structure with single negative materials [J]. *Opt. Commun.*, 2012, 285:4821-4824.
- [7] VESELAGO V. Electrodynamics of substa simultaneously negative electrical and magnetic properties [J]. *Soviet Phys. Uspekhi*, 1968, 10(4):509-517.
- [8] SMITH D, SCHURIG D. Electromagnetic wave propagation in media with indefinite permittivity and permeability tensors [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2003, 90(7):077405.
- [9] SMITH D, PENDRY J, WILTSHIRE M. Metamaterials and negative refractive index [J]. *Science*, 2004, 305(5685): 788-792.
- [10] SMITH DR, KOLINKO P, SCHURIG D. Negative refraction in indefinite media [J]. *JOSA B*, 2004, 21(5):1032-1043.
- [11] SMITH D R, SCHURIG D, MOCK J J, et al. Partial focusing of radiation by a slab of indefinite media [J]. *Appl. Phys.*

- Lett.*, 2004, 84(13):2244-2246.
- [12] XIANG Y J, DAI X Y, WEN S C, *et al.*. Properties of omnidirectional gap and defect mode of one dimensional photonic crystal containing indefinite metamaterials with a hyperbolic dispersion [J]. *J. Appl. Phys.*, 2007, 102:093107.
- [13] WANG S, GAO L. Omnidirectional reflection from the one dimensional photonic crystal containing anisotropic left handed materials [J]. *Eur. Phys. J. B*, 2005, 48:29-36.
- [14] 刘文莉, 唐婷婷, 何修军. 微波段左手材料光子晶体带隙特性研究 [J]. *光子学报*, 2016, 45(2):169-172.
LIU W L, TANG T T, HE X J. Band gap characteristics of photonic crystals consisted of left-hand material in the microwave band [J]. *Acta Photon. Sinica*, 2016, 45(2):169-172. (in Chinese)
- [15] 康永强, 高鹏, 刘红梅, 等. 含各向异性左手材料的一维 Thue-Mores 准周期结构的反射带隙 [J]. *光子学报*, 2015, 44(3):0319004-06.
KANG Y Q, GAO P, LIU H M, *et al.*. Reflection band gap in Thue-Morse quasicrystal containing anisotropic left handed material [J]. *Acta Photon. Sinica*, 2015, 44(3):0319004-06. (in Chinese)
- [16] KOHMOTO M, SUTHERLAND B, TANG C. Critical wave functions and a Cantor-set spectrum of a one-dimensional quasicrystal model [J]. *Phys. Rev. B*, 1987, 35(3):1020.
- [17] DULEA M, SEVERIN M, RIKLUND R. Transmission of light through deterministic aperiodic non-Fibonacci multilayers [J]. *Phys. Rev. B*, 1990, 42(6):3680.
- [18] DULEA M, JOHANSSON M, RIKLUND R. Localization of electrons and electromagnetic waves in a deterministic aperiodic system [J]. *Phys. Rev. B*, 1992, 45(1):105.
- [19] KAVOKIN A, MALPUECH G, DI CARLO A, *et al.*. Photonic Bloch oscillations in laterally confined Bragg mirrors [J]. *Phys. Rev. B*, 2000, 61:4413-4416.
- [20] WANG T B, LIU N H, DENG X H, *et al.*. Bloch oscillations in one-dimensional coupled multiple microcavities containing negative-index materials [J]. *J. Opt.*, 2011, 13(9):095705.
- [21] CALOZ C, ITOH T. *Electromagnetic Metamaterials: Transmission Line Theory and Microwave Applications* [J]. New York: Wiley & Sons, 2006.



康永强(1979 -),男,山西文水县人,博士,副教授,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、石墨烯等方面的研究。

E-mai: kyq_2000@sohu.com