

文章编号: 0258-7025(2008)Supplement2-0178-06

二维空气环型光子晶体的负折射现象

孔令凯¹ 郑志强¹ 冯卓宏¹ 姜翠华¹ 明海²

(¹ 福建师范大学物理与光电信息科技学院, 福建 福州 350007; ² 中国科技大学物理系, 安徽 合肥 230026)

摘要 采用平面波展开法和时域有限差分法研究了二维空气环型光子晶体的负折射现象。通过平面波法计算了三角晶格空气环型光子晶体的能带结构和等频曲线分布, 通过等频曲线的分析得到了光子晶体有效折射率与光波归一化频率之间的关系, 并模拟了光波在有效折射率为 -1 的平板和楔形结构光子晶体中的负折射传输过程。模拟结果表明, 优化设计的空气环型光子晶体可以实现较为理想的负折射现象, 且特定频率光波实现负折射对结构参数的要求较低, 有效的降低了实验室制作光子晶体负折射材料对结构参数的苛刻要求。在实验室采用 X 光刻蚀方法制作空气环型光子晶体能够节省大量的刻蚀时间, 进而降低光子晶体的制作成本。

关键词 光电子学; 光子晶体; 时域有限差分法; 负折射

中图分类号 O435.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL200835s2.0178

Negative Refraction in Two-dimensional Photonic Crystal with Ring-shaped Holes

Kong Lingkai¹ Zheng Zhiqiang¹ Feng Zhuohong¹ Jiang Cuihua¹ Ming Hai²

(¹ School of Physics and Opto Electronics Technology, Fujian Normal University, Fuzhou, Fujian 350007, China)
(² Department of Physics, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China)

Abstract Negative refraction in two-dimensional photonic crystal with ring-shaped holes is studied by the plane wave expansion method and the finite difference time domain method. The band structure and the equifrequency contours of the two-dimensional photonic crystal with ring-shaped holes in triangular lattices are calculated. Based on the analysis of the band structure, the equifrequency contours the relationship between the normalized frequencies and the effective refraction indices are given. Negative refraction in planar slab and wedge structure with the effective refraction index $n = -1$ is simulated by the finite difference time domain method. The results show that it's easier to realize negative refraction in photonic crystal with ring-shaped holes, and the parameters of the structure are tolerant. A lot of time can be saved during the fabrication processes by the X-ray lithography.

Key words optoelectronics; photonic crystal; finite difference time domain method; negative refraction

1 引言

1968 年, 前苏联物理学家 Veselago 在理论上预言了负折射介质的存在^[1]。近十年来, 负折射材料再次引起人们的广泛关注, 并在理论研究和实验室制作方面均取得了较大的突破^[2~12]。2003 年国际权威杂志 Science 将负折射材料的研究成果列为十大科技进展之一; 2007 年德国物理学家在自然界中发现了可以工作在 150 MHz 左右的负折射材料^[13], 这一发现打破了负折射材料都是“人工材料”

的预言, 同时宣告了负折射材料研究的重大意义。

早期 Veselago 在理论上预言的负折射材料同时具有负的介电常数 ϵ 和负的磁导率 μ , 从而具有负的折射率。电磁波在这种材料中传播时电矢量 \mathbf{E} 、磁矢量 \mathbf{H} 和波矢 \mathbf{k} 构成左手螺旋关系, 因而又被称为“左手介质”^[1]。正是由于其“左手”特性, 负折射材料具有很多奇特的物理现象, 如负折射、逆多普勒效应、逆 Cherenkov 辐射、完美透镜等^[14]。近几年的研究表明, 负折射现象的实现并不仅局限

基金项目: 福建省自然科学基金(A0510014)和福建省科技厅项目(2006F5025)资助课题。

作者简介: 孔令凯(1983—), 男, 硕士研究生, 主要从事光子晶体、负折射材料方面的研究。E-mail: lingkaikong@sina.com

导师简介: 郑志强(1963—), 男, 博士, 教授, 主要从事信息光学方面的研究。E-mail: zqzheng@fjnu.edu.cn(通信联系人)

于“双负”材料，可以通过多种方式来实现负折射，如矩形或圆分裂谐振腔结构^[15]、光子晶体结构^[16]、L-C 微波带线等^[17]。

本文重点研究了由空气环阵列组成的二维三角格子光子晶体平板产生的负折射现象，并将能带计算和数值模拟结果与空气孔型光子晶体进行比较。空气环型光子晶体相对传统空气孔(介质柱)型的光子晶体增加了一个结构参数，因而更易于调节光子晶体的结构来改进光子晶体平板的性能。

2 结构分析

空气环型光子晶体的结构和计算时采用的原胞如图 1 所示。空气环型光子晶体的结构可以看作是由三角格子的空气孔型和介质柱型的两种光子晶体

组合而成。即半径(空气环内径)为 r ，相对介电常数为 ϵ_1 的电介质柱插在三角格子的空气孔阵列中，空气孔的半径(空气环外径)为 R ，背景材料的相对介电常数 ϵ_2 。本文研究的结构中，电介质柱的相对介电常数与背景材料相同，即 $\epsilon_1 = \epsilon_2 = \epsilon$ ，计算中选取 $\epsilon = 12.96$ (即折射率为 3.6)。每个原胞包含 1 个介质柱、1 个空气环。首先我们选取空气环外径 $R = 0.4a$ ，内径 $r = 0.1a$ ，其中 a 为晶格常数，由平面波展开法计算得到该结构光子晶体的能带结构及第二能带的等频曲线(TM 模式)如图 2(a)、(c)所示，为了便于比较，同时计算了相同背景介电材料的空气孔型三角晶格光子晶体的能带结构，该结构选取的空气孔半径为 $0.4a$ ，计算结果如图 2(b)、(d)。

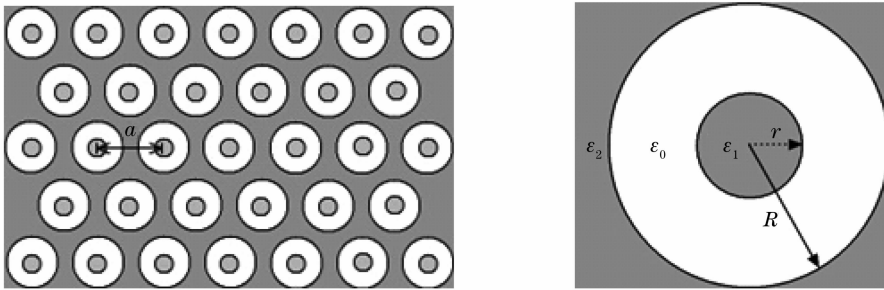


图 1 三角格子空气环型光子晶体的结构

Fig. 1 Structure of two-dimensional photonic crystal with ring-shaped air holes in triangular lattices

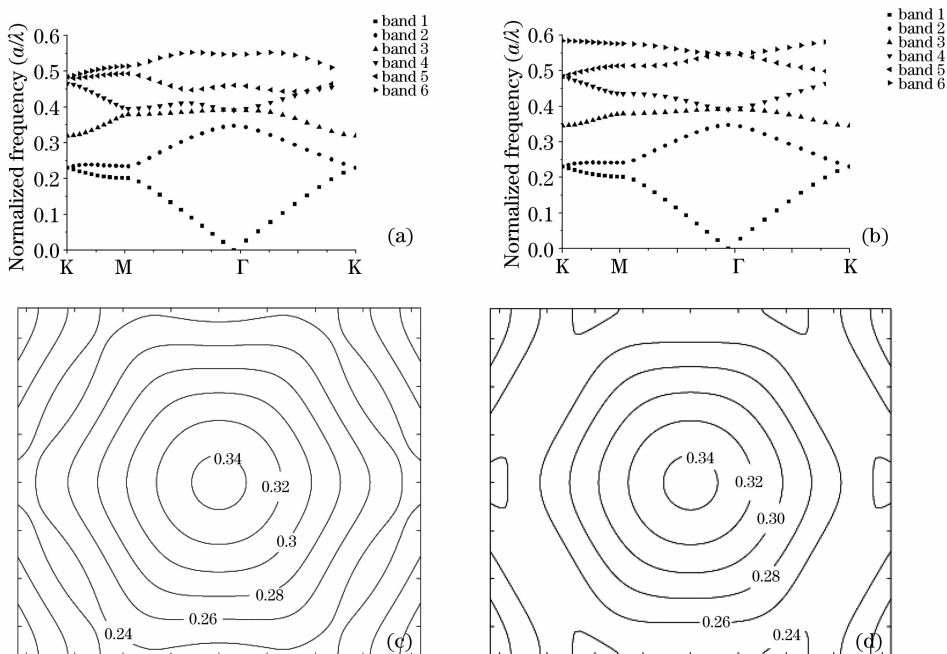


图 2 空气环与空气孔型三角格子光子晶体的能带结构及第二能带的等频曲线(TM), (a), (c) 空气环型结构, (b), (d) 空气孔型结构
Fig. 2 Band structures and equifrequency contours (TM-polarized) of the 2nd band of two-dimensional photonic crystal in triangular lattices with ring-shaped holes (a), (c) and air holes (b), (d)

图 2 为用平面波法计算的二维空气环型和空气孔型光子晶体的能带结构(TM)及与第二能带对应的等频率曲线。图示的等频曲线中均标示出了其相应的归一化频率。

通过比较空气环和空气孔型光子晶体的能带结构发现,两种结构的第一、二能带色散曲线几乎没有明显差别,而在较高的五、六能带色散曲线变化相对比较大。图 2(c)、(d)分别给出了两种结构的光子晶体在第二能带的等频曲线分布。两种结构对应的第二能带的等频曲线除在较低的频率(如0.24)有较大差别外,其它绝大部分频率对应的等频曲线形状也是相似的,越靠近布里渊区的中心等频曲线的形状越趋于圆形。其中归一化频率(a/λ)为 0.3 的等频曲线形状近乎一个圆,由内到外等频曲线对应的频率逐渐降低,满足群速度与相速度反向的条件。

为了进一步探究空气环型光子晶体能否产生负折射现象,采用平面波展开法计算了三角格子空气环型光子晶体沿 ΓM 方向的有效折射率与归一化频率之间的关系,如图 3 所示。从图中可以看到,对于分布在第二能带的频率其有效折射率均为负值,而归一化频率为 0.3 的光波对应的有效折射率恰好为 -1 。

采用平面波展开法计算得到的结果显示空气环型光子晶体同样具备产生负折射现象的条件。下面利用时域有限差分法数值模拟的结果来证明能带

计算得到的结论并做进一步的分析。

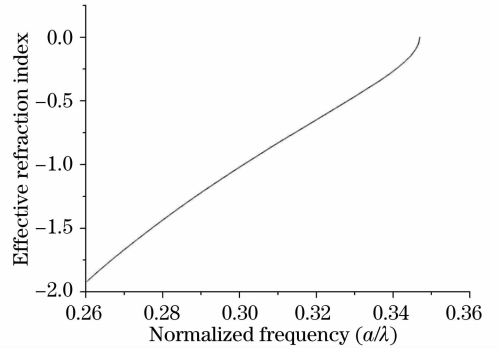


图 3 空气环型光子晶体中沿 ΓM 方向有效折射率与归一化频率的对应关系

Fig. 3 Effective refraction index versus normalized frequency in photonic crystal with ring-shaped holes along the ΓM direction

3 FDTD 模拟及分析

时域有限差分法(FDTD)^[18,19]是用对空间和时间的差分代替微分,采用 Yee 最早提出的二维时域有限差分方法,将单元网格化成二维 TE 和 TM 偏振的 Yee 原胞,用 Δx 、 Δy 分别代表 x 和 y 坐标方向的网格空间步长, i 、 j 为整数,分别代表 x 和 y 坐标方向的标号或空间步长个数。时间步长为 Δt , n 表示时间步长个数。采用中心差分将微分形式的 Maxwell 方程化为迭代形式的二维 FDTD 公式。以 TE 模式偏振为例,转化为差分方程后可得到^[19]。

$$E_x^{n+1}\left(i + \frac{1}{2}, j\right) = E_x^n\left(i + \frac{1}{2}, j\right) + \frac{\Delta t}{\epsilon \Delta y} \left[H_z^{n+\frac{1}{2}}\left(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}\right) - H_z^{n+\frac{1}{2}}\left(i + \frac{1}{2}, j - \frac{1}{2}\right) \right] \quad (1)$$

$$E_y^{n+1}\left(i, j + \frac{1}{2}\right) = E_y^n\left(i, j + \frac{1}{2}\right) - \frac{\Delta t}{\epsilon \Delta x} \left[H_z^{n+\frac{1}{2}}\left(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}\right) - H_z^{n+\frac{1}{2}}\left(i - \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}\right) \right] \quad (2)$$

$$H_z^{n+\frac{1}{2}}\left(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}\right) = H_z^{n-\frac{1}{2}}\left(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}\right) - \frac{\Delta t}{\mu} \begin{bmatrix} \frac{E_y^n\left(i + 1, j + \frac{1}{2}\right) - E_y^n\left(i, j + \frac{1}{2}\right)}{\Delta x} \\ - \frac{E_x^n\left(i + \frac{1}{2}, j + 1\right) - E_x^n\left(i + \frac{1}{2}, j\right)}{\Delta y} \end{bmatrix} \quad (3)$$

对于 TM 模式偏振的电磁波同样可以得到 H_x 、 H_y 和 E_z 的迭代公式。

首先考虑一种二维平板结构光子晶体中产生的负折射现象。选取的空气环型光子晶体结构参数如前所述,平板的厚度为 $7.7282a$,纵向尺寸为 $30a$ (不考虑边缘效应),界面法线沿 ΓM 方向。在光子晶体平板的左侧 $4a$ 处置一宽度为 a 的线光源,光源归

一化频率选取 0.3,以入射角 45° 发生折射。图 4(a)所示为模拟过程中选取的光子晶体结构,图 4(b)即为 FDTD 模拟得到的电场分布情况。由电场分布不难发现,在特定结构的空气环型光子晶体中确实存在负折射现象,即折射光线与入射光线分布在法线的同侧。通过进一步对入射角、折射角的分析,折射角与入射角均为 45° ,很好的验证了有效折射率为

—1的结论。从图 4(b)中也不难看出,在光子晶体平板左侧存在较强的反射,而在右侧折射出的光强度较入射光非常微弱,这一问题可以通过改变光子

晶体的表面结构和调整光子晶体平板的厚度来进行改进。

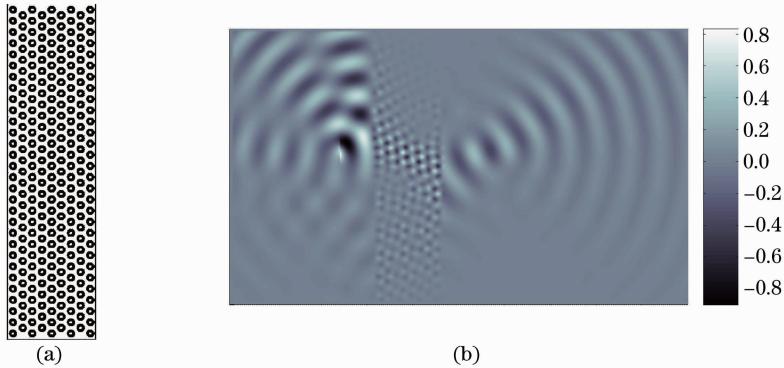


图 4 (a) 平板空气环型光子晶体结构简图; (b) 电场分布

Fig. 4 (a) Structure of a slablike photonic crystal with ring-shaped holes; (b) Distribution of electric field intensity

为了便于比较空气环与空气孔型光子晶体平板的负折射现象,采用前面提到的空气孔结构参数,光源的位置、频率、入射角度及界面法线方向等相关参数均与空气环型光子晶体模拟保持一致,模拟得到的空气孔型光子晶体中发生的负折射现象,电场分布如图 5(b)所示。

比较空气环和空气孔型光子晶体,不难发现二者可以实现负折射现象,无论是结构参数,还是 FDTD 模拟得到的电场分布都非常相似。而对于楔形结构的空气环型光子晶体能否实现负折射接下来我们将继续通过 FDTD 模拟的结果来做进一步的说明。

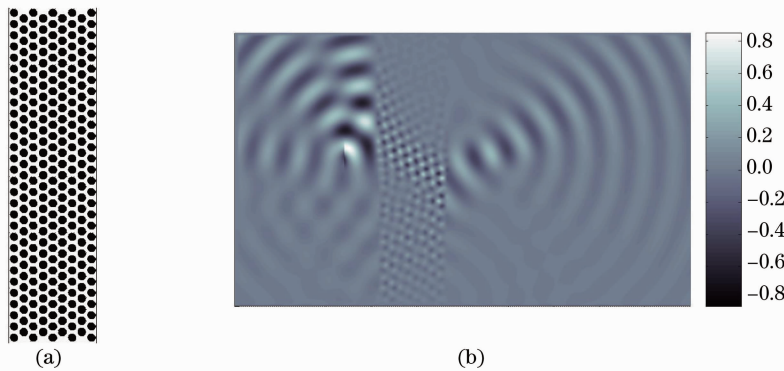


图 5 (a) 平板空气孔型光子晶体结构简图; (b) 电场分布

Fig. 5 Structure of a slablike photonic crystal with air holes; (b) Distribution of electric field intensity

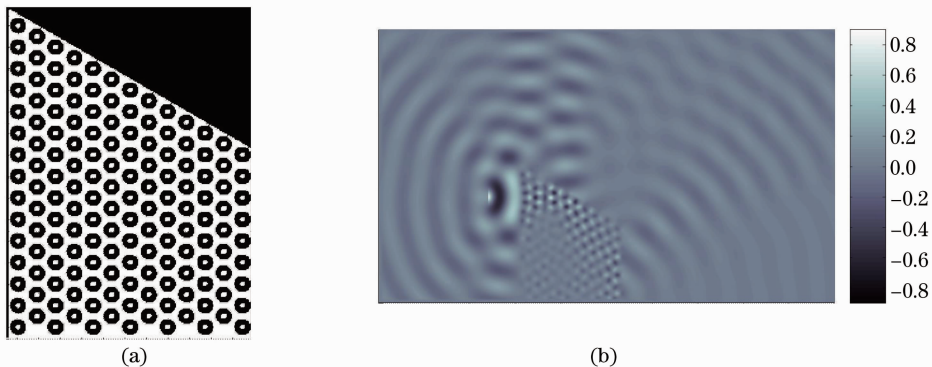


图 6 (a) 楔形空气环型光子晶体结构简图; (b) 电场分布

Fig. 6 (a) Structure of a wedgelike photonic crystal with ring-shaped holes; (b) Distribution of electric field intensity

图 6(a)所示即为模拟过程中所选取的楔形结构光子晶体,上、左、右三个界面的法线方向均沿 ΓM 方向。在距离左侧边界 $4a$ 处置一线光源,光源宽度、频率分别为 $1a$ 、 0.3 ,该线光源沿 ΓM 方向正入射在左侧界面上,经折射后的电场分布如图 6(b)所示。从模拟结果可以清楚的看到负折射现象的产生,但由于边缘效应和反射的影响导致了光束的分散。

通过前面的分析可以发现,对于内径为 $0.1a$ 的空气环型光子晶体可以实现与空气孔型效果相同的负折射现象。但内部介质柱的尺寸必须在有限的范围内才能实现有效折射率为 -1 的负折射。图 7 为有效折射率为 -1 的光波频率随空气环内径的变化情况(空气环外径选取为 $0.4a$)。空气环内径从零一直增大到 $0.2a$ 的过程中,有效折射率为 -1 的光波的归一化频率分布在 0.3 左右,仅有不到 ± 0.001 的变化,但这并不表示空气环内径增加对负折射现象没有大的影响,在光子器件的设计中还必须要考虑到等频曲线的变化。

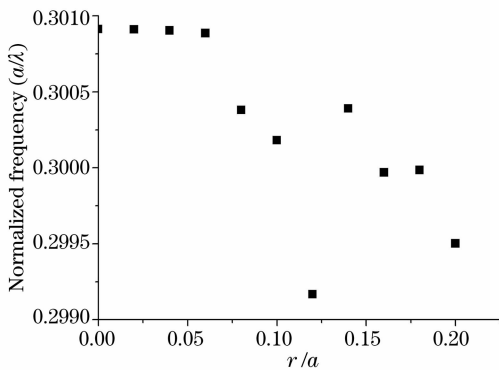


图 7 有效折射率为 -1 的光波频率随空气环内径的变化

Fig. 7 Normalized frequency with effective refraction index -1 versus inner radius of ring-shaped holes

4 结 论

首次研究了二维空气环型光子晶体的负折射现象。在计算三角晶格空气环型光子晶体的能带结构和等频曲线分布的基础上,模拟了光波在有效折射率为 -1 的平板和楔形结构光子晶体中的负折射传输过程,并将模拟结果与空气孔型光子晶体进行比较。结果表明,优化设计的空气环型光子晶体可以实现较为理想的负折射现象,且特定频率光波实现负折射对结构参数的要求较低,有效的降低了实验室制作光子晶体负折射材料对结构参数的苛刻要求。空气环型光子晶体的结构可以看作是由空气孔

型光子晶体与介质柱型光子晶体相互嵌套而成。相对传统的空气孔(介质柱)型光子晶体,空气环型光子晶体增加了一个结构参数,因而更易于通过调节晶体结构达到各种性能要求。在实验室采用 X 光刻蚀方法制作空气环型光子晶体能够节省大量的刻蚀时间,进而可以降低光子晶体的制作成本。本结果对实验制作理想的光子晶体负折射材料提供了良好的理论依据。

参 考 文 献

- 1 Veselago V. G. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ [J]. *Sov. Phys. Usp.*, 1968, **10**(4): 509~514
- 2 J. B. Pendry, A. J. Holden, D. J. Robbina *et al.*. Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena[J]. *IEEE Trans. Microwave Theory and Technol.*, 1999, **47**(11): 2075~2084
- 3 J. B. Pendry, Negative refractive refraction makes a perfect lens [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, **85**(18): 3966~3969
- 4 M. Notomi. Theory of light propagation in strongly modulated photonic crystals; Refractionlike behavior in the vicinity of the photonic band gap[J]. *Phys. Rev. B*, 2000, **62**(16): 10696~10705
- 5 Min Qiu, Wave propagation through a photonic crystal in a negative phase refractive-index region [J]. *IEEE J. Select. Topics Quantum Electron.*, 2003, **9**(1): 106~110
- 6 Alejandro Martínez, Javier Martí. Negative refraction in two-dimensional photonic crystals; Role of lattice orientation and interface termination[J]. *Phys. Rev. B*, 2005, **71**(23): 235115-1~235115-12
- 7 Xianyu Ao, Sailing He. Negative refraction of left-handed behavior in porous alumina with infiltrated silver at an optical wavelength[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **87**(10): 101112-1~101112-3
- 8 Zhifang Feng, Xiangdong Zhang, Kun Ren *et al.*. Experimental demonstration of non-near-field image formed by negative refraction[J]. *Phys. Rev. B*, 2006, **73**(7): 075118-1~075118-5
- 9 Radoš Gajič, Ronald Meisels, Friedemar Kuchar *et al.*. All-angle left-hand negative refraction in Kagomé honeycomb lattice photonic crystals[J]. *Phys. Rev. B*, 2006, **73**(16): 165310-1~165310-5
- 10 Li Yiyu, Gu Peifu, Li Mingyu *et al.*. Near-Field subwavelength imaging in wave-like two-dimensional photonic crystal[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **26**(9): 1409~1413
- 11 厉以宇, 顾培夫, 李明宇 等. 波状结构二维光子晶体近场亚波长成像的研究[J]. *光学学报*, 2004, **26**(9): 1409~1413
- 12 Alexey Sukhovich, Li Jing, John H Page. Negative refraction and focusing of ultrasound in two-dimensional photonic crystals [J]. *Phys. Rev. B*, 2008, **77**(1): 014301-1~014301-9
- 13 Dong Haixia, Jiang Haitao, Yang Chengquan *et al.*. Theoretical simulation and transmission properties of one-dimensional photonic quantum-well structure containing defects layers with negative refractive index[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(12): 2245~2249
- 14 董海霞, 江海涛, 杨成全 等. 含负折射率缺陷的光量子阱的透射特性及理论模拟[J]. *光学学报*, 2007, **27**(12): 2245~2249
- 15 A. Pimenov, A. Loidl, K. Gehrke *et al.*. Negative refraction observed in a Metallic Ferromagnet in the gigahertz frequency range[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2007, **98**(19): 197401-1~197401-4

- 14 J. B. Pendry, Negative refractive [J]. *Contemporary Phys.*, 2004, **45**(3): 191~202
- 15 D. R. Smith, D. Schurig. Electromagnetic wave propagation in media with indefinite permittivity and permeability tensors[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2003, **90**(7): 077405~077408
- 16 G. Shvets. Photonic approach to making a material with a negative index of refraction[J]. *Phys. Rev. B*, 2003, **67**(3): 035109-1~035109-8
- 17 G. V. Eleftheriades, A. K. Iyer, P. C. Kremer. Planar negative refractive index media using periodically L-C loaded transmission lines[J]. *IEEE Trans. MTT*, 2002, **50**(12): 2702~2712
- 18 Vladimir Kuzmiak, Alexei A. Maradudin. Localized defect modes in a two-dimensional triangular photonic crystal[J]. *Phys. Rev. B*, 1998, **57**(24): 15242~15250
- 19 Ge Debiao, Yan Yubo. The finite difference time domain method for electromagnetic wave[M]. Xian: Xidian University Press, 2002, 15~18
葛德彪, 闫玉波. 电磁波时域有限差分方法[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 200, 15~18