

文章编号: 1673- 9620 (2008) 02- 0066- 03

# 含负折射率介质一维光子晶体的全向反射镜<sup>\*</sup>

倪重文, 沈小明, 金 钺, 唐 丽, 是度芳

(江苏工业学院 数理学院, 江苏 常州 213164)

**摘要:** 研究了含负折射率介质的一维光子晶体的反射特性和用其制作全向反射镜的物理基础, 同时研究了此种光子晶体 PBG 的影响因素。研究发现, 周期结构参数——晶格常数和层厚畸变对含负折射率材料的一维光子晶体的 PBG 几乎没有影响。在一定频域内可实现全向反射。

**关键词:** 负折射率; 光子带隙; 全向反射镜; 光子晶体

**中图分类号:** O 437

**文献标识码:** A

## Omnidirectional Reflector from 1D Photonic Crystals with Negative Refractive Index Media

NI Zhong- wen, SHEN Xiao- ming, JIN Yi, TANG Li, SHI Du- fang

(School of Physics and Mathematics, Jiangsu Polytechnic University, Changzhou 213164, China)

**Abstract:** The reflective properties of one- dimensional photonic crystal including negative refractive index materials and the physical foundation of an omnidirectional reflective mirror made of such crystal were studied. The factors were also investigated that have effects on the PBG structure of such crystal. It was found that the PBG was not susceptible to the parameters of periodic structure——crystal constant and layer thickness distortion, therefore, omnidirectional reflection could be realized in a certain frequency domain.

**Key words:** negative refractive index; photonic band gap; omnidirectional reflector; photonic crystal

1968 年 Veselago<sup>[1]</sup> 提出负折射率材料的概念, 但直到世纪末经过 Pendry<sup>[2]</sup>、Smith<sup>[3]</sup> 等对金属光子晶体作深入研究后终于得到负介电常数和负磁导率的结构, 并于 2001 年从实验上证实了负折射率材料的存在<sup>[4]</sup>。对光子晶体研究的深入激发了人们对负折射率材料的热情。在材料的应用研究方面, 负折射率材料的全向反射特性和全折射性质研究就是其中之一。

抛光金属是最古老的全向反射镜, 缺点是在红外波段损耗严重。光子晶体具有光子带隙 (PBG, Photonic Band Gap) 的特征, 利用光子晶体的

PBG 特性做成了第二种全反镜。这种全反镜是由多层电介质材料做成的, 其带隙是由 Bragg 散射形成的, 称为 Bragg 隙。随后一些学者对其作了改进性研究, 包括由各向异性介质组成的光子晶体产生的全向反射<sup>[5,6]</sup>。但这种全向反射有一些缺点, 随着入射角的增大, 反射带将向高频移动, 两个偏振模具有不同的传播特征, 当入射角为 Brewster 角时 TM 模的反射系数恒为 0。本课题组研究也发现, 反射带对结构参数很灵敏<sup>[7]</sup>。负折射率材料也有 PBG 结构, 这种 PBG 结构所具有的独特特性是提出负折射率材料做全向反射镜的物理基础。

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2007- 04- 06

作者简介: 倪重文 (1964- ), 男, 江苏常州人, 实验师。

# 1 负折射率介质全向反射镜物理基础

负折射率介质全向反射镜的物理基础仍然是 PBG。但是负折射率介质的 PBG 与电介质多层结构的 PBG 存在很大区别, 电介质 PBG 所存在的一些缺点在负折射率介质的 PBG 中已不复存在。两种全向反射镜的物理基础虽然都是 PBG, 但由于基本机理和特性不同, 所以把负折射率介质的全向反射镜称为第三类全向反射镜。下面从 3 个方面来说明负折射率介质全向反射镜的物理基础。

## 1.1 PIM/NIM 一维光子晶体的反射特性

作者研究了由正折射率介质 (PIM: Positive Index Media) 和负折射率介质 (NIM: Negative Index Media) 组成的一维光子晶体的透射特性<sup>[13]</sup>。层厚采用  $\lambda/4$  波片形式:  $n_1 d_1 = -n_2 d_2 = \lambda/4$ ,  $n_1 = 1.4$ ,  $n_2 = -2.5$ , 光子晶体的周期  $N = 15$ 。采用传输矩阵法计算反射特性, 其结果见图 1。图 1 (a) 为正入射时的反射谱, 可见与电介质一维光子晶体相比, PIM/NIM 一维光子晶体只有孤立的几个频率能通过该光子晶体, 其它波长基本上都被反射, 而且反射系数接近 1, 近乎全反射。图 1 (b) ~ 图 1 (d) 分别为入射角为  $45^\circ$ 、 $70^\circ$ 、 $85^\circ$  时的反射谱。由图可以看出, 对 PIM/NIM 一维光子晶体的参数没有作刻意的选择, 但是在附近  $\omega_0$  ( $\omega_0 = 2\pi c/\lambda$ ), 基本上能做到全向反射, 频率范围也较大。

## 1.2 $0-\bar{n}$ 隙一维光子晶体的反射特性

香港科技大学<sup>[14]</sup>提出了一种新的光子带隙—— $0-\bar{n}$  隙。对于 PIM/NIM 组成的一维光子晶体, 其体平均折射率为 0, 即  $\bar{n}$ , 这种一维光子晶体产生的 PBG 就称为  $0-\bar{n}$  隙。由于负折射率介质必定有色散, 首先对空气 ( $n = 1$ ,  $d = 16$  mm) 和负折射率介质 ( $\epsilon = -8$ ,  $\mu = -2$ ,  $d = 4$  mm) 的一维光子晶体作了计算, 同样得到了只有几个孤立频率能透射, 其它频率范围均反射 (见文献 [14] 的 Fig1 (b))。考虑色散后 (见文献 [14] 的 (13) 式), 计算结果为  $\epsilon$  和  $\mu$  均从负值到正值变化, 得到了 2 个带隙: 在  $\epsilon$  和  $\mu$  为负值区 (即负折射率介质区) 得到了  $0-\bar{n}$  隙, 在  $\epsilon$  和  $\mu$  为正值区 (即正折射率介质区) 得到的为 Bragg 隙。当单元层大小改变 (变小) 时,  $0-\bar{n}$  隙位置不变, 但 Bragg 隙则向高频方向移动 (见文献 [14] 的 Fig2)。

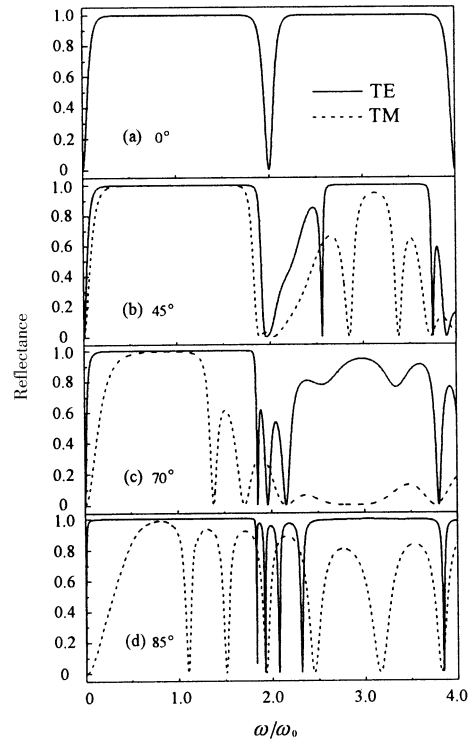


图 1 PIM/NIM 一维光子晶体的反射谱

Fig 1 Reflection spectra of 1D PIM/NIM photonic crystal

## 1.3 单轴各向异性负折射率介质反射特性

由文献 [2~ 4] 知, 负折射率介质是金属条和开口谐振环组成的周期性结构, 结构属性决定了负折射率介质是各向异性的, 只是在考虑到波长比结构单元大得多时不去考察其各向异性。复旦大学<sup>[9]</sup>对单轴各向异性介质的反射特性作了研究, 得到了产生全向反射的条件。满足这些条件时均产生全向反射, 他们也对 PIM/NIM 一维光子晶体作了计算, 所得结果与上述二种情况一致。

## 2 1D 光子晶体结构参数对 PBG 影响

正如前述, 当  $\lambda \gg a$  (晶格常数) 时, 可以用有效参数来处理各向异性介质。考虑色散, 有效介电常数  $\epsilon(f)$  和有效磁导率  $\mu(f)$  有下式表征:

$$\epsilon(f) = 1 + \frac{120}{2 \cdot 36^2 - f^2} + \frac{400}{23^2 - f^2}$$

$$\mu(f) = 1 + \frac{50}{2 \cdot 42^2 - f^2}$$

式中  $f$  的单位是 THz。很简单的计算, 可以得到  $\epsilon(f)$  和  $\mu(f)$  同时为负的频率范围 2.6 ~ 7.5 THz, 这个范围内介质就具有负折射率性质。它与正折射率介质  $n = 1$  的空气 ( $\epsilon = 1$ ,  $\mu = 1$ ) 组成了一维光子晶体, 周期为  $a = 20 \mu\text{m}$ , 两种介质

的厚度比为 0.6:0.4, 周期数  $N=15$ 。采用传输矩阵法计算, 入射角分别为  $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $70^\circ$ 、 $85^\circ$  的透射谱如图 2。由图可以看出, 各种入射角时, TE 模在频率范围 5.3 到 6.2 THz 内, 得到了全反射。入射角的不同, TE 模带隙的频率范围变化不大, 而 TM 模的频率变化范围较为明显。在 6.2 THz 附近可以实现任意偏振光的全向反射。

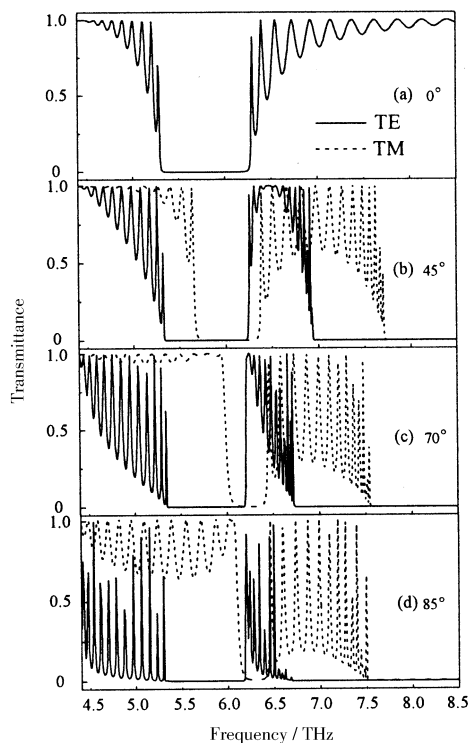


图 2 有色散光子晶体的透射谱

Fig 2 Transmission spectra of dispersive photonic crystal

对于周期性结构参数, 可以考虑 2 个方面: ①将  $a$  缩小为  $3a/4$ , 结果见图 3 (a) 的虚线,  $0-\bar{n}$  隙的带隙 (PBG) 频率没有移动, 仅仅变宽了一点, 全向反射频率范围基本不变。④NIM 层厚作 20% 随机变化, 计算结果见图 3 (b) 的虚线, 同样发现  $0-\bar{n}$  隙的 PBG 基本不变化。图 3 中的实线为层厚未作变化时的透射谱, 其它参数与图 2 (a) 相同, 且为正入射。由此可以得出结论: 对 PIM/NIM 1D 光子晶体, 周期结构参数的变化对 PBG 基本上不产生什么影响, 也就是说, 它不像电介质光子晶体的 PBG 对结构参数那么敏感。

### 3 结 论

研究了含负折射率介质的一维光子晶体的反射特性和透射特性, 这种光子晶体的 PBG (包括  $0-\bar{n}$  隙) 与电介质一维光子晶体的 PBG——Bragg 隙不同, 两者的机理是不一样的。含负折射率介质的

一维光子晶体的 PBG 对周期结构参数的变化——厚度随机变化和晶格常数变化是不敏感的, 在一定频率范围可实现全向反射。这是含负折射率材料的一维光子晶体用作全向反射镜的物理基础。

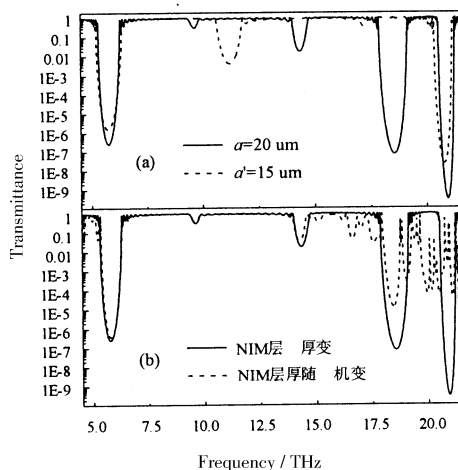


图 3 结构参数对光子晶体透射谱的影响

Fig 3 Effects of the structure parameters on the transmission spectra

### 参考文献:

- [1] Veselago V G. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of  $\epsilon$  and  $\mu$  [J]. Sov Phys Vsp, 1968, 10 (4): 509-514.
- [2] 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): 4773-4776.
- [3] Smith D R, Vier D C, Padilla W, et al. Loop-wire medium for investigating plasmons at microwave frequencies [J]. Appl Phys Lett, 1999, 75 (10): 1425-1427.
- [4] Shelby R A, Smith D R, Schultz S. Experimental verification of a negative index of refraction [J]. Science, 2001, 292 (5514): 77-79.
- [5] Abdulhalim I. Omnidirectional reflection from anisotropic periodic dielectric stack [J]. Opt Commun, 2000, 174 (1): 43-50.
- [6] Han P, Wang H. Extension of omnidirectional reflection range in one-dimensional photonic crystals with staggered structure [J]. J Opt Soc Am B, 2003, 20 (9): 1996-2001.
- [7] Shen X, Chen X, Jiang M, et al. Transmission spectra of one-dimensional photonic crystals including negative-refractive-index media [J]. Optoelectron Lett, 2005, 1 (3): 201-204.
- [8] Li J, Zhou L, Chan C T, et al. Photonic band gap from a stack of positive and negative index materials [J]. Phys Rev Lett, 2003, 90 (8): 083901.
- [9] Liu Z, Xu J, Lin Z. Omnidirectional reflection from a slab of uniaxially anisotropic negative refractive index materials [J]. Opt Commun, 2004, 240 (1): 19-27.