

文章编号: 1000-7032(2008)02-0221-04

## 含负折射率材料的一维“啁啾”光子晶体的透射谱

王政平, 王 成

(哈尔滨工程大学 理学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:** 将“啁啾”函数引入到含负折射率材料的一维光子晶体中, 利用转移矩阵法对这种光子晶体的透射谱进行了研究。通过计算模拟了这种光子晶体的透射谱随入射角、频率的变化关系, 并计算了这种晶体的复有效折射率的表达式。结果表明, 当“啁啾”函数对厚度调制不大时, 该晶体具有很宽的反射带, 并且反射带对入射角度反应不敏感, 其原因是由于其复有效折射率的实部几乎为 0 而虚部较大。利用这一特性可以用来制作高品质的宽带全方位反射镜。

**关键词:** 光子晶体; 负折射率材料; 转移矩阵

中图分类号: O431.1; O437

PACC: 4220

文献标识码: A

## 1 引 言

近年来, 负折射率人工复合材料在理论与实验上引起了广泛关注<sup>[1~4]</sup>。负折射率材料具有负的介电常数与磁导率。1967年 Veselago<sup>[5]</sup>首先研究了这种负折射率系数材料 (left handed media), 证明这种材料具有负的光学折射率。负折射率材料具有一些奇特的光学与电磁学性质, 比如 Doppler 效应与 Cherenkov 辐射的逆转、交界面上的反常折射、原子自发辐射率的特殊改变等现象在负折射率材料中都会出现<sup>[6]</sup>。

最初的反射镜是金属镜, 它具有几乎全角度和宽频带反射, 但是它较大的吸收损耗; 后来的布拉格反射镜具有较小吸收系数, 在高增益激光器和谐振腔发光二极管中得到了重要的应用。但这种布拉格反射镜的反射带对入射角很敏感, 在 Brewster 角附近对 P 偏振分量的反射率接近于零, 具有一定的局限性。本文中, 将厚度调制函数引入到含负折射率材料的一维光子晶体中 (厚度调制函数类似于光纤光栅中的“啁啾”函数), 用转移矩阵法对这种晶体进行了研究, 研究发现这种结构的反射带较宽并且对入射角不敏感, 可以用来制作宽带的全方位反射镜。

## 2 物理模型

## 2.1 透射系数

本文研究的光子晶体由 A, B 两种不同材料沿 z 轴方向交替生长而成, 每个周期由 A, B 材料两层膜构成, 如图 1 所示, 其中 A 的折射率是正值, 介电常数为  $\epsilon_A$ , 磁导率为  $\mu_A$ , B 的折射率是负值, 介电常数为  $\epsilon_B$ , 磁导率为  $\mu_B$ , 折射率分别为  $n_A = \sqrt{\epsilon_A \mu_B}$ ,  $n_B = -\sqrt{\epsilon_B \mu_B}$ , 第 m 个周期相应的 A 膜和 B 膜的实际厚度分别为  $d_A(m)$  与  $d_B(m)$ , 其表达式为

$$d_A(m) = d_A f(m) \quad (1)$$

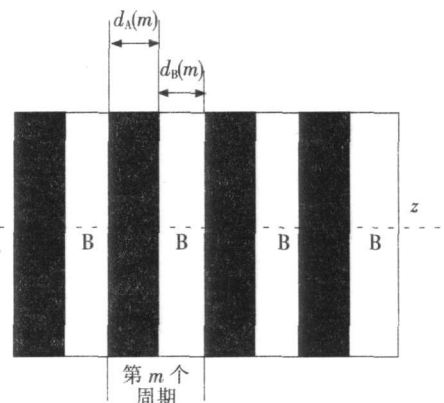


图 1 含负折射材料的一维光子晶体结构示意图

Fig 1 Scheme of the structure of one dimensional photonic crystal containing negative refraction material

收稿日期: 2006-11-28 修订日期: 2007-06-24

作者简介: 王政平 (1949-), 男, 河北乐亭人, 教授, 主要从事材料学的研究。

E-mail: zpwang@hrbeu.edu.cn Tel: (0451) 82518226

$$d_B(m) = d_B f(m) \quad (2)$$

其中  $d_A$  和  $d_B$  是常数,  $f(m)$  是厚度调制函数, 这里称为“啁啾”函数。

第  $j$  层的电磁场用以下二分量波函数描述为<sup>[7]</sup>

$$\psi_j(z) = \begin{bmatrix} E_j(z) \\ iH_j(z) \end{bmatrix} \quad (3)$$

则晶体中的电磁场满足如下关系

$$\psi_m(z + \Delta z) = M_m(\omega) \psi_m(z) \quad (4)$$

其中,  $M_m(\omega)$  是晶体的第  $m$  个周期的传递函数, 表达式为

$$M_m(\omega) = \begin{bmatrix} \cos[k_A d_A(m)] & -a \sin[k_A d_A(m)] \\ \frac{1}{a} \sin[k_A d_A(m)] & \cos[k_A d_A(m)] \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos[k_B d_B(m)] & -b \sin[k_B d_B(m)] \\ \frac{1}{b} \sin[k_B d_B(m)] & \cos[k_B d_B(m)] \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中

$$k_A = \frac{\omega}{c} \sqrt{\epsilon_A \mu_A - \sin^2 \theta} \quad a = \frac{\mu_A}{\sqrt{\epsilon_A \mu_A - \sin^2 \theta}}$$

$k_B = -k_A$ ,  $b = -a$ ,  $\theta$  是入射角,  $c$  是真空中的光速。

当入射波为 TE 波时, 透射系数可表示为

$$t(\omega) = \frac{2}{(x_{11} + x_{22}) + \left[ x_{12} \cos \theta - \frac{x_{21}}{\cos \theta} \right]} \quad (6)$$

其中  $x_{ij}$  是晶体的特征矩阵  $M(\omega)$  的矩阵元,  $M(\omega)$  为

$$M(\omega) = \prod_{m=1}^N M_m(\omega) \quad (7)$$

其中  $N$  是晶体总的周期数。

则透射率可表示为

$$T(\omega) = |t(\omega)|^2 \quad (8)$$

### 2.2 复有效折射率

将透射系数改写为

$$t(\omega) = \sqrt{T(\omega)} e^{i\phi(\omega)} \quad (9)$$

其中  $\phi(\omega)$  是光透过传播介质时, 总的相位移动, 它能体现出光在介质中传播特性的本质信息。

晶体的复折射率可表示为<sup>[8]</sup>

$$\hat{n}_{\text{eff}}(\omega) = \frac{c}{\omega L} \left[ \phi(\omega) - \frac{1}{2} i \ln T \right] \quad (10)$$

其中  $L$  是晶体的总长度。

由式 (9)、(10) 和 (11), 可以得到复有效折射率的实部和虚部分别为

$$\text{Re}[\hat{n}_{\text{eff}}(\omega)] = \frac{c}{\omega L} \arcsin \left\{ \ln \left[ \frac{t(\omega)}{|t(\omega)|} \right] \right\} \quad (11)$$

$$\text{Im}[\hat{n}_{\text{eff}}(\omega)] = \frac{-c}{2\omega L} \ln T \quad (12)$$

### 3 数值计算结果与分析

设  $n_A = 2.5$ ,  $n_B = -1.5$ ,  $\mu_A = 1$ ,  $\mu_B = -1$ ,

$d_A n_A = -d_B n_B = \frac{\lambda_0}{4}$  ( $\lambda_0$  是中心波长), 周期数  $N = 10$

当“啁啾”函数  $f(m) = 1$ , 即无调制时, 把这些数据代入式 (8) 得到这种晶体的透射率随频率和入射角的三维关系图, 如图 2 所示。从图 2 中可以发现对入射角不敏感, 反射带非常的窄。

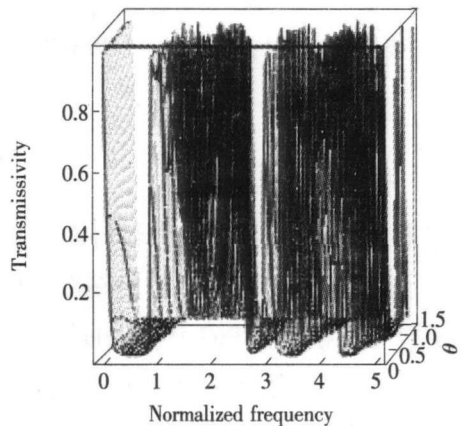


图 2  $f(m) = 1$  时, 一维光子晶体的透射率

Fig 2 The transmittance of one dimensional photonic crystal for  $f(m) = 1$ .

当“啁啾”函数  $f(m) = \frac{1}{m}$  时, 得到这种晶体的透射率随频率和入射角的三维关系图, 如图 3 所示。

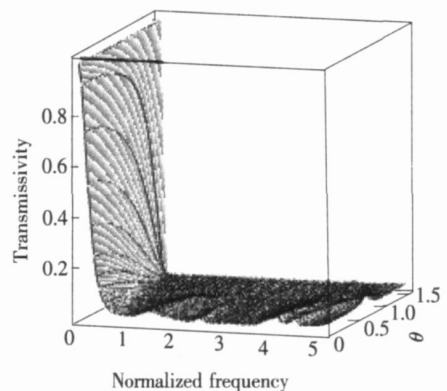


图 3  $f(m) = \frac{1}{m}$  时, 一维光子晶体的透射率

Fig 3 The transmittance of one dimensional photonic crystal for  $f(m) = \frac{1}{m}$ .

从图中可以发现, 几乎在整个计算的频率范围内, 无论入射角如何变化, 透射率都几乎为 0 也就是说几乎在整个计算的频段, 实现了全方位角高反射率。另外随着入射角的增加, 全反射带宽略有增加, 且反射率更接近于 0。

计算得到了晶体复折射率的实部和虚部与频率与入射角的三维关系, 见图 4 (a)、(b) 所示。从图中可以发现除掉在 0 附近的归一化频段外, 无论入射角如何变化, 有效折射率的实部几乎为 0 而虚部都有较大的值。有效折射率的虚部可以反映出光在晶体中的透射能力, 当虚部较大时, 对应着晶体的禁带, 当虚部较小时, 对应着晶体的透带, 所以这里所研究的晶体具有全方位角完全反射特性。有效折射率的实部反映了晶体的色散特性, 从图 4 (a) 中, 可以发现有效折射率的实部随着频率的增大而减小, 这是反常色散现象。

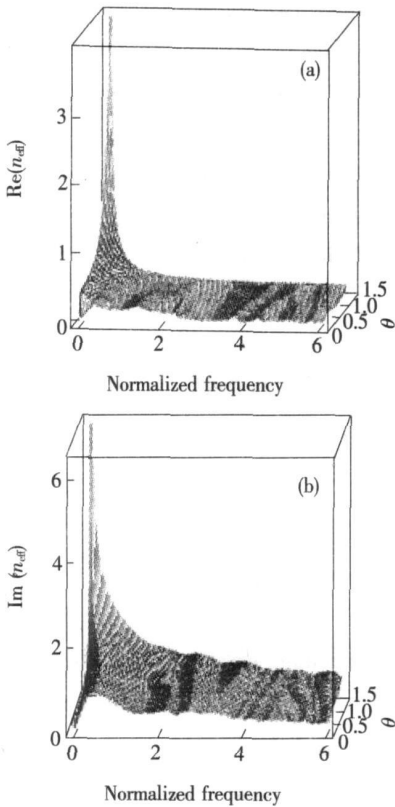


图 4 (a) 有效折射率的实部; (b) 有效折射率的虚部  
Fig 4 (a) the real part of the effective index (b) the imaginary part of the effective index

大, 晶体的透射率波动越显著。这是由于: 对于晶体的每一个周期而言, 在一定频段内, 一定的入射角度范围内, 存在着全反射现象; 由于每个周期的厚度不同, 所以发生全反射的频段也不同; 将这些厚度发生变化的单个周期组合在一起, 每个周期的全反射频段就组合在一起, 形成一个连续的频段, 从而产生了宽频段、全方位角的高反射现象。但是如果“啁啾”函数的调制较大, 这些频段就难以形成一个连续的频段, 所以若要实现全方位角高反射率, 则应选择调制较小的调制函数。

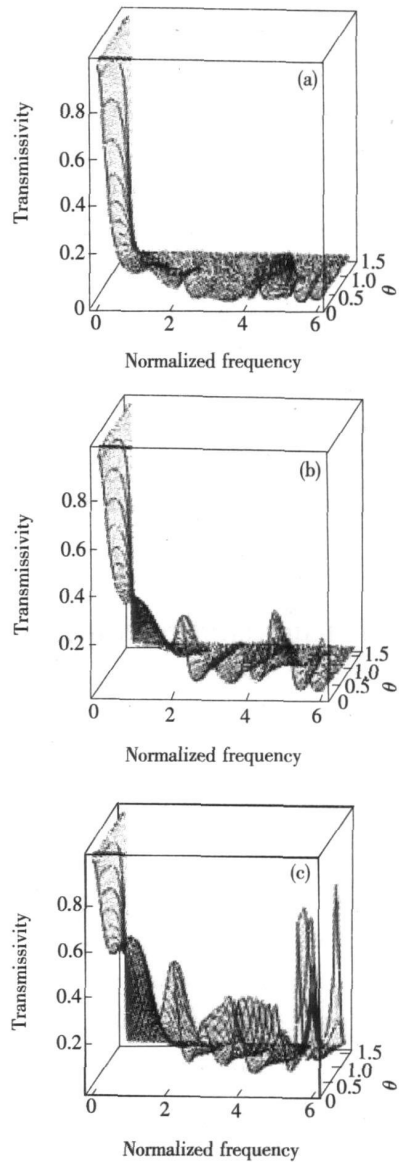


图 5 不同  $f(m)$  时一维光子晶体的透射率  
Fig 5 The transmittance of one dimensional photonic crystal for (a)  $f(m) = \frac{1}{m^2}$ , (b)  $f(m) = \frac{1}{m^3}$ ; (c)  $f(m) = \frac{1}{m^5}$ .

当“啁啾”函数分别为  $f(m) = \frac{1}{m^2}$ ,  $f(m) = \frac{1}{m^3}$ ,  $f(m) = \frac{1}{m^5}$  时, 得到的透射谱如图 5 (a)、(b)、(c) 所示, 发现“啁啾”函数对厚度调制越

## 4 结 论

从电磁理论出发, 推导了光在正负折射率材料交替生成的“啁啾”周期性结构中的传输矩阵。利用传输矩阵方法模拟了这种结构的反射率随角度、频率的变化关系。结果表明, 当“啁啾”函数

对厚度调制不大时, 该体系具有很宽的反射带, 并且反射带对入射角不敏感, 利用这一特性可以用来制作高品质的宽带全方位反射镜, 以及制作半导体量子阱激光器、共振腔光发射二极管等光电子器件中的谐振腔等。

## 参 考 文 献:

- [ 1 ] Shelby R A, Smith D R, Schultz S. Experimental verification of a negative index of refraction [ J]. *Science*, 2001, **292**: 77-79.
- [ 2 ] Moss C D, Grzegorzczak T M, Zhang Y, *et al*. Numerical studies of left handed materials [ J]. *Progress in Electromagnetics Research*, 2002, PIER **35**: 315-334.
- [ 3 ] Pendry J B, O'Brien S. Very-low frequency magnetic plasma [ J]. *J. Phys: Condens. Matter*, 2002, **14** ( 32 ): 7409-7416.
- [ 4 ] Parazzoli C G, Grøegor R B, Li K, *et al*. Experimental verification and simulation of negative index of refraction using Snell's law [ J]. *Phys Rev Lett*, 2003, **90**( 10 ): 107401-1-4.
- [ 5 ] Veselago V G. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of  $\epsilon$  and  $\mu$  [ J]. *Sov. Phys. Uspekhi*, 1966, **10**( 4 ): 509-514.
- [ 6 ] Klimov V V. Spontaneous emission of an excited atom placed near "left handed" media [ J]. *Opt. Commun.*, 2002, **211** ( 4 ): 183-187.
- [ 7 ] Liu N H. Defect modes of stratified dielectric media [ J]. *Phys Rev B*, 1997, **55**( 7 ): 4097-4100.
- [ 8 ] Chen Weizong, Bo Tao, Fu Lingli, *et al*. Effective refractive index and dispersive properties of one dimensional photonic crystals [ J]. *Acta Photonica Sinica* ( 光子学报 ), 2002, **31**( 9 ): 1124-112 ( in Chinese ).

# Transmission Spectrum of One-dimensional "Chirped" Photonic Crystals Containing Negative Refraction Materials

WANG Zheng-ping WANG Cheng

(*Science School, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China*)

**Abstract** The "chirped" function is induced to the one dimensional photonic crystals containing negative index media. The transmission spectrum of this type photonic crystal is investigated using the transfer matrix method. The transmission spectrum, as a function of the incident angle and the frequency, is simulated using computing. The results indicate that this photonic crystal has a wider reflect band which is insensitive to the incident angle when the thickness is not much modulated by the "chirped" function. The reason is that the real part of the complete effective index is almost zero, but the imaginary part is more lager. This special property could be used to make high quality reflection lens with wide band and full incident angle.

**Key words** photonic crystal; negative refraction materials; transfer matrix