

文章编号:1001-5078(2009)11-1206-04

· 光学材料器件与薄膜 ·

准周期光子的透射率对不同偏振态的波长和角度响应

李文胜¹, 付艳华¹, 是度芳^{1,2}

(1. 湖北汽车工业学院理学部, 湖北 十堰 442002; 2. 华中科技大学物理系, 湖北 武汉 430074)

摘要:利用传输矩阵法, 计算了含左手材料的一维准周期光子晶体的透射率对 P 和 S 两个偏振态的波长和角度响应。结果表明: 当入射角 $\theta \leq 10^\circ$ 时, 透射率对 P 和 S 两个偏振态的波长响应完全一致; 而入射角较大时, 上述响应有明显的差异, 入射角越大, 差异越明显。在 5 种单色光的入射下, 其透射率对两个偏振态的角度响应, 在入射角 θ 较小和较大的两个角区间内基本一致, 且入射光波长越短, 响应相同的区间越大。

关键词:光子晶体; 准周期; 透射率; 响应

中图分类号: O734 **文献标识码:** A

Response between wavelength and angular of transmittance of quasi-periodic 1-D photonic crystal for different polarizations

LI Wen-sheng¹, FU Yan-hua¹, SHI Du-fang^{1,2}

(1. Department of Basic Science Hubei Automotive Industries Institute, Shiyan 442002, China;

2. Department of Physics of Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The response between wavelength and angular of transmittance of quasi-periodic 1-D photonic crystal with left-handed materials for different polarizations was calculated by transfer matrix method. The results show: when the incidence angle $\theta \leq 10^\circ$, wavelength response of band gaps for P and S two polarizations are the same; but when the incidence angle is larger, the response above will be significant different, the greater the incidence angle is, there will be more obvious different. When there are 5 kinds of monochromatic incident light, the angular response of band gaps for two polarizations are basically the same when incidence angle is greater or less and the shorter the wavelength of incident light, the greater the response to the same interval.

Key words: photonic crystal; quasi-periodic; transmittance; response

1 引言

偏振特性是光学元器件的重要性能参数。光子晶体作为一种极有应用价值和潜力的新型光学元件, 对其偏振特性的研究是必不可少的。相对光子晶体的其他特性, 这方面的研究明显偏少^[1], 已有的工作也都是对 TE 波(横电波)和 TM 波(横磁波)进行的^[2-3]。而无论是 TE 波还是 TM 波, 都可以进一步分解为相对入射面的平行分量(P 分量)和垂直分量(S 分量), 近期虽有这方面的研究报道, 但研究的对象是严格的周期光子晶体。然而, 由于加工过程中存在的偶然误差, 其几何参数必然随机波动, 此

外介质实际存在的色散也不容忽视。因此严格的周期光子晶体只是一种理想模型。考虑到上述两方面的影响, 本文讨论了在考虑了色散的基础上, 由右手材料(Right-handed Materials, RHM)和左手材料(Left-handed Materials)构成的, 几何厚度在一基准值附近随机变化的一维准周期光子晶体其透射率对 P 和 S 两个不同偏振态的波长和角度的响应。

基金项目:湖北省教育厅基金项目(No. Q200723001)资助。

作者简介:李文胜(1955-), 男, 副教授, 主要从事光学教学与研究工作。E-mail: liwensheng200099@sina.com

收稿日期:2009-06-06

2 物理模型

计算所用的一维准周期光子晶体结构如图 1 所示。图中 A,B 两种介质分别为 RHM 和 LHM,其折射率分别是 n_A, n_B , 相对介电常数、相对磁导率和基准厚度依次分别是 $\epsilon_{rA}, \epsilon_{rB}; \mu_{rA}, \mu_{rB}; d_A, d_B$, 晶体两侧为空气。

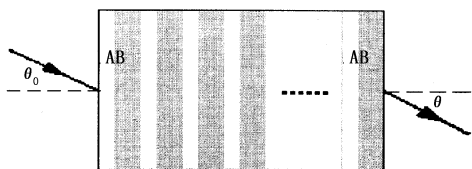


图 1 一维光子晶体模型

Fig.1 the structure of 1D photonic crystal

采用传输矩阵法计算图 1 所示的光子晶体的透射谱的传输矩阵为:

$$M = \prod_K M_{KA} M_{KB} \quad (1)$$

其中, M_{KA} 和 M_{KB} 分别是第 K 单元中 A, B 两介质的特征矩阵, N 为总单元数。对于第 K 单元中的 LHM 介质层, 其特征矩阵 M_{KL} 的具体表示为^[4]:

$$M_{KL} = \begin{bmatrix} \cos\delta_{KL} & i\sin\delta_{KL}/\eta_L \\ i\eta_L \sin\delta_{KL} & \cos\delta_{KL} \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中, $\delta_{KL} = 2\pi n_L d_{KL} \cos\theta_L / \lambda$ ($\theta_L < 0$)。因各单元中 A, B 两介质的厚度是在基准值附近随机变化的, 所以式(1)中 M_{KA} 和 M_{KB} 也应按不同的厚度作相应的变化。对于不同的偏振态, η_L 由下式表示:

$$\eta_L = \begin{cases} \eta_L / \cos\theta_L & S \text{ 偏振态} \\ \eta_L \cos\theta_L & P \text{ 偏振态} \end{cases} \quad (3)$$

其中, θ_L 为第 K 单元中 LHM 介质层光线的折射角。而对 RHM 介质层, 其特征矩阵 M_{KR} 的形式及矩阵元的表达式与上述对应的表示一致, 只需把 η_L 换成 η_R , 下标 L 换成 R 即可^[5]。

$$\text{若 } M = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} \quad (4)$$

则透射率为^[6]:

$$T = \frac{4\eta_a^2}{|\eta_a m_{11} + \eta_a^2 m_{12} + m_{21} + \eta_a m_{22}|^2} \quad (5)$$

式中, η_a 为光子晶体外侧介质的导纳。

3 透射率对波长的响应

计算时, A, B 两种介质的基准厚度均为 380 nm, 厚度的随机变化的幅度均小于 5% (数值计算时由计算机随机产生), 其中, A 介质是 RHM, 选用硅

晶体。它是色散的^[7], 文献[7]对此材料的折射率 n_A 随波长变化的色散关系有很详细的介绍, n_A 与 λ 之间的函数关系为^[8]:

$$n_A = A + BL + CL^2 + D\lambda^2 + E\lambda^4 \quad (6)$$

式中, $A = 1.38761, L = 1/\lambda^2 - 0.028, B = 0.001796, C = -0.00041, D = -0.0023045, E = -0.00000557$, 波长 λ 的单位是 μm 。而 B 介质是 LHM, 其介电常数和磁导率采用 Lossy Dryde^[9] 模式:

$$\epsilon(\bar{\omega}) = 1 - \frac{1}{\bar{\omega}(\bar{\omega} + i\bar{\gamma}_e)}, \mu(\bar{\omega}) = 1 - \frac{(\omega_{pm}/\omega_{pe})^2}{\bar{\omega}(\bar{\omega} + i\bar{\gamma}_m)} \quad (7)$$

那么, 折射率 $n(\bar{\omega})$ 为:

$$n(\bar{\omega}) = \pm \sqrt{\epsilon(\bar{\omega})\mu(\bar{\omega})} \quad (8)$$

式中, $\bar{\omega} = \omega/\omega_{pe}$ 为归一化频率; $\bar{\gamma}_e = \gamma_e/\omega_{pe}$ 和 $\bar{\gamma}_m = \gamma_m/\omega_{pm}$ 分别为归一化电损耗和磁损耗; ω_{pe} 和 ω_{pm} 分别为电和磁等离子体频率。在本文的计算中取 $\gamma_e = \gamma_m = 0.01, \omega_{pe}/\omega_{pm} = 9$ ^[10], 文献[10]对此情况下 LHM 的色散关系做了较详细的计算, 在此不再赘述。

在上述条件下, 用可见光分别以 $0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$ 和 40° 五种入射角入射, 并取单元数 $N = 10$, 经数值计算得到此光子晶体的透射率如图 2 所示。图中实、虚线分别表示 P, S 偏振态。

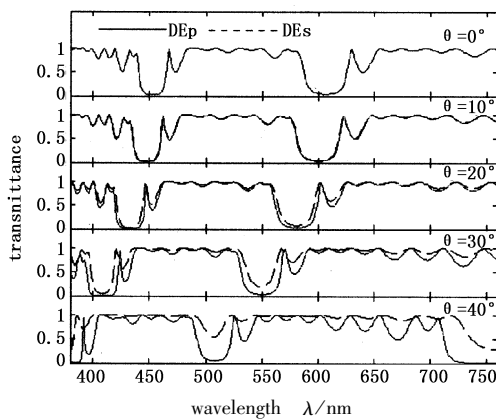


图 2 不同偏振态在不同入射角下透射率的波长响应

Fig.2 wavelength selectivity of transmittance for different polarizations at different angles

从图中可见, 在上述条件下, RHM-LHM 一维准周期光子晶体的透射率对 P 和 S 两个偏振态的波长响应有如下特点:

(1) 当入射角 $\theta \leq 10^\circ$ 时, 在可见光的范围内, 透射率对 P 和 S 两个偏振态的波长响应完全相同, 即两个偏振态的透射率完全一致。

(2) 入射角 $\theta = 20^\circ$ 时, P 和 S 两个偏振态的禁带中心的线位置相同的, 但 S 偏振态的禁带线宽稍小于 P 偏振态对应的线宽度, 且底部也稍有上升。即在入射角 $\theta = 20^\circ$ 时, 在可见光的范围内, 透射率对两个偏振态的波长响应出现了差异。

(3) 当入射角 $\theta \geq 30^\circ$ 时, 透射率对两个偏振态的波长响应出现了明显的差异。具体表现在 S 偏振态的原禁带的底部, 随入射角的增加迅速上升而消失, 而 P 偏振态的原通带则是向短波段方向移动并宽度有所变窄, 且通带顶部的震荡加剧。入射角越大, 两者的差异越大。

产生上述变化的原因, 可从式(3)作一简要分析, 当入射角 θ 较小时, $\cos\theta \approx 1$, 即 P 和 S 两偏振态对应的导纳相等, 故两个偏振态的透射率一致; 否则, $\cos\theta \neq 1$, 两导纳不等, 则两个偏振态的透射率不一致。入射角越大, 差异也越大。

4 透射率对角度的响应

RHM-LHM 一维准周期光子晶体的特征参数保持不变, 入射光波长分别取 $\lambda = 485 \text{ nm}$, 495 nm , 505 nm , 515 nm 和 525 nm , 讨论其透射率在上述单色光入射时, 对不同偏振态的角度响应。计算结果如图3所示, 仍以实、虚线分别表示 P 和 S 偏振态。

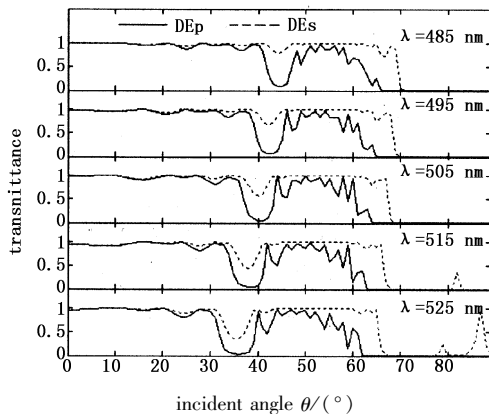


图3 不同偏振态在不同波长下透射率对入射角的响应
Fig.3 angles selectivity of transmittance for different polarizations at different wavelength

从图中可见, 在上述条件下, RHM-LHM 一维准周期光子晶体的透射率对 P 和 S 两个偏振态的角度响应有如下特点:

(1) 上述 5 种单色光在入射角较小 ($\theta \leq 20^\circ$) 时, 透射率对两个偏振态的角度的响应完全相同, 这和前面讨论所得的结论基本一致。

(2) 当入射角满足 $30^\circ \leq \theta \leq 70^\circ$ 时, 上述 5 种单色光入射时对应的透射率对不同偏振的角度响应有

较大的差异。具体表现在 P 偏振态有一明显的禁带, 且随波长增加, 禁带中心的角位置向小角度方向移动, 禁带角宽度增加; 而 S 偏振态在与 P 偏振态的禁带对应的角位置处是一通带, 入射波长增加, 此通带的透射率逐渐变小而成为准禁带。此外对 S 偏振态而言, 在上述角范围内的其他位置基本是严格的通带, 这和 P 偏振态在对应处的通带顶部的震荡形成了明显的对比。

(3) 入射光波长较短 ($\lambda \leq 515 \text{ nm}$) 时, S 和 P 偏振在入射角 $70^\circ < \theta \leq 89^\circ$ 的范围内都是禁带, 即透射率对不同偏振的角度响应完全相同。但当波长较长 ($\lambda = 525 \text{ nm}$) 时, S 偏振态在 85° 角位置处产生了一个新的通带。

5 结论

由上面的讨论可知, 对于上述由 RHM (硅晶体) 和 LHM 组成的一维准周期光子晶体, 在考虑介质色散的情况下, 用可见光入射时, 其透射率对 P 和 S 两个偏振态的波长的响应有以下特点: 入射角较小 ($\theta \leq 10^\circ$) 时, 透射率对两个偏振态的波长响应完全一致; 而入射角较大 ($10^\circ < \theta \leq 40^\circ$) 时, 上述响应有明显的差异, 在上述范围内, 入射角越大, 差异越明显。在上述 5 种单色光的入射下, 其透射率对 P 和 S 两个偏振态的角度响应情况呈准周期变化, 在入射角 θ 较小和较大的两个角区间内基本一致, 且入射光波长越短, 响应相同的区间越大。上述结论对于进行一维准周期光子晶体透射特性的理论和实验研究具有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] Cory H, Zach C. Wave propagation in metamaterial multi-layered structures [J]. *Microw. and opt. Thch. Lett.*, 2004, 40(6):460-465.
- [2] Gerardin J, Lakhtakal A. Negative index of refraction and distribution Bragg reflector [J]. *Microw. and opt. Thch. Lett.*, 2002, 34(6):409-411.
- [3] Zhang Z M, Fu C J. Unusual photo tunneling in the presence of a layer with a negative refractive index [J]. *Appl. phys. lett.*, 2002, 80(6):1097-1099.
- [4] Zhang L, Liang L, Zhang L L, et al. Study of band-structure of 1-D photonic crystal [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, 37(9):1815-1818. (in Chinese)
张玲, 梁良, 张琳丽, 等. 一维光子晶体带隙结构研究 [J]. *光子学报*, 2008, 37(9):1815-1818.

- [5] Jiang M F, Jiang X F, Xiao M, et al. Study of polarization properties of 1-D photonic crystal [J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2005, 22(4): 612 - 616. (in Chinese)
蒋美芳, 江兴方, 沈小明, 等. 一维光子晶体的偏振特性研究[J]. 量子电子学报, 2005, 22(4): 612 - 616.
- [6] Wu Y G, Lin X Y, Gu C S, et al. one dimensional photonic crystal applied for the spectrum modification of BaF₂ scintillation crystal [J]. Acta Photonica Sinica, 2005, 34(1): 94 - 97. (in Chinese)
吴永刚, 林小燕, 顾春时, 等. 一维金属/介质光子晶体用于 BaF₂ 晶体闪烁光谱修饰[J]. 光子学报, 2005, 34(1): 94 - 97.
- [7] Wang W J, Zhou J Y, Xiao W N. Light distribution and localization in one-dimensional periodic structure [J]. Acta Photonica Sinica, 2005, 34(7): 1086 - 1089. (in Chinese)
王维江, 周建英, 肖万能. 光在一维周期结构中的分布与局域化[J]. 光子学报, 2005, 34(7): 1086 - 1089.
- [8] Shi D F, Li C F, Zhang G P, et al. Introduction of modern optics [M]. Wuhan: Hubei Science and Technology Press, 2003: 385 - 386. (in Chinese)
是度芳, 李承芳, 张国平, 等. 现代光学导论[M]. 武汉: 湖北科学技术出版社, 2003: 385 - 386.
- [9] Aguanno G D, et al. Second-harmonic generation at angular incidence in a negative-positive index photonic band-gaps structure [J]. Opt. Commun., 2004, 240: 19 - 27.
- [10] Fu Y H, Zhang Q, LUO S J, et al. Change of band gap structure of 1-D photonic crystal of periodic positive-negative index structure at angular incidence [J]. Chinese journal of quantum electronics, 2008, 25(6): 733 - 736. (in Chinese)
付艳华, 张琴, 罗时军, 等. 含正负介质光子晶体在角度入射情况下的透射率变化[J]. 量子电子学报, 2008, 11(7): 732 - 736.