

文章编号: 1672-8785(2008)08-0037-05

单负材料组成的周期结构中的快慢光

马 煜 吴泉英

(苏州科技学院数理学院物理实验中心, 江苏 苏州 215009)

摘 要: 本文研究由介电系数和磁导率为负的材料组成的一维光子晶体中的电磁波脉冲的传播特性。利用传输矩阵的方法, 计算出了该结构中脉冲传播的透射谱和相时间。数值结果表明, 在光子带隙的带边和带底会分别出现脉冲传播速度减慢和加快的现象。若周期结构中间存在缺陷层, 光子带隙中会出现极窄的透射峰, 因此, 对应于该频率的电磁波在该体系中传播时速度会变得更加缓慢。

关键词: 单负材料; 光子晶体; 缺陷模; 快慢光

中图分类号: O441.6; O487 **文献标识码:** A

Subluminal and Superluminal Pulse Propagation in Periodic Structures Containing Single-negative Materials

MA Yu, WU Quan-ying

(Center of Physics Laboratory, School of Mathematical and Physical Sciences, University of Science and Technology of Suzhou, Suzhou 215009, China)

Abstract: The propagation properties of an electromagnetic pulse in a one-dimensional photonic crystal (PC) composed of single-negative (permittivity- or permeability-negative) materials are studied in this paper. The transmission spectrum and delay time of the pulse propagating in the structure are calculated by using a transfer matrix method. The numerical results show that the subluminal pulse propagation and superluminal transmission can occur respectively at the band edge and in the photonic band gap. If a defect layer exists in the periodic structure, an extremely narrow transmission peak would appear in the photonic band gap. Therefore, the electromagnetic wave corresponding to that frequency will become slower when propagating in the defect mode.

Key words: single-negative materials; photonic crystal; defect mode; subluminal and superluminal propagation

1 引言

改变电磁波传播的速度是实现了对电磁波有效控制的方法之一, 比如使光速减缓的方法就可以用于制作光学延迟线, 或者更进一步的光学数据处理、存储等^[1,2]。光的速度不仅可以被减慢, 在某些情况下, 电磁波传播的速度还可能被

加快, 比如在反常色散区域, 电磁波传播的群速度可能会超过其在真空中的传播速度 c ^[3-5]。不同的介电材料若按周期排列可形成光子晶体, 电磁波在其中传播时会受到多重散射和干涉的叠加作用, 因而晶体中会形成电磁波不能通过的光子带隙。由于具有这样的特性, 光子晶体在

收稿日期: 2008-05-16

基金项目: 江苏省物理教学实验示范中心建设点项目资助

作者简介: 马煜(1981—), 男, 江苏阜宁人, 助理实验师, 硕士, 主要从事负折射材料和光子晶体特性等方面的研究。

高性能反射镜、波导、滤波器件制作方面已越来越受到人们的重视^[6-8]。

负折射率材料是近十几年在实验中实现的折射率为负的人工材料, 电磁波能量在其中的传播方向与它的波矢(相位传播方向)相反。由于它的介电系数 ε 和磁导率 μ 都是负数, 也称其为双负材料^[9,10]。而介电系数或者磁导率单一为负的材料则被称为单负(电负或磁负)材料^[11,12]。本文研究由单负材料组成的一维光子晶体和含有杂质的一维光子晶体中的电磁波传播。利用传输矩阵的方法研究了在带隙附近传播的电磁波脉冲的复透射系数和相时间, 同时还画出了透射脉冲的波形, 得到了电磁波脉冲在该体系中的传播特性。结合光子晶体带隙对电磁波频率选择和电磁波在其中传播速度的快慢, 可以实现对周期结构中传播的光子的更有效控制。

2 理论与模型

图1为由两种材料组成的周期性结构 $(AB)^N$ 的一维光子晶体结构。A和B分别代表磁负材料和电负材料, N是周期数目。磁负材料的介电系数和磁导率分别为^[12]

$$\varepsilon_A = 1.5, \quad \mu_A = 1 - \frac{\omega_{mp}^2}{\omega^2} \quad (1)$$

电负材料的介电系数和磁导率分别为

$$\varepsilon_B = 1 - \frac{\omega_{ep}^2}{\omega^2}, \quad \mu_B = 1.5 \quad (2)$$

式中, ω_{ep} 和 ω_{mp} 分别是磁等离子共振频率和电等离子共振频率。通过选取合适的参数, 使得 ε_i 和 μ_i ($i = A, B$) 为一正一负的实数, 所以在任一层材料中, 折射率都是纯虚数, 而电磁波都是倏逝波。

由于实际材料中普遍具有缺陷结构, 还需考虑在周期结构体系中引入缺陷层的影响。令缺陷层位于体系中间, 缺陷材料是正常的介电常数 ε_C 、磁导率 μ_C 都为正的材料。利用传输矩阵来计算有限尺度的多层结构的电磁脉冲传播特性^[13], 联系单层材料两边的电磁场的传输矩阵可以写成如下形式:

$$M_j(d_j, \omega) = \begin{pmatrix} \cos[k_j d_j] & i/q_i \sin[k_j d_j] \\ i q_i \sin[k_j d_j] & \cos[k_j d_j] \end{pmatrix} \quad (3)$$

式中, 波矢 $k_j = \omega/c\sqrt{\varepsilon_i}\sqrt{\mu_i}\sqrt{1 - \sin^2 \theta/\varepsilon_i\mu_i}$ 是在第j层中沿着z轴的波矢, θ 是光的入射角。参数q在横电波中是 $q = \sqrt{\varepsilon_j}/\sqrt{\mu_j}\sqrt{1 - \sin^2 \theta/\varepsilon_i\mu_i}$; 在横磁波中 $q = \sqrt{\mu_j}/\sqrt{\varepsilon_j}\sqrt{1 - \sin^2 \theta/\varepsilon_i\mu_i}$ 。对于多层结构, 体系的总的传输矩阵是各层的矩阵相乘: $X(\omega) = \Pi M_i(d_j, \omega)$ 。如果该体系放在真空中, 则整个体系的透射系数可以写成如下形式:

$$T(\omega) = 2 \cos \theta \left\{ [X_{11}(\omega) + X_{22}(\omega)] \cos \theta - [X_{12}(\omega) \cos^2 \theta + X_{21}(\omega)] \right\}^{-1} \quad (4)$$

取透射系数 $T(\omega)$ 的模角 $\Phi = \arg[T(\omega)]$, 再求模角 Φ 对 ω 的偏微分, 得到透射脉冲的相时间^[14]:

$$\tau_p = \left(\frac{\partial \Phi}{\partial \omega} \right)_{\omega=\omega_c} \quad (5)$$

比较这个时间和脉冲在真空中传播的时间 $\tau_f = d/c$, 若 $\tau_p < \tau_f$, 则在该体系中的电磁波传播是超光的。

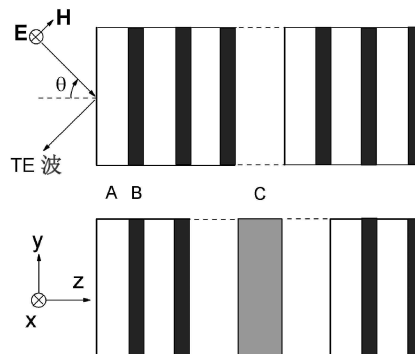


图1 磁负/电负周期材料和有缺陷的周期材料的结构图

然后, 通过计算出射脉冲的波形来检验脉冲传播的快慢^[15]。令入射脉冲是高斯型的, 它可以写成如下形式:

$$E(z, t) = e^{-(t-z/c)^2/\tau^2} e^{-i\omega_c(t-z/c)} \quad (6)$$

则出射脉冲就可以表示为

$$E_T(z, t) = \int_{-\infty}^{\infty} A(\omega) T(\omega) e^{-i\omega(t-z/c)} d\omega \quad (7)$$

通过比较真空中传播的脉冲和在研究体系中传播的脉冲的波形, 可以更加直观地看出电磁脉冲传播的快慢。

3 数值结果和讨论

首先考虑 8 层的磁负 / 电负周期性结构, 厚度分别为 $d_A = 2.4\text{cm}$ 和 $d_B = 1.2\text{cm}$ 。取 $\omega_{mp} = \omega_{ep} = 10\text{GHz}$ [12], 透射随频率的变化在图 2(a) 中画出。

图 2 中的第一个带隙是 $\Phi = k_A n_A d_A + k_B n_B d_B = 0$ 的零相位带隙, 它是由倏逝波的相互作用形成的。另一个带隙是普通的布拉格带隙, 它由条件 $k_0 \bar{n}(d_A + d_B) = m\pi (m=1)$ 得到。当 A、B 材料的厚度变化 (保持两者的比例不变) 时, 布拉格带隙会沿着频率发生移动, 但零相位带隙却不会变化。每层材料厚度越薄时, 因为倏逝波传播过较短的距离, 带隙中的电磁脉冲的透射强度变大。图 2(b) 中描绘了透射脉冲的相时间随频率的变化曲线。从图中可以看到, 脉冲在带隙中的传播是超光速的, 在带隙边, 由于共振作用, 其群速度会减慢。这种情况在布拉格带隙和零相位带隙中同样存在。脉冲在零相位带隙左边界上的传播比在其他带隙边上的传播要更慢。这个结果类似于负折射 / 正折射周期性材料中的相时间谱 [9]。

为了进一步证实相时间的计算, 我们画出了在不同载波频率 ω_c 下的出射脉冲的波形, 载波

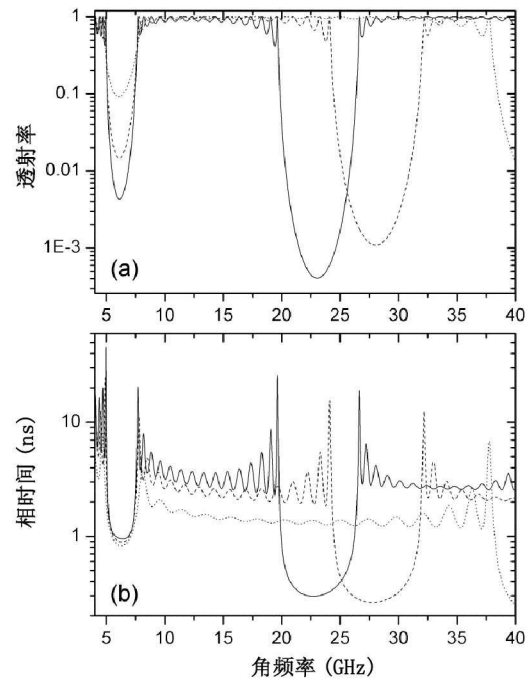


图 2 在不同材料厚度时, 透射率 (a) 和相时间 (b) 随频率的变化。实线代表 $d_A = 2.4\text{cm}$, $d_B = 1.2\text{cm}$; 虚线代表 $d_A = 1.92\text{cm}$, $d_B = 0.96\text{cm}$ (0.8 倍缩放); 点线代表 $d_A = 1.2\text{cm}$, $d_B = 0.6\text{cm}$ (0.5 倍缩放)

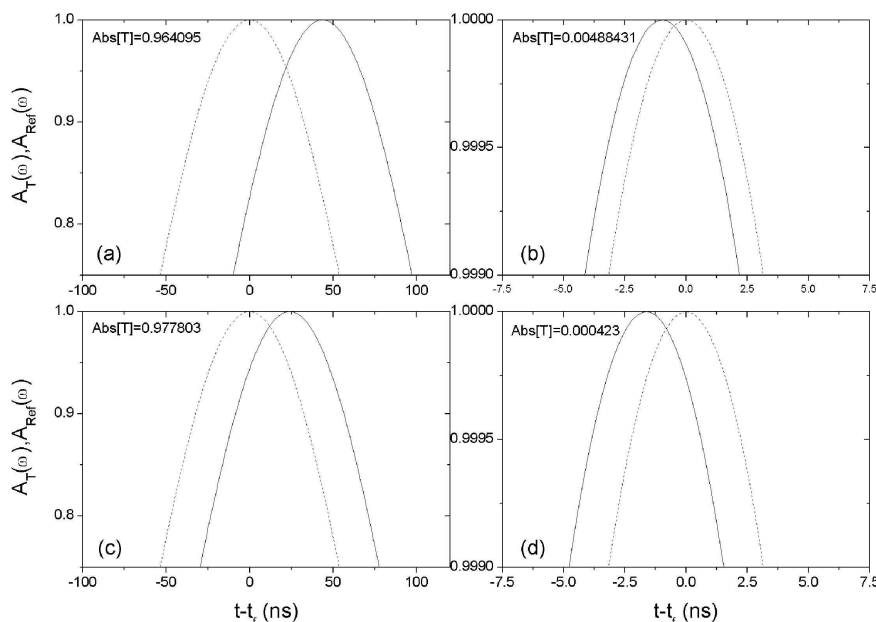


图 3 参考 (虚线) 和透射 (实线) 脉冲波形比较图。载波频率分别为: (a) $\omega_c = 4.97\text{GHz}$; (b) $\omega_c = 6.4\text{GHz}$; (c) $\omega_c = 19.635\text{GHz}$; (d) $\omega_c = 22.705\text{GHz}$, 脉冲宽度 $\tau = 100\text{ns}$

频率分别选择在零相位带隙左带边、带底和 $m = 1$ 布拉格带隙左带边、带底。从图中可以看出,当载波频率在带隙的带边时(图 3(a)和图 3(c)),脉冲传播的慢群速度为 $0.042c$ 和 $0.073c$;当载波频率在带隙底时(图 3(b)和图 3(d)),脉冲传播的慢群速度为 $2.0c$ 和 $6.5c$ 。虚线的波形是脉冲在真空中的传播波形。

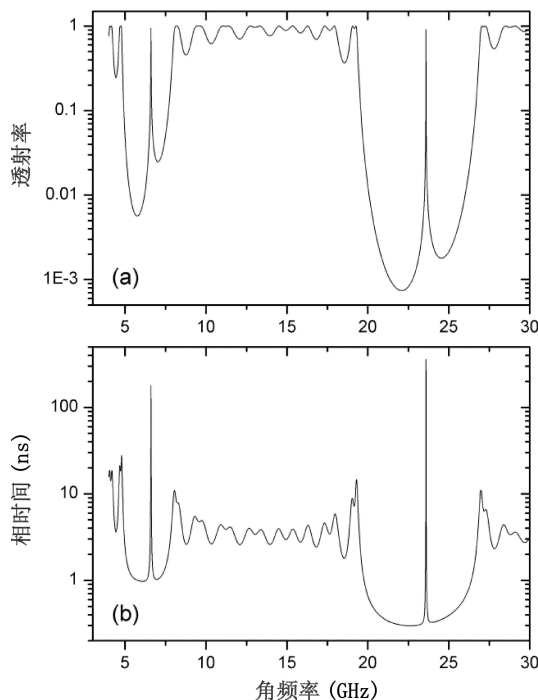


图 4 有缺陷的单负周期结构中的透射率 (a) 和相时间谱 (b)

下面,研究有缺陷的单负周期结构。选择的缺陷材料参数为: $\varepsilon_c = 2.0$, $\mu_c = 2.0$, $d_c = 3\text{cm}$ 。体系的透射和相时间谱由图 4 的 (a) 和 (b) 给出。计算结果表明,不管是在布拉格带隙还是在零相位带隙中,都会出现一个很强的透射峰(透射率几乎达到 1),对应于该透射峰的相时间更是到达了一个极大值。这个极大的相时间产生的原因是在强的吸收背景下出现了一个窄的透射峰。在缺陷模上出现的极大相时间比带隙边的时间大,是因为缺陷模上的透射峰比带边的透射峰还要窄。该局域缺陷模的出现位置可以由 $X(\omega) = \Pi M_{A,B}^8(d_{A,B}, \omega) M_C(d_C, \omega) M_{A,B}^8(d_{A,B}, \omega) = 1$ 决定。图 5 描绘了脉冲在缺陷模上传播的波形,对应缺陷模频率的电磁波的传播群速度被

大大地减缓。零相位带隙和布拉格带隙中的缺陷模上的相时间分别是 179.3ns 和 359.9ns , 对应的群速度分别是 $v_g = 0.011c$ 和 $v_g = 0.006c$ 。

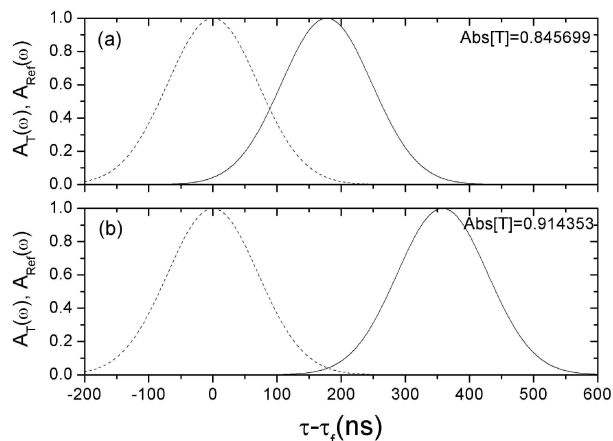


图 5 有缺陷的单负周期结构中的透射和参考波形。取脉冲宽度 $\tau = 100\text{ns}$, 对应的两个载波频率分别为 (a) $\omega_c = 6.595\text{GHz}$ 和 (b) $\omega_c = 23.585\text{GHz}$

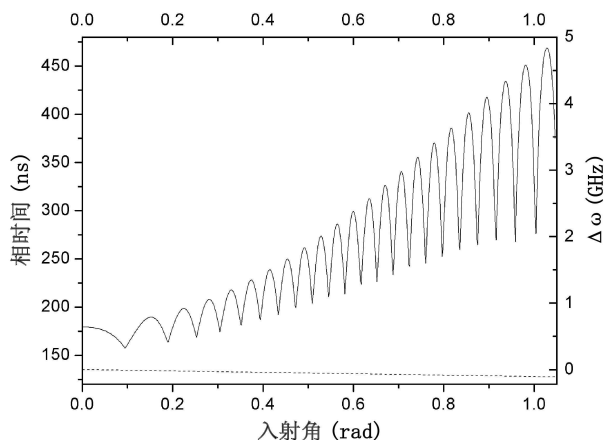


图 6 缺陷模上的相时间 (实线) 和对应的频率 (虚线) 随入射角的变化

最后,考察入射角对缺陷模上的相时间和缺陷模对应的频率的影响。由图 6 可以看出,缺陷模上的相时间在入射角度变大时会呈现震荡上升的现象。这个趋势是由整个体系的色散关系决定的。缺陷模对应的频率会出现轻微的红移。另外,我们得到的慢光速比在单纯负折射材料、正常 Si/SiO₂ 光子晶体和准周期结构中的电磁脉冲传播速度还要慢^[16-18]。

4 结论

本文研究了在磁负 / 电负材料组成的周期结构中及有缺陷情况下的电磁脉冲传播特性。我们发现在单负周期结构中会出现零相位带隙, 处在所有带隙边上的电磁脉冲的传播速度会被减缓, 而脉冲在带隙中传播的群速度比光在真空中传播的速度快。当体系中有缺陷层存在时, 所有带隙中都会出现缺陷模。在加大入射角度的时候, 缺陷模局限在很小范围的频率内, 但电磁波在该频率上的传播速度会显著地减缓。由计算结果得到, 周期性结构中的缺陷模上不仅可以支持频率极窄的电磁波传播, 其传播的速度还会显著地减缓。

参考文献

- [1] Hau L V, Harris S E, Dutton Z, et al. Light speed reduction to 17 meters per second in an ultracold atomic gas [J]. *Nature*, 1999, 397: 594–598.
- [2] Scully M O. Quantum optics: Light at a standstill [J]. *Nature*, 2003, 426: 610–611.
- [3] Chu S, Wang S. Linear Pulse Propagation in an Absorbing Medium [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1982, 48: 738–741.
- [4] Fisher D L, Tajima T. Superluminous laser pulse in an active medium [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1993, 71: 4338–4341.
- [5] Wang L J, Kuzmich A and Dogariu A. Gain-assisted superluminal light propagation [J]. *Nature*, 2000, 406: 277–279.
- [6] Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, 58: 2059–2062.
- [7] John S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, 58: 2486–2489.

- [8] Lin S Y , Chow E, Hietala V, et al. Experimental Demonstration of Guiding and Bending of Electromagnetic Waves in a Photonic Crystal [J]. Science, 1998, 282: 274–276.
- [9] 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: 083901.
- [10] Rao V S C M, Gupta S D. Subluminal and superluminal pulse propagation in a left-handed/right-handed periodic structure [J]. J. Opt. A: Pure Appl. Opt., 2004, 6: 756.
- [11] Jiang H, Chen H, Li H, et al. Properties of one-dimensional photonic crystals containing single-negative materials [J]. Phys. Rev. E, 2004, 69: 066607.
- [12] Wang L G, Chen H, Zhu S Y. Omnidirectional gap and defect mode of one-dimensional photonic crystals with single-negative materials [J]. Phys. Rev. B, 2004, 70: 245102.
- [13] Born M, Wolf E. Principles of Optics [M]. 1980, New York: Pergamon Ch. 1.6.
- [14] Wigner E P. Lower Limit for the Energy Derivative of the Scattering Phase Shift [J]. Phys. Rev., 1955, 98: 145–147.
- [15] Gupta S D, Arun R, Agarwal G S. Subluminal and superluminal propagation in a left-handed medium [J]. Phys. Rev. B, 2004, 69: 113104.
- [16] Gennaro E D, Parimi P V, Lu W T, et al. Slow microwaves in left-handed materials [J]. Phys. Rev. B, 2005, 72: 033110.
- [17] Galli M, Bajoni D, Marabelli F, et al. Photonic bands and group-velocity dispersion in Si/SiO₂ photonic crystals from white-light interferometry [J]. Phys. B, 2004, 69: 115107.
- [18] Hattori T, Tsurumachi N, Kawato S, et al. Photonic dispersion relation in a one-dimensional quasicrystal [J]. Phys. Rev. B, 1994, 50: 4220.

~ ~ ~ ~ ~

简 讯

热成像系统

美国电子物理学公司展出一种名为“绿宝石 LR”的用于远距离监视、跟踪和目标信号分析的热成像系统。该系统采用 650×512 元的大规格碲镉汞焦平面列

阵,能够产生全电视分辨率的红外图像。该系统的工作波段为 $3\mu\text{m} \sim 5\mu\text{m}$, 小于 25mK 的噪声等效温差使其能够探测 25km 之外的目标。机动的光学元件能够自动聚焦或者通过手动聚焦以便产生宽、中、窄视场,它们分别为 $22^\circ \times 16^\circ$ 、 $6.6^\circ \times 5.2^\circ$ 和 $1.7^\circ \times 1.3^\circ$ 。

□ 顾聚兴