

文章编号: 1001-3806(2006)05-0504-03

含正负材料的一维光子晶体的光学特性研究

齐俊璇, 文双春*

(武汉理工大学 信息学院, 武汉 430070)

摘要: 为了得到新的传输性质, 把具有负介电常数和磁导率的负折射率材料引入到光子晶体当中, 运用 Maxwell 电磁波方程和 Bloch 理论得到的含正负折射率材料的色散关系的解析式, 分别分析一维无限周期且正折射率材料和负折射率材料交替组成的一维光子晶体的禁带结构和色散特性, 并与常规的正折射率材料的光子晶体比较, 发现含正、负折射率材料且呈周期性重复的双层结构的复合光子晶体其光子具有较宽禁带, 为设计超宽禁带的光子带隙结构提供了一定的理论可能性。

关键词: 材料; 一维光子晶体; 负折射率材料; 布洛赫波矢; 禁带

中图分类号: O734 文献标识码: A

Research of optical properties of one-dimensional photonic crystals constructed by positive-negative refractive materials

QI Jun-xuan, WEN Shuang-chun

(School of Information, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract Photonic crystals were the new artificial complex media during the last decades, however its transmission property might change a lot if new material with negative refraction index are inserted. The main properties of the band gap and dispersion structure of the one-dimensional photonic crystal whose each period consisting of one layer of a usual material and one layer of negative refractive material are studied based on Maxwell equation and Bloch theory. Our analysis results show it possible to make the band gap of the periodically-layered photonic crystals wider than the usual material which offers a possibility to design photonic band gap structure with wide stop bands.

Key words materials; one-dimensional photonic crystal; negative refractive material; Bloch wave; band gap

引 言

光子晶体是近十几年来出现的新型材料, 它所涉及的范围十分广泛, 包括电磁学、固体能带理论、量子光学等等, 以光子晶体为基础, 提出了光子晶体微腔、光子晶体微波天线、光子晶体光纤、光子晶体光波导等概念以及相关理论^[1]。光子晶体一个最特殊的性质是可以在一定的频率或波矢范围内存在负折射率, PENDRY 等人已经用带隙的环状谐振器做实验证实了这一点^[2-4]。

近年来, 在理论与实验中把具有负介电常数和磁导率的负折射率材料引入到光子晶体当中, 得到了新的传输性质^[5]。负折射率材料具有负的介电常数与磁导率。含负折射率材料的一维光子晶体具有 3 个反常现象, 即复频域的赝模、实数波数的离散模和复数波矢的光子隧道模^[6]。

本文中, 作者通过运用 Maxwell 电磁波方程和传输矩阵的 Bloch-Floquet 定理, 得到的含正负折射率材料的色散关系的解析式, 分别分析一维有限周期含正折射率和负折射率材料的光子晶体的色散特性。同时发现, 含正、负折射率材料且呈周期性重复的双层结构的复合光子晶体其光子禁带较宽, 可以用来补偿在每个周期中光波传输时产生的相移。

1 理论模型

图 1 为一维光子晶体介质结构。d 为厚度周期, z 为晶体表面的法线方向, θ 为电磁波矢 κ 传播方向与法线的夹角。考虑由 A、B 两种不同材料, 其相应的实际厚度分别为 a 和 b, 介电常数分别为 ϵ_A , ϵ_B , 磁导率

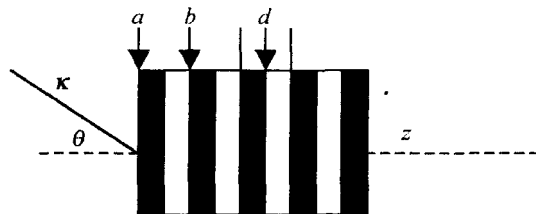


Fig 1 Structure of one-dimensional photonic crystal

作者简介: 齐俊璇 (1980-), 女, 硕士研究生, 研究方向是光纤通信。

* 通讯联系人。E-mail: scwen@vip.sina.com

收稿日期: 2005-09-09; 收到修改稿日期: 2006-03-12

分别为 n_A, n_B , 构成晶格周期为 $a + b = d$ 的理想一维晶体。在此忽略材料本身的色散, 仅考虑光子晶体的结构色散, 并且这些参数均与频率无关。其色散关系可以利用 Bloch 定理 $E(x + d) = \exp(iKd)E(x)$, 其中 $E(x)$ 为光场中 x 处的光场强度, 同时结合 Maxwell 电磁波方程电场的边界条件和介电常数以及磁导率的周期性, 可以得到^[7, 8]:

$$\cos[K(\omega)d] = \cos(K_A a) \cos(K_B b) \mp \frac{1}{2} \left[\frac{K_A}{K_B} + \frac{K_B}{K_A} \right] \sin(K_A a) \sin(K_B b) \quad (1)$$

“ \mp ”对应着两种不同的情况: 当两层介质均为正折射率材料时取“-”, 含有负折射率材料时取“+”。其中:

$$K_A = -\frac{\omega}{c} \sqrt{\epsilon_A}, \quad K_B = -\frac{\omega}{c} \sqrt{\epsilon_B} \quad (2)$$

式中, c 是真空中的光速, $K(\omega)$ 是布洛赫波矢, ω 为频率。本文中采用的计算软件工具为 MATHEMATICA。

2 数值计算与分析

当 A 为正折射率材料, 假设正折射率材料为均质且无损耗材料; B 为负折射率材料。介质 A 为碲化铅, 取 $\epsilon_A = 16.81, n_A = 4.1, \mu_A = 1$; 介质 B 取 $\epsilon_B = -1.8225, n_B = -1.35, \mu_B = -1$ 。介质层的厚度 $a = 90\text{nm}, b = 273\text{nm}$ 。厚度周期 $d = 363\text{nm}$, 参数基本满足 $n_A a = n_B b$, 第一禁带中心频率基频为 $\omega_0 = c\pi / (n_A a + n_B b)$ 。A, B 的折射率分别为 $n_A = \sqrt{\epsilon_A \mu_A}, n_B = -\sqrt{\epsilon_B \mu_B}$ 。当 $n_A a = n_B b$ 时, (1) 式可以化简为:

$$\cos[K(\omega)d] = 1 + \frac{(a-b)^2}{2ab} \sin^2\left(\frac{n_A a \omega}{c}\right) \quad (3)$$

只有当 $\frac{n_A a}{c} \omega = m\pi$ 时 (m 为整数), 满足 $\cos[K(\omega)d] = 1$ 有实数解, 这些离散的解对应着光子的通带; 当 $\frac{n_A a}{c} \omega \neq m\pi$ 时, $\cos[K(\omega)d] > 1$, 布洛赫波矢 $K(\omega)$ 只有虚数解, 它代表的是光子的禁带。对 (3) 式进行计算仿真, 得到一维周期性色散关系如图 2a 所示。从图中可以看出, 含负折射率材料的光子晶体的带结构除了一些离散的点之外全部都是光子禁带。尽管没有光波通过, 但是在这些频率范围内, 当 m 分别为奇数或偶数时, 对应的磁畴壁下会有共振频率。可用传输线理论来解释这一点。在这些频率点, 每层厚度可以表示为 $d_i = m\lambda_i/2$, λ_i 是每层对应材质的波长, 这就是说, 一介质层的阻抗转化为另一介质层的阻抗, 大小保持不变且两层匹配吻合。很明显, 这种光子晶体带结构没有办法用常见的材料来实现。自然界的材料中还没有观察到负折射现象, 美国加利福尼亚大学研究小组在微波段验证了合成的左手化媒质中存在反常折射

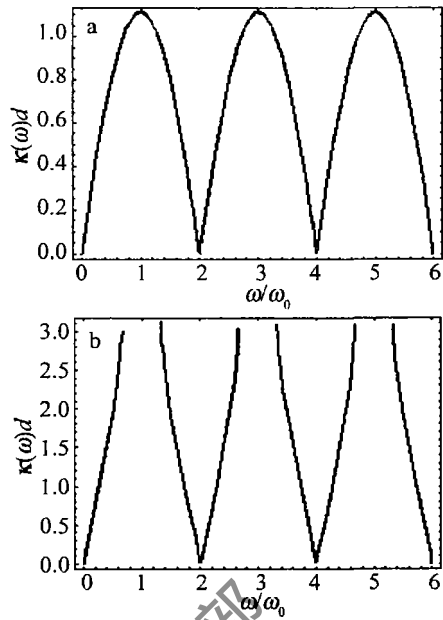


Fig 2 A $n_A a = n_B b$ dispersion of one-dimensional photonic crystal a- containing negative refractive material b- usual material

现象, 但是左手化媒质还只是在实验室合成, 投入生产还有许多技术需要解决。

作者注意到以上的结论不适用于以下这种特殊情况: 即两种介质层的厚度相等并且折射率的绝对值也相等。那么 (1) 式就变为 $\cos[K(\omega)d] = 1$, 这就意味着光子禁带中的电磁场振荡可以在任意频率下存在^[9]。

对于 A, B 均为正折射率材料时光子晶体, 当 $n_A a = n_B b$ 时, 基频偶数倍处的光子禁带消失了。可以通过色散方程来解释这一现象: 从 (3) 式可以看出, 当频率为基频的偶数倍时 ($\omega = 2N\omega_0, N$ 为整数), 可以使 $\cos[K(\omega)d] = 1$, 这样的布洛赫波矢 $K(\omega)$ 是存在的,

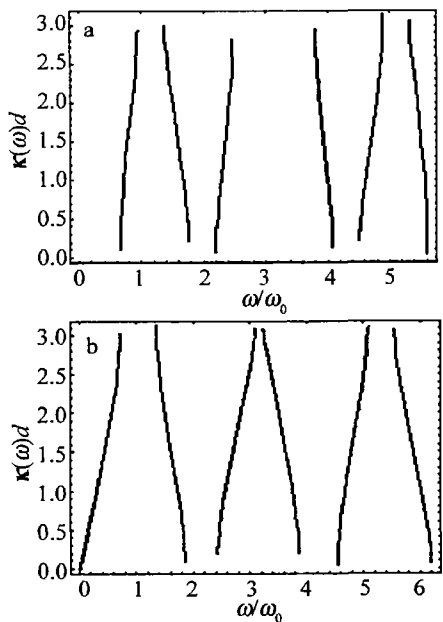


Fig 3 A $n_A a \neq n_B b$ dispersion of one-dimensional photonic crystal a- containing negative refractive material b- usual material

故没有带隙。

当 $n_A a \neq n_B b$ 时, 对于含负折射率材料光子晶体, $|\cos[\kappa(\omega)d]|$ 有可能会大于 1, 故布洛赫波矢 $\kappa(\omega)$ 会有复数解。计算结果如图 3 所示。此时它的禁带并不呈周期性出现, 而且 $\kappa(\omega)$ 极不规则。

从图 2a 和图 3a 可以看出, 含负折射率材料的光子晶体比传统的光子晶体具有更好的角度性, 可以用来实现全方位的反射^[10]。

对于 A, B 均为正折射率材料时光子晶体, 当 $n_A a \neq n_B b$ 时, 会出现 $|\cos[\kappa(\omega)d]| > 1$ 的情况, 这样的布洛赫波矢 $\kappa(\omega)$ 是不存在的, 故基频偶数倍处的光子禁带又出现了。

3 结束语

通过对色散方程的计算与仿真, 分别分析了光子晶体材料均为正折射率时 $n_A a = n_B b$ 与 $n_A a \neq n_B b$ 的情况, 发现在 $n_A a = n_B b$ 时, 光子晶体没有禁带; 而当 $n_A a \neq n_B b$ 时光子晶体禁带出现在基频的偶数倍处。考虑到色散材料其中之一为负折射率, 当 $n_A a = n_B b$ 时, 光子晶体的通带仅为离散的一些数值, 布洛赫波矢 $\kappa(\omega)$ 的虚数解对应着光子晶体的禁带; 而当 $n_A a \neq n_B b$ 时, 光子晶体虽然存在禁带, 但是其出现的周期极不规则。因此在制备含负折射率材料的光子晶体时, 应尽可能满足 $n_A a = n_B b$, 使其得到较好的传输特性。

本文中的结论为设计和利用超宽禁带的光子带隙结构提供了可能性。尽管本文中只对一维光子晶体作了分析, 但是这些结论同样可以推广到二维和三维的光子带隙结构中。在理论计算中, 作者忽略了介质层

的本身色散, 仅考虑光子晶体的结构色散, 这是理想情况, 实际中的满足条件的合成材料都是含色散且有损耗的。但是这不影响利用本文中的结论来对负折射率材料进行更进一步的研究。

参 考 文 献

- [1] SONG J F, CHANG Y Ch, WANG H S. Transmission characteristic of photonic crystal waveguide [J]. Chinese Journal of Lasers, 2002, 26(8): 711~713 (in Chinese).
- [2] PENDRY J B, HOLDEN A J. Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1999, 47(11): 2075.
- [3] ENGHETA N. Is Foster's reactance theorem satisfied in double-negative and single-negative media [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2003, 39(1): 11~13.
- [4] MARKO P, SOUKOULIS C M. Transmission properties and electromagnetic parameters of double-negative metamaterials [J]. Optical Express, 2003, 11(7): 649~661.
- [5] JOANNOPOULOS J D, MCKEAD R D, WANN J N. Photonic crystals: molding the flow of light [M]. Princeton: Princeton University Press, 1995: 13~117.
- [6] WU L, HE S L, SHEN L F. Band structure for one-dimensional photonic crystal containing left-handed materials [J]. Phys Rev, 2003, B67(23): 235103~235108.
- [7] YABUUTI A, YEH P. Optical waves in crystals [M]. New York: Wiley, 1984: 67~88.
- [8] SMITH D R, DALCHAUCH R, KROLL N. Photonic band structure and defects in one and two dimensions [J]. JOSA, 1993, B10(2): 314~321.
- [9] NEFEDOV I S, TRETYAKOV S A. Photonic band gap structure containing metamaterial with negative permittivity and permeability [J]. Phys Rev, 2002, E66: 036611.
- [10] YIN Ch P, LIU N H. Transmission properties of one-dimensional photonic crystals containing negative refraction materials [J]. Chinese Journal of Luminescence, 2005, 26(2): 173~175 (in Chinese).

(上接第 500 页)

参 考 文 献

- [1] STEEN W M. Arc augmented laser processing of materials [J]. JAP, 1980, 51(11): 5636~5641.
- [2] JOKINEN T. Welding of ship structural steel A36 using a Nd:YAG laser and gas metal arc welding [J]. Journal of Laser Application, 2000, 12(5): 185~188.
- [3] UCHIYAMA S, WANG J B, KATAYAMA S. Welding of ship structural steel A36 using a Nd:YAG laser and gas metal arc welding of aluminum alloy [A]. ICALEO Hybrid Laser Welding [C]. Orlando: Laser Institute of America, 2004: 76~85.
- [4] FELIMAN A, JERNSTRÖM P, KUJANPÄÄ V. CO₂-GMA hybrid welding of carbon steel: the effect of shielding gas composition [A]. ICALEO Section A [C]. Orlando: Laser Institute of America, 2003: 56~65.
- [5] SHIMIZU T, TSUBOTA S, WATANABE M. Latest MIG, TIG, arc-YAG laser hybrid welding systems for various welding products [J]. SPIE, 2003, 4831: 347~352.
- [6] KAERLE S, BONGARD K, DAHMEN M. Innovative hybrid welding process in an industrial application [A]. ICALEO Section C [C]. Orlando: Laser Institute of America, 2000: 91~98.
- [7] PETRING D, FUHRMANN C, WOLF N. Investigations and applications of laser arc hybrid welding from thin sheets up to heavy section components [A]. ICALEO Section A [C]. Orlando: Laser Institute of America, 2003: 1~10.
- [8] BAGGER C, SONDRUP L C, OLSEN F O. Laser/TIG hybrid welding of pot for induction heater [A]. ICALEO Hybrid Laser Welding [C]. Orlando: Laser Institute of America, 2004: 60~69.
- [9] XIAO R S, CHEN K, CHEN J M. Experimental research of the plasma shielding mechanism in the process of CO₂ laser welding [J]. Laser Technology, 2001, 25(3): 238~241 (in Chinese).
- [10] TANG X H, ZHU H H, ZHU G F. Laser induced plasma absorption and control for CO₂ laser deep penetration welding [J]. China Mechanical Engineering, 2000, 11(7): 741~743 (in Chinese).