

二维损耗和色散介质光子晶体传输特性的研究*

梅洛勤, 曾 淳, 叶卫民, 袁晓东, 朱志宏, 张晚云, 王 华

(国防科技大学理学院, 湖南 长沙 410073)

摘 要 将传输矩阵法(TMM)用于光子晶体传输特性的研究,采用 Mur 近似吸收边界和周期边界来截断计算区域,计算了以 TM 模正入射时,二维方格子光子晶体在完整周期结构下的透过率谱;在微波波段制作了光子晶体模型,并设计了实验装置,实验与数值模拟计算结果相符合;另外还研究了有损介质光子晶体、色散和吸收介质光子晶体的传输特性,及其对光子禁带的影响。

关键词 光子晶体;光子禁带;传输矩阵法;吸收边界;透射谱

中图分类号:O436 文献标识码:A

The Properties of Transmission Research of 2-D Loss and Dispersive Materials in Photonic Crystals

MEI Luo-qin, ZENG Chun, YE Wei-min, YUAN Xiao-dong, ZHU Zhi-hong, ZHANG Wan-yun, WANG Hua

(College of Science, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract Transfer matrix method(TMM) is used to study the transmission properties of photonic crystals. The Mur absorbing boundary and periodic boundary are used respectively to truncate the computational region in photonic crystals. For two dimensional square lattice photonic crystals, the transmission coefficient versus the frequency of E-polarized incident electromagnetic waves propagating in photonic-band-gap structures is calculated in perfect periodic structures. A model of 2-D square lattice photonic crystals is designed and fabricated in microwave wavelength regions. The results of numerical simulation are in good agreement with experimental results. And also the properties of transmission are studied in 2-D loss, dispersive and absorbing materials of photonic crystals. And how the photonic band gaps are affected by loss and the dispersive absorbing materials of photonic crystals is investigated.

Key words photonic crystals; photonic band gap; transfer matrix method; absorbing boundary condition; transmission spectra

介质的介电常数呈周期性分布被称作光子晶体(photonic crystals)^[1,2],电磁波在其中的传播行为已经引起了人们的广泛关注,因为其色散关系曲线在这种结构中能被改变,出现光子禁带(photonic band gap),如果电磁波的频率落在禁带范围内,则它不能在光子晶体中传播;如果在光子晶体中引入缺陷,则在禁带内有局域态的出现。拥有光子禁带的光子晶体的理论研究已经预见了许多新的物理现象,在一些科学和技术领域为光子晶体的潜在应用开辟了广阔的前景,如光子晶体微波天线^[3]、光子晶体光纤^[4]、光子晶体光波导^[5]、低阈值激光发射器和光子晶体光开关^[6]等等。

已经被用来计算光子晶体的带结构和传输特性的理论研究方法有很多种,如平面波方法(PWM)^[7~9],它能够计算介质的介电常数不随频率变化的光子晶体的带结构,当介质有损耗、有色散和吸收时,平面波方法就不能适用,而传输矩阵法(Transfer Matrix Method)^[10~12]能适用于上述的情况;本文用传输矩阵法(TMM)研究了在二维方格子有损介质、色散和吸收介质光子晶体的传输特性及其对禁带的影响。

* 收稿日期:2003-08-21
基金项目:国家部委基金资助项目
作者简介:梅洛勤(1964—),男,讲师,硕士。

1 计算方法

1.1 传输矩阵法

如果已经知道了两个单层厚度分别为 z_1, L_z 的透射矩阵和反射矩阵,那么与之相连的厚度为 $L_z + z_2$ 的透射矩阵和反射矩阵^[11]可表示为

$$T^{++}(L_z + 1) = T^{++}(z_1) [1 - T^{+-}(L_z)T^{-+}(z_1)]^{-1} T^{++}(L_z) \tag{1}$$

$$T^{+-}(L_z + 1) = T^{+-}(z_1) + T^{++}(z_1) [1 - T^{+-}(L_z)T^{-+}(z_1)]^{-1} T^{+-}(L_z)T^{-+}(z_1) \tag{2}$$

$$T^{-+}(L_z + 1) = T^{-+}(L_z) + T^{-+}(L_z) [1 - T^{+-}(z_1)T^{++}(L_z)]^{-1} T^{-+}(z_1)T^{++}(L_z) \tag{3}$$

$$T^{--}(L_z + 1) = T^{--}(L_z) [1 - T^{+-}(z_1)T^{++}(L_z)]^{-1} T^{--}(z_1) \tag{4}$$

从(1)至(4)式可以看出:任意厚度层的透射矩阵和反射矩阵都可以用此迭代公式计算出,而且其数值是稳定的。

1.2 边界条件

在数值模拟计算中采用了 Mur 近似吸收边界条件^[13]和周期性边界条件^[14]。

2 实验装置

为了验证 Mur 近似吸收边界用于传输矩阵法时计算结果的正确性,根据光子晶体标度不变性特性,设计了如图 1 所示的微波实验装置,它由微波矢量网络分析仪 HP8510C、微波发射和接受天线以及实验平台组成。

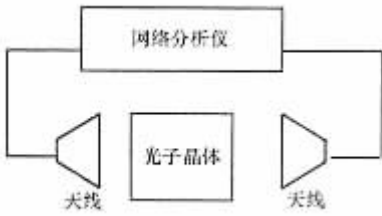


图 1 实验装置示意图

Fig.1 The schematic of system of experimentation

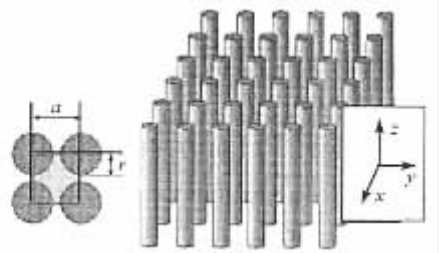


图 2 二维方格子光子晶体

Fig.2 A 2-D photonic crystal

用普通二氧化硅玻璃圆柱棒作为实验样品,其相对介电常数为 4.55,直径为 (10.0 ± 0.5) mm,使其固定在有机玻璃平板基座上,植埋于空气(相对介电常数为 1.00)中,组成二维方格子光子晶体。晶格常数 a 为 (20.0 ± 0.5) mm,如图 2 所示。

3 数值模拟结果与分析

3.1 完整周期结构光子晶体

用实验中的参数 $a = 2.0$ cm, $r = 0.5$ cm 在正入射的方向上模拟了 $8a$ 厚度层的光子晶体,其频率对透过率如图 3(b)所示,实验图为 $19a \times 19a$ 的方格子完整周期结构光子晶体,其频率对透过率如图 3(c)所示。由图 3(b)和 3(c)可以看出,透射率频谱图的禁带范围是相同的,谱图底的中心即禁带的中心在 5.8GHz 附近,禁带宽度大致为 4.8GHz ~ 6.6GHz,所不同的是对 $8a$ 厚度层的模拟的最小透过率比对 $19a \times 19a$ 的光子晶体的最小透过率要大,理论模拟计算和实验的结果是一致的。

3.2 有损介质光子晶体

对由一般介质组成的光子晶体,其损耗是不可以忽略的,也就是必须考虑介电常数的虚部,同样按照实验中的参数 $a = 2.0$ cm, $r = 0.5$ cm,介质圆柱的折射率 ϵ 分别取为 $4.55 + 0.20i$, $4.55 + 0.40i$ 和 $4.55 + 1.00i$,模拟了 $8a$ 厚度层的光子晶体。其频率和透过率的频谱,如图 4 所示。图中曲线(a)对应着 $\epsilon =$

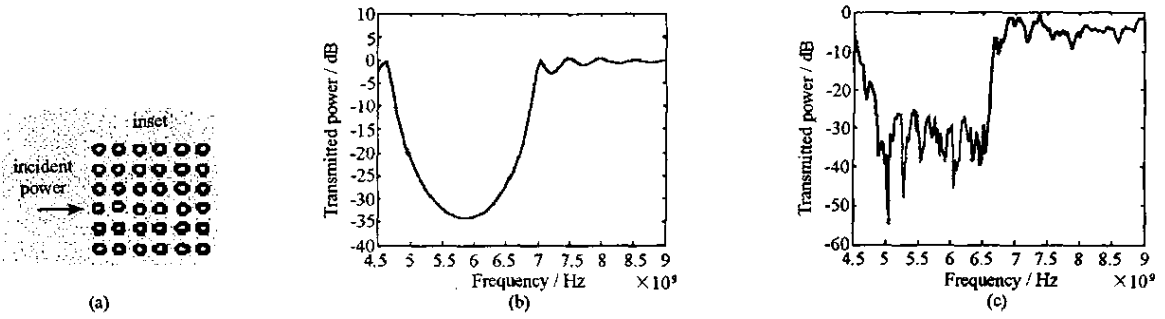


图 3 频率对透过率谱图

Fig. 3 Transmission vs the frequency

4.55 + 0.20i, 曲线 (b) 对应着 $\epsilon = 4.55 + 0.40i$, 曲线 (c) 对应着 $\epsilon = 4.55 + 1.00i$ 。从图中可以看出, 在有损介质光子晶体中, 也有禁带, 其结构与无损、完整周期结构光子晶体的传输特性图大致相同, 禁带的中心也在 5.8GHz 附近, 禁带宽度也为 4.8GHz ~ 6.6GHz, 损耗较小的曲线 (a) 基本和无损的图 3 相同, 但损耗增大时, 差异较大。图 4 中, 在低频段, 损耗的影响不大, 但在高频段, 传输特性差距较大, 在 7.5GHz 附近的突变处, 最大和最小值曲线 (a) 相差 30dB, 曲线 (b) 相差 25dB, 曲线 (c) 相差 20dB 还不到, 因此损耗大就难以形成禁带。

3.3 色散和吸收介质光子晶体

在红外和光波段的光子禁带 (PBG) 材料电介质, 其介电常数不仅随着频率在变化, 而且还有很高的吸收。

已经知道横向光频声子 (transverse optical phonons) 和横向电磁波的耦合整个改变了电磁波的传播性质, 这种耦合可以用电介质的介电常数随频率变化来描述, 为 $\epsilon(\omega) = \epsilon_\infty + (\epsilon_0 - \epsilon_\infty)$

$\frac{\omega_T^2}{\omega_T^2 - \omega^2 - i\Gamma\omega}$, 其中 $\epsilon_0, \epsilon_\infty$ 是 $\omega = 0, \infty$ 时的电介质常数, ω_T 是晶格长光学波横波频率, Γ 是吸收系数。

(1) 在考虑吸收的情况下, 即 $\Gamma \neq 0$ 时, GaAs 的介电常数随频率的变化关系式依赖于上式, 对 $a = 7.540\mu\text{m}$ $f = 0.449$ 模拟了 $8a$ 厚度层, 其频率对透过率谱如图 5 所示, 图中点线对应着 $\Gamma = 0.1\text{THz}$, 实线对应着 $\Gamma = 0.5\text{THz}$ 。可以看出, 对应于 $\Gamma = 0.1\text{THz}$, 即吸收较小时, 其透过率谱与不考虑吸收时的谱图相差不大, 在吸收较大时, 透射谱图发生了很大的变化。在极化带两边, 在 7.5THz 附近的突变处, 对 $\Gamma = 0.1\text{THz}$, 透过率为 -10dB, 而对 $\Gamma = 0.5\text{THz}$, 透过率为 -35dB; 在 9.0THz 附近的突变处, 对 $\Gamma = 0.1\text{THz}$, 透过率为 -5dB, 而对 $\Gamma = 0.5\text{THz}$, 透过率为 -25dB, 在吸收较小时, 透过率最大值和透过率最小值相差大致在 30dB, 而

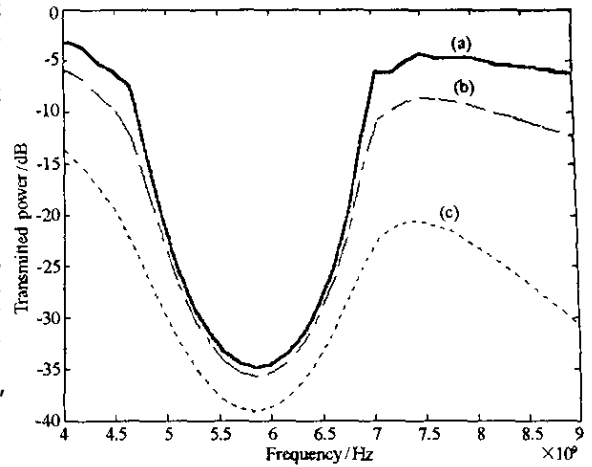


图 4 频率对透过率谱图

Fig. 4 Transmission vs the frequency

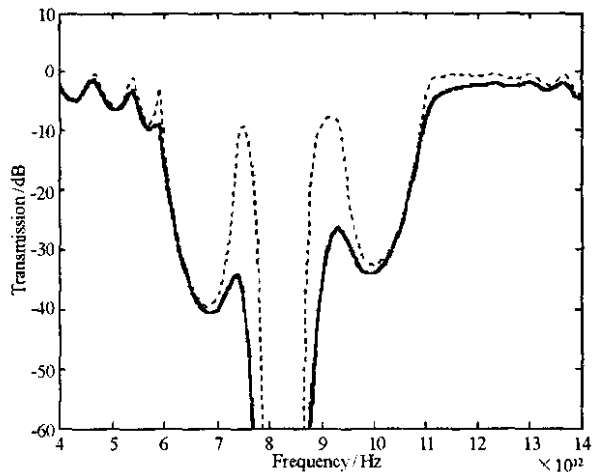


图 5 频率对透过率谱图, $\Gamma = 0.1\text{THz}$ (点线), $\Gamma = 0.5\text{THz}$ (实线)

Fig. 5 Transmission vs the frequency, the dotted lines corresponds to $\Gamma = 0.1\text{THz}$, the solid lines correspond to $\Gamma = 0.5\text{THz}$

吸收较大时,透射率最大值和透射率最小值相差大致只有几个 dB。因此,在吸收较小时,除了极化带是禁带外,也可以形成禁带;在吸收较大时,除了极化带是禁带外,在其它频率段,有可能不能形成禁带。

(2)在不考虑吸收的情况下,即 $\Gamma = 0$ 时,取 $a = 9.425\mu\text{m}$, $f = 0.449$,在 $6a \times 6a$ 大小方格子光子晶体中引入两点缺陷,无吸收,即在与入射方向垂直的方向上移去两个 GaAs 柱子,形成有二个点缺陷的方格子光子晶体,进行数值模拟,其对应的频率的透射谱如图 (a) 所示,点线对应有色散的二维完整周期结构的方格子,实线对应有缺陷的二维方格子。同样,在 $6a \times 7a$ 的方格子光子晶体中,在与入射方向一致的方向上移去两个 GaAs 柱子,组成有二个点缺陷的光子晶体,进行数值模拟,其对应的频率的透射谱如图 (b) 所示,点线对应有色散的二维完整周期结构的方格子,实线对应有缺陷的方格子。从图 (a) 和图 (b) 中可以看出,在禁带范围内有缺陷峰出现,对图 (a),在 9.5THz 附近有一明显的缺陷峰,在 12.5THz 和 14.5THz 附近各有一个缺陷峰,对图 (b),在 6.0THz 附近有一明显的缺陷峰,在极化带附近 7.5THz 有一缺陷峰,在 13.5THz 附近和 14.0THz 附近也有缺陷峰出现。

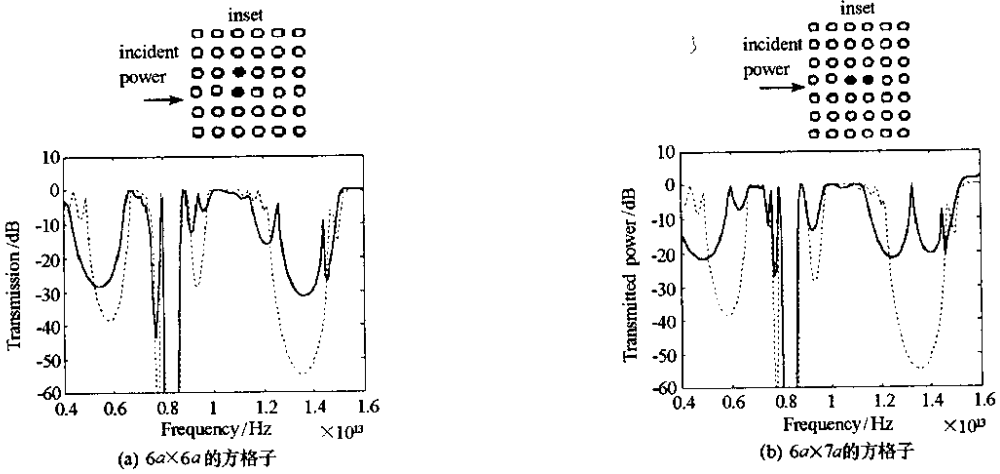


图 6 频率对透射率谱图
Fig.6 Transmission vs the frequency

4 小结

用 Mur 近似吸收边界条件来处理光子晶体的边界,用传输矩阵法 (TMM) 计算了二维方格子光子晶体的透射率频谱分布,研究了有损介质光子晶体、色散和吸收介质光子晶体的传输特性及其对光子禁带的影响。

参考文献:

- [1] Yablonovich E. Inhibited Spontaneous Emission in Solid-state Physics and Electronics[J]. Phys. Rev. Lett ,1987 ,58 :2059 - 2067 .
- [2] John S. Strong Localization of Photons in Certain Disordered Dielectric Superlattices[J]. Phys. Rev. Lett ,1987 58 :2486 - 2496 .
- [3] Brown E R , McMahon O B. High Zenithal Directivity from a Dipole Antenna on a Photonic Crysta[J]. Appl. Phys. Lett. ,1996 68 :1300 ~ 1308 .
- [4] Knight J C , Broeng J , Birks T A et al. Photonic Band Gap Guidance in Optical Fibers[J]. Science , 1998 282 :1476 - 1483 .
- [5] Mekis A , Cheen J , Kurland I et al. High Transmission through Sharp Bends in Photonic Crysta[J]. Phys. Rev. Lett. ,1996 77 :3387 - 3382 .
- [6] Soukoulis M. Photonic Band Gaps and Localizati[M]. Nato ARW , Plenum , New York ,1993 .
- [7] Ho K M , Chan C T , Soukoulis C M. Existence of a Photonic Gap in Periodic Structures[J]. Phys. Rev. Lett. ,1990 65 :3152 - 3159 .
- [8] 金崇君,等. 手征材料构成的筒立方光子晶体光子带结构计算——平面波法[J]. 光学学报,1997,17(4):409.
- [9] Zhang Z , Satpathy S. Existence of a Photonic Gap in Periodic Structures[J]. Phys. Rev. Lett. ,1990 65 :2650 - 2655 .
- [10] Pendry J B , MacKinnon A. Calculation of Photon Dispersion Relati[J]. Phys. Rev. Lett. ,1992 69 2772 - 2778 .
- [11] Pendry J B. Photonic Band Structures[J]. Journal of Modern Optics , 1994 41 :209 - 218 .
- [12] Bell P M et al. A Program for Calculating Photonic Band Structure and Transmission Coefficient of Complex Structur[J]. Computer Physics Communications , 1995 85 :306 - 312 .
- [13] 高本庆. 时域有限差分法[M]. 北京:国防工业出版社,1995.
- [14] 方俊鑫,陆栋. 固体物理[M]. 上海:上海科学技术出版社,1981.

