

一维光子晶体色散特性的研究^①

李院平^②

(枣庄学院物理与电子工程系 山东省枣庄市北安路 1 号 277160)

摘要 应用传输矩阵法研究一维光子晶体的色散特性, 数值模拟得到了一维光子晶体横电(TE)模、横磁(TM)模的色散特性, 研究结果为一维光子晶体器件的设计提供了理论依据。

关键词 光子晶体; 传输矩阵法; 色散特性

中图分类号: O572.31

文献标识码: A

文章编号: 1004-8138(2011)02-0937-03

1 引言

光子晶体的概念是 1987 年分别由 John S^[1]和 Yablonovich E^[2]等人提出来的。他们将具有“光子频率禁带”的材料称作为光子晶体, 它的概念是根据传统的晶体概念类比而来的。光子晶体按其介电函数的周期性又可分为一维、二维和三维光子晶体。一维光子晶体就是只在一个维度上具有周期性, 如图 1a, 是由两种介质交替叠层而成的。图 1b 是二维光子晶体, 是由许多介质柱平行而均匀的排列而成的, 在垂直于介质柱的方向上介电常数是空间位置的周期性函数, 而在平行于介质柱方向上介电常数不随空间位置变化。三维光子晶体结构如图 1c 所示, 高低折射率的材料交替排列形成周期性结构, 这种结构的主要缺点是制造不容易, 尤其是在短波段, 如毫米波长量级以下时难以实现。目前对一维光子晶体的研究主要集中在其传输特性、带隙结构、色散特性等方面的研究^[3-5], 本文主要是用传输矩阵法研究一维光子晶体色散特性。

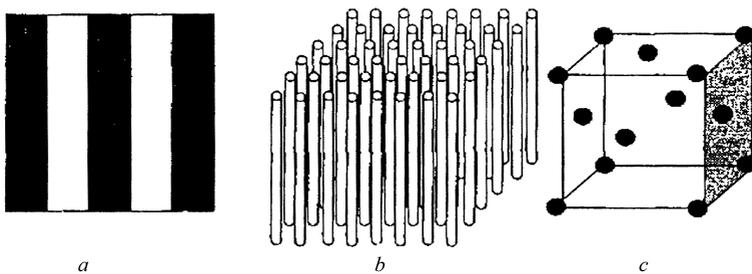


图 1 光子晶体的基本结构
a——一维结构; b——二维结构; c——三维结构。

2 传输矩阵法

传输矩阵法求解 Maxwell 方程的基本思想是由电磁场在实空间格点位置展开, 将麦克斯韦方

① 山东省 2009 年高等学校科技计划项目(J09LG56); 枣庄学院 2010 年青年计划项目

② 联系人, 手机: (0) 13863281592; E-mail: wlxyp123@126.com

作者简介: 李院平(1979—), 女, 山东省枣庄市人, 讲师, 硕士, 主要从事光子晶体方面的研究工作。

收稿日期: 2010-11-18; 接受日期: 2010-12-04

程组化成传输矩阵形式,最后求解本征值问题。这种方法对介电常数随频率变化的金属系统特别有效,由于矩阵阵元比较少,计算量不是很大,精确度也非常好,具体计算过程如下。

在设计和分析光子晶体的传输特性中,分析光子晶体的带隙结构,核心是解 Maxwell 方程,式中: E ——电场强度; H ——磁场强度; $\epsilon_0, \epsilon(r), \mu_0, \mu(r)$ ——分别是真空介电常数、介质介电常数、真空磁导率和介质磁导率。 j ——虚数; ω ——角频率; B ——磁感应强度; D ——电位移常数。

$$\nabla \times H = \epsilon_0 \epsilon(r) \frac{\partial E}{\partial t}, \quad \nabla \times E = -\mu_0 \mu(r) \frac{\partial H}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \cdot [\epsilon \epsilon(r) E] = 0, \quad \nabla \cdot [\mu \mu(r) H] = 0 \quad (2)$$

利用差分法将 (1), (2) Maxwell 方程化为:

$$\begin{cases} \frac{E_z(r+b) - E_z(r)}{b} - \frac{E_y(r+c) - E_y(r)}{c} = j\omega B_x(r) \\ \frac{E_x(r+c) - E_x(r)}{c} - \frac{E_z(r+a) - E_z(r)}{a} = j\omega B_y(r) \\ \frac{E_y(r+a) - E_y(r)}{c} - \frac{E_x(r+b) - E_x(r)}{b} = j\omega B_z(r) \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \frac{H_z(r-b) - H_z(r)}{b} - \frac{H_y(r-c) - H_y(r)}{c} = j\omega D_x(r) \\ \frac{H_x(r-c) - H_x(r)}{c} - \frac{H_z(r-a) - H_z(r)}{a} = j\omega D_y(r) \\ \frac{H_y(r-a) - H_y(r)}{c} - \frac{H_x(r-b) - H_x(r)}{b} = j\omega D_z(r) \end{cases} \quad (4)$$

式中: a, b, c ——分别表示 x, y, z 方向上的差分间隔; 常量 $\tau^{-1}a$ (a 为晶格常数)——计算差分间隔; τ ——在每个单元晶胞中(在 x, y 上)分成 $\tau \times \tau$ 格。公式(3)和(4)通过前一层格点的 $E(r)$ 和 $H(r)$ 可以算出下一层的电场 $E(r+c)$, 由得出 $E(r+c)$ 和前一层的 $H(r)$, 可求出下一层的磁场 $H(r+c)$ 。令

$$F(r) = \begin{bmatrix} E_x(r) \\ E_y(r) \\ H_x(r) \\ H_y(r) \end{bmatrix} \quad (5)$$

则下一层的电磁场为

$$F(r+c) = M(r)F(r) \quad (6)$$

则 $M(r)$ 是一个 $4\tau \times 4\tau$ 的矩阵, 而根据 Bloch 定理:

$$\begin{cases} E(r+c) = \exp(ik_2c)E(r) \\ H(r+c) = \exp(ik_2c)H(r) \end{cases} \quad (7)$$

得到 $M(r)F(r) = \exp(ik_2c)F(r)$ (8)

根据不同的频率 ω 解这个方程的本征值, 得出相对应的波矢量, 就可以得到光子晶体的色散特性。

3 色散特性研究

一维光子晶体模型如图 1a 所示, 图中黑色部分的折射率为 $n_2 = 3.45$, 白色部分的折射率为 $n_1 = 1.45$, d_1 和 d_2 表示它们的厚度, 其中 $d_1 = n_2 / (n_1 + n_2)$, $d_2 = 1 - d_1$ 。图 2 表示 TE 模色散特性图, 图中纵坐标表示归一化频率, 横坐标表示入射波的角度, 中间黑色部分为波的禁带。在 $0-40^\circ$ 存在

两个禁带, 在 $0.1848\text{--}0.3581\text{Hz}$ 和 $0.6793\text{--}0.7995\text{Hz}$ 。在 $40\text{--}80^\circ$ 变化较为明显, 通过图中发现波传播过程中随着角度的变化, 色散特性发生变化。图 3 表示 TM 模色散特性图, 图中纵坐标表示归一化频率, 横坐标表示入射波的角度, 中间黑色部分为波的禁带。在 $0\text{--}60^\circ$ 存在两个禁带, 在 $0.1914\text{--}0.3581\text{Hz}$ 和 $0.6726\text{--}0.7962\text{Hz}$ 。通过图中发现波传播过程中随着角度的变化, 色散特性发生变化。

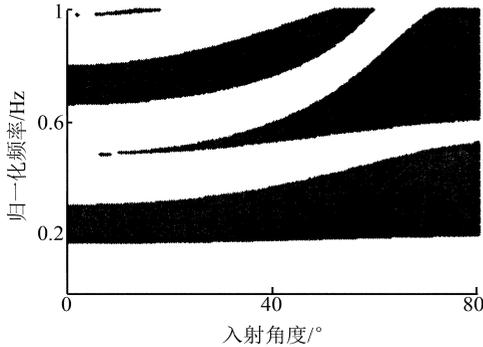


图 2 TE 模色散特性图

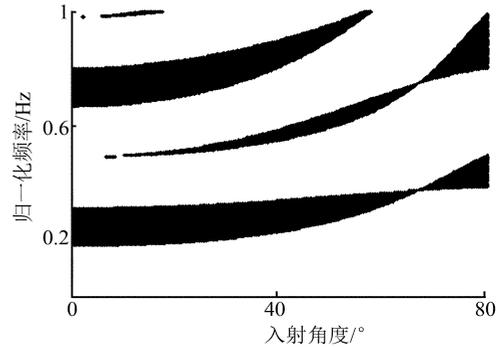


图 3 TM 模色散特性图

4 结论

一维光子晶体 TE 模、TM 模的色散特性通过频率表现出来, 通过分析角度变化对应的 TE、TM 及 TE/TM 模的禁带情况, 得到了入射角度从 $0\text{--}80^\circ$ 间变化时一维光子晶体的色散特性, 为了解光子晶体的物理特性提供了理论依据。

参考文献

- [1] John S.Strong Locali Zation of Photons in Certain Disordered Dielectric Superlattices[J]. *Physical Review Letter*, 1987, **58**(23): 2486—2488.
- [2] Yablonovich E. Inhibited Spontaneous Emission in Solid-State Physics and Electronics[J]. *Physical Review Letter*, 1987, **58**(20): 2059—2061.
- [3] 张超, 耿继国. 一维光子晶体的折射谱线特性分析[J]. *光谱实验室*, 2008, **25**(2): 52—55.
- [4] 苏安, 张宁. 单负材料一维光子晶体的透射谱特性[J]. *发光学报*, 2010, **35**(3): 439—444.
- [5] 刘启能. 一维矩形光子晶体中电磁波的传输特性[J]. *光子学报*, 2010, **20**(5): 847—850.

Dispersion Properties of 1-D Photonic Crystal

LI Yuan-Ping

(Department of Physics and Electronic Engineering, Zaozhuang University, Zaozhuang, Shandong 277160, P. R. China)

Abstract Dispersion properties of 1-D photonic crystal were studied by transfer matrix method. The dispersion properties of 1-D photonic crystal of TE mold and TM mold were obtained by numerical simulation. This result provides theoretic basis for projection of the 1-D photonic crystal devices.

Key words Photonic Crystal; Transfer Matrix Method; Dispersion Properties