

一种二维金属电磁带隙结构的电磁传输特性

许小玲¹, 刘长军¹, 钟淑蓉¹, 范如东¹, 申东雨²

(1.四川大学 电子信息学院, 成都 610064; 2.韩国汉城国立大学 数学系, 韩国 汉城 151-747)

摘要: 采用时域有限差分法与 Floquet 定理相结合, 对由正方形金属柱构成的二维电磁带隙结构的传输特性进行了分析和计算, 得到了不同频率的平面电磁波在不同角度入射时, 该结构的传输参数及电磁特性。通过改变金属方柱的边长和间距, 得到了电磁带隙结构的阻带中心频率的变化规律, 进而得到了拟合公式, 该公式计算结果与仿真结果间最大误差不超过 2%, 具有较好的可靠性和较高精度, 可用于 EBG 结构的应用研究。

关键词: 电子技术; 电磁传输特性; 时域有限差分法; Floquet 定理; 电磁带隙

中图分类号: TN011

文献标识码: A

文章编号: 1672-2892 (2006)02-0125-04

Electromagnetic Transmission Characteristics of a 2-D Metal EBG Structure

XU Xiao-ling¹, LIU Chang-jun¹, ZHONG Shu-rong¹, FAN Ru-dong¹, SHEEN Dongwoo²

(1.School of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610064, China;

2.Dept. of Mathematics, Seoul National University, Seoul 151-747, Korea)

Abstract: In this paper, the Finite Difference in Time Domain (FDTD) method with Floquet theorem is applied to analyze the transmission characteristics of a 2-D EBG structure, which is an array of square metal rods. The transmission parameters and electromagnetic characteristics are obtained while a plane electromagnetic wave at different frequencies is incident under oblique or perpendicular condition. By altering the parameters of the EBG structure, such as the size of the square metal rod or the distance between two metal rods, an empirical formula of the central frequency of the electromagnetic band-gap is achieved. Further results show that the empirical formula is reliable and accurate with an error less than 2%, and it can be applied to the design of EBG structures.

Key words: electronic technology; electromagnetic transmission characteristics; FDTD; Floquet theorem; EBG

1 引言

电磁带隙(Electromagnetic Band Gap, EBG)是一种由介质、金属或其混合体单元按周期性排列所构成的阵列结构, 对特定频段内的电磁波呈现带阻特性。近年来, EBG 结构引起了人们的广泛关注, 并已应用到很多领域, 特别是在微波毫米波研究中, EBG 结构已成功用于改善天线性能^[1], 增加功率放大器的效率和输出功率^[2], 应用于宽带衰减器以及频率选择表面^[3]等方面。在对 EBG 结构进行理论分析时, 曾先后采用了平面波展开法(Plane Wave Expansion, PWE)、转移矩阵法(Transfer Matrix Method, TMM)、时域有限差分法(Finite Difference in Time Domain, FDTD)等^[4-7], 这些方法各有所长, 但在复杂周期结构或金属柱周期单元的研究中, FDTD 法是一种较好的模拟方法。

本文采用 FDTD 法对二维金属 EBG 结构的电磁特性进行数值分析, 结合使用 Floquet 定理, 采用高斯脉冲入射, 通过傅里叶变换得到该结构的频率响应曲线。同时分析了金属柱截面边长及金属柱之间的距离等参数对该 EBG 结构阻带的影响, 获得了关于阻带中心频率及带宽的经验公式, 并对经验公式做了进一步验证。

二维 EBG 结构可对不同入射角度的平面波进行响应, 但是只有对一定角度内的入射波, EBG 结构才具有带阻的特性。因此, 研究斜入射情况可以给出实际应用中入射角度的限制, 并可作为评估不同二维 EBG 结构的一

收稿日期: 2005-11-15; 修回日期: 2006-02-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60301004; 60411140521)

个指标。本文对入射角度的变化对阻带的影响也做了分析计算。

2 EBG 结构和数值方法

本文所讨论的 EBG 结构是周期排列的二维金属方柱阵列，如图 1(a)所示。金属柱横截面的边长为 r ，周期单元的长度为 a ，如图 1(b)所示。

对 EBG 的周期单元结构进行 Yee 氏网格剖分，将 Maxwell 方程组进行离散化，按照 TM(Transverse Magnetic)平面电磁波模式传播。

边界条件设置如图 2 所示，采用 Mur 吸收边界，平面电磁波通过连接边界条件引入。入射波为线极化的平面电磁波，其极化方向与金属柱平行，入射波为复数正弦调制的高斯脉冲：

$$E_i(n\Delta t) = (\cos(2\pi f_{source}n\Delta t) + j\sin(2\pi f_{source}n\Delta t)) \exp\left(-\frac{(n\Delta t - t_0)^2}{\tau^2}\right) \quad (1)$$

式中： E_i 为入射电场， f_{source} 为入射电磁波的频率， Δt 为时间步长， t_0 为脉冲峰值出现的时刻， τ 为高斯脉冲的宽度。如图 1(b)所示，为了分析 EBG 结构层数、金属柱截面边长及金属柱之间的距离的变化对 EBG 结构阻带的影响，设定在 x 方向有 N 层，而在 y 方向上为无限多层，根据 Floquet 定理得到：

$$\psi(x, y + T_y, t) = \psi(x, y, t - \frac{T_y}{v_{\phi y}}) \quad (2)$$

式中： ψ 为电磁场的某一分量， T_y 为沿 x 方向的周期长度， $v_{\phi y} = c/\sin\phi_i$ ，为电磁波沿 y 方向的相速， c 为光速， ϕ_i 为平面电磁波的入射角。

根据 Bragg 定律，EBG 结构的中心频率 f_0 是该结构周期单元尺寸 a 的函数^[8-9]。在二维金属柱组成的 EBG 结构中，通常选取以周期单元边长 a 作为半个波长的频率来估计阻带的中心频率 f_0 ，即 $f_0 = c/2a$ (3)

本文取中心频率 $f_0=2\text{GHz}$ 对应 $a=75\text{mm}$ ，将每个周期单元均匀离散为 40×40 个网格 ($N_a = a/\Delta s = 40$)， N_a 为离散单元边长，空间步长 $\Delta s = \Delta x = \Delta y = 1.87\text{mm}$ ，在后面的计算中空间步长不变。根据 Courant 稳定条件，确定时间步长 $\Delta t = \Delta s/2c = 3.125\text{ps}$ ，总时间步数取电磁波在计算区域内往返十次所需的时间，以铝为典型代表，取金属柱的电导率 $\sigma = 3.72 \times 10^7 \text{S/m}$ 。

3 模拟计算结果

3.1 层数的影响

图 3 给出了当单元边长和金属柱截面边长一定时 ($N_a=40$ ，离散金属柱界面边长 $N_s=8$)，不同层数 N 对传输特性的影响，从图 3 中可以看出，当层数 $N>3$ 层时，层数的变化对阻带的中心频率及带宽的影响都不大，此时层数 N 主要影响阻带的性能。 N 越大，阻带的特性越好，一般只要 $N>5$ ， $S_{21}<-20\text{dB}$ ，就能满足一般阻带的要求了。

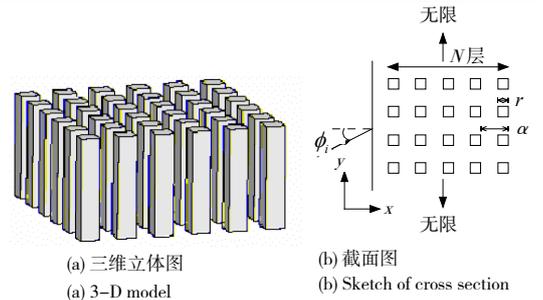


图 1 二维金属 EBG 结构示意图 Fig.1 Structure of a 2-D metal EBG

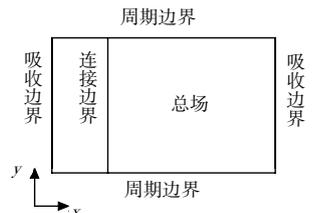


图 2 边界条件的设置 Fig.2 Boundary conditions

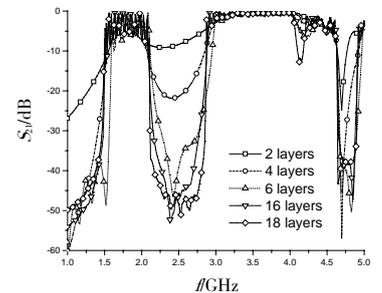


图 3 层数 N 对传输特性的影响 Fig.3 Transmission characteristics with different layers

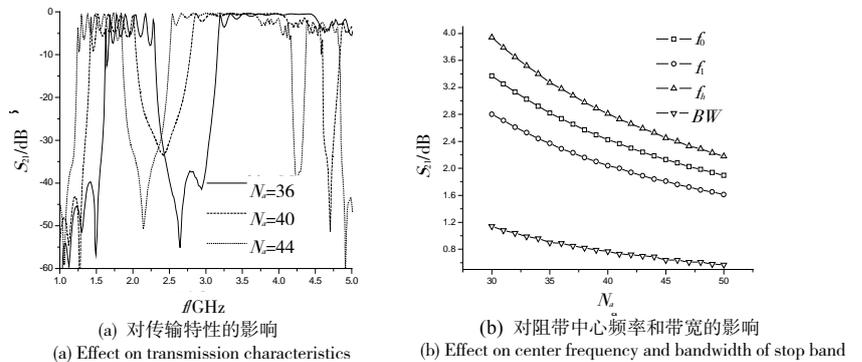


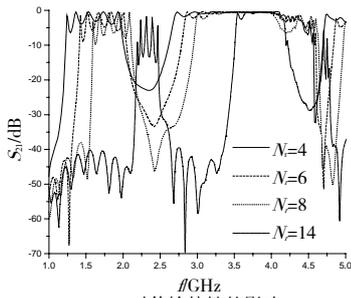
图 4 Na 的变化对阻带的影响 Fig.4 The stop band changes with Na (Na=6, Na=6)

3.2 单元边长的影响

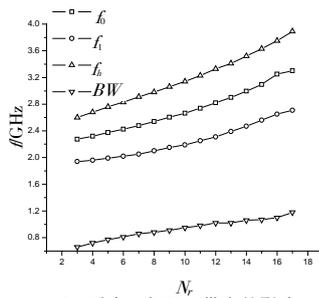
当金属柱截面边长和层数一定时($N_r=6, N_s=6$), 单元边长的改变将影响传输特性, 当变化幅度不超过原周期单元长度的 1/4 时, 从图 4(a)中可以看出, N_s 的变化对阻带的中心频率、带宽及性能都有影响, 当 N_s 增大时, 阻带的中心频率降低, 带宽变窄, 其具体的变化如图 4(b)所示。

3.3 金属柱截面边长的影响

图 5(a)给出了当单元边长和层数一定时($N_s=40, N_r=6$), 金属柱截面边长对传输特性的影响, 由图 5(a)可以看出, r 的变化对阻带的中心频率、带宽及性能都有影响, 当 N_r 增大时, 中心频率升高, 带宽增大, 性能更好, 其具体的变化如图 5(b)所示。



(a) 对传输特性的影响
(a) Effect on transmission characteristics



(b) 对中心频率及带宽的影响
(b) Effect on center frequency and bandwidth of stop band

图 5 N_r 的变化对阻带的影响

Fig. 5 The stop band changes with N_r ($N_s=40, N_r=6$)

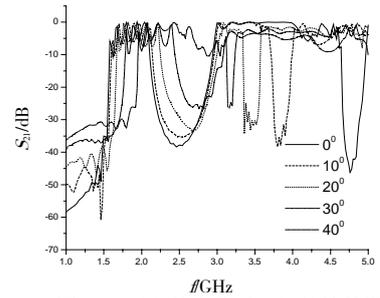


图 6 入射角的变化对传输特性的影响
Fig. 6 Transmission characteristics with different incident angles ($N_s=6, N_r=40, N_s=8$)

3.4 入射角度的影响

图 6 给出了当 EBG 结构不变时 ($N_s=6, N_r=40, N_s=8$), 入射波角度的变化对传输特性的影响, 可以看出, 随着入射角度的增大, 传输特性越来越差, 阻带逐渐向高频端移动。当 $\phi_i > 30^\circ$ 时, 该结构已不再具有 EBG 结构的带阻特性了。

4 经验公式的推导及验证

由图 4~6 可以看出, EBG 结构的阻带中心频率是变化的, 式(3)并不准确, 为准确预测该类 EBG 结构的阻带中心频率, 根据以上所得数据, 得出了随 N_s, N_r 变化的关于阻带中心频率的经验拟合公式:

$$f_0 = \frac{N_s + c_1}{N_s - N_r + c_2} \times \frac{N_s'}{N_s} \times f_0' \quad (4)$$

式中: N_s' 为原结构的单元网格数, f_0' 为式(3)的结果, c_1, c_2 为常量, 对应于不同的空间步长, 应该有不同的值。当 $N_s'=40, f_0'=2\text{GHz}$ 时, 采用最小二乘法得到 $c_1=11, c_2=8.3$ 。

由表 1 和表 2 可以看出, 式(4)得出的结果与通过 FDTD 模拟计算得到的结果基本吻合, 其中的误差与(4)式中系数只取两位有效数字有一定关系。模拟计算的中心频率和带宽通过阻带的上截止频率和下截止频率求得。

表 1 $N_s=40$ 时式(4)的计算结果

Table 1 Results of formula (4) in the case of $N_s=40$

N_r	$f_0/(\text{GHz})$	$f_0''/(\text{GHz})$	Error/(%)
3	2.275	2.267	0.3663
7	2.480	2.488	0.3147
11	2.740	2.757	0.6116
15	3.095	3.091	0.1322
17	3.300	3.290	0.2933

表 2 $N_r=6$ 时式(4)的计算结果

Table 2 Results of formula (4) in the case of $N_r=6$

N_s	$f_0/(\text{GHz})$	$f_0''/(\text{GHz})$	Error/(%)
30	3.370	3.417	1.385
35	2.820	2.842	0.7695
40	2.425	2.429	0.1473
45	2.130	2.118	0.5538
50	1.895	1.877	0.9539

注: 表中 f_0'' 为式(4)计算出来的结果, f_0 为 FDTD 模拟计算结果, $\text{Error} = \frac{|f_0 - f_0''|}{f_0} \times 100\%$

为了确定式(4)的可靠性, 分别在以下两种情况下进行验证:

1) 增大单元网格数, 令 $N_x'=50$, 中心频率 $f_0'=1.6\text{GHz}$, 其它参数不变, 表 3 给出了当 $N_x=50$, N_z 在 4~18 间变化时, 式 (4) 得出的结果与模拟计算得出的结果之间的比较。

2) 增大金属柱截面边长 $N_z=8$, 其他参数不变, 表 4 给出当 N_x' 在 30~50 间变化时, 式(4)得出的结果与模拟计算得出的结果之间的比较。

由表 3 和表 4 可以看出, 对于不同的变量 N_x 和 N_z , (4)式的结果与模拟计算所得的结果都具有很好的一致性, 其计算结果误差不超过 2%, 这就能准确地预测二维金属 EBG 结构的阻带中心频率。

表 3 $N_x=50$ 时式 (4) 的计算结果Table 3 Results of formula (4) in the case of $N_x=50$

N_z	$f_0/(\text{GHz})$	$f_0'/(\text{GHz})$	Error/(%)
4	1.830	1.807	1.235
8	1.965	1.952	0.6616
12	2.120	2.121	0.0820
16	2.315	2.324	0.3805
18	2.435	2.440	0.2053

表 4 $N_z=8$ 时式 (4) 的计算结果Table 4 Results of formula (4) in the case of $N_z=8$

N_x	$f_0/(\text{GHz})$	$f_0'/(\text{GHz})$	Error/(%)
30	3.595	3.644	1.376
35	2.980	3.004	0.8081
40	2.540	2.550	0.3937
45	2.215	2.211	0.1198
50	1.960	1.952	0.4082

5 结论

本文对一种二维金属 EBG 结构进行了数值模拟, 得到了其传输系数的频率曲线, 并通过改变金属柱截面边长、间距及入射角度, 得到了与阻带性能、中心频率及带宽的关系。仿真结果表明当层数 $N>5$, 入射角度 $\phi_i \leq 30^\circ$ 时, 该类 EBG 结构的阻带性能良好。通过大量的数值模拟总结了 EBG 结构阻带中心频率的经验公式, 并进一步验证。结果表明(4)式(在 $N>5$, 正入射角度的情况下)有很好的可靠性, 误差小于 2%。因此, 可以使用经验公式(4)来预测该类 EBG 结构的阻带中心频率, 这在 EBG 结构的工程设计及应用中具有重要意义。

参考文献:

- [1] T J Ellis, G M Rebeiz. MM-wave tapered slot antennas on micro machined photonic band gap dielectrics[A]. IEEE MTT-S, Int. Microwave Symp. Dig[Z], 1996. 1157-1160.
- [2] V Radisic, Y Qian, T Itoh. Broadband power amplifier using dielectric photonic band gap structure[J]. IEEE Microwave Guided Wave Lett, 1998, 8(1):13-14.
- [3] M P Kesler, J G Maloney, B L Shirley. Antenna design with the use of photonic band gap materials as all dielectric planar reflectors[J]. Microwave Opt. Tech. Lett., 1996, 11(3):169-174.
- [4] R Hillebrand, W Hergert. Band gap studies of triangular 2D photonic crystal with varying pore roundness[J]. Solid State Communications, 2000, 115:227-232.
- [5] M Sigalas, C M Soukoulis, E N Economou, et al. Photonic band gaps and defects in two dimensions[J]. Studies of the transmission coefficient. Physical Review B, 1993, 48(19): 14121-14126.
- [6] C T Chan, Q L Yu, K M Ho. Order-N spectral method for electromagnetic waves[J]. Physical Review B, 1995, 51(23): 16635-16642.
- [7] 包秀龙, 章文勋, 郑龙根, 等. 二维介质 PBG 结构色散特性的时域有限差分法分析[J]. 应用科学学报, 2003, 21(3):236-240.
- [8] 付云起, 袁乃昌. 用 FDTD 分析光晶带隙结构散射特性[J]. 电子学报, 2001, 29(12):1729-1730.
- [9] 赵小莹, 周乐柱. 不同参量的二维介质电磁带隙的反射及传输特性研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2005, 41(3): 460-464.

作者简介:

许小玲(1981-), 女, 黑龙江尚志人, 在读硕士研究生, 目前主要从事微波化学相关的研究工作. Email: imaple99@163.com.

刘长军(1973-), 男, 河北邢台人, 教授, 博士生导师, 目前主要从事电磁场与微波技术方面的研究工作.

钟淑蓉(1974-), 女, 四川金堂县人, 在读硕士研究生, 主要从事微波化学相关的研究.

范如东(1982-), 男, 河南新县人, 在读硕士研究生, 主要从事微波化学方面的研究.

申东雨(1957-), 男, 韩国汉城人, 教授, 主要从事数值分析和有限元算法的研究.