

铁氧体介质基片微带线色散特性的研究

郑国武 王湖庄 陈抗生

(浙江大学信息与电子工程系, 浙江, 杭州, 310008)

摘要: 利用扩展的二维 FD-TD 方法研究了包含铁氧体介质的均匀微带线的色散特性, 给出了铁氧体介质的厚度, 微带线导带宽度以及铁氧体的外加恒磁场对其传输特性的影响, 并对这类传输线在禁带附近模式容易传播的模式进行了讨论.

关键词: 微带线, 铁氧体, FD-TD 方法, 色散特性.

引言

近年来, 由于微波与毫米波集成电路的发展, 铁氧体薄膜器件在微波与毫米波集成电路中的应用 (如集成铁氧体隔离器、移相器和滤波器等) 已引起了人们的关注^[1]. 铁氧体介质基片微带线是集成元器件最基本的结构, 因而对这一类传输线特性的研究显得迫切和重要.

以前, 对这类微波铁氧体器件的研究是引入多种近似的定性分析^[2], 近来利用数值方法——谱域法分析包含铁氧体介质简单的微带线和鳍线已见报道^[3], 但是谱域法在分析各向异性的色散介质导波结构时存在着局限性, 尤其是当铁氧体的外加恒磁场与结构坐标不一致时, 谱域法很难处理. 时域有限差分法 (FD-TD 方法)^[4], 虽具有很强的通用性, 但一般的 FD-TD 方法对于分析存在色散介质 (介质特性是频率函数) 的结构是很困难的, 这主要是由于对于色散介质情况, 如 $\bar{\mu}(\omega)$, 其关联方程在时域中以卷积的形式出现^[5]. 本文针对这一情况, 为了克服卷积形式在差分方程中出现, 通过改变关联方程表示形式, 从铁氧体介质的磁进动方程出发, 同时引入小信号近似, 把与频率有关的介质特性用关于时间的差分方程加以表示, 导出了适合于分析存在旋磁介质导波结构的扩展 FD-TD 方法.

本文最后利用这二维扩展 FD-TD 方法研究了包含铁氧体薄膜介质层均匀微带线的传输特性, 讨论了铁氧体介质的厚度, 微带线导带的宽度以及外加恒磁场的大小对其色散特性的影响.

1 铁氧体介质中的二维 FD-TD 方法

假设所研究的对象是无源的, 所有导体都是理想导体. 为了分析方便, 在铁氧体介质中的麦克斯韦方程写成:

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \quad \nabla \times \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}; \quad (1)$$

关联方程为:

$$\vec{D} = \bar{\epsilon} \vec{E}, \quad \vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \vec{M}; \quad (2)$$

式(2)中 $\bar{\epsilon}$ 表示铁氧体介质的介电常数.

从微观动力学角度出发, 旋磁介质特性可用微分方程表示为:

$$\frac{d\vec{M}}{dt} = -\gamma(\vec{M} \times \vec{H}), \quad (3)$$

式(3)中 γ 为回旋磁比. 磁矩 M' 和磁场 H' 分别为恒定分量 (\vec{M}_0, \vec{H}_0) 和交变分量 (\vec{M}, \vec{H}) 之和, 假设所分析的结构如图 1 所示, 铁氧体外加恒磁场为 \vec{H}_0 . 在局限于小信号传输的情况下, 从式(3)中忽略其二阶小量, 可以得到 M 关于时间 T 的微分方程:

$$\frac{dM_x}{dt} = \gamma M_z H_0 - \gamma M_0 H_z, \quad (4)$$

本文类似于文献 [6], 只分析纵向均匀的传输线, 假设其各场分量都包含 $e^{-j\beta z}$ 因子, 经过一系列变换, 从式(1)可以获得相应的二维标量麦克斯韦方程组:

$$\frac{\partial B_x}{\partial t} = \beta E_y - \frac{\partial E_z}{\partial y}. \quad (5)$$

为了得到合适的差分表达式, 且能使网格点上的场分量能很好与结构边界相匹配, 参考文献 [6] 采用如图 2 所示的网格. 其中磁矩 M , 磁感应强度 B 和其相对应的 H 分量落在同一位置上. 引入定义:

$$F^n(i, j) = F(i\Delta x, j\Delta y, n\Delta t), \quad (6)$$

式(6)中 Δx , Δy , Δt 分别为空间和时间上的差分步长. 由此, 对式(4)和式(5)进行差分离散可构成麦克斯韦方程组和磁进动方程组的差分表达式:

$$B_x^{n+1/2}\left(i, j + \frac{1}{2}\right) = B_x^{n-1/2}\left(i, j + \frac{1}{2}\right) + \Delta t \left[\beta E_y^n\left(i, j + \frac{1}{2}\right) - \frac{E_z^n(i, j+1) - E_z^n(i, j)}{\Delta y} \right], \quad (7a)$$

$$M_x^{n+1/2}\left(i, j + \frac{1}{2}\right) = M_x^{n-1/2}\left(i, j + \frac{1}{2}\right) + jv\Delta t \left[H_0 M_z^{n-1/2}\left(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}\right) - M_0 H_z^{n-1/2}\left(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}\right) \right]; \quad (7b)$$

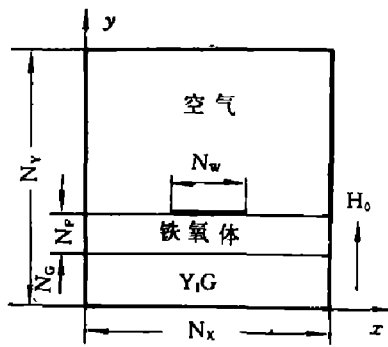


图 1 铁氧体微带线结构示意图

Fig. 1 The configuration of microstrip line with ferrite media

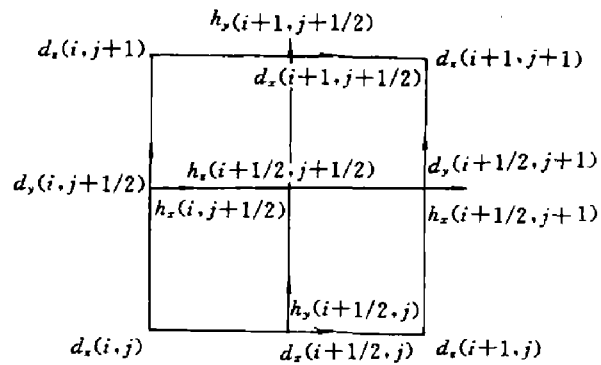


图 2 场分量在网络中的分布

Fig. 2 The positions of field components in the mesh

由此对于给定的结构在给定一个 β 的情况下, 只要联立方程组 (7) 和关联方程 (2), 就可以得到网格点上各个场分量的时间序列解。

差分方程组 (7) 要有稳定收敛的解, Δx , Δy , Δt 和 β 的选择必须满足一定的关系^[7], 即

$$C\Delta t \leq \left[\sqrt{\left(\frac{1}{\Delta x}\right)^2 + \left(\frac{1}{\Delta y}\right)^2 + \frac{\beta^2}{4}} \right]^{-1}, \quad (8)$$

但对铁氧体介质来说, 式 (8) 只是使差分方程稳定的必要条件, 不是充分条件. 由式 (7b) 可知: Δt 的绝对值必须足够小, 以使式 (7b) 有足够的差分精度. 从原理上说 Δt 的选择定性地和外加恒磁场的大小有关。

2 边界、初始激励的处理及本征值的求解

在进行差分方程组求解以前, 必须给定初始激励和对边界的离散化进行处理。

对介质分界面电特性的不连续性可采用文献 [6] 中的方法, 只要在磁性介质中纯导体表面上使为零的场分量落在其表面上即可. 对于磁特性不连续的介质分界面, 可以认为磁场不连续是由于 M 的不连续引起的, 所以在求解落在分界面上的磁场分量时, 只要对落在边界上的 M 分量取平均即可. 而在分析图 1 所示的结构时, 只要在划分网格时使 M_x , M_z 不在边界上即可免去这一边界的处理。

初始激励可采用微带导带下面的法向电场不为零, 其余全为零的空间分布来实现。

经以上讨论, 只要给定一个 β 就可以得到结构横截面上每一差分网格点上场分量的时间序列解. 从微波理论可知, 对波导结构在纵向传播的模式, 在横截面上必定是谐振的. 由此对应于传播常数 β 的本征值可从横截面上选取某一个适当点的合适场分量的时间序列解的傅氏变换结果中提取。

$$F(f) = \sum_N F^n(i_0, j_0) \exp(-j2\pi n\Delta t), \quad (9)$$

则使 $F(f)$ 取得极值的 f 就是对应给定的 β 和激励下所能激励出的传播模式的频率。

值得指出的是,在分析介质是色散的导波结构时,由于其介质特性与频率有关,所以不能通过导波结构几何尺寸的缩放得到相类似导波结构的特性,即存在色散介质的导波结构不再满足缩比原理.

3 数值模拟结果和讨论

为了检验这一算法的合理性和可靠性,以填充铁氧体介质的 BJ-100 矩形波导为例进行了数值模拟,其中 $\mu_0 H_0 = 0.05T$, $\mu_0 M_0 = 0.085T$, $\epsilon_r = 15.3$, 得到的结果和解析结果相比其相对误差小于 0.1%. 本文利用这一方法研究了如图 1 所示不同结构的铁氧体介质微带线的色散特性,给出了不同的饱和磁矩 M_0 , 外加恒磁场 H_{y0} , 不同的铁氧体基片厚度和不同导带宽度情况下微带线的色散特性(见图 3), 其中差分步长 $\Delta x = \Delta y = 1\text{mm}$, $N_x = N_y = 10$, 稳定因子 $c\Delta t/\Delta x = 0.515$.

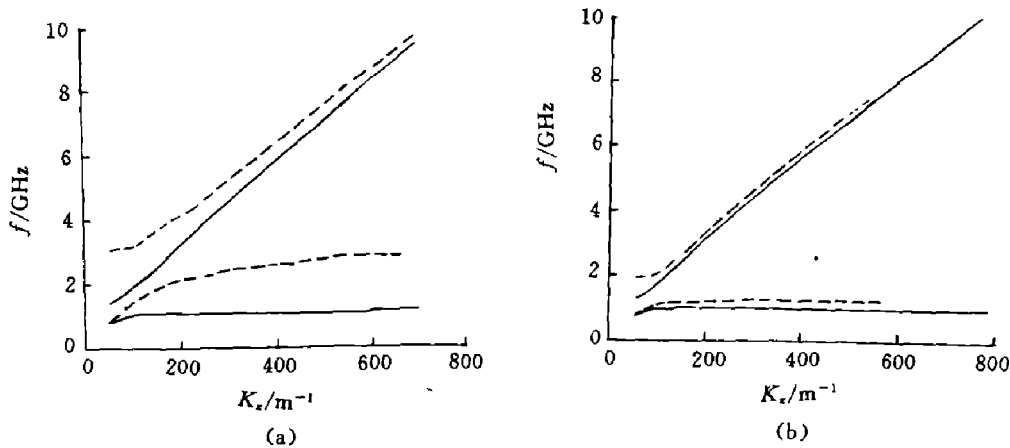


图3 铁氧体介质微带线色散特性

Fig. 3 The dispersion of microstrip line with ferrite media

- (a) $N_F = 2, N_G = 2, N_W = 3.5$; --- $\mu_0 H_0 = 0.5T, M_0 = 0.865T$, — $\mu_0 H_0 = 0.2T, M_0 = 0.346T$
 (b) $\mu_0 H_0 = 0.2T, M_0 = 0.346T$; — $N_F = 1, N_G = 3, N_W = 3.5$, --- $N_F = 4, N_G = 0, N_W = 3.5$

从图 3(a) 中可以看出,当铁氧体的外加恒磁场增大时其阻带明显变宽,变化主要发生在低频段;从图 3(b) 中可以看出铁氧体介质的厚度对微带线阻带的影响也很明显.比较图 3(a), (b) 发现,微带线金属导带的变化,主要影响其高频的传播特性,而对低频特性影响不大.

由以上的现象可以推断,在存在铁氧体介质的微带线中,铁氧体的外加恒磁场 H_0 和饱和磁矩 M_0 对微带线特性影响最大,在这一类微带线中存在着阻带^[3],阻带的频宽主要由 H_0 和 M_0 所决定,其次铁氧体介质的厚度对阻带也有相当大的影响,其它因素影响微带线的高频传播特性.我们所得的结果和文献 [3] 定性相符.从利用二维 FD-TD 方法分析这一类微带线的过程中,我们发现阻带附近在给定的 β 和激励的条件下,容易激起有效介电常数小于 ϵ_r ,但又不是过分小的模式.这在用一般的频域法分析时是不可能看到的.

本文为铁氧体器件传输线色散特性的研究提供了一个有效的数值方法, 使包含铁氧体介质的微波与毫米波器件用一般方法很难分析的问题, 可以用本文提出的方法很方便地进行精确的数值模拟。本文在方法上用差分代替一般情况下的卷积, 扩展了 FD-TD 方法的应用范围。

本文所得到的结果, 尤其是所提出的方法对微波与毫米波集成电路的设计是具有参考价值的。

参考文献

- 1 Marion E Hines. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, 1971,19(5):442-251
- 2 Lax B et al. *Microwave ferrite and ferrimagnetic*, New York, McGraw-Hill, 1962
- 3 Tsutsumi M et al. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, 1990,38(10):1461-1467
- 4 Yee K.S. *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 1966,14(3):302-307
- 5 Gardioi F. *IEEE Newsletter*, 1989, p.43-44
- 6 Zheng Guowu et al. *Int. J. Infrared Millim. Waves*, 1990,11(4):489-498
- 7 Lapidus L et al. *Numerical Solution of Partial Differential in Science and Engineering*, New York Wiley, 1982

THE STUDY OF DISPERSIVE CHARACTERISTICS OF MICROSTRIP LINE INVOLVING FERRITE MEDIA

Zheng Guowu, Wang Huzhuang, Chen Kangsheng

(Department of Information Science and Electronics Engineering,
Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310008, China)

Abstract: The dispersive characteristics of microstrip lines involving ferrite media are studied in this paper by using the extended two-dimensional FD-TD method. The effects of the thickness of ferrite dielectric, the width of metal strip of microstrip and the applied DC magnetic field of ferrite media on the transmission characteristics are presented. The mode which can propagate more easily nearby the stopband of microstrip lines is also discussed.

Key words: microstrip line, ferrite, FD-TD method, dispersive characteristics