

利用时域有限差分法计算并分析非对称共面波导色散特性

陈 鹏, 房少军

(大连海事大学信息工程学院, 辽宁大连 116026)

摘 要: 利用 FDTD 方法对 ACPW 的色散特性进行了计算与分析, 给出了计算 ACPW 的 FDTD 全空间计算模型, 取高斯脉冲的激励, 选择 Mur 二阶吸收边界条件, 计算得出几种结构的 ACPW 的特性阻抗 $Z_0(\omega)$, 并绘出了 Z_0 随频率变化的曲线. 计算结果与测试值取得了良好的一致性.

关键词: 非对称共面波导, 时域有限差分法, Mur 边界条件, 特性阻抗 Z_0 , 色散特性

中图分类号: TN814 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2006) 09-1610-03

Calculation and Analysis of Dispersion Characteristic of ACPW Using FDTD Method

CHEN Peng, FANG Shao-jun

(Information Engineering College, Dalian Maritime University, Dalian, Liaoning 116026, China)

Abstract Dispersion characteristic of asymmetrical coplanar waveguide (ACPW) using finite-difference time-domain (FDTD) method is presented. A FDTD model of ACPW is advanced and the transient propagating waveforms along the ACPW, which are excited by retarded Gaussian pulse, are found in the time domain. After the time-domain field distributions are obtained, frequency-domain parameters such as characteristic impedance Z_0 are calculated using Fourier transformations. The results agree well with available theoretical and experimental data over a wide frequency range.

Key words asymmetrical coplanar waveguide, finite-difference time-domain, Mur's absorbing boundary condition, characteristic impedance Z_0 , dispersion characteristic

1 引言

在微波集成电路以及毫米波和光学集成电路中, 共面波导 (CPW) 的应用越来越受到重视. 虽然对称共面波导的结构较为常见, 但是实际制作出来的 CPW 都是非对称的, 而且在微波集成元器件的研究中, 非对称共面波导 (ACPW) 的应用也比较多, 例如转接器和耦合器等, ACPW 更具有一般性和应用灵活性. 虽然已有一些学者对 ACPW 进行了一些研究^[1-5], 但涉及的内容较少, 而且主要停留在静态特性研究上, 从目前的资料来看, 并没有对 ACPW 进行过色散特性的分析研究.

自从 1969 年文献 [6] 首先提出来的 CPW (对称结构) 之后, 有很多的学者都对 CPW 很感兴趣, 而且进行了各方面的研究. 文献 [7] 对共面波导进行了全波分析, 并讨论了特性阻抗的计算方法, 文献 [8] [9] 取时域有限差分法 (FDTD) 对对称结构的 CPW 进行了全波分析, 并给出了特

性阻抗的曲线. 文献 [1] [2] 于 1981 年首先提出了 ACPW 的概念并研究了介质基片为有限厚度和无限厚度两种 ACPW; 文献 [3] 采用变分法研究了 ACPW; 1993 年文献 [4] 发表了非对称共面线和 ACPW 的研究结果; 文献 [5] 采用保角变换的方法对带底板的 ACPW 进行了详细的研究. 而利用 FDTD 方法对 ACPW 的色散特性进行分析研究至今还未见报导.

本文利用 FDTD 方法, 构造一个用于计算 ACPW 的 FDTD 计算模型, 选择合适的 Mur 二阶吸收边界条件^[10], 通过高斯脉冲的激励, 一次计算可以得到时域中整个计算空间的电场和磁场的值, 并通过快速傅立叶变换 (FFT), 计算出 ACPW 的 $Z_0(\omega)$, 并对其色散特性进行了分析与讨论.

2 ACPW 结构及色散特性

2.1 ACPW 结构

文献 [8] 给出的对称 CPW 的横截面结构图如图 1 所

示, 本文给出了 ACPW 的横截面结构图如图 2 所示, w 是中心导带, s_1 和 s_2 分别是左右槽的宽度, 宽度是不相等的, 金属带的长度视作无限长, 底板 w 为无限宽, 厚度视作 0 在这里给出了 6 种不同结构的 ACPW (结构 1 为对称 CPW), 结构参数如表 1.

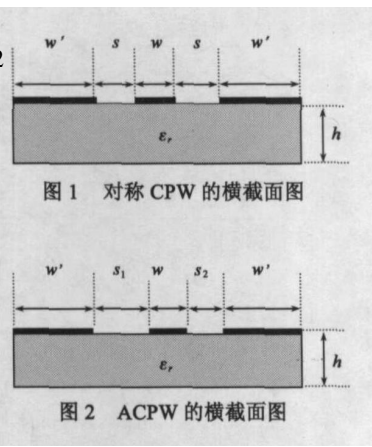


图 1 对称 CPW 的横截面图

图 2 ACPW 的横截面图

表 1 ACPW 的结构参数

| 参数 | 结构 1 | 结构 2 | 结构 3 | 结构 4 | 结构 5 | 结构 6 |
|--------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| w (mm) | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.4 |
| s_1 (mm) | 0.5 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 |
| s_2 (mm) | 0.5 | 0.4 | 0.3 | 0.4 | 0.4 | 0.4 |
| h (mm) | 1 | 1 | 1 | 1 | 1.5 | 2 |
| ϵ_r | 20 | 20 | 20 | 12 | 20 | 20 |
| μ_r | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| w' | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ |

2.2 色散特性数值计算

CPW 的结构及边界条件决定了它所传输的模为准 TEM 模, 众所周知, 对于非 TEM 模传输系统而言, 特性阻抗不是唯一的, 它随着频率发生变化, 也就是说 CPW 是具有色散特性的.

特性阻抗 Z_0 与系统中的电磁场分布紧密相连, 它与电压和电流的定义有关, 因此只要知道系统某个横截面上的电场和磁场的分布, 就可以根据定义计算出与电场分布有关的电压 $V(t, z)$ 和与磁场分布有关的电流 $I(t, z)$. 一般采用定义

$$V(t, z) = \int_L E(x, y, z, t) \cdot dL \tag{1}$$

$$I(t, z) = \oint_C H(x, y, z, t) \cdot dL \tag{2}$$

其中 L 和 C 需根据具体系统按定义选定, 其进行 FFT 可得,

$$V(\omega, z) = F[V(t, z)] \tag{3}$$

$$I(\omega, z) = F[I(t, z)] \tag{4}$$

特性阻抗可由式 (3)、(4) 表示为,

$$Z_0(\omega, z) = \frac{V(\omega, z)}{I(\omega, z)} \tag{5}$$

3 FDTD 计算与分析

3.1 ACPW 的 FDTD 计算模型

首先参考文献 [8] 的对称 CPW 的 FDTD 计算的模型如图 3 构建用于计算 ACPW 的 FDTD 计算模型如图 4 所示.

3.2 FDTD 计算步骤

根据含时间变量的 Maxwell 旋度方程如式 (6) 和式 (7),

$$\nabla \times E = -\mu \frac{\partial H}{\partial t} - \sigma_m H \tag{6}$$

$$\nabla \times H = \epsilon \frac{\partial E}{\partial t} + \sigma_e E \tag{7}$$

利用 Yee 氏算法的网格划分方法^[11], 将上式演绎成 Yee 氏迭代公式, 即 FDTD 的基本方程, 取 Mur 二阶吸收边界条件, 如图 3 4 虚线所示, 以及高斯脉冲激励源 ϕ 如式 (8),

$$\phi = \exp^{L-(n\Delta t-200\Delta t)/(100\Delta t)^2} \tag{8}$$

对于 CPW 和 ACPW 的 FDTD 计算参数汇总于表 2 中所示, 根据上述的步骤计算得出电场值和磁场值 E, H .

3.3 数值计算结果与分析

根据图 4 的计算模型, 通过 FDTD 计算, 得出时域计算空间中的电场和磁场值 E, H , 再利用式 (1) ~ (5) 计算得出 V 和 I 以及各种 ACPW 结构的特性阻抗 $Z_0(\omega)$, 如图 5 (a)、(b)、(c)、(d) 所示.

表 2 FDTD 计算参数

| | 对称 CPW | ACPW |
|----------------------------------|--------|--------|
| X 方向的空间步长 Δx (μm) | 50 | 50 |
| Y 方向的空间步长 Δy (μm) | 50 | 50 |
| Z 方向的空间步长 Δz (μm) | 50 | 100 |
| 时间步长 Δt (ps) | 0.0858 | 0.0858 |
| X 方向的空间网格数 N_x | 40 | 45~65 |
| Y 方向的空间网格数 N_y | 50 | 100 |
| Z 方向的空间网格数 N_z | 100 | 120 |
| 总的时间步数 N_t | 900 | 1200 |

图 5(a) 给出了沿电波传输方向上提取的 $\Delta z = 30$ 和 $\Delta z = 60$ 的电压波形, 其中 $\Delta z = 30$ 和 $\Delta z = 60$ 分别为激励源所在面与阻抗计算面, 从图中可以看出在传输过程中, 由于色散特性的影响, 波形的幅度减小, 宽度变宽.

图 5(b) 分别给出了五种尺寸 (结构 2~ 结构 6) 的 ACPW 结构的特性阻抗实部的值. 由曲线 1 和 2 可知, 随着一边槽宽的变小, 阻抗值也随之变小; 由曲线 1 和 3 可知, 特性阻抗的值随着 ϵ_r 的增大而减小; 由曲线 1 和 4 和 5 可知, 随着介质厚度 h 的增加, 其特性阻抗的值逐渐趋于一个定值, 而基本不再受厚度的影响. 与对称结构的 CPW 类似, 在 20GHz 以后, 由于色散特性的影响, 阻抗值的实部逐渐减小.

利用本文计算方法对文献 [8] 给出的对称 CPW (ACPW 结构 1) 进行计算, 得出的结果和文献 [8] 给出的

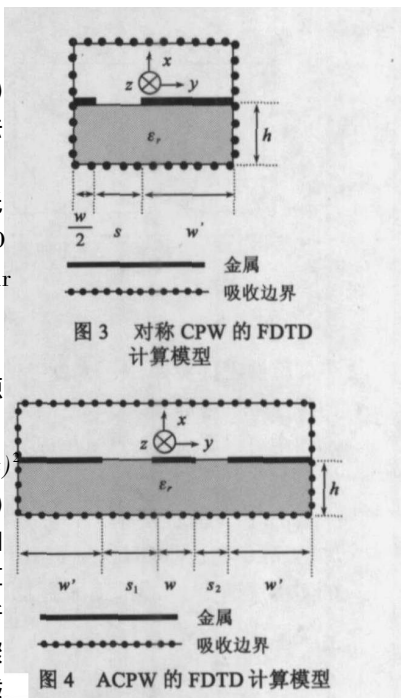


图 3 对称 CPW 的 FDTD 计算模型

图 4 ACPW 的 FDTD 计算模型

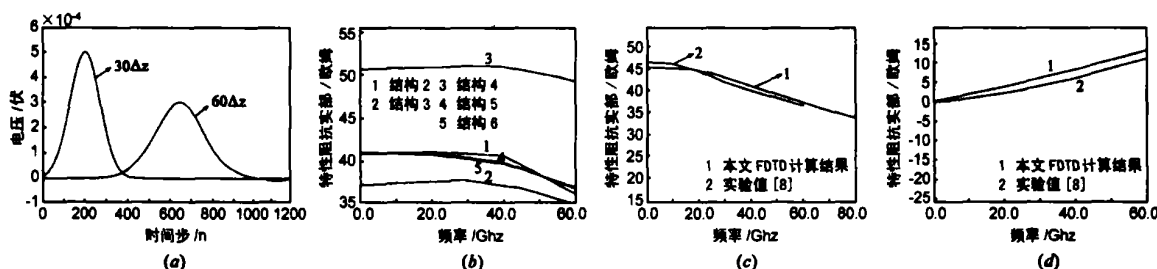


图5 FDTD数值计算结果

计算结果进行比较如图 5(c)、(d)所示。图 5(c)中的曲线 1 是本文计算得出的特性阻抗实部, 曲线 2 是文献 [8] 给出的特性阻抗实部; 图 5(d)中的曲线 1 是本文计算得出的特性阻抗虚部, 曲线 2 是文献 [8] 给出的特性阻抗虚部。从图中可以看出, 由于 Mur 边界条件所固有的反射, 计算结果与文献 [8] 的实验结果有一点偏差, 但基本上是趋于一致的。由此验证了本文计算方法正确性。而且从图中可知, 当频率超过 20GHz 以后, 由于色散特性影响, 其阻抗值的实部逐渐变小, 虚部逐渐变大。

4 结论

ACPW 作为共面波导的一种普遍情况, 本文用 FDTD 方法对其构建了计算模型, 对不同结构参数的 ACPW 的色散特性进行了计算与分析, 而且用本文的计算方法对文献 [8] 中给出的对称 CPW 的色散特性进行了计算, 其计算结果与文献 [8] 的实测值取得了良好的一致性。验证了本文计算方法的正确性。而且从计算结果中看出, 由于色散特性的影响, 特性阻抗 $Z_0(\omega)$ 的实部随着工作频率的升高而逐渐减小, 而且得出了对不同结构参数的 ACPW 特性阻抗值 $Z_0(\omega)$ 的实部的变化规律, 并发现不同结构参数 ACPW 的色散特性保持着相对的一致性。

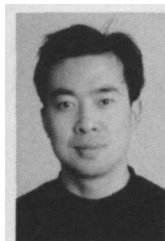
致谢 在本文的研究过程中, 大连理工大学王百锁教授和北京理工大学任武老师对本文提出很多宝贵意见, 在这里一并表示衷心感谢。

参考文献:

- [1] V. Fouad Hanna and D. Thebault Analysis of asymmetrical coplanar waveguides [J]. NT. J Electronics 1981, 50 (3): 221-224
- [2] V. Fouad Hanna and D. Thebault Theoretical and experimental investigation of asymmetrical coplanar waveguides [J]. IEEE Trans on MTT, 1984, 32(12): 1649-1651
- [3] T. Kitazawa Quasistatic characteristic of asymmetrical and coupled coplanar type transmission lines [J]. IEEE Trans on MTT, 1985, 33(10): 771-778
- [4] G. Ghione A CAD-oriented analytical model for the losses of general asymmetric coplanar lines in hybrid and monolithic MICs [J]. IEEE Trans on MTT, 1993, 41(9): 1499-1510

- [5] Fang Shao-jun Analysis of Asymmetric Coplanar Waveguide with Conductor Backing [J]. IEEE Trans on MTT, 1999, 47 (2): 238-240
- [6] C. P. Wen Coplanar waveguide: A surface strip transmission line suitable for nonreciprocal gyromagnetic device applications [J]. IEEE Trans on MTT, 1969, 17(12): 1087-1090
- [7] J. B. Knorr and K. D. Kuchler Analysis of coupled slots and coplanar strips on dielectric substrate [J]. IEEE Trans on MTT, 1975, 23(7): 541-548
- [8] Guo-Chun Liang Yao-Wu Liu, Kenneth K. Mei Full Wave Analysis of Coplanar Waveguide and Slotline Using the Time-Domain Finite-Difference Method [J]. IEEE Trans on MTT, 1989, 37(12): 1949-1957
- [9] Shibata T, Sano E. Characterization of MIS Structure Coplanar Transmission Lines for Investigation of Signal Propagation in Integrated Circuits [J]. IEEE Trans on MTT, 1990, 38 (7): 881-890
- [10] Gerrit Mur Total-Field Absorbing Boundary Conditions for the Time-Domain Electromagnetic Field Equations [J]. IEEE Trans on Electromagnetic Compatibility, 1998, 40 (5): 100-102
- [11] Yee K. S. Numerical Solution of Initial Boundary Value Problems Involving Maxwell's Equations in Isotropic Media [J]. IEEE Trans On AP, 1966, 14(5): 302-307

作者简介:



陈鹏 男, 1977 年生于山西长治, 大连海事大学信息工程学院博士生, 研究领域为微波技术与微波通信。

Email: chengpeng213@126.com



房少军 男, 1957 年生于山东淄博, 大连海事大学信息工程学院教授, 博士生导师, 主要研究领域为微波技术与微波通信。

Email: fangshj@dhmu.edu.cn