

# 微机械微波共平面波导特性阻抗的有限元法分析

石艳玲, 于丹丹, 董兴其, 赖宗声

(华东师范大学电子科学技术系, 上海 200062)

**摘要:** 本文在相似剖分有限元法的基础上, 结合微机械微波共平面波导的结构特点, 提出了混合相似剖分有限元技术并应用于微机械微波共平面波导特性阻抗的数值计算, 分析了其特性阻抗及其随参数的变化, 并给出常用  $35\Omega$ 、 $50\Omega$ 、 $75\Omega$ 、 $120\Omega$  波导的具体设计尺寸。

**关键词:** 微机械共平面波导; 特性阻抗; 有限元方法; 相似剖分

**中图分类号:** TN62      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2000) 12 0113-03

## Analysis of the Characteristic Impedance of Micromachined Microwave Transmission Lines with FEM

SHI Yan ling, YU Dan dan, DONG Xing qi, LAI Zong-sheng

(Department of Electronic Science and Technology, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

**Abstract:** A new similarity method in FEM is presented for researching of the problems about the nonuniform and irregular region, such as micromachined microwave coplanar waveguide, which can be fabricated through a commercial CMOS process. By using this new method, we calculate the characteristic impedance of this kind of suspended waveguide and analyze the change with its dimensions. From the result, we summarize the different structures with characteristic impedance of  $35\Omega$ 、 $50\Omega$ 、 $75\Omega$ 、 $120\Omega$ .

**Key words:** micromachined coplanar transmission; characteristic impedance; FEM method; similarity discretization

### 1 引言

用硅片作基体来制作微波传输线会由于电磁耦合作用在硅片上产生感生电流, 导致电磁波在传输过程中产生很大的损耗, 但结合微机械加工技术, 便可制作悬浮于硅片之上的共平面波导, 这不但将大幅度降低传输线的插入损耗, 同时其制作工艺又与 CMOS 工艺兼容, 使得以后制作微波单片集成系统成为可能。

目前, 基本能够通过数值计算方法求解常规 (大尺寸) 微波传输线的特性阻抗、损耗等问题, 而对毫米级的传输线则无任何系统的研究, 也无法预知设计尺寸变化对其特性阻抗的影响, 因此寻找适当的数值分析方法, 辅助传输线的设计显得尤为重要。而有限元是一种成熟、通用、应用广泛的数值计算方法, 是微波传输线静态特性的主要的分析方法。但由于受计算机条件的限制, 应用常规的有限元法分析微机械微波传输线问题是不可能的。文献 [3~5] 中提出了一种静电问题的相似剖分有限元的方法, 介绍了其基本思想和求解过程。与传统的有限元方法相比, 在一些媒质均匀、几何尺寸规则但求解域很大的静电问题上, 证明相似剖分有限元法无论在计算机内存和计算时间方面均优于常规的有限元法。

本文在此基础上提出了一种新的混合相似剖分有限元方

法, 进一步扩大相似剖分有限元的应用范围。对不规则不均匀区域先进行大的粗分, 尽量使其中的部分粗分单元区域均匀规则, 然后对这些规则的区域进行按层的相似剖分, 对不规则的粗分区域进行常规的有限元剖分, 重新推导了一组新的递推公式。经对单层的刚度矩阵递推计算后得到一个只与相似剖分区域周边上的节点数有关的新的刚度矩阵, 再与其他的粗分区域的常规有限元刚度矩阵结合求解。由于相似剖分只要求按层相似剖分, 而层的形状是任意的, 因此实际问题总能粗分出可以进行相似剖分的区域。

### 2 混合相似剖分有限元方法

图 1 为微机械微波共平面波导的结构剖面图, 它是通过混合腐蚀工艺将 Si 衬底腐蚀出一 V 形空腔, 从而形成悬浮的 GSG 结构共平面波导。由于介质界面的存在, 微带线通常以准 TEM 模方式工作, 高频下会出现高次模, 因此形成空腔将

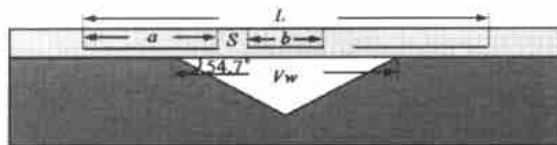


图 1 微机械微波共平面波导结构剖面图

使微带线更好地工作于 TEM 模式. 图中所示,  $a$ 、 $b$  分别表示地线和信号线的宽度,  $S$  表示两者之间的间距,  $L$  则表示整个结构的宽度, 以上几个参数由版图设计决定; 而  $V_{iw}$  表示形成的 V 形空腔开口的大小, 它主要决定于混合腐蚀工艺中各向同性腐蚀的时间, 并且经各向异性腐蚀 (KOH、TMAH、EDP 等) 后, 形成腐蚀面角度总是  $54^\circ$ , 故计算结果中不再标识 V 形空腔的高度. 图 1 所示的静电问题的求解空间是非均匀、不规则的区域.

由于结构的复杂性, 采用常规有限元法刚度矩阵将非常庞大. 例如按 1 微米 10 节点计算, 结构区域至少需要 4000, 000 个节点, 再加上外空间区域, 则节点数更多, 计算机存储量巨大. 为此需要对结构先进行以下的粗分, 如图 2 所示. 粗分后, 整个结构分成了几个大的粗分单元, 而每个单元进一步进行按层的相似剖分. 样例剖分图如图 3 所示.

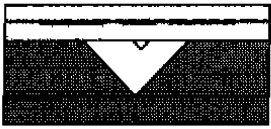


图2 粗分图

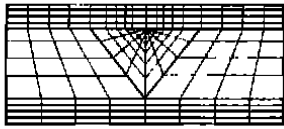


图3 细分样图

因此, 尽管直接对求解区域进行相似剖分不可能, 但经上述处理后使相似剖分成为可能. 下节将对相似剖分区域进行特殊的递推处理, 得到每个只与相似剖分区域的周边节点有关的等效刚度矩阵. 经多次迭代消元处理, 最后将形成一个维数是硬边界节点数的刚度矩阵. 不用求区域内未知节点电位值可直接通过泛函得到能量值.

由于每个相似剖分区域中各层两头的节点都与相邻的相似剖分区域的节点关联, 因此文献[5]中的公式不再适用. 本文重新推导了一个递推公式.

按常规有限元前处理方法, 得到任一层的层刚度矩阵  $K_1$ . 由  $K_2$  可得到每相邻两层的刚度矩阵  $K_2$ . 假设每一层上的节点数是  $N_L$ , 则  $K_1$  是  $2N_L$  维的方阵,  $K_2$  是  $3N_L$  维的方阵. 相邻两层上的总节点数  $3N_L$ . 其中周边上的节点数是  $N_{out} = 2N_L + 2$ , 形成一  $N_{out}$  维的节点电位向量  $\Phi_{out}$ . 内部的节点数是  $N_{in} = N_L - 2$ , 形成一  $N_{in}$  维的节点电位向量  $\Phi_{in}$ . 则每相邻两层的泛函是:

$$F = (1/2) (\Phi_{out}^T, \Phi_{in}^T) K_2 (\Phi_{out}, \Phi_{in}) \\ = (1/2) (\Phi_{out}^T, \Phi_{in}^T) \begin{pmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{pmatrix} (\Phi_{out}, \Phi_{in}) \quad (1)$$

式(1)泛函对  $\Phi_{in}$  的导数应为 0, 得到:

$$K_{21} \Phi_{out} + K_{22} \Phi_{in} = 0 \quad (2)$$

从式(2)中得到

$$\Phi_{in} = -K_{22}^{-1} K_{21} \Phi_{out} \quad (3)$$

把式(3)代入泛函式(1), 得到只有外部节点电位的泛函式:

$$F = (1/2) \Phi_{out}^T K' \Phi_{out} \quad (4)$$

式(4)中的等效刚度矩阵是  $N_{out}$  维的对称矩阵, 只与外部的节点有关, 比较式(4)和式(1), 得

$$K' = K_{11} - K_{12} K_{22}^{-1} K_{21} \quad (5)$$

从式(1)到式(4)完成了一次消元过程, 剖分层数减少一半.

消元的关键是公式(5). 把  $K'$  等效为新的单层刚度矩阵, 把它代入式(5)的左边, 又将完成一次新的消元过程. 与文献[5]中的消元过程的递推公式相比, 式(5)的递推过程保留了每层两头的节点.

实际的计算机实现步骤如下:

(1) 得到任一层的单层刚度矩阵  $K_1$ . (2) 扩展  $K_1$  得到两层的刚度矩阵  $K_2$ . (3) 对  $K_2$  行列交换使与外部节点相关行列放置在  $K_2$  的前面部分, 内部节点相关的行列放置在  $K_2$  的后部分. (4) 将行列交换后的  $K_2$  代入公式(5)得到  $K'$ . (5) 令  $K_1 = K'$ , 重复步骤 1~5. (6) 递推结束后得到一粗分单元的等效刚度矩阵, 此时单元内节点已全部消除. (7) 对每个能够相似剖分的粗分单元重复步骤 1~6. (8) 对不能相似剖分的粗分单元进行常规的有限元分析. (9) 对外空间应用文献[4]中的方法处理. (10) 合成所有的粗分单元求解.

注意每次递推过程中, 式(5)的维数是递增变化的.

强调相似剖分是为了减少前处理工作, 在不增加负担的同时, 简单增加步骤(1)~(5)的迭代次数可达到无限细分的目的. 而公式(5)是通用的, 适用于一般的情况. 实际上经过上述处理后尽管只留下了粗分边界上的节点, 但节点数仍有几千个, 微机仍无法处理. 在实际计算时, 在相邻粗分单元刚度矩阵合并时再次应用式(5)消除相邻粗分单元共同边界上的节点. 经这样处理后将只剩下不能消除的硬边界上的节点和一个维数只有与这些节点数相一致的刚度矩阵. 由两者可直接得到求解域的泛函, 即静电问题的能量值. 因此本文的方法在研究传输线特性阻抗等一类只与能量值有关的问题时特别适用.

### 3 计算结果

分别变化图 1 中  $a$ 、 $b$ 、 $S$ 、 $L$ 、 $V_w$  的数值, 各种结构的共平面波导的特性阻抗进行了分析. 得到各种尺寸结构的特性阻抗  $Z_e(\Omega)$ . 由于采用 CMOS 常规工艺, 衬底和介质层分别采用硅和二氧化硅, 介电常数分别是 11.9 和 3.6, 在所有的计算中这两个参数值不变. 在大量的计算结果中发现, 在所有可变参数中, 信号线的宽度及信号线与地线之间间距 ( $b/S$ ) 的变化对波导特性阻抗值影响最大, 变化曲线如图 4 所示.

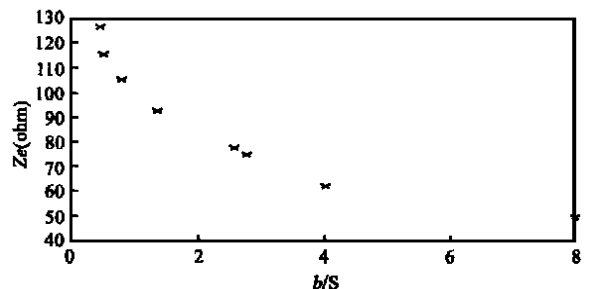
图 4  $b/S$  变化对波导特性阻抗的影响

表 1 中给出信号线  $b = 24\mu\text{m}$ , 信号线与地线间距  $S = 3\mu\text{m}$ , 空腔开口  $V_w = 280\mu\text{m}$  条件下, 结构中地线宽度的变化对波导特性阻抗值的影响. 表中数据再次证明  $a$  数值的逐渐增大, 将引起  $Z_e$  的下降, 但变化幅度相对极小.

表 1 地线宽度变化对波导特性阻抗的影响

$a(\mu\text{m})$	30	35	40	45	55	60	65	70
$Z_e(\Omega)$	47.35	47.10	47.00	46.91	46.76	46.70	46.65	46.61

从大量计算结果中, 总结出常用的特性阻抗值为 35 $\Omega$ 、50 $\Omega$ 、75 $\Omega$ 、120 $\Omega$  波导的具体结构参数, 如表 2 所示.

表 2 常用波导的结构参数

分组	特性阻抗( $\Omega$ )	$V_w(\mu\text{m})$	$L(\mu\text{m})$	$a(\mu\text{m})$	$b(\mu\text{m})$	$S(\mu\text{m})$
A	35.64	140	130	50	28.4	0.8
B	49.65	140	130	50	24	3
C	74.75	140	130	40	29	10.5
D	76.03	140	150	50	30	10
E	120.55	140	150	50	20	15
F	120.81	140	130	40	9.5	20

其中 B 组的计算条件与文献[1]中相应的结构尺寸一致, 计算结果和文献[1]给出的测试结果一致, 证明本文方法是正确可行的. 值得说明的是, 本文的计算过程是在普通 32M 内存的 586PC 上进行的.

从上述数据可以看到, 共平面波导中, 若其它参数保持一定, 则地线与信号线之间间距越大, 波导的特性阻抗值越高. 进一步分析 A 组数据可以发现, 该组数据中, 信号线与地线之间间距只有 0.8 $\mu\text{m}$ , 这要求微电子工艺技术能达到亚微米, 这在一般实验室条件下很难实现. 而其它几组数据在工艺要求上都是实际可行的, 因此可直接用于版图设计.

#### 4 结论

本文在相似剖分有限元技术的基础上, 参照微机械微波共平面波导几何结构的特点, 采用了混合剖分技术, 找到了一种理论分析并计算了不同结构共平面波导的特性阻抗及其变化规律的简单有效方法. 通过对大量计算结果的分析可以得出下述结论: 在所有参数中信号线宽度和信号线与地线之间的间距对特性阻抗的影响最大, 其它参数的影响较小. 这为毫米级长度的传输线的制备提供了理论依据.

#### 参考文献:

- [1] Veljko M., Michael Gaitan, et al. Micromachined microwave transmission lines in CMOS technology [J]. IEEE Trans on MTT, 1997, 45(5): 630-635.
- [2] Veljko M., Michael Gaitan, et al. Design and fabrication of micromachined passive microwave filtering elements in CMOS technology [A]. Transducers '97 [C]. 1007-1010.
- [3] 董兴其, 安同一. 静电问题的相似剖分有限元法 [J]. 微波学报, 1996, 12(1): 15-21.
- [4] Dong Xingqi, An Tongyi. A new FEM approach for open boundary laplace's problem [J]. IEEE On MTT, 1996, 44(1): 157-160.
- [5] 董兴其, 安同一. 开放微波传输线的准静态有限元分析 [J]. 电子学报, 1997, 25(3): 105-107.

#### 作者简介:



石艳玲 华东师范大学电子系微电子专业讲师, 在职博士生. 研究方向为微机械技术、微波微机械器件设计、制备与分析.



于丹丹 华东师范大学电子系无线电物理专业硕士研究生. 研究方向为有限元数值分析.