

毫米波微带键合金丝互连模型的研究

徐鸿飞, 殷晓星, 孙忠良

(东南大学毫米波国家重点实验室, 江苏南京 210096)

摘 要: 本文应用神经网络方法、采用 FDTD 全波分析结果作为训练样本得到了毫米波微带键合金丝互连的参数模型. 这个神经网络模型可以指导毫米波集成电路的设计, 利用该模型可以得到不同拱高、微带间隙和频率时的电路散射参数. 实验测试了键合金丝互连的散射参量并与神经网络模型的结果进行了比较分析.

关键词: 微带互连; 神经网络; 时域有限差分

中图分类号: TN405. 96 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2003) 12A-2015-03

On the Model of Microstrip Bonding Wire Interconnects for Millimeter Wave Applications

XU Hong-fei, YIN Xiao-xing, SUN Zhong-liang

(State Key Lab of Millimeter Waves, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China)

Abstract: A model of microstrip bonding wire interconnects for millimeter wave applications is presented, which is based on neural network methods. The results from a FDTD full-wave algorithm have been used in the learning procedures of the neural network. The model can be applied to the design of millimeter wave integrated circuits. The scattering parameters of the bonding wire, which are related with the gap between microstrips, the height of bonding wires and the operating frequency, have been simulated by the neural network model. The scattering parameters of a bonding wire interconnect has been measured and compared with the results from the neural network model.

Key words: microstrip interconnection; neural network; FDTD

1 引言

键合金丝(bonding wire)互连是微波毫米波集成电路和单片集成电路(MMIC)的常用技术,在多种毫米波电路和系统中,利用键合金丝互连技术,实现固态器件或单片集成电路与无源电路的连接、无源电路的互连、多芯片的互连.尽管倒装芯片(flip chip)和其他一些无源耦合技术可以在某些应用中替代键合金丝互连,但键合金丝互连具有工艺简单、廉价、热膨胀系数小等优点,因此在航空航天领域的毫米波应用系统中具有突出的应用价值.

键合金丝互连的模型提取是其成功应用的必要前提之一,只有准确获取了互连的模型参数,才能综合设计相应匹配、补偿网络,从而实现电路的整体性能.通常获取模型参数有以下几个基本途径:(1)基于全波分析,如时域有限差分法(FDTD)、有限元法对键合金丝互连的结构进行全波分析,采用适当的网格划分技术和相应的算法,计算互连结构的电路散射参数矩阵^[1,2];(2)准静态分析,将互连金丝近似等效为多段传输线,分析其等效分布电路参数和电路散射参数矩阵^[2,3];(3)基于测量的方法,应用网络分析仪测量互连结构

测量散射参数.

键合金丝互连是微带互连的基本形式之一,其分析与模型提取方法适用于微带与单片集成电路、单片集成电路内部、芯片之间等多种互连应用场合^[4-7].应用时需要获取具有不同拱高、微带间隙和金丝直径等互连物理参数的互连结构的散射参数模型.如果采用全波分析方法,需要进行多次全波分析,计算量很大,不适合优化设计.而且虽然采用FDTD方法可以一次得到整个频带内的参数,但对不同的结构尺寸参数,仍然要进行逐点计算才能得到S参数随结构尺寸的变化规律.采用准静态分析可以直接得到散射参数模型,但在毫米波段由于空间辐射、分布参数的影响,准静态的分析方法将引入较大的误差.采用测量方法需要对大量互连实物进行测量,难以获得全面构造模型所需的测量数据.

神经网络方法被广泛应用于电磁场建模领域.与传统的电磁场全波仿真模型相比,神经网络模型的使用灵活、计算时间短、内存占用少,便于进行优化设计,是高效可靠的电磁场建模方法^[8].

本文将神经网络方法应用于毫米波微带键合金丝互连模型的研究,首先利用少量的FDTD全波分析结果作为神经网

络的训练样本,然后利用神经网络模型计算了不同拱高、微带间隙和频率时的电路散射参数,并与 FDTD 全波分析的结果进行了比较.接着比较了神经网络模型计算的结果与实际测试的结果,并对比较结果进行了分析.

2 键合金丝互连的神经网络模型

一个典型的金丝键合互连结构如图 1 所示.

在毫米波微带键合金丝互连模型中,微带之间的间隙,金丝的拱高是影响传输性能的重要参数,需要进行优化调节.基片的厚度虽然也是影响键合金丝传输性能的重要参数,但对于一个具

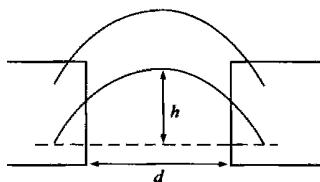


图 1 键合金丝结构示意图

体的制造过程,它是一个固定的常数,不需在键合金丝模型中考虑.因此微带键合金丝互连神经网络模型的输入矢量是

$$X = (d, h, f) \quad (1)$$

其中, d 为微带线之间的间隙长度, h 为键合金丝的拱高, f 为工作频率.因为是对称互易网络,有 $S_{21} = S_{12}$, $S_{11} = S_{22}$.因此金丝互连神经网络模型的输出参量是

$$Y = (|S_{11}|, \angle S_{11}, S_{21}, \angle S_{21}) \quad (2)$$

因为 S 参数的幅度和相位随输入矢量变化的趋势不太一样,因此我们把幅度和相位分成两个神经网络模型处理.

我们采用两层前传网络,输入层网络的输入参数有三个,分别是微带线的间隙、金丝线的拱高和频率.在隐藏层有五个神经元,采用双曲正切 S 形活化函数.在输出层采用线性活化函数.

我们使用 MATLAB 工具构造键合金丝互连的神经网络模型.在网络训练阶段,采用的是 TRAINLM 训练函数,它使用了 Levenberg-Marquardt 方法.学习函数 LEARN_GDM,误差函数是 MSE.

在训练两根平行键合金丝互连的神经网络模型时,训练样本是采用 FDTD 的分析结果.使用的电磁场分析软件是 CST.模型中的其它参数是微带线介电常数 2.16,介质板厚度 0.25mm,损耗角正切 0.009,导电厚度 0.005mm,输入输出微带宽度为 0.76mm,键合点至端口距离 3mm,键合点至微带开路端 0.1mm,键合金丝间隔 0.4mm(对称).微带线放在屏蔽盒里,屏蔽盒的盖住离微带线 5mm.采用的训练样本共 88 个,输入参数的取值范围是:频率 30GHz 到 40GHz,微带线间隙 0.2mm 到 0.4mm,拱高 0.1mm 到 0.3mm.

3 神经网络模型结果分析

为了估计键合金丝互连的神经网络模型的精度,对微带线间隙等于 0.3mm、金丝拱高等于 0.3mm 的金丝互连的传输特性用神经网络模型进行了分析,并与用 FDTD 分析的结果进行了比较.图 2 是不同频率下的 S_{11} 幅度比较结果,整数频率点上的数据属于训练样本,非整数频率点上的数据不属于训练样本.结果表明,神经网络的计算结果与 FDTD 非常接

近,两者的相对误差不超过 0.3%,而 S_{21} 幅值两者的计算结果更为接近.

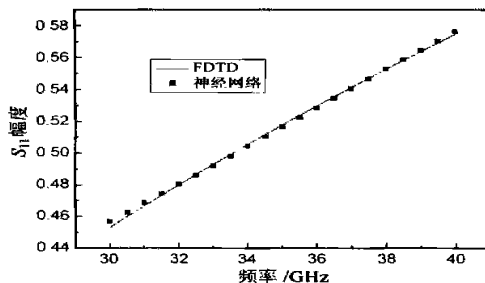


图 2 神经网络模型和 FDTD 计算结果比较

我们把键合金丝互连神经网络模型的计算结果与键合金丝互连 S 参数的实际测试结果进行了比较.利用 HP8510B 毫米波矢量网络分析仪,并采用 TRL 校准去嵌入方法^[9]对拱高 0.2mm,微带间隙 0.25mm 的互连结构进行测试.

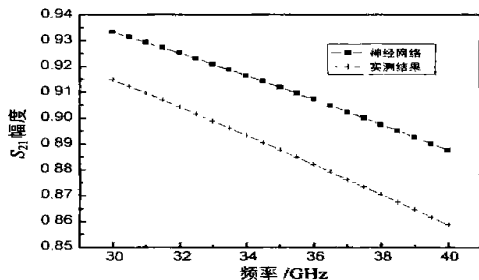


图 3 金丝互连传输特性神经网络模型模拟结果与实测结果比较

从图上看,实际测试结果与神经网络模型模拟以及 FDTD 分析结果存在一些偏差.主要原因是,神经网络模型的训练样本来自于 FDTD 的分析结果,因此它们之间的偏差很小.但是 FDTD 分析与实测结果存在一些偏差,这些偏差来源于实测样品屏蔽盒的导体损耗,加工误差,测试误差.正是由于这个偏差导致了实测结果与神经网络的偏差.

由于 FDTD 分析过程是模拟实际样品中的电磁现象,两者都遵循大体同样的规律.FDTD 分析过程通过数值计算方法模拟了物理结构空间到电磁参数空间的映射,实物通过测量得到结果的过程同样也是物理结构空间到电磁参数空间的映射,这两个映射具有相似的特性.因而,如果采用实测结果作为训练样本,基于这些样本训练出来的神经网络模型,其模拟结果与相应实测结果的偏差将会很小.

我们曾经用一部分测试数据与 FDTD 分析的结果一起作为训练样本,来训练神经网络.由于两者之间的偏差使得训练好的神经网络存在一些振荡现象,在某些检验点上误差较大.反而掩盖了分析结果随频率、键合结构参数变化的规律.

尽管目前限于成本,从实测结果中得到足够数量合适的训练样本比较困难,但采用 FDTD 分析的结果训练神经网络得到的键合金丝互连模型,可以比较准确地得到电路散射参数变化的规律,与部分实测结果比较可以得到偏差,仍可以指导电路设计和调试.进一步研究 FDTD 分析方法,使测试中遇到的诸如边界条件、导体损耗、加工的离散性、测试端口误差

等因素,得以准确地描述,使得测试数据与全波分析数据之间偏差进一步减小,将为利用测试数据与 FDTD 分析的结果结合起来作为的有效训练样本,得到更好的神经网络模型创造条件.这一建模的方法,为进一步研究基于测试、计算和神经网络方法的键合金丝互连模型提供了参考.

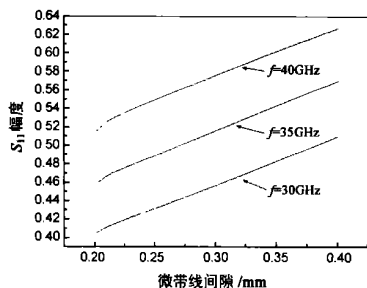


图 4 S_{11} 幅值与微带线间隙的关系
(拱高为 0.3mm)

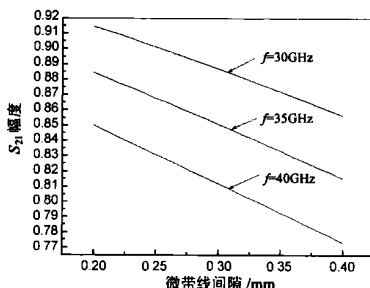


图 5 S_{21} 幅值与微带线间隙的关系
(拱高为 0.3mm)

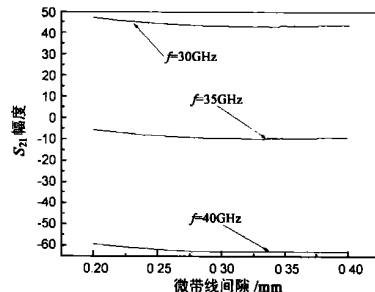


图 6 S_{21} 幅值与微带线间隙的关系
(拱高为 0.2mm)

4 结论

本文将神经网络方法应用于毫米波微带键合金丝互连的建模研究中,利用少量的 FDTD 全波分析获取一定数量的计算结果作为神经网络模型的训练样本,然后利用训练好的神经网络模型,计算出不同拱高、微带间隙和频率条件下的电路散射参数.神经网络模型与 FDTD 全波分析的结果比较显示,两者之间吻合的很好.神经网络模型与实验测试结果的比较表明,两者之间数值上存在一定差异,但变化的趋势却非常一致,因此如果采用实测结果作为神经网络的训练样本,则神经网络模型可以很好地模拟毫米波微带键合金丝互连的传输特性.

参考文献:

- [1] F Alimenti, P Mezzanotte, L Roselli. Full-wave investigation on the curved bonding wire interconnection by using a suitable FDTD code [J]. IEEE MTT-S Digest, 1997. 1737- 1740.
- [2] F Alimenti, U Goebel, R Sorrentino. Quasi static anaysis of microstrip bondwire interconnects[J]. IEEE MTT-S Digest, 1995. 679- 681.
- [3] F Alimenti, P Mezzanotte, L Roselli, et al. Modeling and characterization of the bonding-wire interconnection[J]. IEEE Trans, 2001, MTT-49(1): 142- 150.
- [4] Thomas P Budka. Wide-bandwidth millimeter-wave bond-wire interconnects[J]. IEEE Trans, 2001, MTT-49(4): 715- 718.
- [5] Wolfgang Pohlmann, Ame F Jacob, Helmut Schafer. Microstrip-to-microstrip interconnects with adhesive bonded ribbons for micro- and millimeterwave applications[J]. IEEE Trans, 1998, CPM-21(4): 463 - 468.
- [6] Hai-Young Lee. Wideband characterization of mutual coupling between high density bonding wires[J]. IEEE Microwave and Guided Wave Letters, 1994, (8): 265- 267.
- [7] Uhland Goebel. DC to 100GHz Chip-to-Chip Interconnects with reduced tolerance sensitivity by adaptive wirebonding[A]. 3rd Topical

在实际设计应用中,通常要对键合金丝互连的结构参数尺寸进行优化,因此需要快速计算不同结构尺寸下的键合金丝互连的传输特性.上面构造的键合金丝互连的神经网络模型满足了这个要求.图 4 至图 6 是用神经网络模型计算的不同结构尺寸下的键合金丝互连的传输特性.

Meeting on Electrical Performance of Electronic Packaging [C]. USA: IEEE, 1994. 182- 185.

- [8] 王秉中. 计算电磁学[M]. 北京: 科学出版社, 2002. 9- 14.
- [9] Kimmon J Silvonon. Calibration of test fixtures using at least two standards[J]. IEEE Trans, 1991, MTT-39(8): 624- 630.

作者简介:



徐鸿飞 男,1966 年 10 月生于江苏如皋,高级工程师,现在东南大学毫米波国家重点实验室攻读博士学位,主要从事微波毫米波集成电路、目标特性研究.



殷晓星 男,1963 年 10 月生于山西太原,东南大学无线电工程系副教授,博士,主要从事教学和计算电磁学、天线技术研究.



孙忠良 男,1936 年 8 月生于浙江 县,东南大学无线电工程系教授,博士生导师,中国工程院院士,长期从事毫米波电路与技术研究.