**2024届本科生学士学位论文 学校代码：10269**



**集成电路中互连寄生测试结构设计及自动生成**

**Design and Automatic Generation of Interconnect Parasitic Test Structure in Integrated Circuit**

**姓 名： 许天一**

**学 号： 10202150422**

**学 院： 通信与电子工程学院**

**专 业： 微电子科学与工程**

**指导教师： 孙亚宾**

**职 称： 教授**

**2024年4月**

**华东师范大学学位论文诚信承诺**

本毕业论文是本人在导师指导下独立完成的，内容真实、可靠。本人在撰写毕业论文过程中不存在请人代写、抄袭或者剽窃他人作品、伪造或者篡改数据以及其他学位论文作假行为。

本人清楚知道学位论文作假行为将会导致行为人受到不授予/撤销学位、开除学籍等处理（处分）决定。本人如果被查证在撰写本毕业论文过程中存在学位论文作假行为，愿意接受学校依法作出的处理（处分）决定。

承诺人签名： 日期： 年 月 日

**华东师范大学学位论文使用授权说明**

本论文的研究成果归华东师范大学所有，本论文的研究内容不得以其它单位的名义发表。本学位论文作者和指导教师完全了解华东师范大学有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅；本人授权华东师范大学可以将论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索、交流，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文和汇编本学位论文。

保密的毕业论文（设计）在解密后应遵守此规定。

作者签名： 导师签名： 日期： 年 月 日

**集成电路互连寄生测试结构设计及自动生成**

摘要：

随着集成电路产业的发展，深纳米工艺不断发展，器件的特征尺寸不断缩小，电路频率逐渐提高，即使尽可能考虑器件材料以及在布局布线中不断优化，集成电路中后道寄生，即互联线所带来的寄生对电路性能的影响日趋明显。因此，对集成电路互连寄生结构的搭建和测试逐渐成为集成电路制造中重要的一环。

同时，计算机软件的发展使集成电路设计和制造更加便利。其中，图形用户界面(GUI)的应用使用户可以直观地进行电路的搭建和测试，这项技术可以用于对集成电路互连寄生结构的搭建和自动生成。

本文设计结合Python下的GUI界面，通过读取文件夹内特定结构编写的模版文件，使用户可以在图形界面输入参数，自动生成skill脚本。用户可将skill脚本导入cadence中完成测试结构的搭建。本文设计允许用户自定义模型，同时，图形化界面可以直观地生成模型，为后道寄生测试模型的搭建和测试提供了流程上的优化。

**关键词：**深纳米工艺，GUI，skill，自动生成

**Design and Automatic Generation of Interconnect Parasitic Test Structure in Integrated Circuit**

Abstract:

With the development of the integrated circuit industry and the continuous development of deep nanotechnology, the feature size of devices continues to shrink, and the circuit frequency gradually increases. Even if device materials are considered as much as possible and optimization is continuously carried out in layout and wiring, the parasitic effects of interconnect lines on circuit performance in integrated circuits are becoming increasingly apparent. Therefore, the construction and testing of parasitic structures in integrated circuit interconnection has gradually become an important part of integrated circuit manufacturing.

Meanwhile, the development of computer software has made integrated circuit design and manufacturing more convenient. Among them, the application of graphical user interface (GUI) allows users to intuitively build and test circuits, and this technology can be used to build and automatically generate parasitic structures for integrated circuit interconnection.

This article designs a GUI interface based on Python, which allows users to input parameters and automatically generate skill scripts by reading template files written for specific structures in folders. Users can import skill scripts into cadence to complete the construction of testing structures. This article allows users to customize models, and the graphical interface can intuitively generate models, providing process optimization for the construction and testing of post parasitic testing models.

**Keywords:** Deep Nanotechnology, GUI, skill, Automatic generati

1. 绪论
   1. 研究背景

摩尔定律是计算机科学中一个著名的观察结论，最初由英特尔公司的创始人之一戈登·摩尔在1965年提出。他预测，未来集成电路上的晶体管数量将每两年翻一番。后来，这个预测被修正为每18个月翻一番，反映了半导体行业更快的发展速度。摩尔定律表明，随着技术的进步，我们可以在相同的物理空间内集成更多的晶体管，从而提高计算机的性能和存储容量。在过去的几十年里，摩尔定律一直合理地预测了半导体行业的发展。

随着深纳米技术的不断进步，半导体器件的尺寸不断缩小，在同一块芯片上所包含的晶体管数量逐渐增多，其表现为超大规模集成电路(Very Large Scale Integrated Circuit, VLSI)概念的出现。它是指在芯片上集成超过10万个以上元件的电路。而如今的集成电路更是能容纳数十亿晶体管。诚然，深纳米技术的发展给芯片的性能上的提高带来了革命性的变化，但它也由于其逐渐多样复杂的工艺，让电路设计者面临着更大的挑战。由于特征尺寸的缩小，一些由于工艺和制造所产生的影响，如寄生效应，也随着深纳米工艺的发展不断放大，成为集成电路产业界不得不考虑的问题。

早期集成电路设计确实主要依赖于传统的手工制图方法，这种方法的效率相对较低，成本较高，且制造周期长，这在一定程度上限制了集成电路产业的快速发展。然而，随着中小规模集成电路的出现，人们对设计效率和精度的要求日益提高，传统的手工制图方法已无法满足这种需求。在这种情况下，计算机辅助设计(Computer Aided Design, CAD)技术开始被引入到集成电路产业中。CAD技术的引入，极大地提高了集成电路设计的效率、精度和可靠性。通过计算机强大的计算能力和图形处理能力，设计师可以更快速、更准确地完成集成电路的版图设计、布局布线、仿真验证等工作。

在测试集成电路寄生效应的影响时，计算机辅助设计也发挥了重要作用。寄生效应是指由于电路元件之间的相互作用而产生的非理想效应。其中，互连寄生，也被称为后道寄生，是指集成电路中互连线之间相互作用所产生的寄生效应。通过CAD工具，设计师可以对电路进行精确的建模和仿真，从而预测和评估寄生效应对电路性能的影响。这有助于设计师在设计阶段就及时发现并解决潜在的问题，提高电路的性能和可靠性。因此，对于如何快速精准构建寄生模型，在CAD中如何提取互连寄生参数，成为了集成电路产业关注的重点问题之一。

* 1. 国内外现状

早在20世纪60年代，内部等效技术(integral-equation, IE)就应用于二维几何结构电容值的计算[1]，在20世纪70年代初，IBM公司的Watson研究中心首次提出了互连参数提取问题，引发了业界的广泛关注[2]。随着20世纪80年代左右化学气相沉积(Chemical Vapor Doping, CVD)和隔离层定义(Isolation Layer Definition, ILD)技术的出现，再到化学机械抛光技术(Chemical Mechanical Polishing, CMP)在产业界运用，集成电路逐步进入了多层金属互连的时代[3]。然而，直到90年代，特别是在深亚微米工艺兴起之后，相关的算法研究和软件开发才变得异常活跃。在当前电路的工作频率下，寄生电容的提取问题备受瞩目，而且在这一领域的研究方法还可以应用于寄生电阻、衬底耦合等寄生效应的分析中。进入21世纪，西方各国加快了对于后道寄生模型的研究工作。对于互连寄生效应的模拟出现在在美国硅谷的大部分EDA软件中。这一功能的实现需要包括数据分析、数理方程建立、计算机科学等多个学科进行交叉，并且随着集成电路复杂度的提高，模型也逐渐复杂。

国内对寄生抽取的相关研究起步较晚。中国科学院微电子研究所才首次提出后道互连寄生测试概念。随后，国内众多高校和科研机构也开展了相关技术研究。在电子设计自动化(EDA)领域的重要会议上，众多三维电容提取方法被提出，并在IEEE Transactions on Computer-Aided Design等期刊上发表了相关论文。基于这些研究，多家EDA公司研发了针对互连寄生参数提取的EDA测试工具。尽管寄生参数提取技术已趋于成熟，但在集成电路设计中，其提取和测试要求仍至关重要，需持续改进与提升。虽然研究热潮已减退，但相关研究依然具有重要意义。

* 1. 后道寄生测试模型自动生成及寄生参数提取的意义

在集成电路产业起步阶段，器件的性能如开关速度是影响电路性能的主要矛盾，此时的后道寄生效应对电路性能的影响几乎可以忽略不计，体现在设计领域即设计者往往把互连线看作是理想导线。但随着器件尺寸的缩小，器件的开关速度不断提高，电路的频率已经达到了千兆赫兹(kM Hz)。此时，器件的性能已经不是影响电路性能的主要矛盾，而是器件缩小导致互连线缩小所引起的更加显著的寄生效应成为影响电路性能的关键因素。并且随着特征尺寸的减小，互连线因素影响占总延迟的比例逐渐增大。此外互连寄生效应对电路的串扰、功耗和稳定性也产生严重的影响[4]。而且随着电路的频率升高，互连线之间将出现很强的寄生耦合：互连线发热表明有分布电阻效应；线与地之间会出现漏电流表明存在分布漏电导；不同互连线之间电场的相互作用增强，体现其还具有分布电容效应，这时，耦合效应导致的噪声也开始明显[5]。

因此，在当今集成电路领域，后道寄生参数的提取是值得关注的问题。然而，传统设计中，寄生参数测试通常依赖于手动建模和测试，这一过程确实繁琐且耗时。设计师需要手动创建测试模型，设定测试参数，并逐一进行验证。随着集成电路规模的不断增大和复杂度的提升，这种手动测试方法的效率和准确性受到了极大的挑战。为了克服这些挑战，引入计算机辅助进行测试模型的自动生成成为了一种有效的解决方案。计算机辅助自动生成测试模型可以极大地提高测试效率和准确性。通过先进的算法和仿真技术，计算机辅助系统能够自动分析电路结构，提取寄生参数，并生成相应的测试模型。这一过程不仅减少了手动操作的繁琐程度，还提高了测试的一致性和可重复性。此外，计算机辅助自动生成测试模型还具有更高的灵活性。它可以根据不同的设计需求和电路特性进行定制，生成适应特定场景的测试模型。这使得设计师能够更专注于电路的创新和优化，而不必过多关注繁琐的测试工作。

通过自动生成的后道寄生测试模型，制造商可以更有效地检验芯片的性能和可靠性，确保产品符合设计规格和质量要求。这有助于在进行大规模生产时，降低产品故障率，提高客户满意度，增强市场竞争力。

1. 互连寄生参数
   1. 寄生电阻

理想情况下，互连线的寄生电阻由材料和尺寸决定。理想条件下计算公式如下：

其中，为材料的电导率，l,w,h分别为导线的长度、宽度和高度。

不过随着集成电路的规模越来越大，互连线越来越复杂，理想条件的公式不再能准确描述互连线的电阻，出现一些非理想因素，如在铜互连线工艺中，由于阻挡层导致的互连线横截面积减小，增加了互连线的阻值[6]。并且，寄生电阻还会受到趋肤效应(Skin Effect)的影响。由于趋肤效应，在高频下，互连线的电阻还会上升，且互连线存在最大长度[7]。

* 1. 寄生电感

在以往集成电路设计过程中，往往忽略寄生电感的影响。在传统集成电路设计中，正因为采用了多种降低RC时间参数的方法，使得电感所引发的延迟效应更为突出。仿真数据表明，特别是在高速应用中，当信号边沿陡峭、导线较宽且间距较近时，传统的RC模型在模拟电路行为时表现出明显的不足[8]。

值得注意的是，电感对误差的敏感程度相较于RC模型来说较小，且寄生电感值受材料尺寸变化的影响也较小。这意味着，即使在电感值存在高达20%的误差时，电路的波形误差依然能够保持在较小的范围内。如果忽视寄生电感的影响，那么电路仿真和实际表现之间将会出现显著偏差[8]。

因此，在高频集成电路的设计和分析中，必须充分考虑电感效应，以确保电路性能的准确性和可靠性。同时，通过合理的材料选择和布线设计，可以在一定程度上控制寄生电感的大小，从而优化电路的整体性能。

* 1. 寄生电容

产业界和学术界很早就开始了针对寄生电容的研究。在互连线系统中，主要可分为交叉电容、对地电容和耦合电容。针对三维寄生电容的提取，主要有间接边界元法、直接边界元法、半解析法、MEI法[9]。

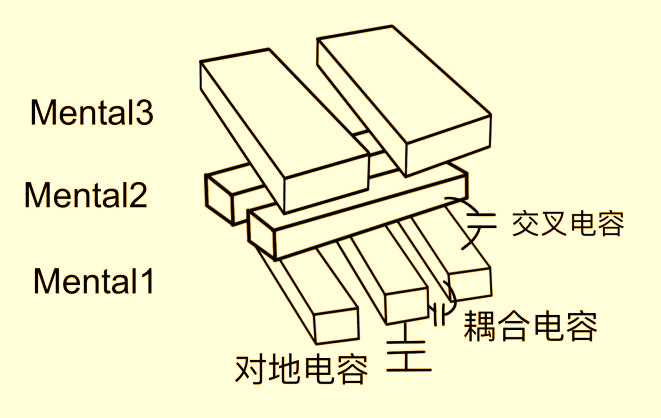


图 互连线系统寄生电容示意图

1. Python GUI设计
   1. 设计功能概述

程序的使用需要如下步骤：1、安装相关依赖：customtkinter；2、运行Python程序；3、输入所需参数；4、点击生成按钮，在output文件夹下生成.il文件。

程序可以读取当前文件夹下template文件夹下的按照特定格式编写的用户自定义的.txt文件作为模版文件，在GUI界面生成模型选择多选框和参数输入框，程序可以根据用户输入的参数，运算模版文件中的表达式，自动生成需要计算的参数值，并填入程序内文本，在用户点击生成按钮后，程序在当前文件夹内的output文件夹内自动生成相应的.il文件。

在template文件夹内的.txt文本文件需要按照以下格式编写：将文本内容分为两部分，上半部分为json格式，下半部分为含有可替换信息的文本，实际上按照skill脚本语法编写。在json格式中，含有两组键值对：parameter和expression，分别对应着自动生成过程中用户需要输入的参数和根据用户输入参数值进行计算的函数。其中，parameter的值是一个列表，元素为需要用户输入的变量名，元素格式为字符串；expression的值是按照json格式书写，包含若干键值对：键为函数名，值为表达式的字符串形式。目前，表达式支持加(+)、减(-)、乘(\*)、除(/)、整除(%)和括号运算，操作数和运算符之间需要用空格隔开。

* 1. 依赖软件包及介绍

customtkinter：基于Tkinter的Python UI库。它提供了现代、全新且完全可定制的小部件，这些小部件像普通的Tkinter小部件一样创建和使用，为Python开发者提供了一个强大且灵活的UI库，使得创建现代、美观且功能丰富的用户界面变得更加容易。

tkinter：Python的标准图形用户界面（GUI）工具包。它封装了Tk GUI工具包的接口，使得Python程序员能够使用Tk的部件来创建GUI应用程序。Tkinter可以在大多数的Unix平台下使用，同样也可以应用在Windows和Mac OS系统里。Tkinter模块提供了大量的控件，如按钮、标签、文本框等，这些控件可以用来创建各种窗口应用程序。通过Tkinter，可以创建复杂的布局，处理用户输入，以及实现其他GUI相关的功能。

json：软件包是一个用于处理JSON数据的标准库。提供的函数可以完成Python对象与json之间的解码与编码。

operator：提供了一系列用于执行各种操作的函数。这些函数实现了Python中的内建操作符，使得它们可以像普通函数一样被调用。使用operator模块可以方便地在需要函数作为参数的上下文中使用操作符，往往用于针对动态参数的操作。在本程序中，operator用于进行表达式的堆栈计算。

os：Python的一个标准库模块，它提供了很多与操作系统交互的函数。通过使用 os 模块，你可以执行各种与操作系统相关的任务，比如读取环境变量、操作文件和目录、执行系统命令等。程序中用于文件相关操作。

re：Python的正则表达式库，用于处理字符串中的模式匹配和搜索替换等操作。正则表达式(Regular Expression)是一种强大的文本处理工具，它使用一种特定的语法来描述字符串的模式，从而实现对字符串的匹配、查找、替换等操作。程序中用来识别表达式中的变量名并替换成用户输入的数值。

time：模块提供了各种与时间相关的函数。使用这些函数可以获取当前时间、测量代码执行时间、格式化时间、将时间转换为特定格式的字符串等。程序中用于读取当前时间作为生成文件名的一部分。

* 1. 程序运行流程及分析