



集成电路测试实验课程建设与人才培养

戴志坚¹, 韩熙利^{2*}

(1. 电子科技大学(深圳)高等研究院, 深圳 518000; 2. 电子科技大学 自动化工程学院, 成都 611731)

摘要: 集成电路测试专业人才匮乏的现状已经极大地制约了国内集成电路产业发展。对集成电路测试工程师的能力要求涵盖电子电路设计、集成电路设计与可测性设计、集成电路生产工艺、测试计量技术以及软件设计等诸多方面。集成电路测试实验课程有针对性地提高了实验者专业能力, 经过 3 年的建设运行, 从学习该课程的学生进入专业领域研究和就业前景等方面来看, 实验教学均取得了较好的效果, 具有推广前景和意义。

关键词: 集成电路测试; 实验课程; 人才培养; 课程建设

中图分类号: G640

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20220346

Integrated Circuit Test Experimental Course Construction and Talent Cultivation

DAI Zhijian¹, HAN Xili^{2*}

(1. Shenzhen Institute for Advanced Study, University of Electronic Science and Technology of China, Shenzhen 518000, China; 2. School of Automation Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: The lack of integrated circuit testing professionals has greatly restricted the development of domestic IC industry. A qualified IC testing engineer should master a lot of knowledge, including electronic circuit design, integrated circuit design, design for testability, integrated circuit production process, measuring and testing technique, software development. To help the IC employees master these technological skills, the course of IC test experiment has been offered for 3 years. The experiment course did help the students enter their research field quickly and have better employment prospects, so it deserves to be developed and promoted.

Key words: integrated circuit testing; experiment course; talent cultivation; course building

随着信息技术的发展, 集成电路产业对我国经济发展的重要性已经得到从国家到行业内的共识, 亟需尽快发展、实现自主可控。作为一个资金密集、技术密集、人才密集的产业, 国家、地方财政和民间资本已经陆续投入了大量资金支持, 制约集成电路产业的发展问题集中到了技术积累和人才培养两方面。根据《中国集成电路产业人才白皮书》统计, 2022 年测试专业人员缺口约 10 万人。针对国家和就业市场需求, 作者团队在高校进行了集成电路测试实验室的建设, 面向研究生和本科生开设了相关理论和实验课程。经过 3 年的试运行, 从学习该课程的学生进入专业领域研究和就业前景等方面来看, 实验教学均取

得了较好的效果。

1 集成电路测试技术能力需求

集成电路测试是一个贯穿集成电路产业全过程的环节。集成电路测试是对集成电路成品或晶圆进行检测, 施加特定的激励, 然后将被测集成电路的输出响应和预期进行比较, 以确定或评估集成电路功能和性能的过程, 是验证设计、监控生产、保证质量、分析失效以及指导应用的重要手段。作为验证集成电路是否存在设计错误、工艺缺陷等的方法和手段, 对任何具体集成电路的测试方案应该在设计之初就开始着手进行编写。特别是随着集成电路密度、集成度和复杂度

收稿日期: 2022-06-08; 修回日期: 2022-06-27

基金项目: 深圳市软科学研究项目(RKX20210618144536006)。

作者简介: 戴志坚(1968-), 男, 硕士, 教授级高级工程师, 主要从事集成电路方面的研究。

* 通信作者: 韩熙利(1974-), 女, 硕士, 高级工程师, 主要从事集成电路方面的研究。E-mail: hanxili@uestc.edu.cn

的增加,每百万门级集成电路可测试的管脚资源变少,集成电路内部各模块之间的互连状况难以观测,如果由测试工程师参与芯片设计阶段的工作,可以针对提高测试覆盖率和效率的需求,从芯片设计初始阶段就增加可测性设计的内容,测试方案的编写可以和可测性设计方案相互验证^[1]。

集成电路测试方向从业人员大致可分为以下几类。

1) 在设计阶段,需要测试工程师和设计工程师协作制定大规模片上系统(system on chip, SoC)集成电路量产测试方案,构建可测性设计的整体架构,确定可测性设计的模块划分及评价指标,开发可测性设计代码和流程自动化脚本。芯片设计公司如上海海思技术有限公司等都专门设有可测性设计部门,这一部门对测试工程师的要求很高,需要掌握集成电路设计、验证、制造、封装测试全流程知识,着力于集成电路量产测试以促进电路优化及良率提升。

2) 晶圆测试和成品测试应用开发人员,要求掌握多种平台测试软件开发环境,设计复杂集成电路的参数测试和功能测试方案,设计器件接口板(device interface board, DIB)或探针卡电路,能综合分析测试结果和影响因素,提出质量提升方案。

3) 集成电路自动测试设备研发人员,需要掌握集成电路测试仪各模块,如电源、产生输入激励和采集输出信号的数字、模拟、射频模块的原理和设计方法,掌握自动测试系统软件平台需求并进行平台开发。

从上面的分析可以看出,不论从事哪个细分专业,集成电路测试专业方向均要求从业人员具有电子电路设计、集成电路设计与可测性设计、集成电路生产工艺、测试计量技术、软件设计等基础知识并能将所学的知识融会贯通。

目前设置了集成电路专业和测试技术与仪器专业的高校很多,但缺乏将这两门专业结合起来的跨专业学科设置。据调研,目前高校中只有复旦大学微电子学院、北方工业大学微电子学院和电子科技大学(深圳)高等研究院建立了专门的集成电路测试实验室。复旦大学和北方工业大学集成电路实验室隶属于微电子学科,主要面对集成电路设计专业提供测试服务^[2]。复旦大学和 ATE

厂商爱德万公司合作面向社会提供爱德万机台使用培训,对学生的培养以集成电路设计专业为主。作者团队隶属于测量学科,长期在集成电路测试、高速高精度数据采集、复杂波形产生、信号重构与误差消除、多通道同步一致性、故障诊断与可测性设计等方向进行研究,并取得一系列理论和应用成果。在集成电路测试方向的应用成果包括高精度混合信号集成电路测试系统和大规模片上系统测试系统等。

针对目前集成电路测试人才匮乏的现状,亟需高校教育做出跟进。作者团队从 2018 年起陆续为本科生开设集成电路测试技术跨专业创新课程和基于 ATE 的芯片测试设计与实现挑战性课程;为研究生开设了混合信号集成电路测试技术课程和混合信号集成电路测试技术实验课程。作为对理论教学必不可少的补充,实验教学起到了相当重要的作用。

2 集成电路测试实验课程建设

实验教学与理论教学的区别和优势在于学生可以将开发的测试程序运行在实验设备上,对实际集成电路进行测试,得到测试结果并进行分析。经过理论课程学习,学生基本掌握了常规的集成电路测试原理和方法,实验课程需要额外学习自动测试系统软件平台的操作,但重点应放在实验内容的部分,而不应花很多精力亦步亦趋地完成操作步骤。这对我们的自动测试设备开发环境的界面友好性和易操作性上提出了较高的要求。

2.1 实验用自动测试设备

作为教学设备的各类仪器和测试系统,由于学生集体上课,突发使用率高,在教学环节时候需求的数目多,因此实验室建设对其单价比较敏感。自动测试设备(automatic test equipment, ATE)的价格主要由它的通道数目、工作速度和测量精度等指标决定。而对大部分集成电路,工作速度和精度的差别并不影响其主要参数和功能的测量原理及方法。所以本实验室选择了国产基于 PXIe 总线的高性价比集成电路测试系统。该系统适用于中小规模集成电路和混合信号集成电路的测试,它能施加和采集数字、模拟信号来对集成电路的功能进行验证和仿真,实现集成电路的功能测试、交直流参数测试等,具备最大 128 通道

数字测试通道, 最大数字测试速率 200 Mb/s。以 PXIe 作为通信平台采用模块化集成形式, 可以根据需要扩展功能模块, 同时可通过背板总线同步混合信号。价格比不比性能相近的国外产品低的同时, 还具有同样功能强大的测试程序开发平台, 从而适合用于教学培训。

2.2 实验平台软件

调研国际市场上主流 ATE 厂商测试系统, 总结他们的通用特性。针对数字集成电路的测试, 测试平台开发环境需要提供的內容应该包括以下 7 个方面^[3-4]。

1) 数字图形的输入。决定所有输入和输出管脚在每个工作周期内处于高电平、低电平、高阻或任意的状态。

2) 时序信息的输入。为了配合完成复杂的功能, 集成电路的各个管脚具有严格的时序关系, 对应的每个管脚在一个工作周期内事件的变化, 如上升沿或下降沿应该能调节到周期的任何位置, 调节的步进由 ATE 机台的工作速度决定。

3) 逻辑电平和实际电平的对应关系。

4) 被测集成电路管脚与 ATE 通道的映射关系。

5) 灵活的测试结果显示方式, 如 Shmoo 图可以以二维坐标图显示不同的测试条件组合下的测试结果。

6) 可视化的测试程序开发界面和通用的软件开发环境, 如 VC 等。

7) 常规测试如连接性测试、直流参数测试的模板, 提供用户可视化界面直接输入需要设置的参数, 输出测试结果。

针对混合信号集成电路的测试, 测试平台软件应该能额外专门提供模数转换器 (analog to digital converter, ADC) 和数模转换器 (digital to analog converter, DAC) 测试程序开发界面^[5]。

3 集成电路测试实验设计与能力培养

按照处理信号分类, 集成电路分为数字集成电路、模拟集成电路和数模混合信号集成电路 3 类。数字集成电路测试聚焦于测试图形的产生、管脚间复杂的时序关系以及测试条件的综合设置。混合信号集成电路的测试方法应引入基于数字信号处理 (digital single process, DSP) 的方法测试 ADC 的信噪比、信纳比、有效位数、无杂散动态范围等动态参数^[6]。模拟集成电路测试的特点是

常常采用间接测试法, 需要在 DIB 上设计辅助电路。受课时限制, 实验课程的设计主要围绕数字集成电路测试和混合信号集成电路测试。下面分别介绍对这两种类型集成电路进行测试的实验内容以及实验对学生能力的培养。

所有实验的步骤都包括被测集成电路数据手册分析、提取待测集成电路测试指标、编写测试方案、编写并调试测试程序、执行测试流程、对测试结果进行分析并撰写完备性测试报告的过程。

3.1 数字集成电路测试实验

数字集成电路实验课选择了非门 HD74HC04P、译码器 XD74LS138 和动态随机存取存储器 TMS4256 这 3 款芯片开设 3 个实验。第一次课程采用老师全程用演示机投影示范 HD74HC04P 的测试程序开发详细过程, 学生同步操作; 后续课程由学生自己开发译码器 XD74LS138 和动态随机存取存储器的测试程序。

3 个实验均需要进行管脚连接性测试、漏电流测试、电源电流测试、输入输出高低门限等直流参数测试和传输延迟时间、上升下降时间等交流参数的测试。老师以功能简单的非门电路讲授测试程序开发流程和操作步骤。对功能简单的数字集成电路进行测试时, 测试图形较为简单明了, 所以课堂注意力主要放在一个测试程序应包含的内容和流程上。其中需要重点讲述以下两点: 一是测试图形中的每一位输入数据事件变换的时间点和输出比较点需要由程序设计人员决定, 强调这些时间设置最终决定了测试结果, 要避免设置错误出现的粗大误差; 二是注重强调测试开发人员应该具有主动性, 需要综合利用测试机台提供的方法创造性地开发测试程序, 如应用软件平台的“Shmoo 显示方式”测量输出转换时间 t_{THL} 。Shmoo 显示方式是指分别在二维坐标轴上设置两种不同的测试条件或测试参数, 然后扫描输出两种组合下的测试结果。 t_{THL} 指输出由高变化到低的过渡时间, 测量输出为高电平的 90% 转换到 10% 的过渡时间。Shmoo 方式可以将测试时间设置在 X 轴, 测试的输出电平分值设置在 Y 轴, 直接在 Shmoo 显示界面上找出 90% 高电平测试结果由成功变为失败的时间点以及对 10% 高电平测试结果由成功变为失败的时间点, 两个时间之差即为转换时间 t_{THL} 。如果不采用 Shmoo 自动扫描显示方式, 运用二分法需要手动反复设置比较时

间,需要分别经过多次寻找才能找到输出电平约等于90%高电平和10%低电平的点。译码器XD74LS138的实验主要是让学生熟练掌握整个集成电路测试应用开发程序的流程,动手操作能够让被动听老师讲授的知识被综合理解内化为自己掌握的知识。

简单数字电路实验帮助实验者掌握集成电路常用直流参数和交流参数的测试,掌握测试程序开发流程,了解测试工程师应具有的积极性,产生对集成电路测试专业方向深入研究的兴趣。

动态随机存取存储器TMS4256需要学生完全自主设计,并且提出测试效率的要求。该芯片行地址和列地址复用地址总线,分别通过行选通(RAS)和列选通(CAS)信号进行选通,读写控制线(W)决定对存储器读还是写操作,可以对该芯片进行页或半字节读写操作。测试效率要求实验方案设计时需要仔细设置时间周期集,还要满足固定时间间隔内对集成电路进行刷新的要求^[7]。对读写电流、待机电流、刷新电流、页模式工作电流等的测试要求仔细分析地址信号、行选通信号、列选通信号、读写控制的时序,满足地址建立时间、地址保持时间等十多项参数的要求。实验的成功,要求测试设计者能够在ATE开发平台上对时间周期集、边沿集、数据格式进行综合设置,以构成复杂灵活的测试向量。存储功能测试促使实验者理解存储器常用的测试图形,要求使用对角线背景图形,再在棋盘格、行进、齐步或跳步走图形中选择1~2种作为测试图形^[8]。

动态随机存取存储器实验可以帮助实验者掌握使用ATE机台实现对复杂时序电路的测试,掌握常用存储器测试图形,理解生产测试对测试效率、故障覆盖率的要求^[9]。

3.2 混合信号集成电路测试实验

混合信号集成电路测试实验选择数模转换器DAC8550和模数转换器ADC0832进行。ADC和DAC是互逆的过程,它们的静态参数微分非线性(differential nonlinearity, DNL)和积分非线性(integral nonlinearity, INL)的意义相同,反映的是它们实际转换特性与理想转换曲线之间的偏离,当然对于两种转换器来说测试和计算DNL和INL的方法是不同的。ADC和DAC也同样定义了信噪比等动态参数来反映转换中混入的噪声和谐波,对动态参数的测试和计算方式完全一致,

区别是测试ADC动态参数时是将其转化后的数字信号直接进行处理测试,测试DAC动态参数是将其转换后的模拟信号送入ATE被采集为数字信号进行处理测试。

在对ADC的测试中,ATE模拟信号源将数字离散信号转换成连续信号,即对信号进行重构,作为激励信号输入到被测ADC。被测ADC对模拟信号进行采样转换为数字信号,通过数字信号处理的手段对ADC动态性能进行测试^[10]。在对DAC的测试中,ATE机台将数字信号输入到被测DAC,被测DAC将其重构为连续的模拟信号,又送入ATE模拟采集模块中转化为数字信号进行处理。

混合信号集成电路测试实验中,学生除了掌握模拟信号源即任意波形发生器和模拟采集模块即数字化仪的常规操作如阻抗、幅度、偏移等设置外,实验的重点放在针对混合信号集成电路测试的特殊需求,应在测试开发中对ATE进行相应的设置。如在ADC静态参数测试中,对单个满幅信号进行多次采样计算码宽,每个码宽对应的模拟电平范围和采样后该码值的个数有关,所以需要设置触发同步启动输入模拟信号和采样时钟^[11]。在ADC动态参数测试过程中,需要学生掌握采样和重构的概念,掌握量化误差、时钟抖动引起的误差以及非相干采样引入的频谱泄露概念,能运用频谱分析方法进行正确的抗混叠低通滤波器截止频率的选择、采样频率设置、被采样信号频率设置、采样点数的选择、窗函数的选择等^[12-14]。为了直观掌握不同设置对测试结果的影响,实验设计了各种对比实验,如要求分别进行非相干采样与相干采样观察频谱差别,分别进行过采样与正常采样情况下观察噪底差别,进行快速傅里叶变换时不加窗、加窗以及加不同种类窗情况下观察频谱差别等一系列对比测试。

从实验过程中我们可以看出,ADC和DAC的测试实验通过让实验者同时设置模拟域和数字域信号及相关仪器模块,同时运用时域和频域测试,帮助实验者掌握基于数字信号处理进行集成电路测试的方法。

4 结束语

经过对学生进行集成电路测试实验教学结合理论讲授的模式,实验课选修结束后,学生对多

种类型集成电路的测试方法、测试原理、测试结果分析处理方法等有了全面的掌握,并且在至少一种 ATE 环境上动手实践开发测试程序,掌握了进行集成电路测试的流程,掌握了 ATE 的基本结构、组成原理、硬件设计方案以及系统软件需求。为从事集成电路测试方向的研究奠定了坚实的理论和实践基础。

参考文献

- [1] 闫丽琴,王占选,冯建呈,等.基于典型集成电路的自动测试演示验证研究[J].计算机测量与控制,2022(8):251-255.
- [2] 姜岩峰,张晓波,杨兵.集成电路测试方向的探索和教育内容的建设[J].实验技术与管理,2009,26(6):172-174.
- [3] 尹坤.PXIe集成电路测试系统多通道同步技术研究与应用[D].成都:电子科技大学,2020.
- [4] 吴晓涓.混合集成电路测试系统控制软件平台设计与实现[D].成都:电子科技大学,2021.
- [5] 章慧彬,朱江.大规模集成电路测试程序开发技术及流程应用[J].电子与封装,2017,17(6):10-15.
- [6] 南江,孔宪伟,胡海涛,等.同步动态随机存储器时序参数容限测试方法研究[J].信息技术与标准化,2021(11):43-46.
- [7] 惠嘉成.FLASH存储器测试系统设计与实现[D].成都:电子科技大学,2022.
- [8] HARUTYUNYAN G, SHOUKOURIAN S. A new method for march test algorithm generation and its application for fault detection in RAMs[J]. *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, 2012, 31(6): 941-949.
- [9] 1241-2010 - IEEE Standard for Terminology and Test Methods for Analog-to-Digital Converters[EB/OL]. [2022-03-06]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/5692956>.
- [10] PERALIAS E J, JALON M A, RUEDA A. Simple evaluation of the nonlinearity signature of an ADC using a spectral approach[J]. *VLSI Design*, 2008(4): 5-9.
- [11] KESTER W. Understand SINAD, ENOB, SNR, THD, THD+N, and SFDR so you don't get lost in the noise floor[J]. *Analog Devices Tutorial*, 2009, 10(8): 1-8.
- [12] MAKOTO T, MISTUHIRO U. A method of high precision frequency detection with FFT[J]. *Electronics & communications in Japan*, 1988, 71(11): 24-32.
- [13] 何江涛.基于数字信号处理的高精度ADC测试方法研究[D].成都:电子科技大学,2019.
- [14] ROBERTS G, TAENZLER F, BURNS M. An introduction to mixed-signal IC test and measurement[M]. 2ed. New York: Oxford University Press, 2011.

编辑 张莉