

# 基于 PMU 的小型集成电路测试系统 实现及性能分析

祝新军<sup>1</sup>, 纪敦礼<sup>2</sup>, 何少佳<sup>2</sup>

(1. 绍兴职业技术学院, 浙江 绍兴 312000; 2. 桂林电子科技大学 机电工程学院, 广西 桂林 541000)

**摘要:** 文中给出了一种基于精密测量单元的小型集成电路测试系统的设计方法, 并对小功率范围进行详细实验验证; 该测试系统将电压/电流钳位技术、比较技术、功率扩展技术、恒流源和恒压源技术和四象限驱动技术等多项技术相结合, 能够对被测器件 (DUT) 施加精确地激励值, 并准确测量 DUT 在激励下的响应, 该系统同时具备大功率扩展能力满足多种电路测试的需求; 系统借助四通道集成仪表放大器电路, 结合嵌入式控制器、功率扩展电路以及上位机控制界面共同完成设计, 解决了 nA 级电流无法准确测量的问题, 通过优化补偿电路设计, 提高电路测试速度; 系统性能分析结果表明, 文章所设计的小型集成电路测试系统测量精度高、施加激励稳定可靠、响应速度快, 相比类似产品节约 2/3 的硬件设计成本, 能够满足集成电路测试中直流参数测试的要求。

**关键词:** 集成电路; 精密测量单元; 直流参数测试; 性能分析; 嵌入式

## Implementation and Performance Analysis of Small Scale Integrated Circuit Test System Based on PMU

Zhu Xinjun<sup>1</sup>, Ji Xiaoli<sup>2</sup>, He Shaojia<sup>2</sup>

(1. Shaoxing Vocational & Technical College, Shaoxing 312000, China;

2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China)

**Abstract:** A design method of small integrated circuit test system based on precise measurement unit is presented in this paper, and the small power range is verified in detail. The test system the voltage / current clamp technique, comparison of technology, power expansion constant current source and voltage source and four quadrant drive technology, the combination of technology, to the device under test (DUT) applied to precisely and accurately measure the DUT value of the incentive, incentive in the response of the system at the same time. With high power capacity expansion to meet the various needs of the test circuit. The four channel system with integrated instrument amplifier circuit, combining extension circuit and PC control interface to accomplish the design of embedded controller, power, solve the nA current cannot be accurately measured, by optimizing the compensation circuit design, improve the testing speed of circuit. The analysis results show that the performance of the system, integrated circuit test system in the design of high precision, stable and reliable excitation and fast response speed, cost saving compared to 2/3 hardware design of similar products, to meet the integrated circuit DC parameter test requirements.

**Keywords:** integrated circuit; precision measurement unit; DC parameter measurement; performance analysis; embedded system

## 0 引言

随着集成电路集成度的不断提高, 集成电路的测试难度不断增大。目前, 主要依赖于集成电路自动测试仪 (Automatic Test Equipment) 完成集成电路测试。ATE 的测试原理是对被测器件 (Device Under Test) 施加激励和收集响应信号, 与 DUT 的技术手册参数进行比对, 从而判断 DUT 是否合格<sup>[1]</sup>。集成电路测试仪主要应用在晶圆测试 (中测) 和成品测试 (成测), 文章中的集成电路测试系统针对成测中的直流参数测试进行设计。从半导体技术的发展情况来看, 芯片测试技术落后于芯片的制造速率, 高性能的测试仪器价格昂贵, 大大提高了电路测试的成本<sup>[2]</sup>。为降低集成电路测试成本, 本文提

出一种新型的电路测试系统设计方案, 满足小微集成电路测试用户对测试精度和测试速度的要求。

## 1 模拟集成电路测试仪的总体架构

模拟集成电路测试仪主要由嵌入式控制器、总线接口电路、PAB 板、MAB 板和 DUT 适配板构成, 系统的机构如图 1 所示。

本文主要介绍集成电路测试仪直流参数测试板 (PAB) 的设计原理、性能分析及功率扩展与实现。

## 2 PAB 电路的工作原理和结构组成

进行模拟集成电路直流参数测试时, 需要对 DUT 提供恒流源和恒压源激励, 并精确测量 DUT 的响应值, PMU 单元可以完成对 DUT 激励施加和响应测量<sup>[3]</sup>。电压源/电流源、钳位电路和测量电路是 PAB 板的主要部分, 考虑到测试系统精度和成本的要求, 选用 ADI 公司的集成 PMU 外搭功率扩展电路的方式进行设计。PMU 内部包括电压源 (Voltage Source)、电流源 (Current Source)、比较电路 (Compare Cir-

收稿日期: 2017-08-19; 修回日期: 2017-09-09。

基金项目: 浙江省教育厅一般科研项目 (Y201738754); 绍兴市公益性技术应用研究计划项目 (2017B70071)。

作者简介: 祝新军 (1983-), 男, 浙江江山人, 硕士, 讲师, 主要从事机电液一体化技术方面的科研和教学方向的研究。

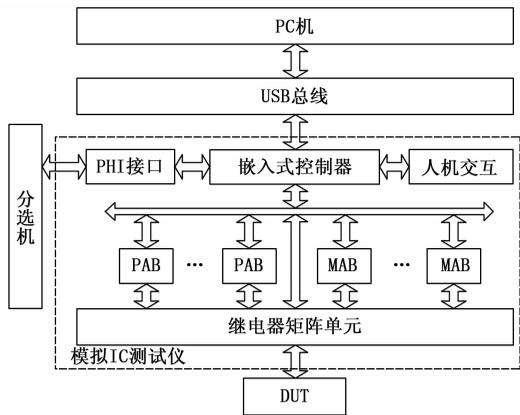


图 1 模拟集成电路测试仪总体架构

circuit)、钳位电路 (Clamp Circuit)、测量电路 (Measure Circuit) 和补偿电路 (Compensate Circuit)<sup>[4]</sup>等 4 个部分, 小量程测试精度高, 但功率有限, 需要增加功率扩展电路才能满足多种电路测试的要求。

电压/电流源对 DUT 施加恒流源/恒压源激励, 同时可为 DUT 提供电源, 为了满足集成电路测试对大功率的需求, 由大功率运算放大器和跟随器组成负反馈电路, 输出稳定的大电流/大电压。比较电路主要完成激励响应值与参数手册中设计值之间的比较, 输出 pass/fail。钳位电路包括电路钳位和电压钳位, 主要防止因操作失误和引入容性负载带来的大电流、大电压损坏测试仪和破坏 DUT。测量电路完成 DUT 响应信号检测, 采用四线开尔文的连接方式连接 DUT 可提高测量精度<sup>[5]</sup>。补偿电路主要是防止电路产生自激和震荡。采用四象限技术设计 PAB 板的工作模式, 每个 PMU 均具有施加电压测量电流 (FVMI)、施加电流测量电压 (FIMV)、施加电流测量电压 (FIMI)、施加电压测量电压 (FVMV)、施加电压 (FV)、施加电流 (FI)、测量电压 (MV)、测量电流 (MI) 八种工作模式<sup>[4]</sup>。图 2 所示为 PAB 板的电路结构, 使用嵌入式控制器完成 PMU 的控制和量程切换, 以提高电路测试的灵活性。

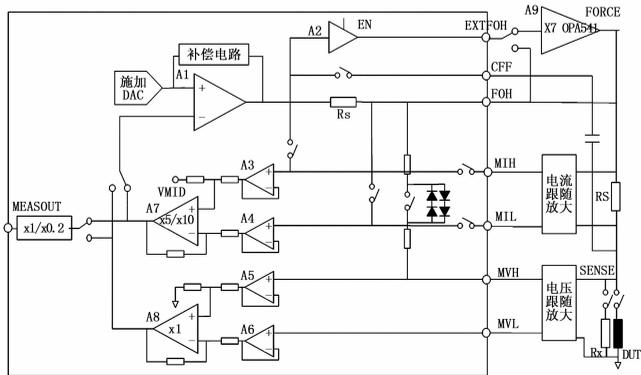


图 2 PAB 板的电路结构

### 3 PAB 板硬件电路的设计与实现

#### 3.1 电压源与电流源

为了满足集成电路大功率测试的需求, 同时兼顾小量程的

测试精度, 将电流量程大于 2mA 的进行单独设计, 小于 2mA 电流范围使用 PMU 内部量程, 这样既降低了 PMU 的发热功率, 也提高了测试系统的精度。根据 PAB 板的原理图, 小功率电压/电流源由高精度运放 A1 提供, 采样电阻与电流检测运放 A3 和 A4 构成电流源反馈回来, 运放 A1 与电压检测运放 A5 和 A6 构成恒压源反馈回路; 大功率电压源/电流源由高精度运放 A1、A2 和大功率运放 A9 共同完成, 采样电阻、大功率电流仪表放大器、电流检测运放 A3 和 A4 构成大功率恒流源反馈电路, 运放 A1、A2、A9、大功率电压仪表放大器与电压检测运放 A5 和 A6 构成大功率恒压源反馈电路, 通过模拟开关完成电流源与电压源的切换。

恒压源与恒流源实现原理基本相同, 下面以大功率恒压源的设计与实现为例进行介绍。

施加 DAC 的转换值与负反馈值相加, 作为高精度施加运放 A1 的正向输入, 与运放 A2 和大功率运放 A9 共同完成高电压和大电流的稳定输出。其中, 补偿电路的设计将在后面介绍。功率缓冲电路如图 3 所示。大功率运放 A9 (OPA541) 做同样比例放大反馈, 放大倍数为 +7 倍。

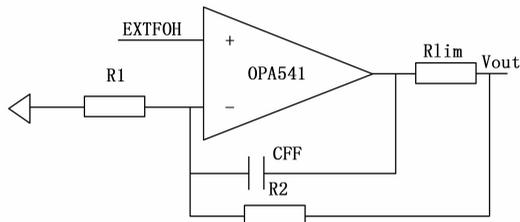


图 3 功率缓冲电路

根据运放虚短虚断原理, 运放的放大倍数为 +7 倍时,  $R_1$ 、 $R_2$  满足<sup>[6]</sup>:

$$\frac{R_1 + R_2}{R_1} = 7 \quad (1)$$

采样电阻与高精度运放 (LF411) 组成电压跟随仪表放大器, 输出电压经分压电阻后反馈到输入端, 以实现电压稳定输出<sup>[11]</sup>, 电压检测仪表放大电路如图 4 所示。

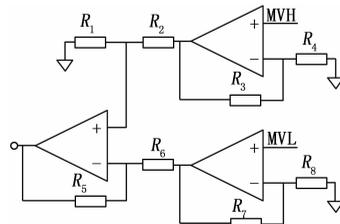


图 4 电压检测仪表放大电路

为了满足电压输出量程与电压检测量程相匹配, 设计  $R_3 = R_7$ ,  $R_2 = R_6$ ,  $R_1 = R_5$ ,  $R_4 = R_8$ 。则电路的放大系数  $K$  满足下面的关系<sup>[4-6]</sup>:

$$K = \frac{V_{OUT}}{V_{in1} - V_{in2}} = \frac{R_1}{R_6} \times \frac{R_7 + R_8 + R_3}{R_4} \quad (2)$$

由公式 (2) 可知, 放大倍数  $K$  通过电阻阻值进行设定。PMU 的输出电压范围限制在  $\pm 10$  V 之间。为提高电压测量精度, 并与 PMU 的输出相匹配, 将输出电压分成 4 V、8 V、20 V 和 40 V 四档, 对应的电压放大系数分别是: 2.5、1.25、

0.5 和 0.25。

恒流源的设计原理与恒压源类似，取样电阻对电流进行取样，与电压检测运放组成负反馈电路。考虑到检测精，现将电流检测回路中反馈电压量程设为±2 V，则电流检测放大器的放大倍数应为+5，电流量程的切换可通过继电器切换取样电阻实现。例如，取样电阻的阻值  $R_s = 2 \Omega$ ，根据欧姆定律，电流量程应选择 1 A。

### 3.2 补偿电路

所设计的集成电路测试系统，采用施加运放（内部补偿）和负载器件（外部补偿）分别补偿，通过程控方式切换不同的电容。补偿电路在集成电路测试中主要有两个方面的作用：系统在测试范围较大的容性负载时维持电路的稳定；内部“积分器”能够限制环路的转换速度，增加环路的直流增益，最大限度降低环路的误差电压值<sup>[7]</sup>。

补偿电路仅对电压模式起作用，补偿电容越大，电路越容易稳定，但会加长整个环路的建立时间。采用导通电阻小于 50  $\Omega$  的模拟开关和多路复用器切换不同的电容值完成补偿。当切换到电流模式时，外部补偿自动断开。根据实验数据，补偿电容选择的参考值如表 1 所示<sup>[8]</sup>。

表 1 补偿电容选择参考

$C_{DUT}$	$C_{内}$	$C_{外}$
$\leq 1nF$	100pF	220pF
$\leq 10nF$	100pF	1nF
$\leq 100nF$	$C_{DUT}/100$	$C_{DUT}/10$

注： $C_{DUT}$ 被测负载电容值； $C_{内}$  内部补偿电容值； $C_{外}$  外部补偿电容值。

### 3.3 钳位电路

钳位电路主要是防止环路中电压或电流值突然升高，保护 DUT 和测试仪<sup>[9]</sup>。系统设计了两种钳位方式，一种是通过高压运放钳位，如图 3 所示，通过调整  $R_{lim}$  的大小改变钳位范围；另一种是通过 PMU 环路进行钳位，图 5 所示为钳位电路原理，钳位电路通过两个高精度运放实现高低钳位的设定，比较反馈量是否在所设定的高低钳位范围之内，若在范围之内，钳位电路不工作，若反馈值超出钳位范围，钳位二极管导通，运放 A2 的输入电压变成钳位电压设定值，钳位范围之外的电压被电阻  $R_2$  消耗，施加运放 A1 输出抑制，钳位电路开始作用。

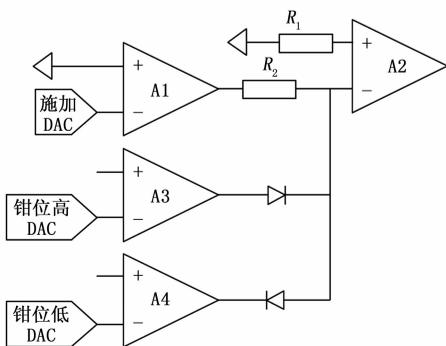


图 5 钳位电路实现原理

### 3.4 其他

使用 16 位模数转换器 AD7686 作为 ADC 转换电路，将 4 个 PMU 的测量输出端并联在一起接入 ADC 上，通过模拟开关切换测量输出环路的开闭，既简化了电路设计，又能满足系统中数据转换的需求，同时降低该系统的硬件设计成本<sup>[10]</sup>。

为了降低继电器内阻对取样电阻的影响，在电流/电压取样电路中采用四线制开尔文的连接方式。同样，从提高测试精度方面考虑，对 DUT 的施加线（FORCE）和测量线（SENSE）采用开尔文的连接方式分开接线。

在试验中发现，在负载断开的情况下切换电流档位，此时相当于负载无穷大，接入负载后需要较长的时间才能达到环路的稳定。选择预设负载并联在 DUT 两端，当负载断开时，切换继电器将预设负载接入电路，能有效减少环路再次稳定的时间。

## 4 测试性能分析

为了测试电流档位的精度，选用精度 0.1% 的金属薄膜电阻进行采样。由于测试工作量比较大，下面对电压源的精度进行详细测试。工作模式为 FV（施加电压）时，通过精密万用表检测电压源的施加精度；工作模式为 FVMI（施加电压测量电流）时的电流测量精度；工作模式为 FVMV（施加电压测量电压）时的电压测量精度。

当系统工作在施加电压模式时，以系统设定施加电压值为 +5 V 为例，通过精密万用表等间距采集 100 个点，数据显示，系统输出的电压值最大为 5.006 791 V，最小为 5.004 120 V，平均值为 5.005291 V，施加精度在 0.09% 左右，图 6 所示为电压源施加 +5 V 时系统的输出情况。



图 6 电压源输出 +5 V 时的波动情况

系统工作模式为施加电压测量电流（FVMI）模式时，选用阻值为 10 k $\Omega$  的金属薄膜电阻作为 DUT，电压源输出 -5 V ~ +5 V 的直流电压，步长为 10 mV，图 7 为系统测得的电流值经过 ADC 转换后的结果。通过图 7 可以得出，系统对电流的测量精度小于 0.3%。

系统工作模式为施加电压测量电压（FVMV）模式时，电压源输出 -10 ~ +10 V 的直流电压，步长为 10 mV，图 8 为经过 ADC 转换后的结果。通过图 8 可以看出，系统输出呈线性状态，电压测量精度小于 0.5%。

用同样方式可以测得系统工作在施加电流（FI）模式时，系统输出 1  $\mu A$  的电流，经过 ADC 转换后的结果如图 9 所示，根据测量结果，在软件矫正之前，电流源的施加与测量精度小于 0.3%。

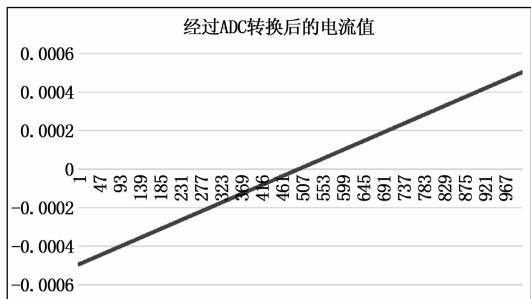


图 7 FVMI 模式下电流的测量精度

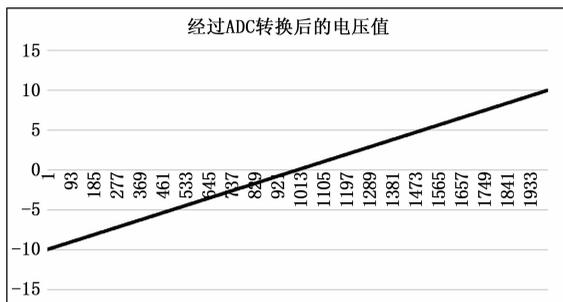


图 8 FVMV 模式下电压的测量精度

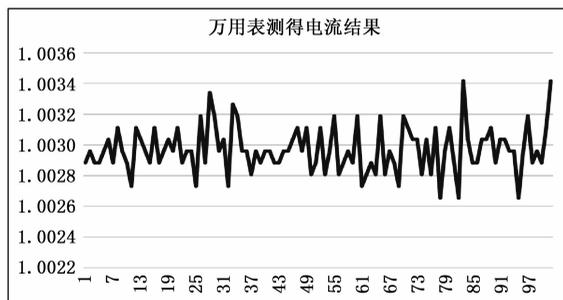


图 9 FIMI 模式下电流的测量精度

经过实际测试, 与理论计算值相比, 电流源的施加精度能够控制在 0.05%, 通过取样电阻取样并经过 ADC 转换后的值与理论值相比, 绝对误差值呈线性分布, 软件矫正前的电流精度小于 0.4%, 同样方法得到电压的精度小于 0.3%, 满足集

(上接第 51 页)

提高将近五倍, 有效提高检测算法的实时性。

**参考文献:**

[1] Nguyen D T, Li W Q, Ogunbona P O. Human detection from images and videos: A survey [J]. Pattern Recognition, 2016, 51: 148-175.

[2] 张 阳. 复杂交通场景中基于视频的行人检测与跟踪若干关键问题研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2013.

[3] Wang Z, Cao X B, Yang P K. Transfer Learning for Pedestrian Detection [J]. Neurocomputing, 2013, 100 (1): 51-57.

[4] 苏松志, 李绍滋, 陈淑媛, 等. 行人检测技术综述 [J]. 电子学报, 2012, 40 (4): 814-820.

[5] Enzweiler M, Gavrilu D M. Monocular pedestrian detection: survey and experiments [J]. IEEE Trans Pattern Anal. Mach. Intell.

成电路测试的要求。

大量实验和测试可知, 通过优化补偿电路可有效提高系统的稳定性, 解决了工频干扰、高频信号以及不良元件带来的问题。另外, 在容性负载两端并联补偿电容的方式也能起到维持电路稳定的作用。

**5 结语**

电路测试结果表明, 该系统工作在小量程时, 精度高, 速度快。另外, 该系统具备功率扩展单元, 可测试电路范围更宽, 可以灵活地对被测件施加电压源激励或者电流源激励, 从优化电路结构和改善补偿电路两个方面提高系统的测试精度, 而且系统运行更加稳定可靠, 达到工业级测试需求。该设计方案相比现有的产品可降低 2/3 的硬件设计成本, 可满足小微电路测试企业的要求。

**参考文献:**

[1] 魏少军. 2017 年中国集成电路产业现状分析 [J]. 集成电路应用, 2017, 34 (4): 6-11.

[2] 高 成, 张 栋, 王香芬. 最新集成电路测试技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.

[3] 韩兵兵, 黎福海. 集成电路自动测试设备大功率电压电流源的设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2009, 17 (4): 660-662.

[4] 佛朗哥. 基于运算放大器和模拟集成电路的电路设计 [M]. 西安交通大学出版社, 2009.

[5] 罗友哲, 齐增亮, 李鹏飞, 等. 高精度电压基准测试的问题及对策 [J]. 电子技术与软件工程, 2017 (1): 234-234.

[6] 康华光. 电子技术基础: 模拟部分 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2013.

[7] 张 克, 贺 国, 张超杰. 一种模拟电路动态电源电流信号测量电路设计与实验验证 [J]. 舰船电子工程, 2017, 37 (4): 6-11.

[8] 宋尚升. 集成电路测试原理和向量生成方法分析 [J]. 现代电子技术, 2014, 37 (6): 122-124.

[9] 汪天伟. 混合集成电路测试硬件电路测试板的设计 [D]. 成都: 成都电子科技大学, 2013.

[10] 张武甲. 基于参数测量单元的芯片自动测试系统设计 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013.

[11] 陈国强, 吴国华, 刘敬猛. 中规模集成电路功能测试仪的设计 [J]. 电子技术应用, 2009, 35 (7): 139-141.

[12] Dalal N, Triggs B. Histograms of oriented gradients for human detection [J]. IEEE Conference on Computer Vision & Pattern Recognition. 2005: 556-893.

[13] 王 旋, 陈 忻, 刘 巍. 一种适用于并行运算处理的实时高动态范围图像合成算法研究 [J]. 影像科学与光化学, 2015, 33 (4): 330-335.

[14] 苏奇全, 贾宏光, 朱明超, 等. 基于递推闭环子空间辨识的自适应预测控制方法 [J]. 信息与控制, 2015, 44 (2): 22-26.

[15] 徐胜军, 韩九强, 赵 亮, 等. 用于图像分割的局部区域能量最小化算法 [J]. 西安交通大学学报, 2011, 45 (8): 7-12.

[16] Wang X, Han T X, Yan S. An HOG-LBP human detector with partial occlusion handling [A]. Proc. ICCV [C]. 2009: 32-39.