



功率器件 CV 特性解决方案



- MOSFET、IGBT
- 单管器件
- 模组器件
- C_{iss} 、 C_{oss} 、 C_{rss} 、 R_g
- C_{ies} 、 C_{oes} 、 C_{res} 、 R_g
- CV特性曲线

同惠功率器件CV特性测试解决方案

» 前言

随着我国加快实现“碳达峰、碳中和”的目标，电气化替代已成为实现目标的关键。

电气化替代是通过功率半导体把光伏、风电、特高压、新能源汽车、高铁等织成一张可循环的高效、可靠、可控能源网络，实现对可再生能源的高效管理和利用降低能耗、减少碳排放。

同时功率半导体 在计算机、交通、消费电子、汽车电子 为代表的 4C 行业应用也越来越广泛。

可以预见，随着新能源爆发式增长，在新能源汽车领域，汽车的动力系统、空调压缩机、充电桩等都需要大量功率半导体器件；风电和光伏产生的电不能直接并网，需要逆变器、变流器进行电能转化，这会新增大量的功率半导体需求。

随着科技的发展，现有半导体材料已经经过了三个发展阶段：

半导体材料			禁带宽度（eV）	理论最高温度（℃）	熔点（K）	主要应用
第一代	锗	Ge	1.1		1221	低压、低频、中功率晶体管、光电探测器
	硅	Si	0.7	175	1687	
第二代	砷化镓	GaAs	1.4		1511	微波、毫米波器件、发光器件
第三代	碳化硅	SiC	3.05	600	2826	高温、高频、抗辐射、大功率器件 发光二极管、半导体激光器
	氮化镓	GaN	3.4	800	1973	
	氮化铝	AlN	6.2		2470	
	金刚石	C	5.5		>3800	
	氧化锌	ZnO	3.37		2248	

由此可见，第三代半导体展现出了高压、高频、高速、低阻的优点，其击穿电压，在在某些应用中可高到 1200-1700V。这些特点带来如下新特性：

- 极低的内部电阻，与同类硅器件相比，效率可提高70%
 - 低电阻可改善热性能(最高工作温度增加了)和散热，并可获得更高的功率密度
 - 散热得到优化，与硅器件相比，就可采用更简单的封装、尺寸和重量也大大减少
 - 极短的关断时间(GaN器件接近于零)，能工作于很高的开关频率，工作温度也更低
- 这些特性，在功率器件尤其是MOSFET以及IGBT上面的应用最为广泛。



其中，功率器件以MOSFET、IGBT为代表，两者均为电压控制电流型功率开关器件，MOSFET优点是驱动电路简单、开关速度快、工作频率高，IGBT是由BJT和MOSFET组合成的复合器件，兼具两者的优点：速度快、能耗低、体积小、而且大功率、大电流、高电压。

MOSFET以栅极（G）极电压控制MOSFET开关，当 V_{GS} 电压大于阈值电压 $V_{GS(th)}$ 时，MOSFET导通。

IGBT同样以栅极（G）极电压控制 I_{GT} 开关，当 V_{GE} 电压大于阈值电压 $V_{GE(th)}$ 时，IGBT导通。

因此，在第三代半导体高速发展的同时，测量技术也面临全面升级，特别是高电压、大电流、高频率测试，以及电容特性（CV）特性。

本方案用于解决MOSFET、IGBT单管器件、多个器件、模组器件的CV特性综合解决

在了解本方案之前，需先了解一下MOSFET、IGBT器件的米勒效应、CV特性等相关知识。

二、功率器件的米勒效应、CV特性

1. MOS管的寄生电容

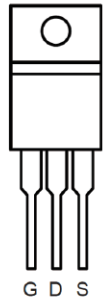
以台湾育碧VBZM7N60为例

MOS管具有三个内在的寄生电容：Cgs、Cgd、Cds以及栅极电阻Rg，

VBZM7N60

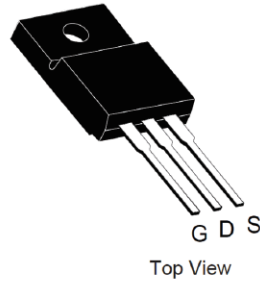
VBZMB7N60

TO-220AB

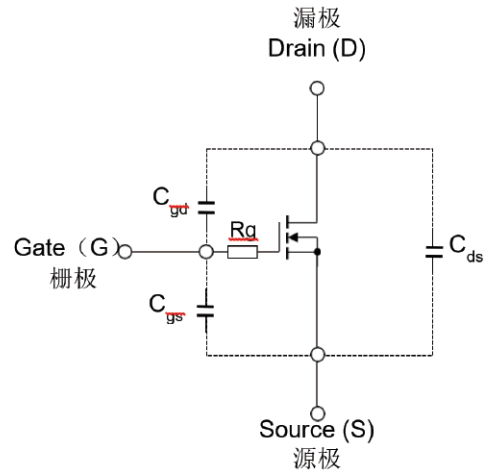


Top View

TO-220 FULLPAK



Top View



在规格书常用Ciss、Coss、Crss这三个参数代替。

VBZM7N60 / VBZMB7N60

 **VBsemi**
www.VBsemi.com

Dynamic							
Input Capacitance	C _{iss}	V _{GS} = 0 V, V _{DS} = 100 V, f = 1 MHz		-	360	-	pF
Output Capacitance	C _{oss}			-	25	-	
Reverse Transfer Capacitance	C _{rss}			-	12	-	
Effective Output Capacitance, Energy Related ^a	C _{o(er)}	V _{DS} = 0 V to 520 V, V _{GS} = 0 V		-	45	-	pF
Effective Output Capacitance, Time Related ^b	C _{o(tr)}			-	62	-	
Total Gate Charge	Q _g	V _{GS} = 10 V	I _D = 4 A, V _{DS} = 520 V	-	25		nC
Gate-Source Charge	Q _{gs}			-	2.0	-	
Gate-Drain Charge	Q _{gd}			-	2.7	-	
Turn-On Delay Time	t _{d(on)}	V _{DD} = 520 V, I _D = 4 A, V _{GS} = 10 V, R _g = 9.1 Ω		-	25	-	ns
Rise Time	t _r			-	55	-	
Turn-Off Delay Time	t _{d(off)}			-	70	-	
Fall Time	t _f			-	40	-	
Gate Input Resistance	R _g	f = 1 MHz, open drain		-	3.5	-	Ω

符号	名称	影响
Ciss	输入电容	Ciss = Cgs + Cgd, 影响延迟时间; Ciss越大, 延迟时间越长
Coss	输出电容	Coss = Cds + Cgd, Coss越大, 漏极电流上升特性越差, 这不利于MOSFET的损耗。高速驱动需要低电容。
Crss	反向传输电容	Crss = Cgd, 即米勒电容, 影响关断特性和轻载时的损耗。如果Coss较大, 关断dv / dt减小, 这有利于噪声。但轻载时的损耗增加。
Rg	栅极输入电阻	影响开关管的开关速度。栅极电阻太大, 开关速度显著降低, 开关损耗大。栅极电阻太小, 高开关速度带来的是很大的电流电压变化率即强烈的干扰。

三个等效电容是构成串并联组合关系, 它们并不是独立的, 而是相互影响, 其中一个关键电容就是米勒电容Cgd。

这个电容不是恒定的, 它随着栅极和漏极间电压变化而迅速变化, 同时会影响栅极和源极电容的充电。

规格书上对上述三个电容的CV特性描述

由描述可见, 三个电容均会随着VDS电压的增加而呈现下降的趋势。

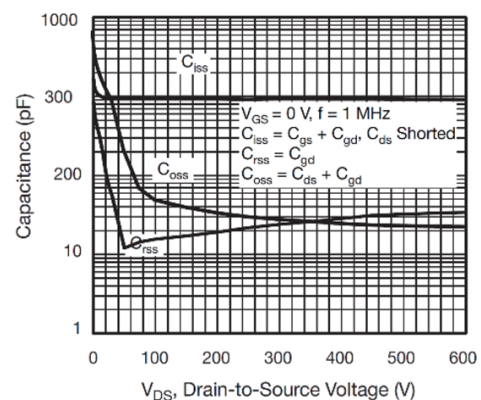


Fig. 5 - Typical Capacitance vs. Drain-to-Source Voltage

* 参数如有修改 恕不另行通知 以最新!

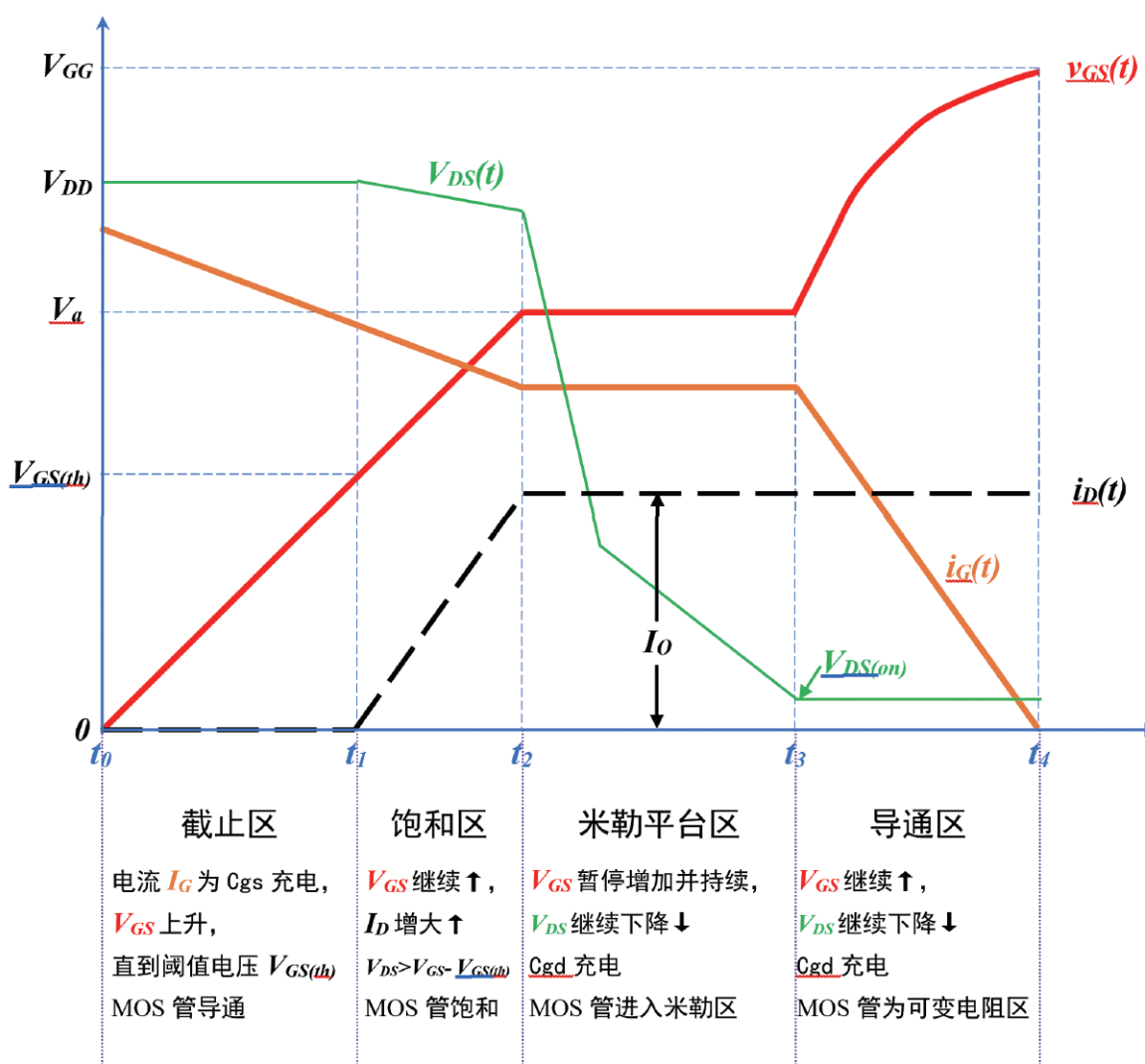
2. MOS管的米勒效应

理想的MOS管驱动波形应是方波，当 C_{gs} 达到门槛电压之后，MOS管就会进入饱和导通状态。

实际上在MOS管的栅极驱动过程中，由于米勒效应，会存在一个米勒平台。米勒平台实际上就是MOS管处于“放大区”的典型标志，所以导致开通损耗很大。



米勒平台形成的详细过程：



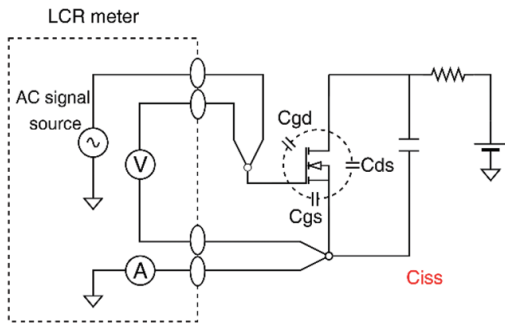
3. 寄生电容、CV特性、栅极电阻 R_g 测试技术

由前述知识可见，功率器件的寄生电容的测试，需要满足下列几点：

- ①由于寄生电容基本在pF级别至nF级别，测试频率至少需要100kHz-1MHz，这些可由参数表找到
- ②测试寄生电容时，用于测试的LCR或者阻抗分析仪至少需要2路直流电源，其中 V_{DS} 需要电压很高，由几十V至几百V，第三代半导体功率器件甚至需要几千V。
- ③参数表中CV特性曲线，需要可变的 V_{DS} ，因此DS电压源需要可调电源。

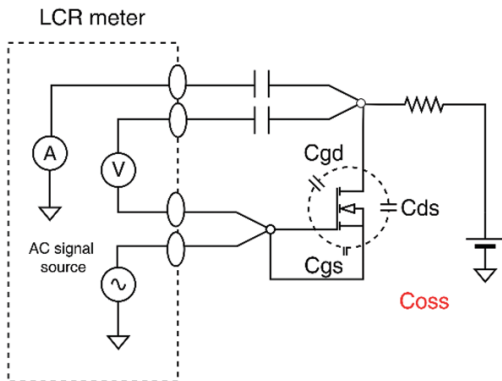
具体几个寄生电容极栅极电阻测试原理如下：

1) 输入电容Ciss



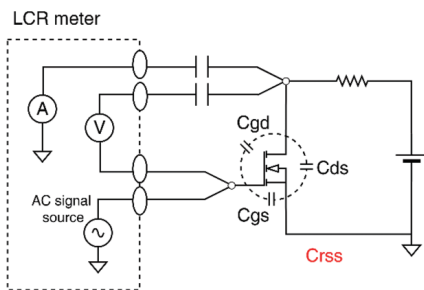
漏源（DS）短接，用交流信号测得的栅极和源极之间的电容
 $C_{iss} = C_{gs} + C_{gd}$

2) 输出电容Coss



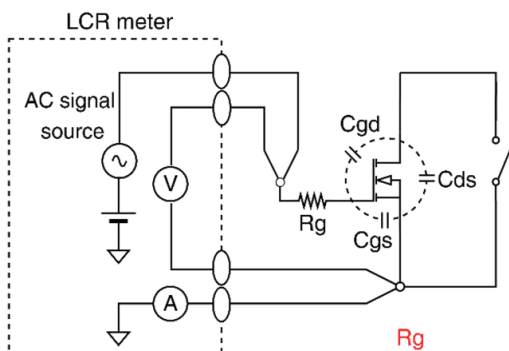
栅源GS短接，用交流信号测得的漏极和源极之间的电容
 $C_{oss} = C_{ds} + C_{gd}$

3) 反向传输电容Crss



源极G接地，用交流信号测得的栅漏GD极之间的电容，也称米勒电容
 $C_{rss} = C_{gd}$

4) 栅极电阻Rg



漏源DS短接，或开路，用交流信号测得栅源GS间交流电阻

三. 半导体功率器件CV特性测试痛点

现今，市场上功率器件CV特性测试仪器，普遍存在下列痛点：

1. 进口设备

进口设备功能全、一体化集成度高、测试准确，但是有如下缺点：

- 价格昂贵，动辄几十万甚至上百万的价格，一般企业很难承受。
- 操作繁琐，集成了太多功能加上大多英文化的操作界面，对于用户操作并不友好。
- 测试效率低，一台设备可能完成动态特性、静态特性的全部测试，但是接线复杂、操作难度大，测试结果用时较长，测试效率无法保障。

2. 国产设备

在进口设备无法满足用户测试需求的情况下，国产设备应运而生，以相对功能单一、操作方便、价格低廉快速占领了一部分市场，但是，这些设备同样也有如下缺点：

- 体积庞大，大多数国产设备，由于没有专业的电容测试经验，通常是用几台电源、一台LCR、工控机或者PLC、机箱、测试工装等组合而成，因此体积过大，无法适用于自动化产线快速生产。
- 漏源电压 V_{DS} 过低，大多最高只能达到1200V左右，已无法满足第三代半导体功率器件测试需求。
- 测量精度低，由于缺乏专业电容测量经验，加上过多的转接，导致电容特别是pF级别的小电容无法达到合适的测量精度。
- 测试效率低，同样由于组合仪器过多，加上需用工控机或PLC控制过多仪器，导致测试单个器件时间过长。
- 扩展性差，由于设备过多，各种仪器不同的编程协议，很难开放第三方接入以集成至客户产线自动化测试整体方案中。

四. 同惠半导体功率器件CV特性解决方案

针对当前测试痛点，同惠电子作为国产器件测量仪器头部企业，责无旁贷的担负起进口仪器国产化替代的责任，本着为客户所想、为客户分忧的精神，契合市场热点及需求，及时推出了针对半导体功率器件CV特性的一体化、系列化解决方案。

单管或者多个MOSFET、IGBT测试解决方案

单管器件或者多个单管器件测试相对简单，同惠提供了TH510系列半导体C-V特性分析仪即可满足基本测试要求。

TH510系列半导体C-V特性分析仪基本情况如下：



* 参数如有修改 恕不另行通知 以最新资料为准

基本参数

型号	TH511	TH512	TH513
测试频率	1kHz-2MHz		
通道	标配2通道, 可扩展4/6通道	标配2通道	
测试参数	Ciss、Coss、Crss、Rg (MOSFET) 或Cies、Coes、Cres、Rg (IGBT)		
测试方式	点测、列表扫描、图形扫描(选件)		
V _{GS} 范围	0-±40V		
V _{DS} 范围	0 - ±200V	0 - ±1500V	0 - ±3000V
分选	10档		
接口	RS232C、USB HOST、USB DEVICE、LAN、GPIB、HANDLER		
编程协议	SCPI、MODBUS		

特点

体积小:	L _{CR} +V _{GS} 电源+V _{DS} 电源+高低压切换开关+软件集成在一台仪器内部, 体积仅430mm(W)x177mm(H)x405mm(D)
集成度高:	无需上位机软件, 仪器本身即可测试4个参数及多种曲线
操作方便:	10.1寸触摸屏, Linux系统, 操作简单 提供标准工装, 直接插入器件即可测试
精度高:	以同惠30年阻抗测试基础, 全部转接开关内置, 开路/短路校准技术保证了电容和电阻测试精度和单一样
V _{DS} 高:	最高可达200V/1500V/3000V
通道多	标配2通道, 可扩展至6通道, 适合多个单管器件或模组器件测试
扩展性好:	提供RS232C、USB、LAN接口 SCPI协议 支持HANDLER接口交互 可方便集成与自动化产线或功率电子测试系统

应用场景

a) 实验室、产线工作台

对于实验室、产线工作台应用, 一台单机即可完成全部测试, 提供了标准化直插治具, 对于直插式MOSFET或IGBT器件, 直接插入治具即可进行测试; 同时可以测试最多6个单个器件。

优势如下:

- 体积小, 便于集成
- 测试精度高
- 测试速度快, 测试效率高
- 性价比高, 比国产系统更便宜
- 操作简单方便
- 功能可定制化

b) 产线自动化测试

针对产线自动化测试, 公司提供了2米延长线便于客户自己改装自动化产线工装改装, 仪器出厂前已校准好2米线测试数据, 保证只要按标准要求改装, 不会损失测试精度。

仪器已标配了HANDLER接口, 可自行编程每个信号线的输入输出电平及信号特征, 便于与自动化产线进行I/O信号交互。

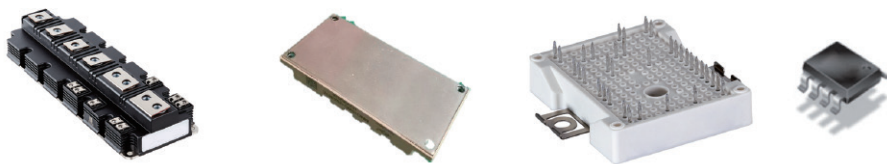
仪器内置了SCPI、MODBUS标准编程指令协议, 用户可自行编程集成到产线自动化测试系统中, 同惠也提供标准化上位机软件或定制特殊需求的上位机软件。

优势如下:

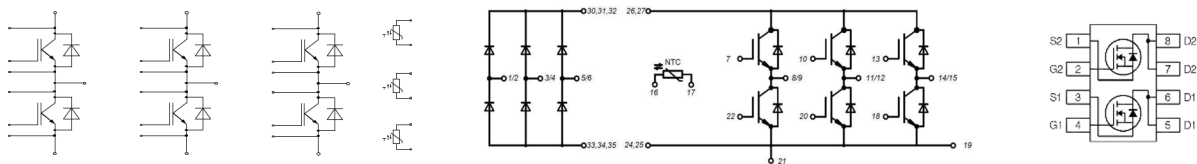
- 提供2米扩展延长线
- 测试精度高
- 测试速度快, 测试效率高
- 标配HANDLER接口
- 操作简单方便
- 功能可定制化

五. 多芯器件或模组MOSFET、IGBT测试方案

多芯器件、模组器件由于内部集成多个MOSFET、IGBT芯片，而且内部电路比较复杂，因此，测试相对复杂。



实物图



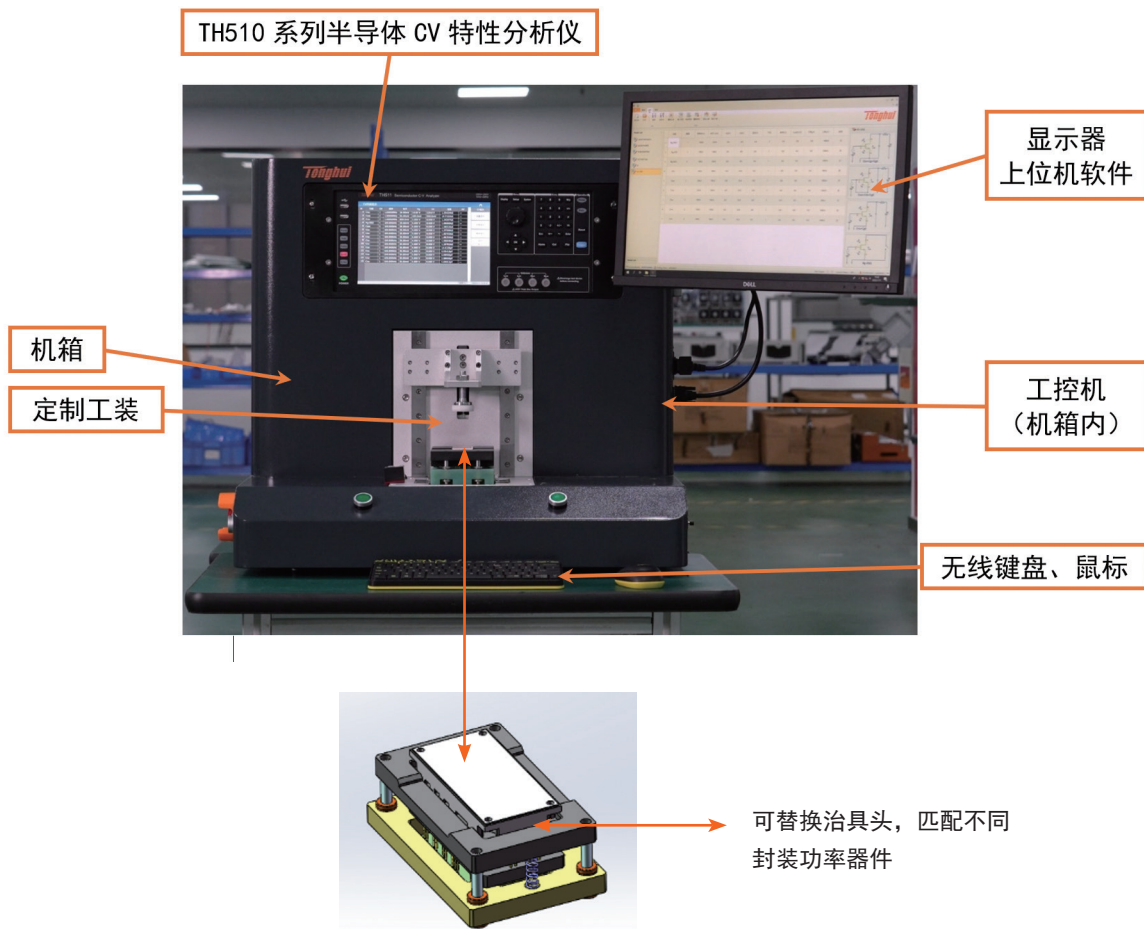
等效电路图（部分）

由上图可见，部分多芯器件、模组器件由于脚位众多、核心多、有贴片封装、异形封装等，如果用单机去测试，接线都很困难，而要完成整颗器件测试更是难上加难。

因此，同惠为此开发了针对模组式器件的测试系统

1) 系统结构

整套系统基于TH510系列半导体CV特性分析仪，加上定制工装、上位机软件等组成了一套完整的测试、数据分析系统。



3) 整套测试系统配置清单

清单可根据不同需求定制

序号	设备名称	型 号	单位	数量	备注
1	半导体CV特性分析仪	TH511	台	1	可根据DS电压选择不同型号
2	工控机	研华610	套	1	含无线键盘、鼠标
3	操作台	----	台		
4	测试治具		套	1	定制
5	系统机柜	TH301	套		
6	扫码枪	基恩士SR700	台	1	可根据需求选择
7	系统软件		套	1	定制

联系方式

常州同惠电子股份有限公司 ☎ 400-624-1118

地址：江苏省常州市新北区新竹路 1 号
电话：00-86-519-89888931
手机：15851963021(王先生)
<http://www.tonghui.com.cn>
Email: sales@tonghui.com.cn



微信公众号

* 参数如有修改 恕不另行通知 以最新资料为准

附录

TH510系列半导体CV特性分析系统



性能特点

- 一体化设计：
LCR+V_{GS}低压源+V_{DS}高压源+通道切换+上位机软件
- 单管器件（点测）、模组器件（列表扫描）、曲线扫描(选件)
三种测试方式
- 四寄生参数(Ciss、Coss、Crss、Rg或Cies、Coes、Cres、Rg)
同屏一键测量及显示
- 标配2通道，可扩展至6通道，可测单管、多芯或模组器件
- CV曲线扫描、Ciss-Rg曲线扫描
- 电容快速充电技术，实现快速测试
- 接触检查Cont
- 通断测试OP_SH
- 自动延时设置
- 栅极电压V_{GS}：0 - ±40V
- 漏极电压V_{DS}：0 - ±200V/±1500V/±3000V
- 10档分选

技术参数

产品型号		TH511	TH512	TH513
通道数		2（可选配4/6通道）		1
显示	显示器	10.1英寸(对角线)电容触摸屏		
	比例	16:9		
	分辨率	1280×RGB×800		
测量参数		Ciss、Coss、Crss、Rg，四参数任意选择		
测试频率	范围	1kHz-2MHz		
	精度	0.01%		
	分辨率	10mHz	1.00000kHz-9.99999kHz	
		100mHz	10.0000kHz-99.9999kHz	
		1Hz	100.000kHz-999.999kHz	
		10Hz	1.00000MHz-2.00000MHz	
测试电平	电压范围	5mVrms-2Vrms		
	准确度	±（10%×设定值+2mV）		
	分辨率	1mVrms	5mVrms-1Vrms	
		10mVrms	1Vrms-2Vrms	
V _{GS} 电压	范围	0 - ±40V		
	准确度	1%×设定电压+8mV		
	分辨率	1mV	0V - ±10V	
		10mV	±10V - ±40V	
V _{DS} 电压	范围	0 - ±200V	0 - ±1500V	0 - ±3000V
	准确度	1%×设定电压+100mV		
输出阻抗		100Ω，±2%@1kHz		
数学运算		与标称值的绝对偏差Δ，与标称值的百分比偏差Δ%		
校准功能		开路OPEN、短路SHORT、负载LOAD、夹具校准		

* 参数如有修改 恕不另行通知 以最新资料为准

测量平均		1-255次
AD转换时间（ms/次）		快速+：0.56ms(> 5kHz) 快速：3.3ms 中速：90ms 慢速：220ms
最高准确度		0.5%（具体参考说明书）
Ciss、Coss、Crss		0.00001pF - 9.99999F
Rg		0.001mΩ - 99.9999MΩ
Δ%		±（0.000% - 999.9%）
多功能参数列表扫描	点数	50点，每个点可设置平均数，每个点可单独分选
	参数	测试频率、Vg、Vd、通道
	触发模式	顺序SEQ：当一次触发后，在所有扫描点测量，/EOM/INDEX只输出一 次 步进STEP：每次触发执行一个扫描点测量，每点均输出/EOM/INDEX，但列表扫描比较器结果只在最后的/EOM才输出
图形扫描	扫描点数	任意点可选，最多1001点
	结果显示	同一参数、不同Vg的多条曲线；同一Vg、不同参数多条曲线
	显示范围	实时自动、锁定
	坐标标尺	对数、线性
	扫描参数	Vg、Vd
	触发方式	手动触发一次，从起点到终点一次扫描完成，下个触发信号启动新一次扫描
	结果保存	图形、文件
比较器	Bin分档	10Bin、PASS、FAIL
	Bin偏差设置	偏差值、百分偏差值、关
	Bin模式	容差
	Bin计数	0-99999
	档判别	每档最多可设置四个参数极限范围，四个测试参数结果设档范围内显示对应档号，超出设定最大档号范围则显示FAIL，未设置上下限的测试参数自动忽略档判别
	PASS/FAIL指示	满足Bin1-10,前面板PASS灯亮，否则FAIL灯量
存储调用	内部	约100M非易失存储器测试设定文件
	外置USB	测试设定文件、截屏图形、记录文件
键盘锁定		可锁定前面板按键，其他功能待扩充
接口	USB HOST	2个USB HOST接口，可同时接鼠标、键盘，U盘同时只能使用一个
	USB DEVICE	通用串行总线插座，小型B类（4个接触位置）；与USB TMC-USB488和USB2.0相符合，阴接头用于连接外部控制器。
	LAN	10/100M以太网，8引脚，两种速度选择
	HANDLER	用于Bin分档信号输出
	RS232C	标准9针，交叉
	RS485	标准差分线
	GPIOB	24针D-Sub端口（D-24 类），阴接头与IEEE488.1、2和SCPI兼容
开机预热时间		60分钟
输入电压		100-120VAC/198-242VAC可选择，47-63Hz
功耗		不小于130VA
尺寸（WxHxD）mm		430x177x405
重量		16kg