



半导体材料与器件科学云讲堂

——宽禁带半导体（GaN/SiC）材料及器件测试

主讲人：朱杰昕 ——泰克华东区现场应用工程师

2020/7/17

半导体材料与器件科学云讲堂

- ✓ 专业测试平台
- ✓ 六大类测试流程
- ✓ 剖析、解决半导体新问题



关注“泰克科技”公众号



每月2期专题直播，等您解锁！

直播日程

第一季 直播课程 (4~6月)

- 纳米材料及纳米电子器件IV和CV测试 4月29日
- 二维材料/石墨烯及其电子器件IV和CV测试 5月15日
- 量子材料及超导材料电输运物性表征测试 5月29日
- 超快脉冲在先进的NVM测试中的应用及神经元网络测试前瞻 6月

番外篇一

测试技巧：半导体参数测试仪使用技巧及案例集锦 7月3日

第二季 直播课程 (7~9月)

- 宽禁带半导体 (GaN/SiC) 材料及器件测试 7月17日
- 功率IGBT器件测试系统及自动化简介 7月31日
- 微机电系统MEMS测试概述 8月14日
- MOSFET的准静态CV/超低频CV测试 8月28日
- 半导体器件可靠性HCI/NBTI测试 9月11日
- 快速上手自动化半导体参数测试系统 9月25日



预约泰克线下实验室



泰克高速串行实验室预约

实验室设备涵盖各系列高速示波器、误码仪、源表、电源功率分析仪及各种配套探头和测试专用夹具。支持各种工业应用标准及高速接口测试环境。



北京



上海



深圳



西安



成都

泰克电源实验室预约

实验室具备数十台测试仪器组成的电源设计全流程测试方案，功率器件选择，查找主要损耗点，优化效率及电源标准预认证。另外实验室里还有GaN, SiC评估板供您体验！



北京



上海



深圳





宽禁带半导体 (GaN/SiC) 材料及器件测试

朱杰昕

Field Application Engineer



议程

- 什么是宽禁带半导体功率器件？
- 材料级——材料阻抗分析
 - 低电平测量挑战
 - 材料自热效应对测试的挑战
 - 半导体材料的霍尔效应
- 器件级特性——静态参数分析
 - 高压3kV，高流100A高精度源表
 - 从Lab到Fab的以源表为硬件构成的完整静态参数测试系统
 - 超高精度电流输出精度40fA，电流测量精度10fA，电压测量精度80uV
- 应用层测试——动态参数分析
 - 示波器+双脉冲信号源+光隔离探头组成的双脉冲测量方案
 - 器件动态参数的一键式配置和结果显示
- 答疑环节

什么是宽禁带半导体功率器件

- 宽禁带半导体是什么？
- 宽禁带半导体的趋势和带来的好处？
- 双脉冲测试的待测件是什么？

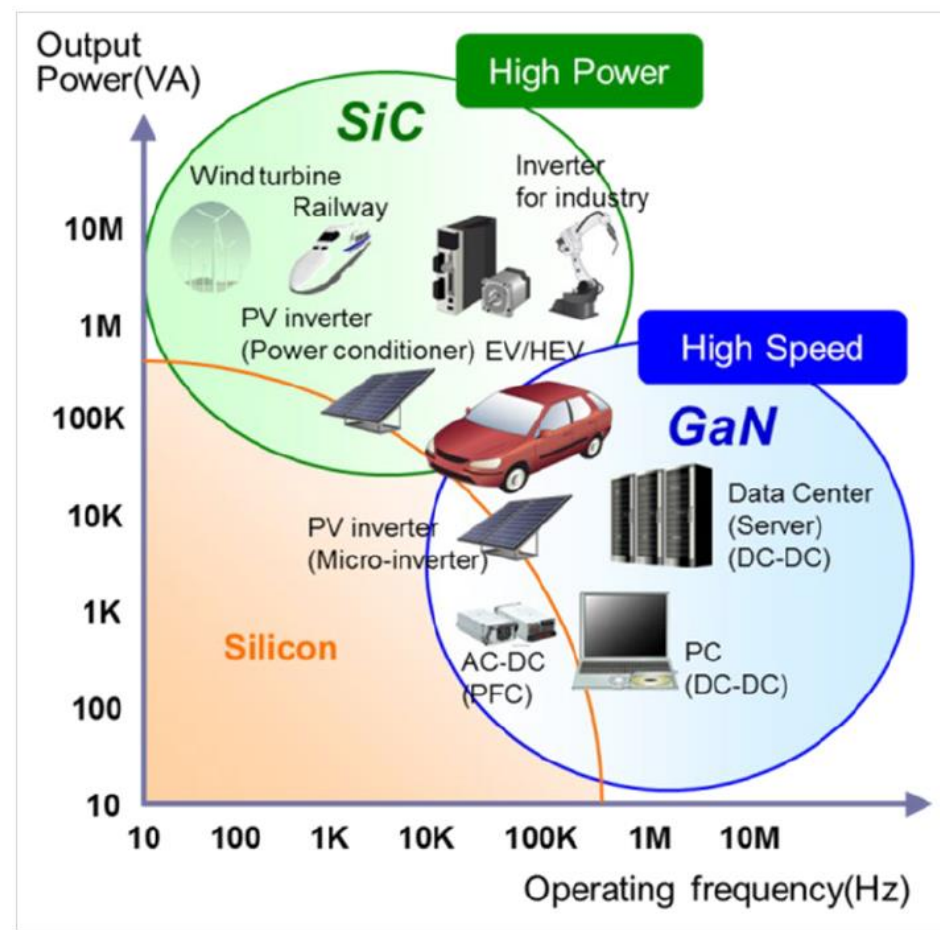
什么是“宽禁带半导体”——第三代半导体

第一代半导体：元素半导体（硅、锗）

第二代半导体：化合物半导体（砷化镓，磷化铟）

- 宽禁带半导体材料是指禁带宽度在 3.0eV 及以上的半导体材料，典型的是碳化硅(SiC)、氮化镓(GaN)、金刚石等材料。宽禁带半导体材料被称为第三代半导体材料。

材料	禁带宽度/ eV	电子迁移率/ $\text{cm}^2\cdot\text{V}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$	介电常数	饱和速率/ $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$
Si	1.119	1350	11.9	1×10^7
GaAs	1.428	8000	13.18	2×10^7
SiC	2.994	1000	9.7	2×10^7
金刚石	5.5	2200	5.5	2.5×10^7
GaN	3.36	900	8.9	2.5×10^7



宽禁带半导体优势四个字

四高一抗

- 高功率
- 高温
- 高效率
- 高频率
- 抗辐射

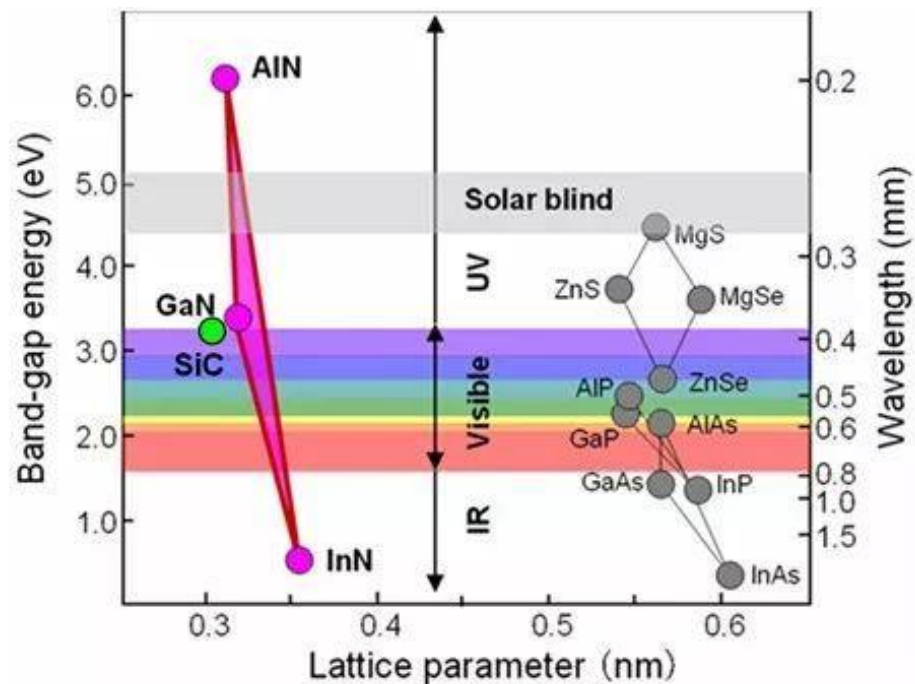


图 主要半导体材料的禁带宽度与吸收边波长

GaN's Benefit

EFFICIENCY

POWER DENSITY

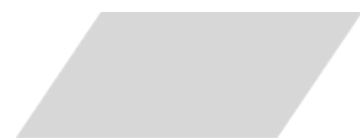
Reliability

Stability

Cost

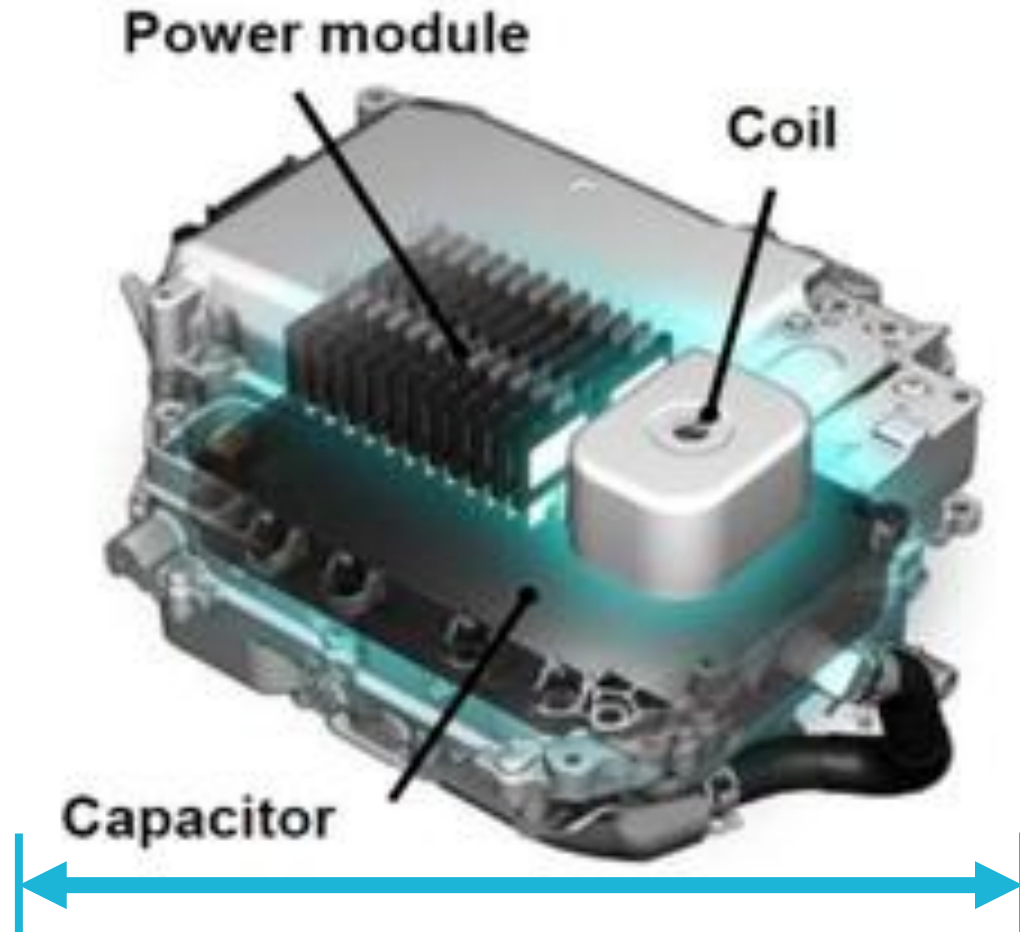
Weight

SIZE



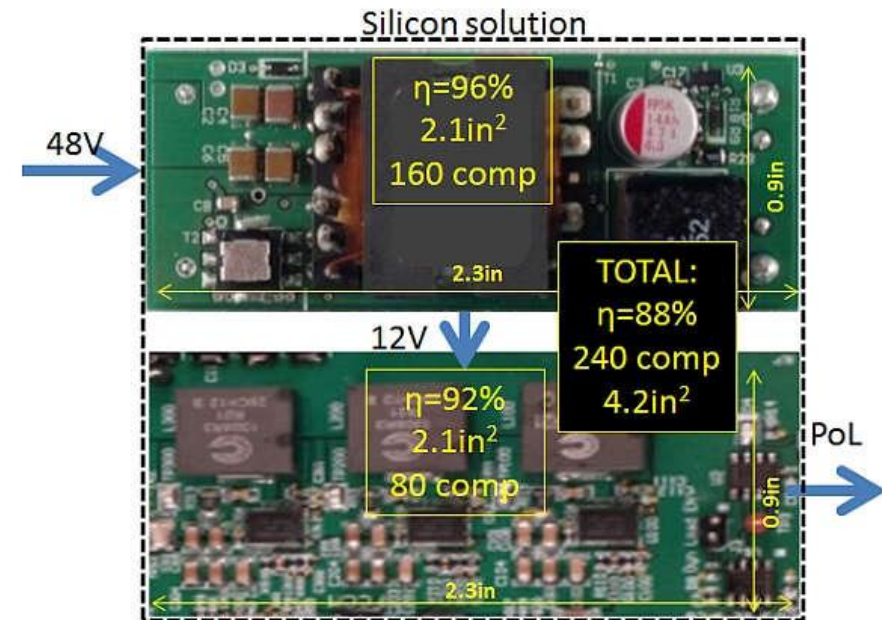
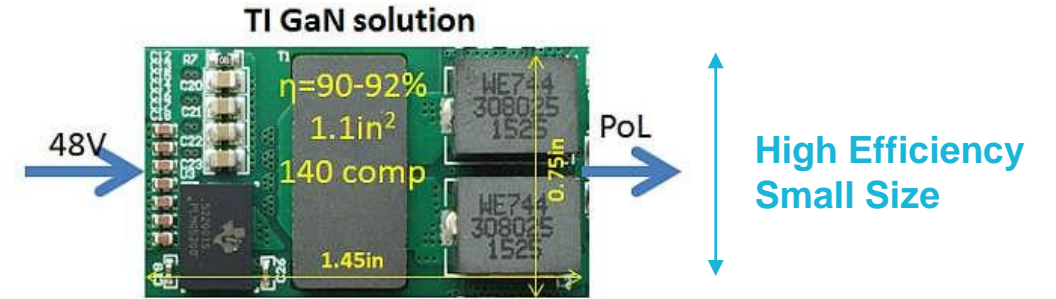
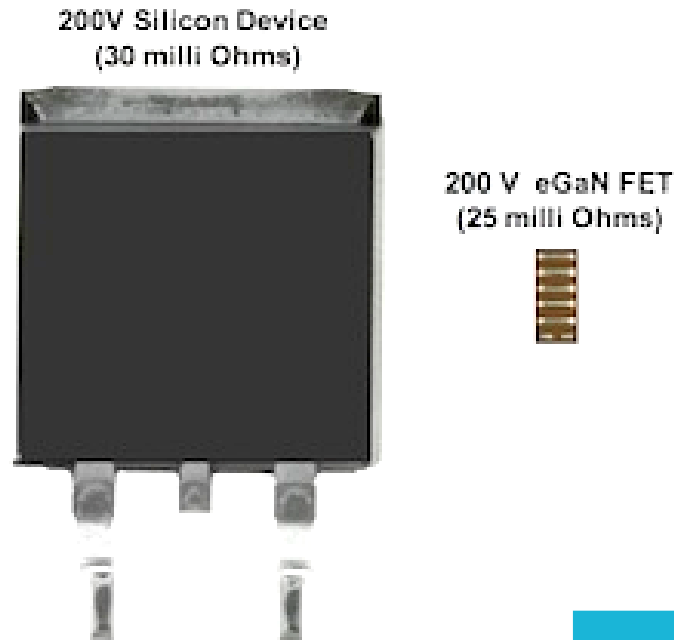
ONE
TEAM

Eg1 - Size and Power Density



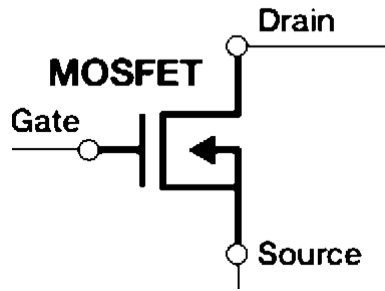
Shrink
80%
@
High Efficiency

Eg2 - Wide Band Gap enables high Power Density

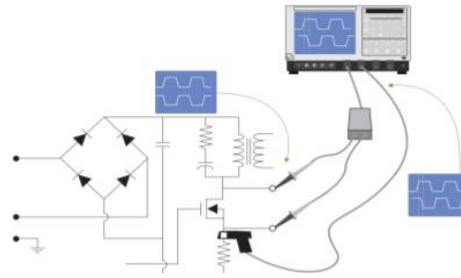


High Switching Frequency =
Small parts (Capacitor and Inductors)

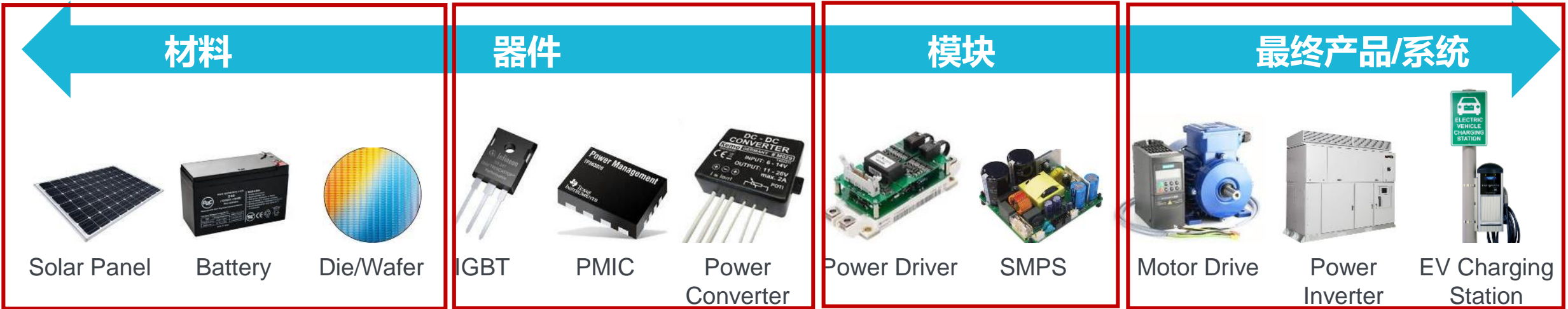
产品从前沿研发到最终生产的流程概述



宽禁带半导体器件
(SiC, GaN)



AC-DC 开关电源



Sensitive Apps Static Dynamic Product Level

材料级——材料阻抗分析

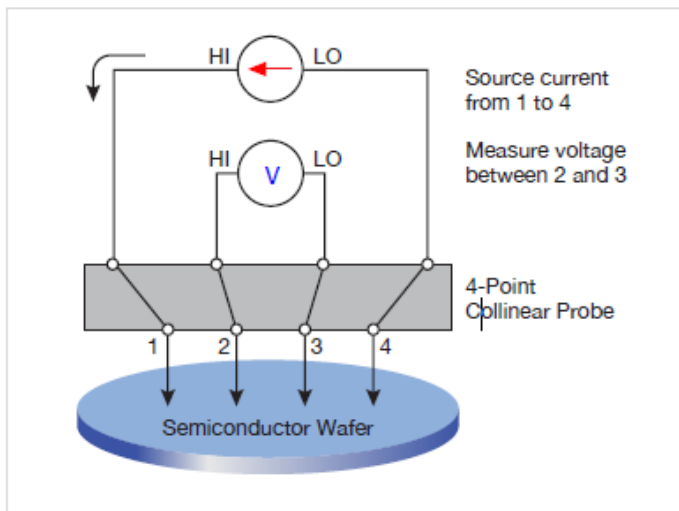
- 低电平测量挑战
- 材料自热效应对测试的挑战
- 半导体材料的霍尔效应

材料的电学性能测试

材料电阻率测试

- 四探针法

- The Four-Point Collinear Probe Method

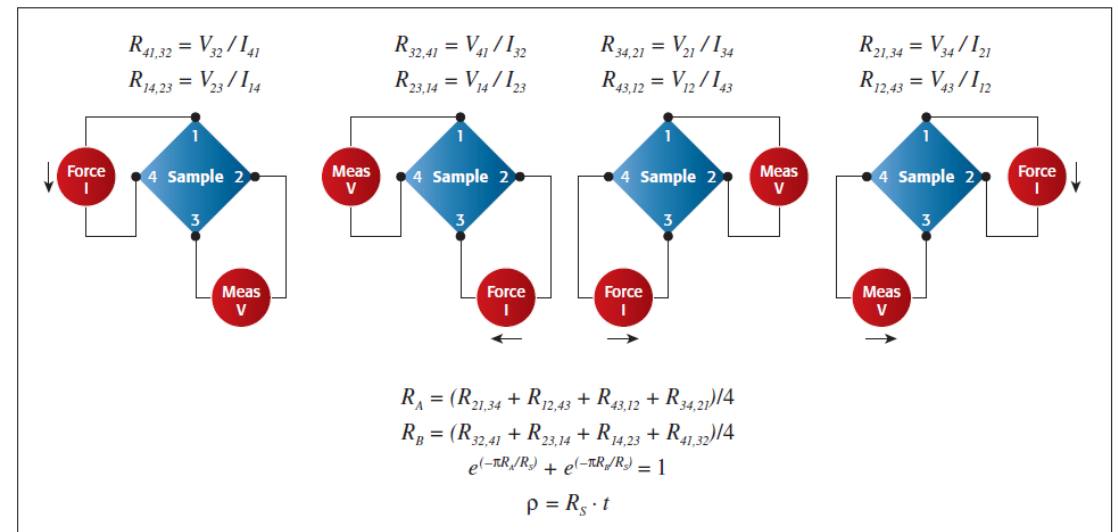


$$\rho = \frac{\pi}{\ln 2} \times \frac{V}{I} \times t \times k \quad \sigma = \frac{\pi}{\ln 2} \frac{V}{I} k = 4.532 \frac{V}{I} k$$

- 电阻率电导率是评价材料导电性能的基本参数

- 范德堡法

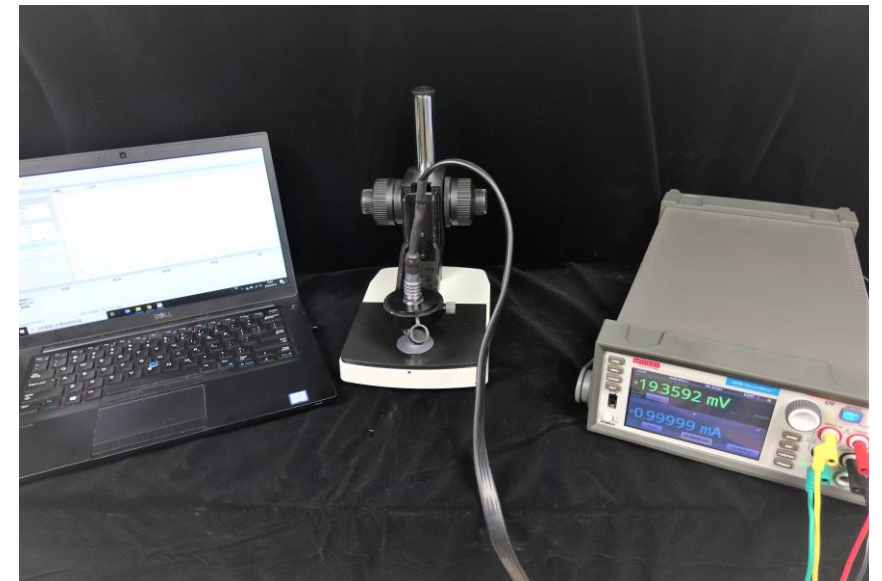
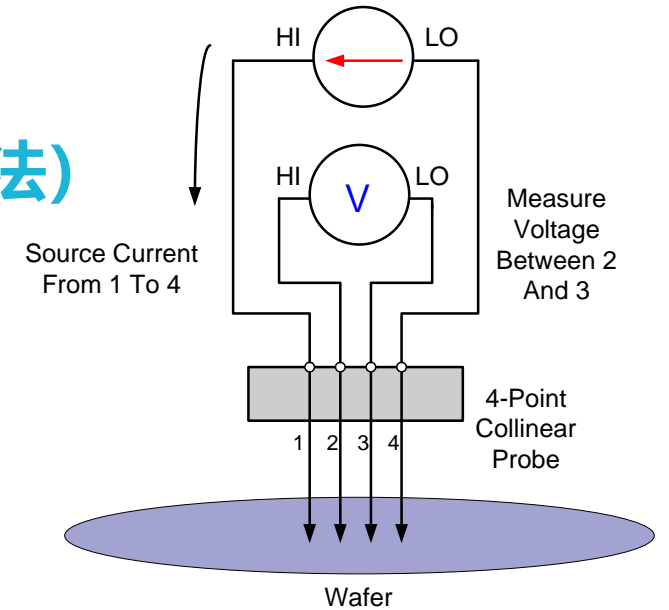
- The van der Pauw method



源表典型应用：薄膜材料电阻率测试

FOUR-POINT RESISTIVITY MEASUREMENTS (四探针法)

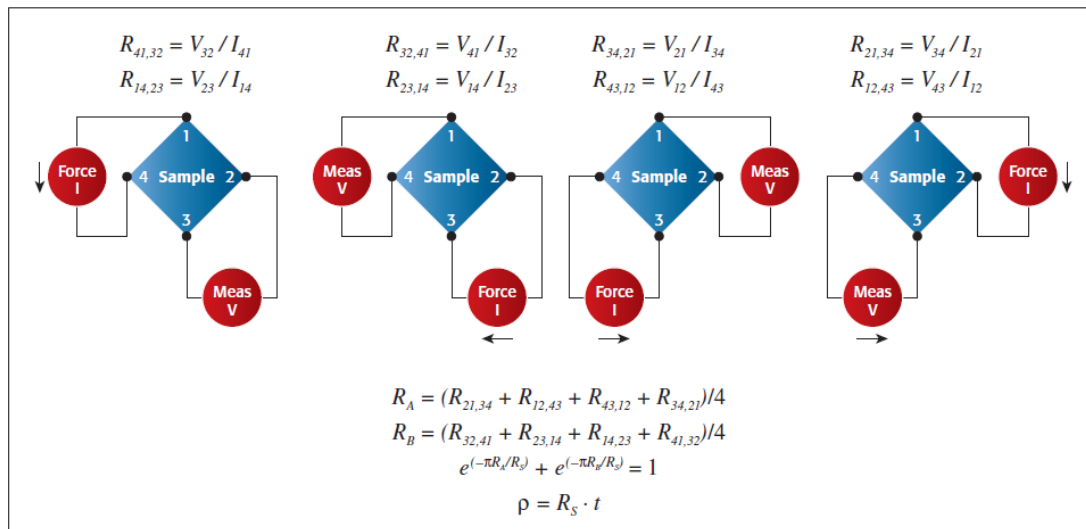
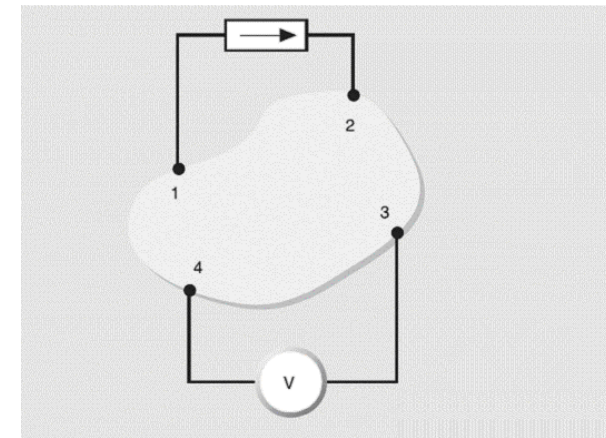
- 对于规则圆形的薄膜材料，电阻率测试比较方便的方法是四探针法
- 要求
 - 四点共线
 - 四根针等间距
 - 材料长度和宽度远大于探针间距



源表典型应用：薄膜材料电阻率测试

THE VAN DER PAUW METHOD-范德堡法电阻率测试（不规则形状的样片）

- 四探针技术要求样品为薄膜样品或块状，范德堡法为更通用的四探针测量技术，对样品形状没有要求，且不需要测量样品所有尺寸，但需满足以下四个条件
 - 样品必须具有均匀厚度的扁平形状。
 - 样品不能有任何隔离的孔。
 - 样品必须是均质和各向同性的。
 - 所有四个触点必须位于样品的边缘。

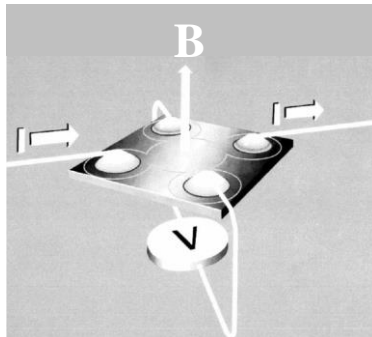


材料霍尔效应测试

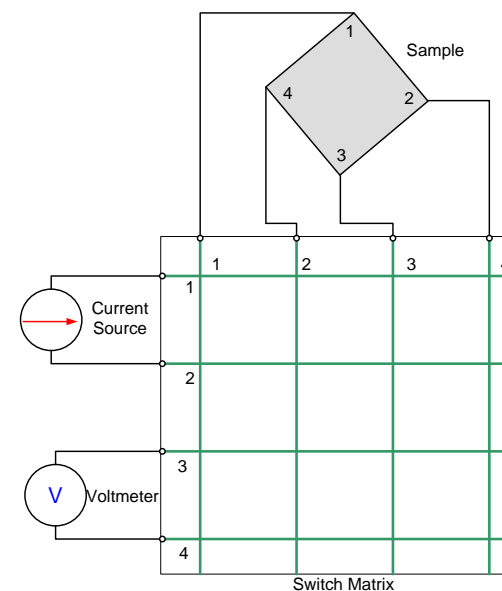
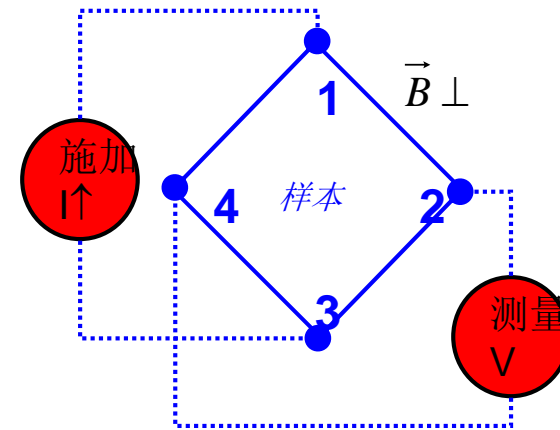
霍尔迁移率

- 首先测量霍尔电压 V_H
 - 施加磁场 B
 - 提供电流 I
 - 测量 V_H
 - t 是样本厚度
- 然后测量电阻率 r
 - 使用范德堡技术
- 然后计算霍尔迁移率 m_H :

- 自动霍尔测试系统的实现：
 - 使用源表 + 矩阵开关插卡

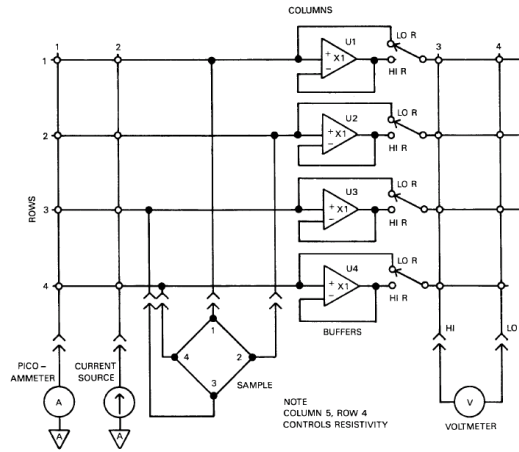


$$\mu_H = \frac{|V_H t|}{BI\rho}$$

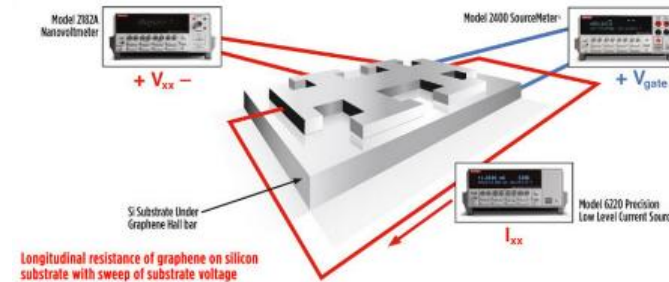
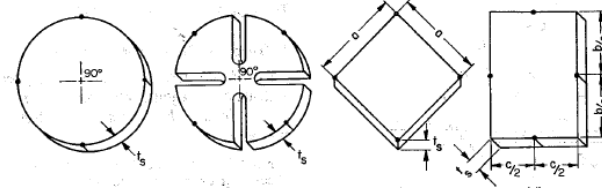


吉时利半导体材料霍尔效应测试方案

OUR UNIQUE HALL EFFECT SWITCHING CARD FOR TESTING MATERIALS WITH A WIDE RANGES OF RESISTANCES



• ASTM Standard

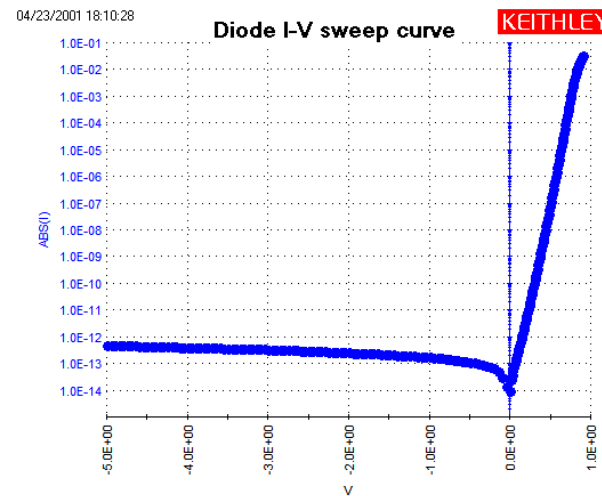
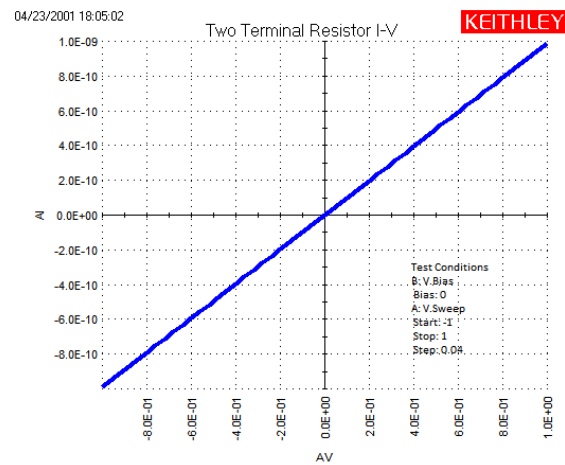
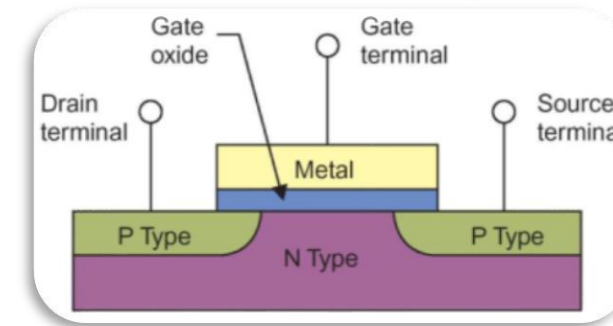
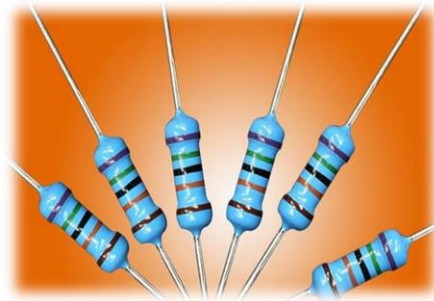


器件级特性——静态参数分析

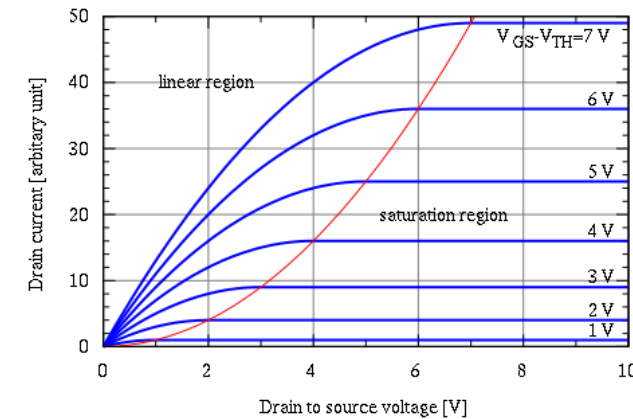
- 高压3kV，高流100A高精度源表
- 从Lab到Fab的以源表为硬件构成的完整静态参数测试系统
- 超高精度电流输出精度40fA，电流测量精度10fA，电压测量精度80uV

直流 (DC) I-V特性测量：精准测量

DC I-V 测量是器件及材料特性测量的最基本测试手段



*1(+9.00E+1, +3.50E-2, 92)



元器件测量的好帮手——源表

源测量单元 SOURCE MEASURE UNIT (SMU)

- 电压和电流：源和测量功能。即：电压源、电流源、电压表、电流表
- 电子负载



Precision DMM



True Current Source

Source Measure Unit (SMU)



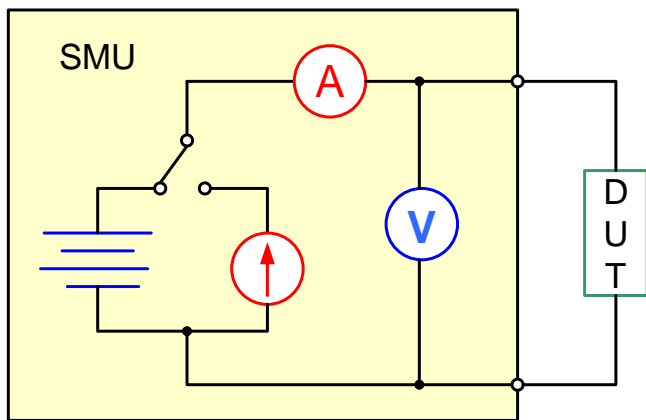
Precision Power Supply



Electronic Load

什么是源表?

源表的电路拓扑和四象限特性



SMU
4象限 - 源端和接收端

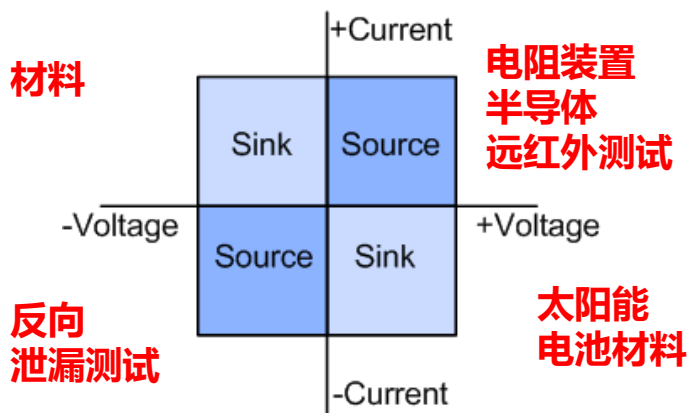
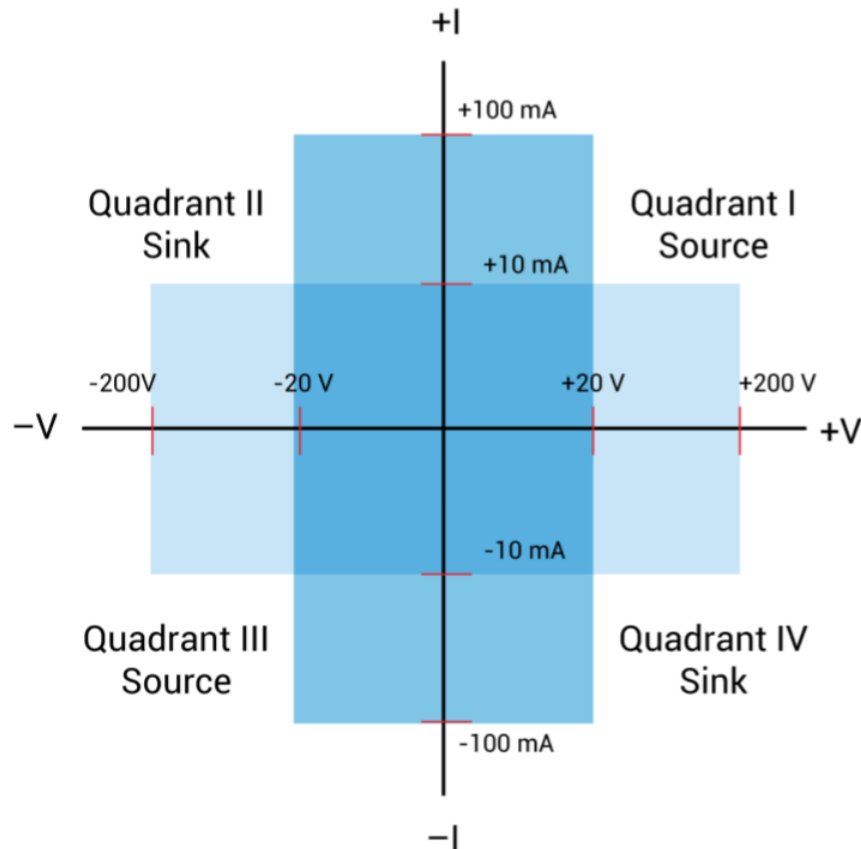


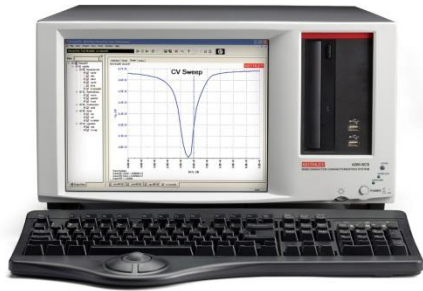
Figure 31: 4200-SMU and 4200-PA operating boundaries



吉时利半导体测试解决方案

FROM LAB TO FAB

4200-SCS



半导体测试系统，
集成PC 及测试软
件，工作站式测试

Parametric Curve Tracer



高功率，可灵活配
置及组合的参数曲
线追踪仪；集成功
能强大的测试软件

S530, S500 & ACS



自动化半导体测
试设备；面向半
导体器件级特性
分析的参数测试
系统及软件

Model 4200A-SCS参数分析仪

中等功率SMU

210 V, 100 mA, 10fA最小电流,
100 aA分辨率

高功率SMU

210 V, 1 A, 10fA最
小电流, 100 aA分
辨率

脉冲测量单元

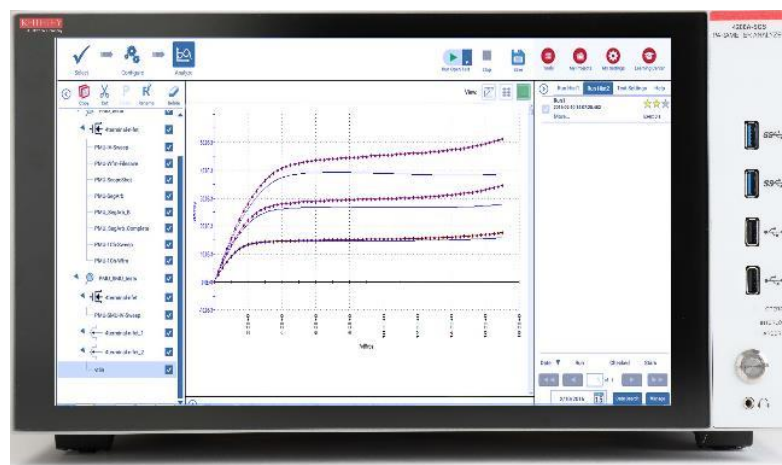
- 超快速I-V
- 示波器视图
- 波形生成
- 脉冲和测量

多频率C-V测量单元

1 kHz – 10 MHz

应用测试

超过450项应用测
试, 而且数量在
不断增长



切换开关

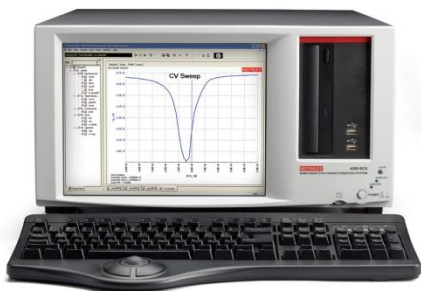
- 4225-RPM切换开关
- 707B/708B开关矩阵

脉冲发生器和示波器卡

吉时利半导体测试解决方案

FROM LAB TO FAB

4200-SCS



半导体测试系统，
集成PC 及测试软件，
工作站式测试

Parametric Curve Tracer



高功率，可灵活配置
及组合的参数曲线
追踪仪；集成功
能强大的测试软件

S530, S500 & ACS



自动化半导体测试
设备；面向半
导体器件级特性
分析的参数测试
系统及软件

功率半导体器件的主要特性

几种功率器件的典型特征参数

650 V IGBT HB series



Characterization	Test Category	Devices and Parameters		
		IGBT	Power MOSFET	GTR
Static	ON-state	V_{CE-I_C} V_{GE-I_C}	V_{DS-I_D} V_{TH} V_{GS-I_D} $R_{DS(on)}$	V_{CE-I_C} Gummel plot
	OFF-state	I_{CEO} I_{CES} BV_{CES} BV_{CEO} BV_{CBS}	I_{GSS} I_{DSS} BV_{DSS} BV_{DG}	I_{CEO} I_{CES} BV_{CES} BV_{CEO}
Dynamic	Charge	Q_G	Q_G	
	Capacitance	C_{iss} (a.k.a. C_{ies}) C_{oss} (a.k.a. C_{oes}) C_{rss} (a.k.a. C_{res})	C_{iss} (a.k.a. C_{ies}) C_{oss} (a.k.a. C_{oes}) C_{rss} (a.k.a. C_{res})	NA
Switching	Timing	$T_{d(on)}$ T_r $T_{d(off)}$ T_f	$T_{d(on)}$ T_r $T_{d(off)}$ T_f	T_s T_f

静态特性 (Static Characterization) 测试简便，表征器件本身直流特性

Series 2600B和2650A SMUs

Model 2636B SMU

- 两个独立的SMU通道
- 高达200V
- 高达10A脉冲
- 0.1fA测量分辨率



Model 2651A SMU

- 高达50A脉冲(两台仪器高达100A)
- 高达2000W脉冲 / 200 W DC电源
- 100us ~ DC脉冲宽度
- 配备高速度及积分ADCs



Model 2657A SMU

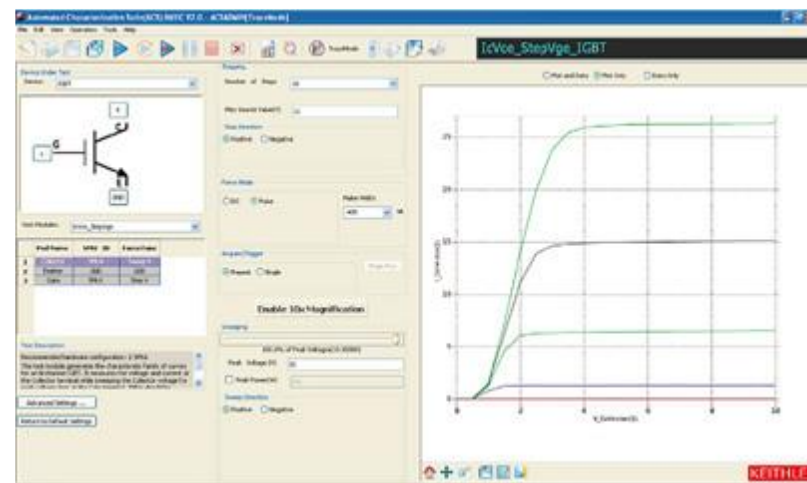
- 高达3000V, 高达180W功率
- 四象限操作 (源端和电子负载)
- 1fA测量分辨率
- 配备高速度及积分ADCs

参数曲线跟踪仪

器件参数验证

• 功率器件解决方案

- 完善的解决方案，包括SMU仪器、电缆、测试夹具、软件、测试程序库和样本器件
- 测试管理软件包括实时绘图的跟踪模式及提取参数的参数模式
- 提供了宽动态范围：
 - 从 μV 到3kV
 - 从fA到100A
- 灵活的可重新配置的系统，满足不断变化的功率测试要求



跟踪模式捕获IGBT器件的输出特点

Model 8010和Model 8020测试夹具

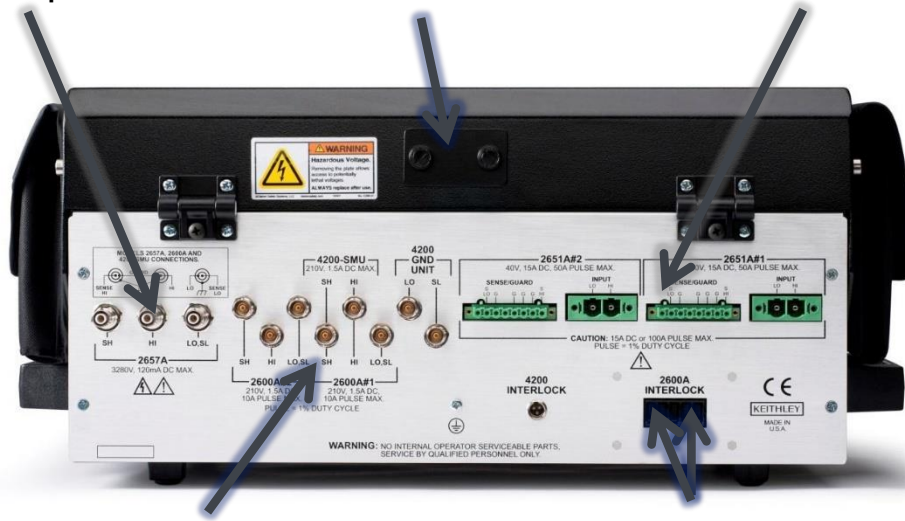
满足器件级和晶圆级的连接和测试



连接一台Model 2657A, 执行3kV和低电流(pA)测试

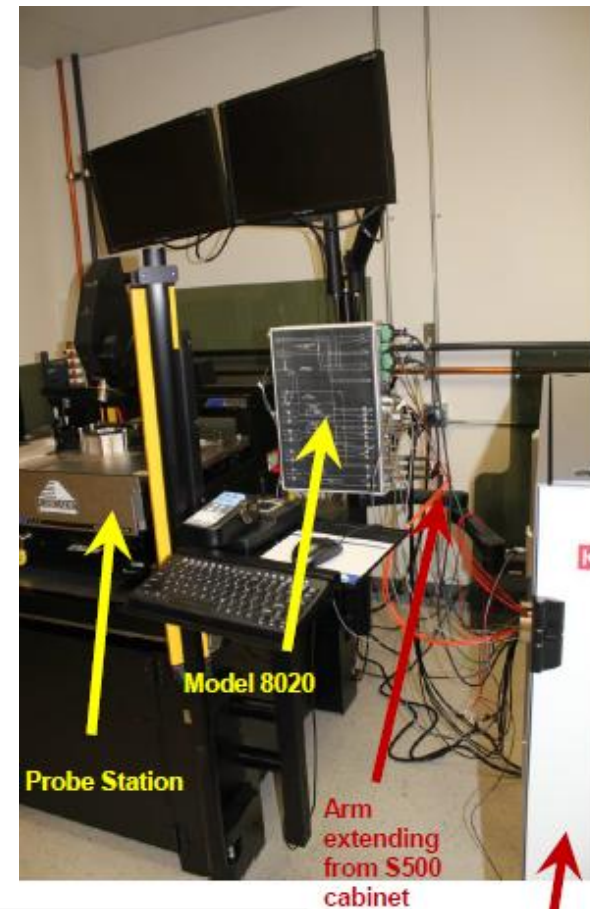
接入端口, 传送外部仪器(示波器探头, 热电偶)信号

并连两台Model 2651A, 执行100A脉冲式测试



连接最多两台Model 2636B或Model 4200 SMU, 执行200V和低电流(pA)测试

连接SMU互锁。在打开测试夹具中禁用SMU的高压输出

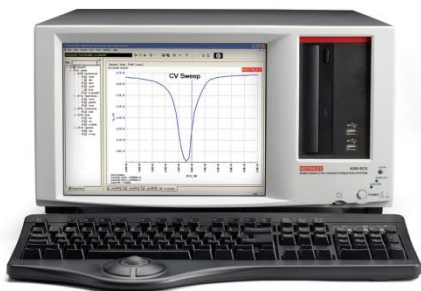


1. 方便了高功率仪器(如PCT)与高功率探针台的连接: 丰富且标准的接口使晶圆级别功率半导体测试成为现实
2. 使高压 C-V 测试更方便的接口转换面板: 避免了 DC - IV, AC - CV换线的烦恼

吉时利半导体测试解决方案

FROM LAB TO FAB

4200-SCS



半导体测试系统，
集成PC 及测试软件，
工作站式测试

Parametric Curve Tracer



高功率，可灵活配置
及组合的参数曲线追踪仪；
集成功能强大的测试软件

S530, S500 & ACS



自动化半导体测试设备；
面向半导体器件级特性
分析的参数测试系统及软件



S530及S500系统

自动测试解决方案

软件

硬件



S530 Parametric Test System

配置标准化的测试系统



S500 Integrated Test System

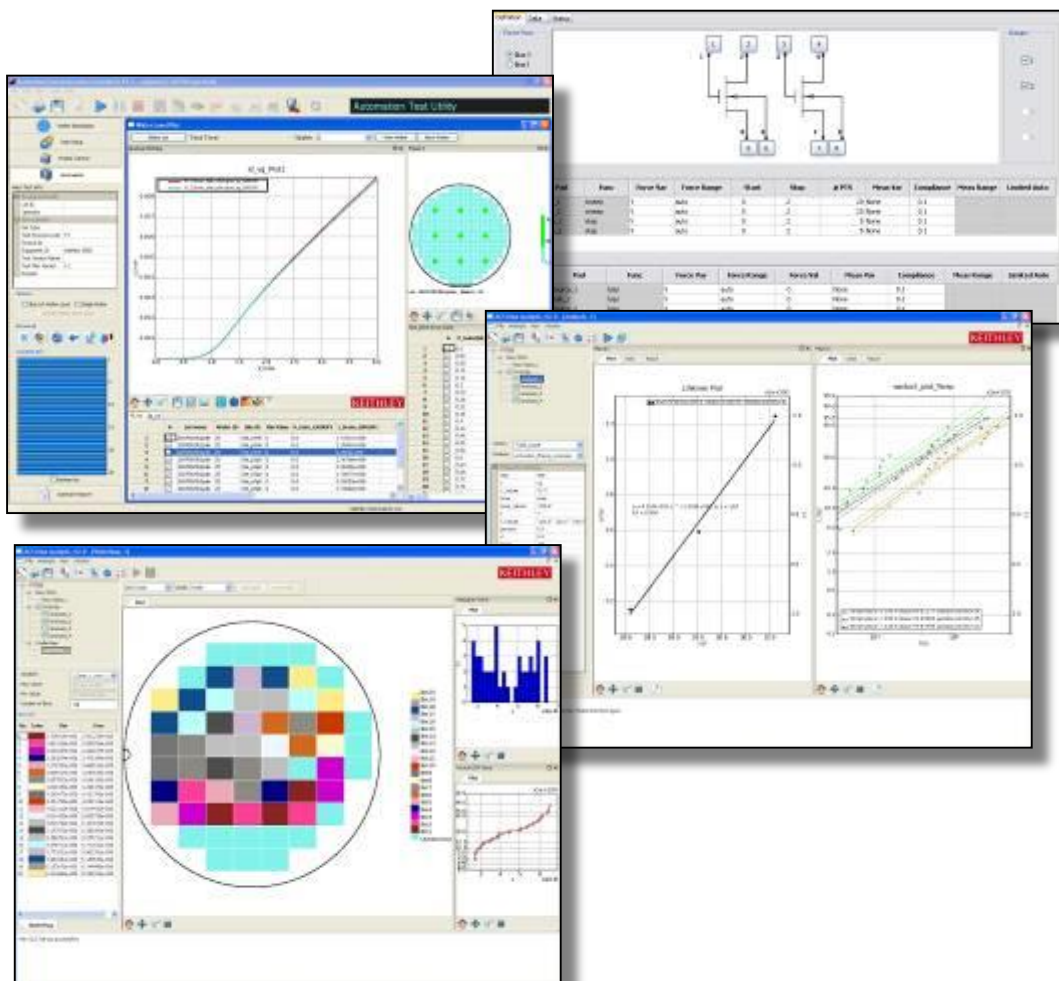
可根据实际情测试需求定制硬件及特殊测试程序



Instruments

WLR (Wafer Level Reliability)

ACS软件控制下的测试系统



- 可以扩充为真正的并行测试
- Lot级别或Wafer级别批次作业
- 完整原始数据本地记录及上传功能
- 数据处理及分析功能

应用层测试——动态参数分析

- 示波器+双脉冲信号源+光隔离探头组成的双脉冲测量方案
- 器件动态参数的一键式配置和结果显示

6. Specifications

6.1. Absolute Maximum Ratings⁽¹⁾

(with respect to Source (pad) unless noted)

SYMBOL	PARAMETER	MAX	UNITS
V_{DS}	Drain-to-Source Voltage	-7 to +650	V
V_{TDS}	Transient Drain-to-Source Voltage ⁽²⁾	750	V
V_{CC}	Supply Voltage	30	V
V_{PWM}	PWM Input Pin Voltage	-3 to +30	V
V_{DZ}	V_{DD} Setting Pin Voltage	6.6	V
V_{DD}	Drive Supply Voltage		V
I_D	Continuous Drain Current (@ $T_C = 100^\circ\text{C}$)	12	A
$I_{D\ PULSE}$	Pulsed Drain Current (10 μs @ $T_J = 25^\circ\text{C}$)	24	A
$I_{D\ PULSE}$	Pulsed Drain Current (10 μs @ $T_J = 125^\circ\text{C}$)	16	A
dV/dt	Slew Rate on Drain-to-Source	200	V/ns
T_J	Operating Junction Temperature	-55 to 150	$^\circ\text{C}$
T_{STOR}	Storage Temperature	-55 to 150	$^\circ\text{C}$

That's one of the reasons.

双脉冲测试 Double Pulse Test

- **双脉冲测试是什么？**

- 为了评估功率器件的动态参数，通常采取的测量方法是**双脉冲测试**。那是双脉冲测试呢？顾名思义，是通过两个脉冲，去控制器件的开关，然后测试在开关过程中的一些参数指标。

- **双脉冲测试测什么？**

- 启动参数，关断参数
 - Ton Loss, Toff Loss, dV/dt, dV/dt peak, dI/dt, dI/dt peak
 - Rise Time, Fall Time, td(on), td(off)
- 反向恢复参数
 - Err (Recovery Loss) , Qrr, Trr, Irr

- **为什么要做双脉冲测试，意义何在？**

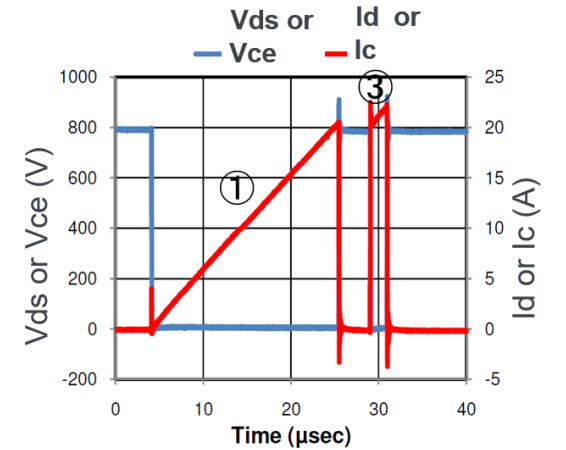
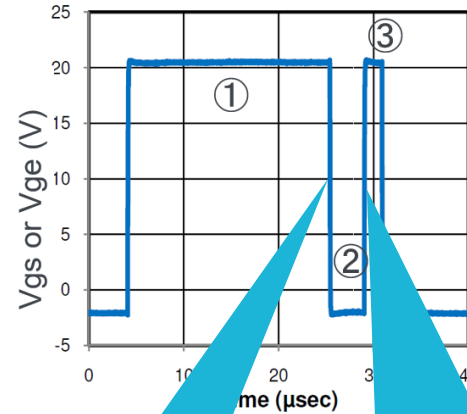
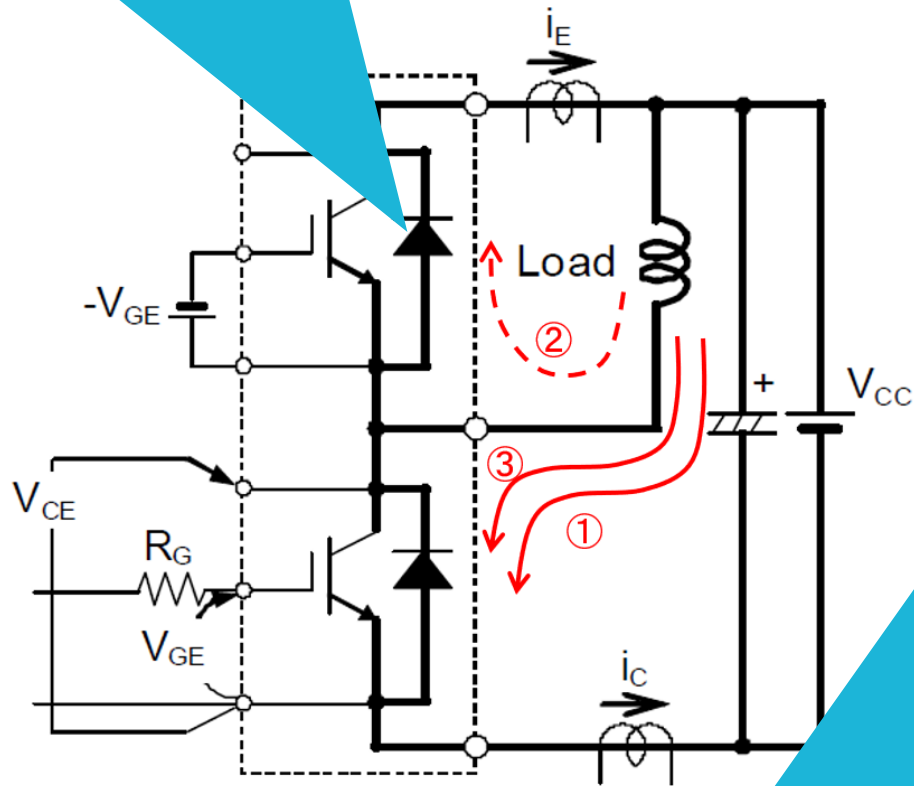
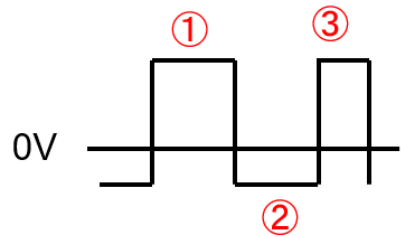
- 对比同一品牌不同型号或者同一型号不同品牌的IGBT的性能是否满足厂商提供的技术规格书
- 考虑功率器件在工作时的实际表现（例如二极管的反向恢复电流是否合适，关断时的电压尖峰是否合适，开关过程是否有不合适的震荡等）

双脉冲测试需要测试的参数

SWITCHING PARAMETERS NEEDS TO MEASURE

Reverse recovery of diode 反向恢复参数

T_{rr} , Q_{rr} , E_{rr} , I_{rr}



Turn-on characteristics 启动参数

T_{on} , t_r , $t_d(on)$, $E(on)$, di/dt , dv/dt

Turn-off characteristics 关断参数

T_{off} , t_f , $t_d(off)$, $E(off)$, di/dt , dv/dt

If measure parameters manually.....

MANY ENGINEERS STILL MEASURE SWITCHING PARAMETERS MANUALLY USING CURSORS AND EXCEL.

- Engineers want to measure switching parameters.
 - Ton Loss, Toff Loss, dV/dt , dV/dt peak, dI/dt , dI/dt peak,
 - Rise Time, Fall Time, $t_d(\text{on})$, $t_d(\text{off})$
 - Err (Recovery Loss) , Q_{rr} , T_{rr} , I_{rr}
 - Based on IEC60747-8 and IEC60747-9 (for $R_{DS(\text{on})}$, JEDEC JEP173)
- To guarantee specification of power device datasheet
- To confirm actual value or deviation of the power devices or power modules
- It takes almost one day to measure all parameters with one device.
- Engineer must measure these switching parameters with various current value condition and with many devices.

启动&关断参数 Ton & Toff Switching Parameters

IGBT_TOWN SOFTWARE SUPPORTS CUSTOM REFERENCE LEVEL

启动参数:

启动延迟 ($t_{d(on)}$)

上升时间 (t_r)

t_{on} (启动时间)

E_{on} (开能量)

dv/dt 和 di/dt

然后确定能量损耗

关闭参数:

关闭延迟 ($t_{d(off)}$)

下降时间 (t_f)

t_{off} (关闭时间)

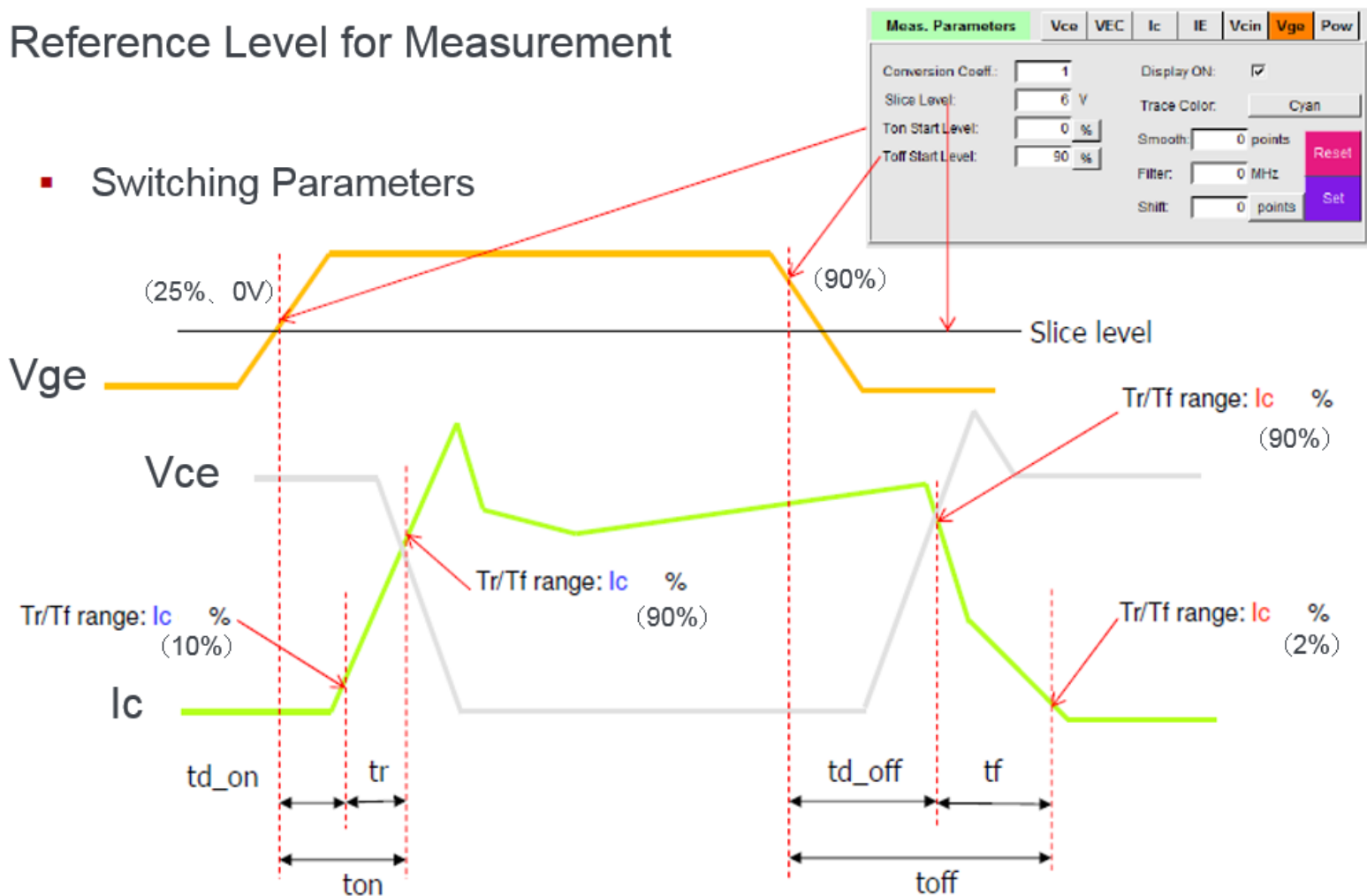
E_{off} (关能量)

dv/dt 和 di/dt

然后确定能量损耗

Reference Level for Measurement

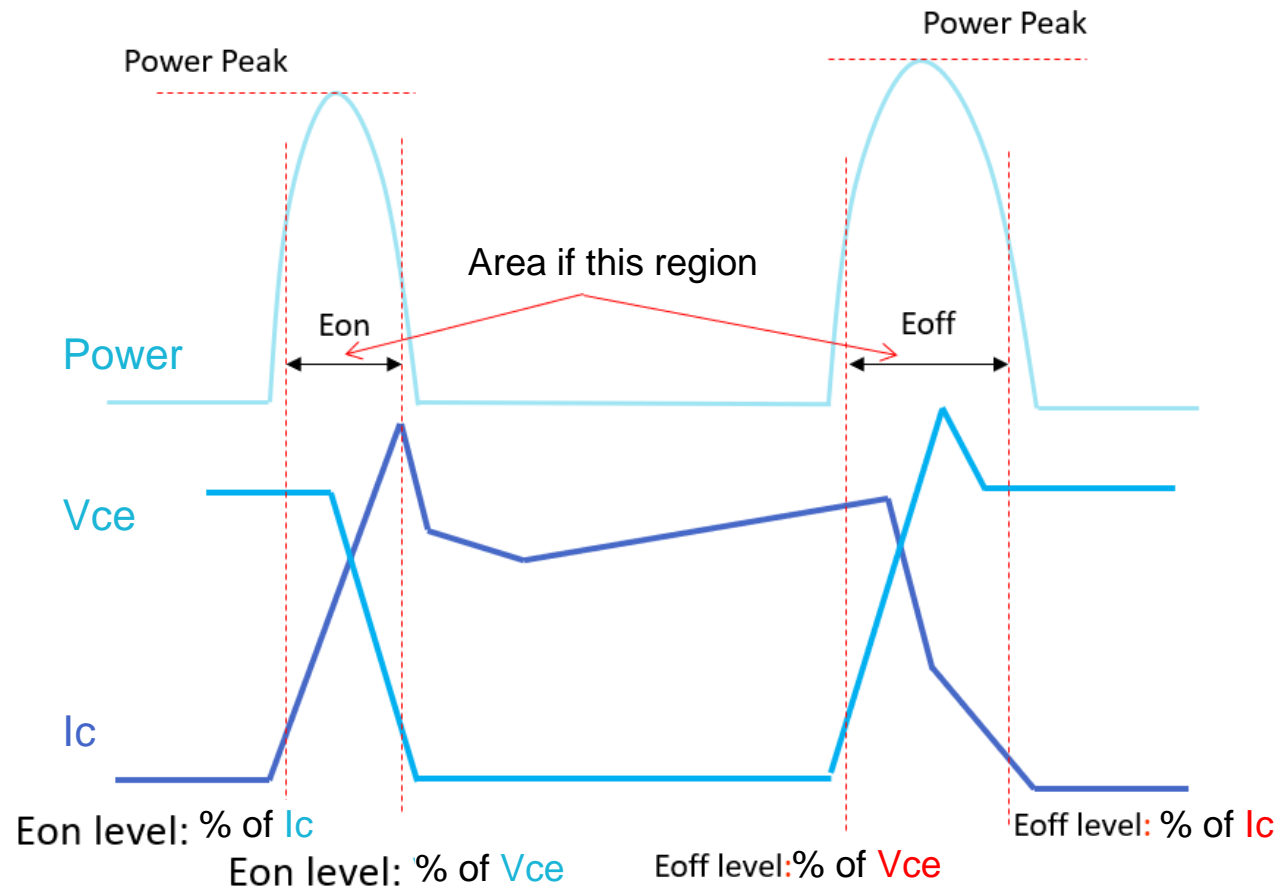
Switching Parameters



启动&关断能量损耗 Ton Loss and Toff Loss

IGBT_TOWN SUPPORTS CUSTOM REFERENCE LEVEL

Power (Vce x Ic or Vds x Id)



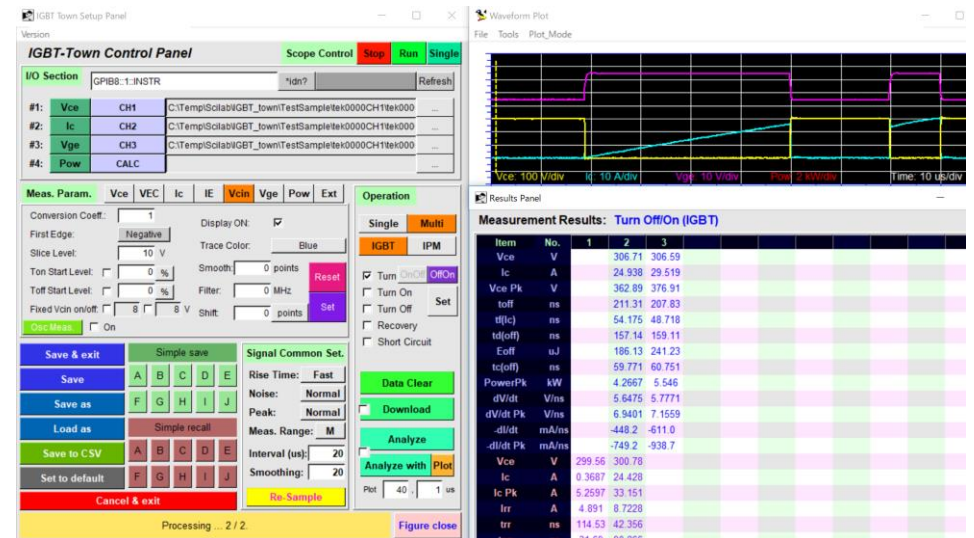
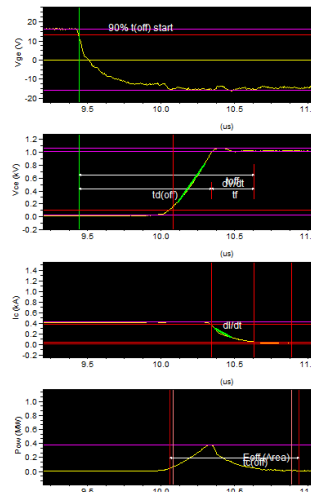
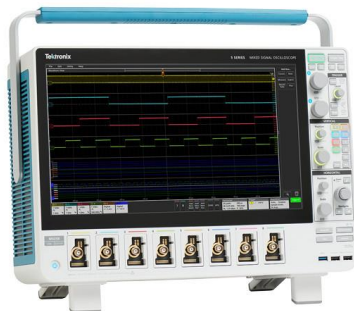
可以使用下面的公式计算
转换过程中的能量损耗：

$$E_{on} = \int_0^t V_{DS} I_{DS} dt$$

IGBT-town Software

SOFTWARE TO MEASURE SWITCHING PARAMETERS OF IGBT, FET AND DIODE

- IGBT-Town
 - AE-Ware for only users of DPOPWR or 5-PWR/6-PWR
 - Runs on Windows of MSO5/6, DPO7kC and DPO/MSO5kB
 - Measurement such as toff, td(off), tf(Ic), Eoff, Ton, td(on), tr(Ic), Eon, di/dt, dV/dt, Err, Qrr, trr, Irr based on IEC60747-9 and IEC60747-8
 - Significantly speed-up evaluation of switching parameters (From 1 day to several seconds)
 - Debug variation of device

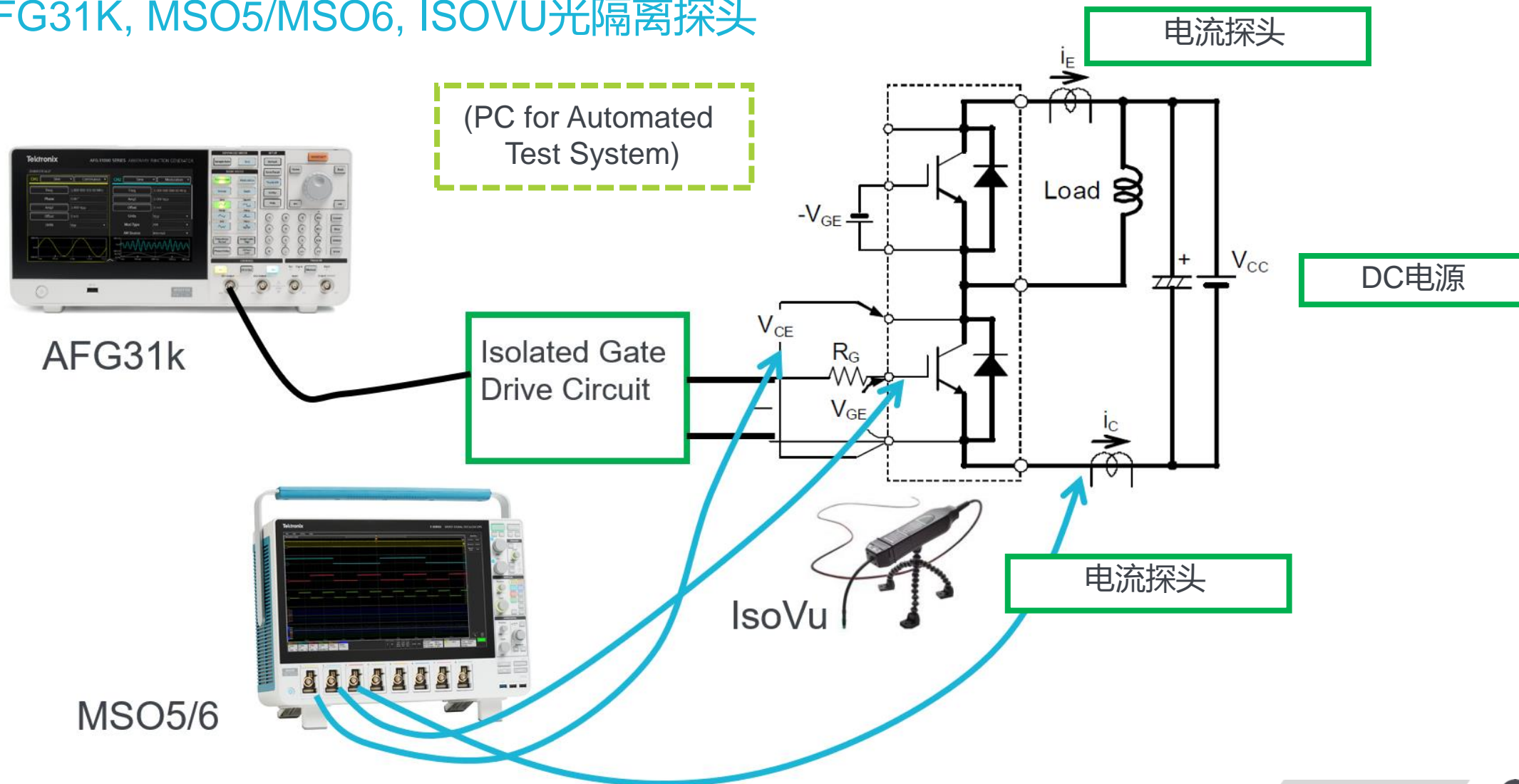


双脉冲测试解决方案构成



双脉冲测试系统——方案构成

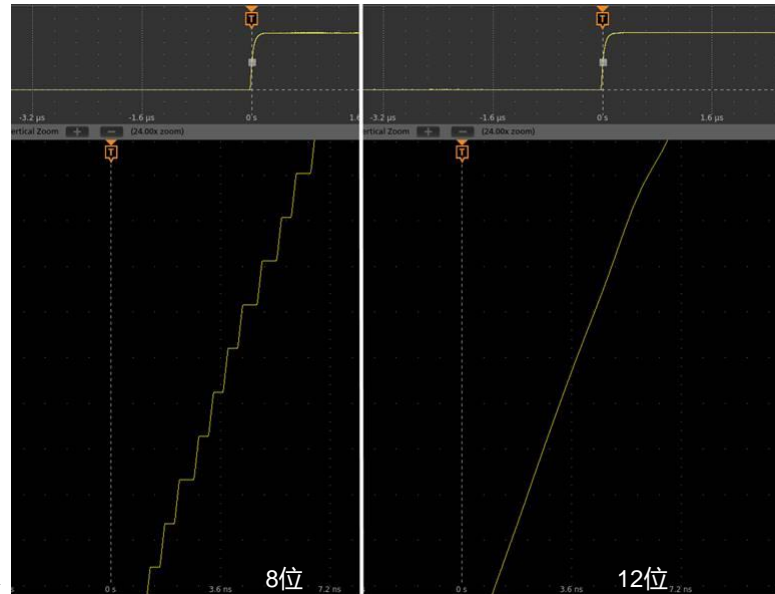
AFG31K, MSO5/MSO6, ISOVU光隔离探头



合适的示波器——业界领先的垂直分辨率

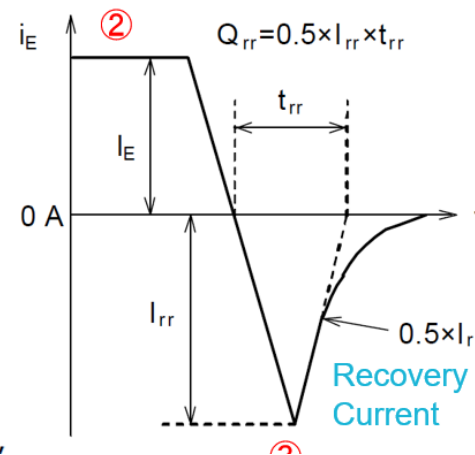
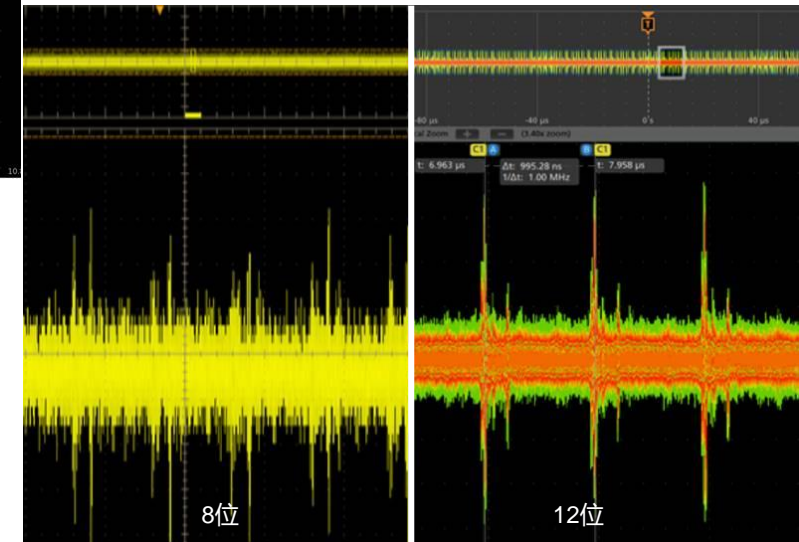
12位ADC和全新HIGH RES模式，更准确地查看信号

- 下一代前端放大器降低了噪声，帮助解析小的信号细节
 - 噪声比前一代示波器降低了~4.5 dB
- 12位模数转换器(ADC)提供的分辨率是传统8位ADC的16倍
- 全新High Res模式提供了最高16位垂直分辨率，可以更精细地查看频率较低的信号
 - 在每种采样率下应用独特的DSP滤波器限制了带宽，进而限制了噪声，可以更准确地查看信号



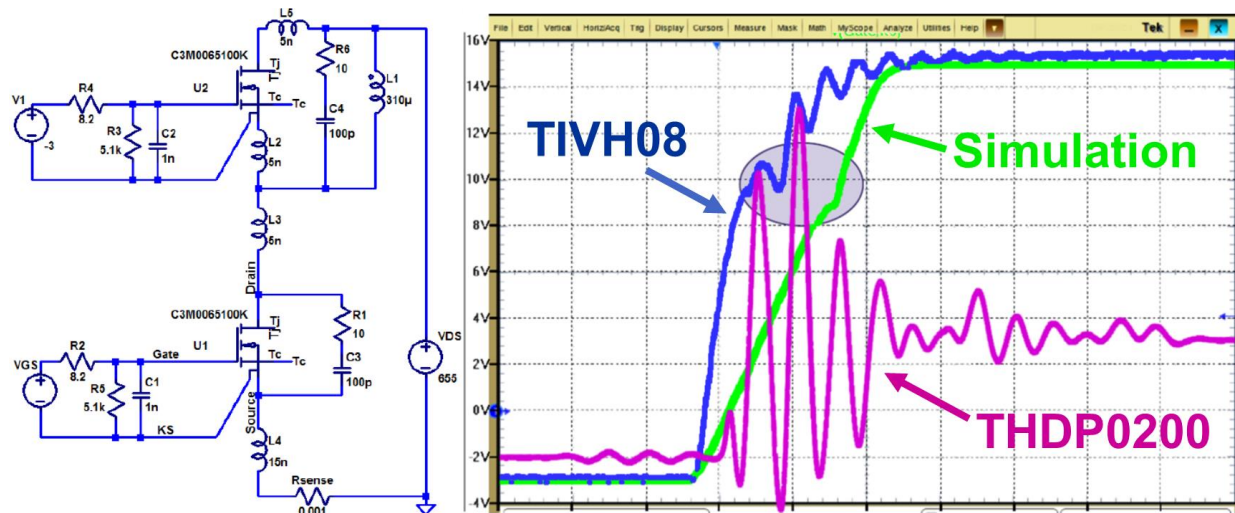
左图: 12位示波器上看到的模数转换电平提高了16倍

下图: 8位传统示波器与5系列MSO 12位模式对比, 显示了DDR3电源线信号

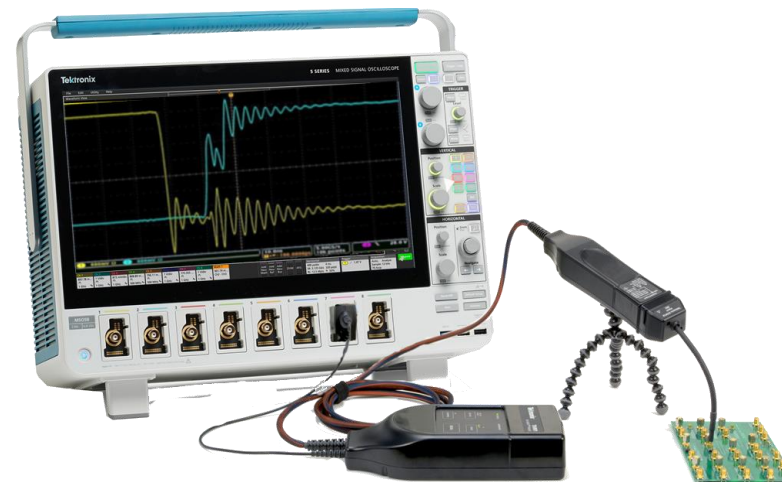


合适的探头——TIVH光隔离探头

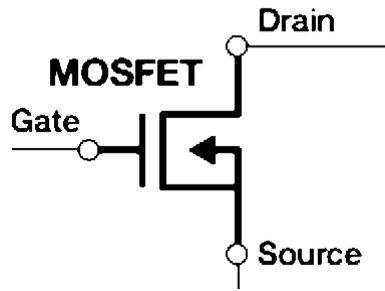
ISOLATED - DIFFERENTIAL MEASUREMENT SYSTEM



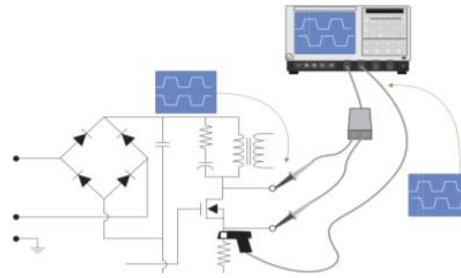
- 唯一同时提供杰出的**带宽、动态范围、共模范围和共模抑制比**的测量系统
 - 1 GHz带宽
 - 60KV共模电压
 - 高达2500V差分电压
 - 杰出的共模抑制比
 - DC ~ 100 MHz, 100000:1 (120 dB) CMRR
 - 1 GHz时, 10,000:1 (80 dB) CMRR



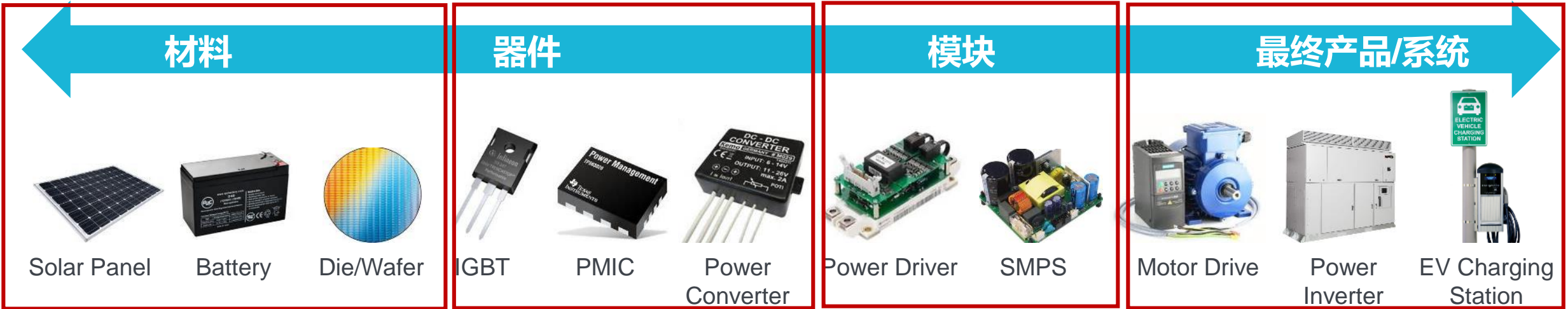
回顾——产品从前沿研发到最终生产的流程概述



宽禁带半导体器件
(SiC, GaN)



AC-DC 开关电源



Sensitive Apps Static Dynamic Product Level