用于ESD分析的传输线脉冲测试 (Transmission Line Pulse - TLP Measurement) 元件级

2015.01.23版

Wei Huang, Jerry Tichenor

Web: www.esdemc.com Email: info@esdemc.com Tel: (+1) 573-202-6411 Fax: (+1) 877-641-9358

Address: 4000 Enterprise Drive, Suite 103, Rolla, MO, 65401

ESDEMC
EXPERT ESD/EMC SOLUTIONS

目录

ESD的定义	3
ESD的研究意义	4
ESD防护方法	8
ESD抗扰度测试	10
TLP测试简介	15
ESD抗扰度测试 vs. TLP测试(脉冲形状参数)	29
TLP测试的优点	30
TLP测试步骤	31
采购注意事项	32
TLP标准	33
TLP测试系统比较	34
TLP常见问题	35
参考文献	43

ESDEMC
EXPERT ESD/EMC SOLUTIONS

ESD的定义

- 静电放电（Electrostatic Discharge - ESD) 是两个物体间的电荷转移。当两个物体直接接触，或相互靠近发生介质击穿时，会产生静电放电。

表1 静电产生实例（来源：ESD Association)

不同相对湿度（RH）生成静电电压实例		
静电生成方式	10%-25% RH	65%-90% RH
人在地毯上走动	35,000V	1,500V
人在乙烯树脂地板上走动	12,000V	250V
人在工作台上操作	6,000V	100V
从工作台上上拿起普通聚乙烯袋	20,000V	1,200V
从垫有聚氨基甲酸泡沫的工作椅上站起	18,000V	1,500V

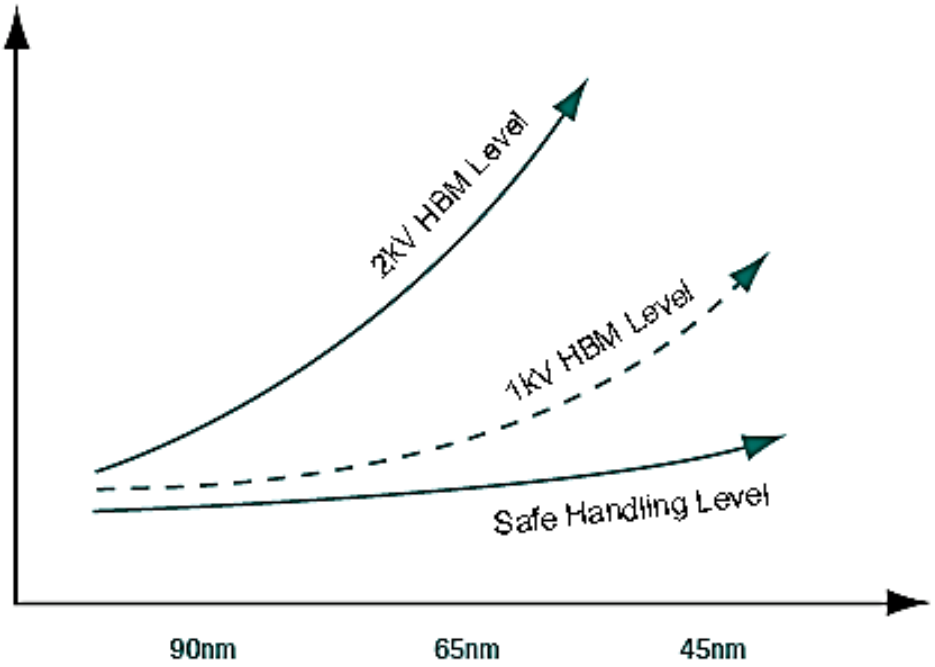
注意：例子中的电压值相当高，部分在某些极端情况下可能发生。

ESDEMC
EXPERT ESD/EMC SOLUTIONS

ESD的研究意义

Cost of ESD design dependent on

- chip area
- respins
- resources
- circuit performance
- time-to-market

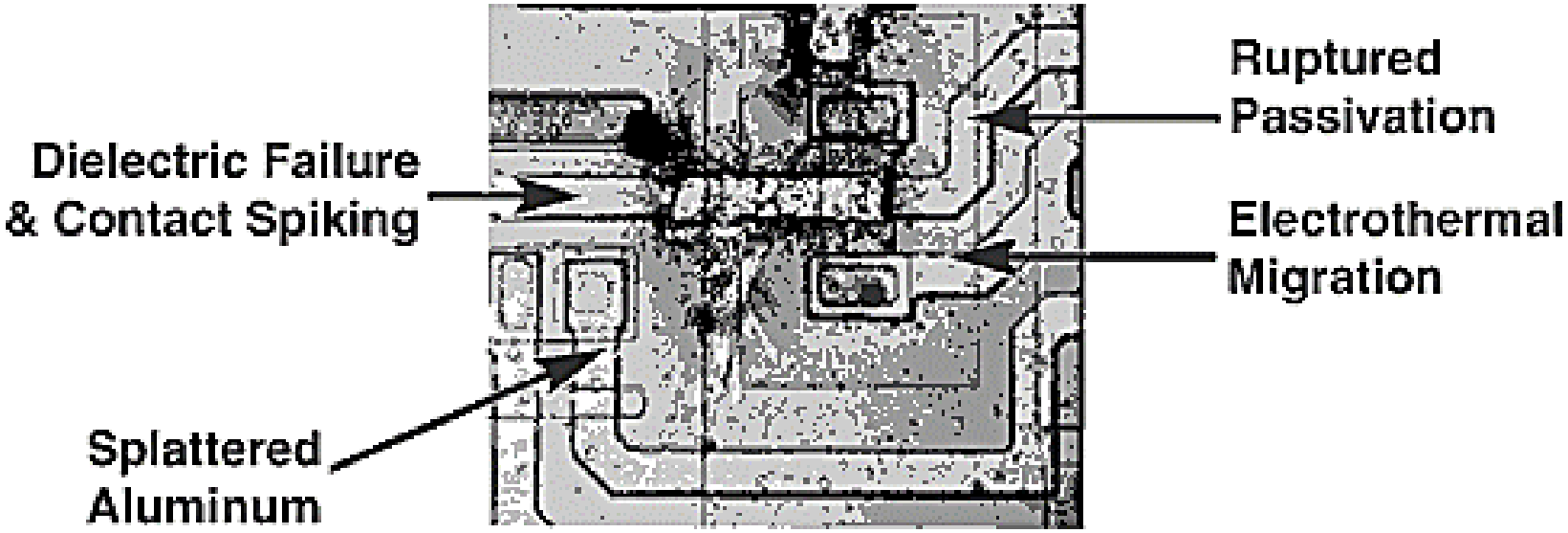


来源: 2005 ESD/EOS 会议论文

- 电路设计的潜在ESD损坏可能导致:
  - 产品质量差
  - 用户不满
  - 维修和返工费用上涨
- 电击穿，氧化击穿，以及由于元件不能及时散热造成的局部过热，都会造成元件的永久性损坏。

ESDEMC
EXPERT ESD/EMC SOLUTIONS

硬件故障 – ESD造成的IC损伤

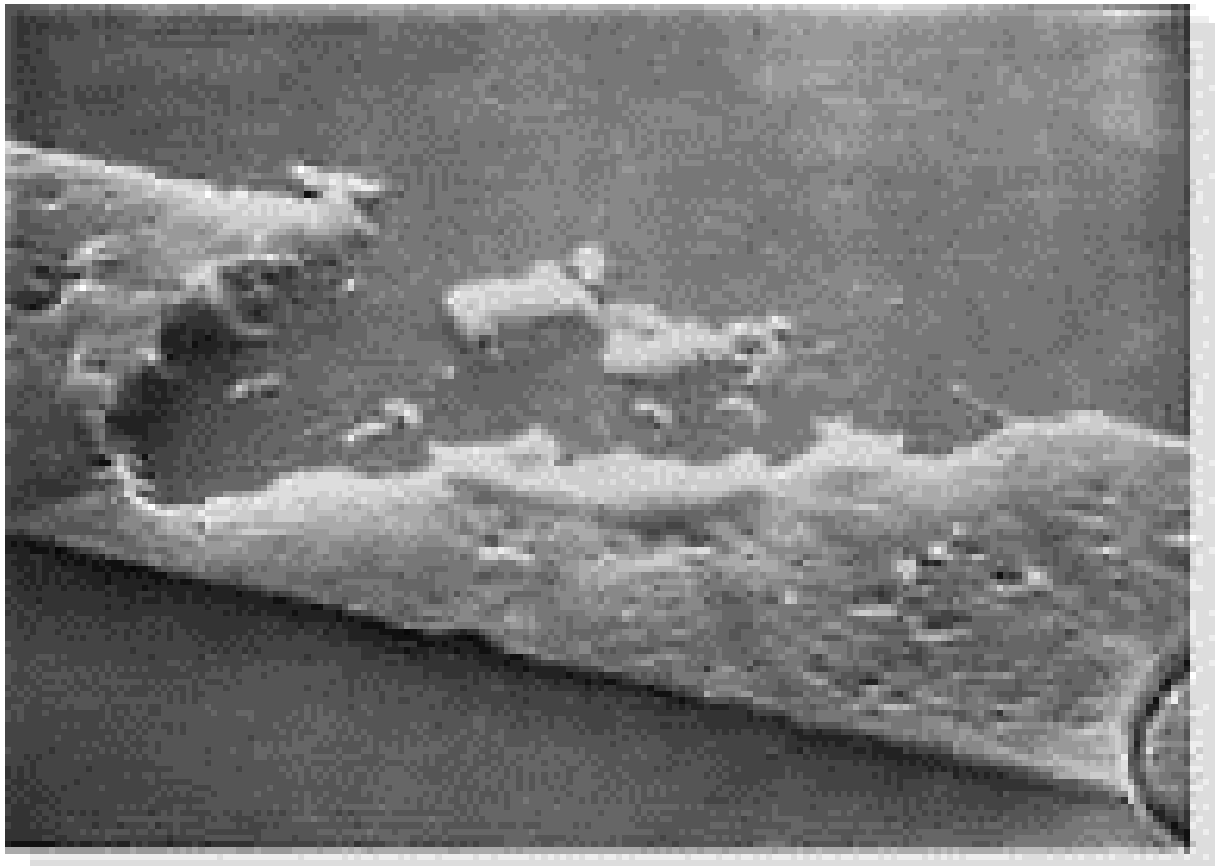


Picture 5

15kV静电电击后的RS-232接口IC

ESDEMC
EXPERT ESD/EMC SOLUTIONS

有物理损伤, 但功能正常- ESD造成的IC损伤



Picture 6

ESD浪涌造成的过电压。IC仍然能工作，但已经接近彻底损坏。

ESDEMC
EXPERT ESD/EMC SOLUTIONS

硬件故障 - ESD造成的IC损伤

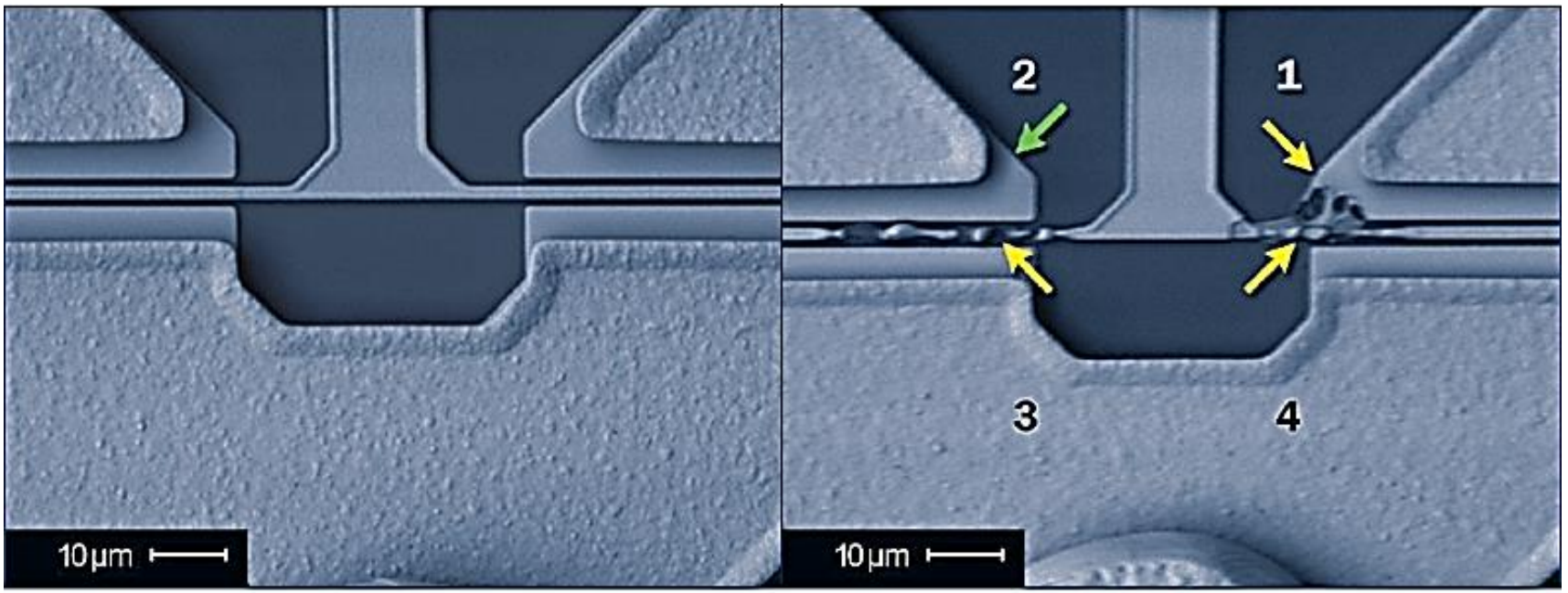


Figure 2-3: Shown on the left is a SEM image of good transistor. To the right is a SEM image showing EOS damage (indicated by yellow arrows).

Picture 7

电气过应力(Electrostatic Over Stress - EOS)损坏

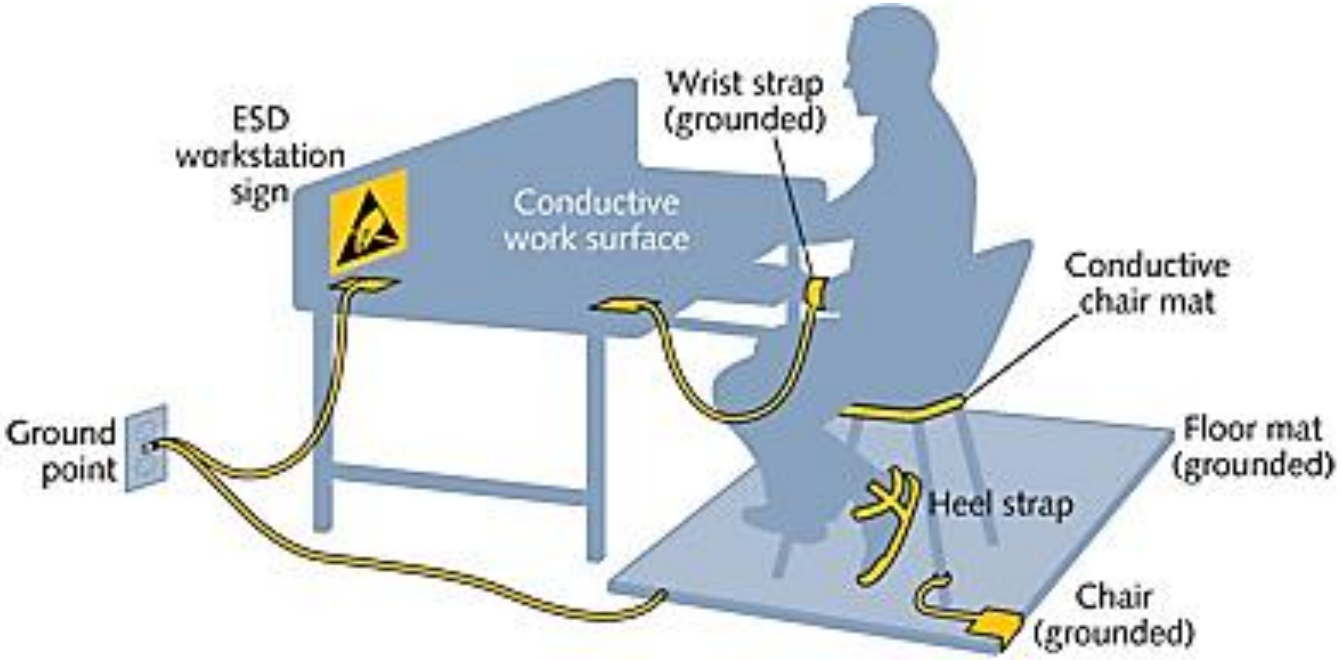
我们为何关注ESD?

ESDEMC
EXPERT ESD/EMC SOLUTIONS

ESD防护方法

1. 受控环境[1]

- 减少潜在的电荷积聚
- 设备和家具接地
- 清洁房间 -- 控制湿度和颗粒粉尘
- 这类措施对电子产品终端用户（例如消费电子的用户）无效。



Picture 8

ESD 友好的工作环境

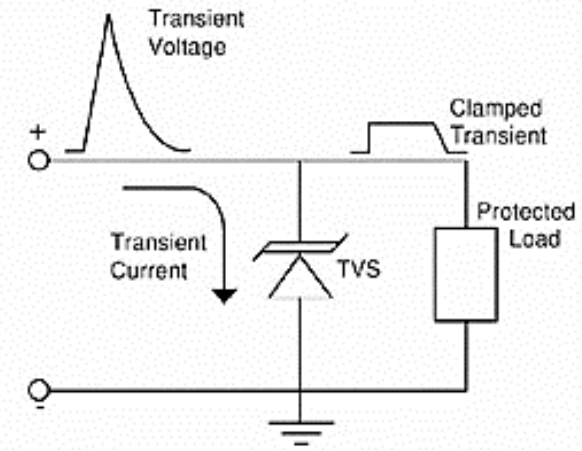
ESDEMC
EXPERT ESD/EMC SOLUTIONS

ESD防护方法

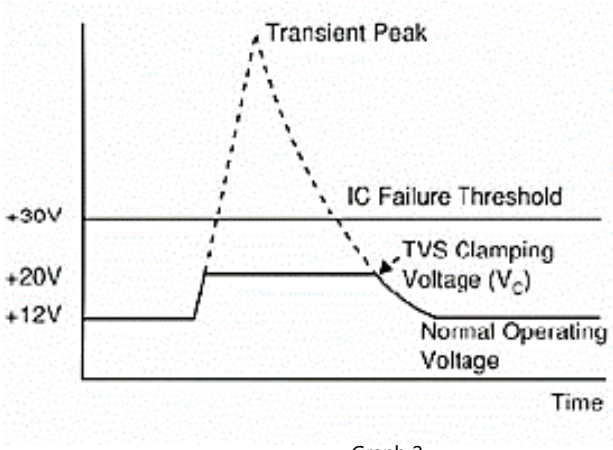
2. 改善系统ESD抗扰度

- 了解电子系统的工作环境和潜在的ESD风险
- 仔细考虑系统的ESD防护设计!
  (请参考System Level ESD - White Paper 1,2,3 - Industry Council on ESD Target Levels, http://esda.org/IndustryCouncil.html)
  - 了解关键元件的ESD敏感度
  - 测试并选择ESD薄弱点的最佳防护方案
  - 测试并进一步改善系统级ESD抗扰度

设计师需要掌握不同类型ESD测试的关键数据。
TLP测试可以为ESD设计提供很多重要数据!



Graph 1

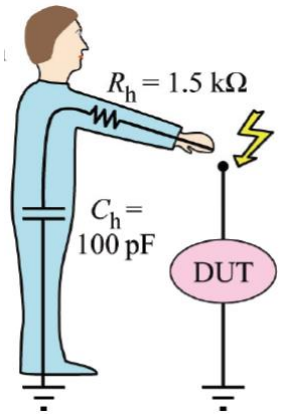


Graph 2

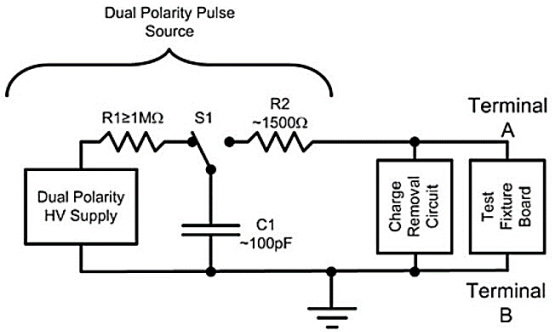
ESDEMC
EXPERT ESD/EMC SOLUTIONS

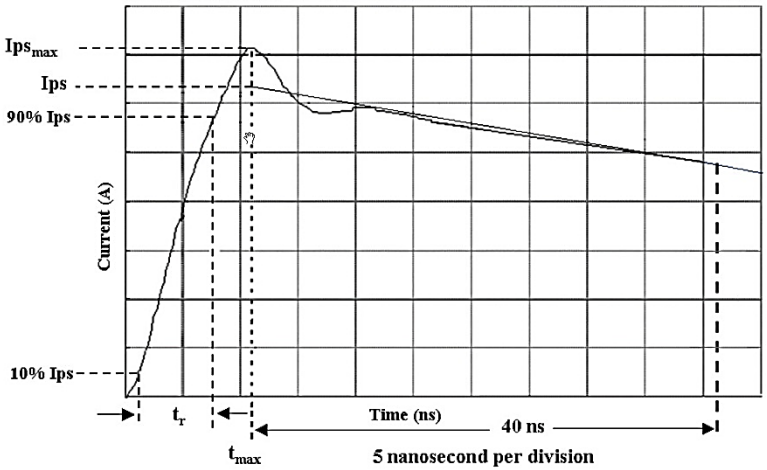
ESD抗扰度测试

- 人体模型(Human Body Model - HBM) [2]
  - 带电人体接触受试设备(DUT)
  - ANSI/ANSI/ESDA/JEDEC JS-001-2010
  - 对地测试电压4000V, 电流< 3A (也可用8000V)
  - 皮肤放电(IEC 61000-4-2标准是手持金属放电)

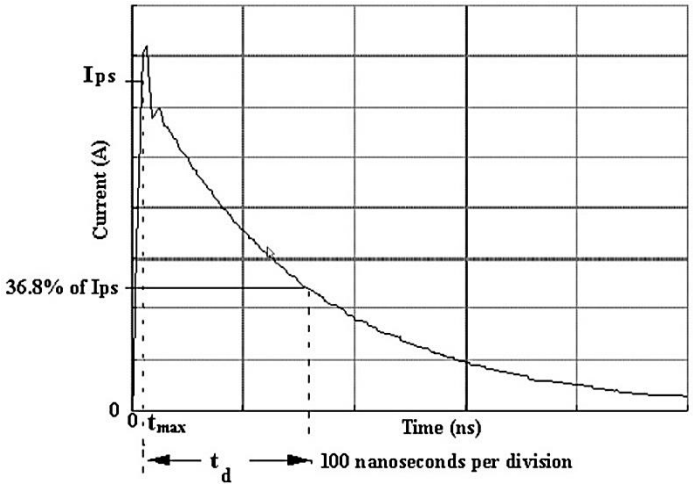


Picture 9





对地放电，上升时间(t_r) – 2 to 10ns

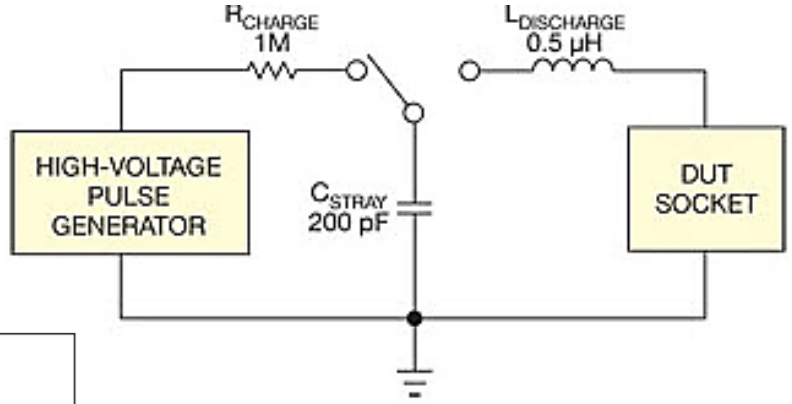


对地放电，衰减时间(t_d) – 130 to 170ns

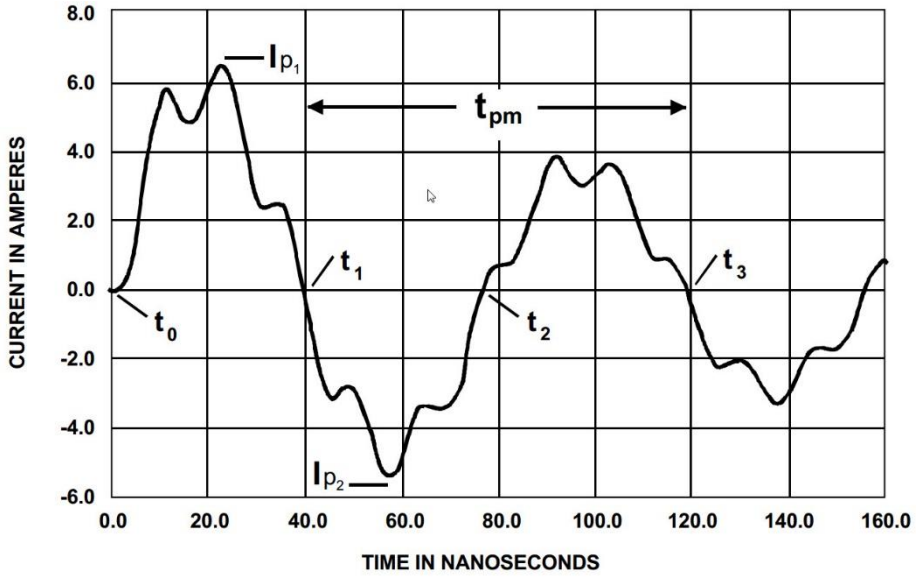
ESDEMC
EXPERT ESD/EMC SOLUTIONS

ESD抗扰度测试

- 机器模型(Machine Model - MM) [3] (MM 模型很少用到)
  - 带电机器对设备放电，在生产过程中可能发生
  - ESD STM5.2-2012
  - 400V测试电压
  - 对地放电电流< 7A



Graph 3

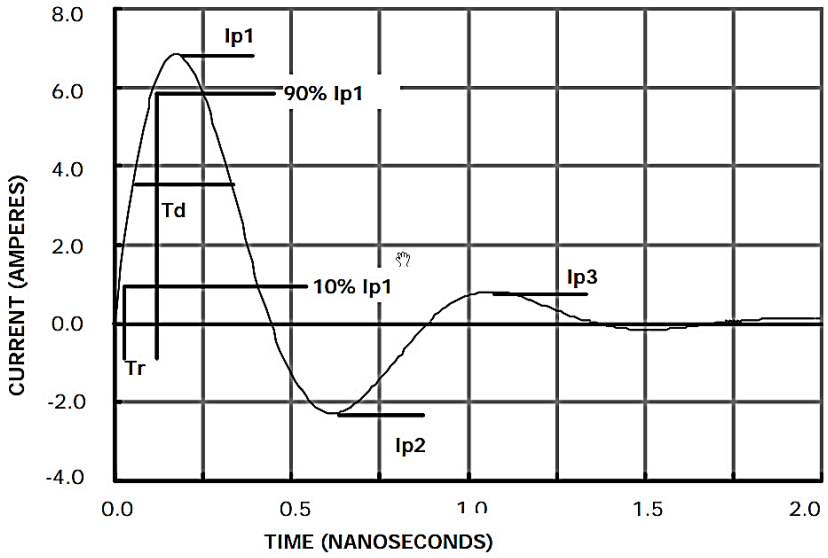


对地放电，脉冲主周期(t_{pm}) – 66 to 90ns

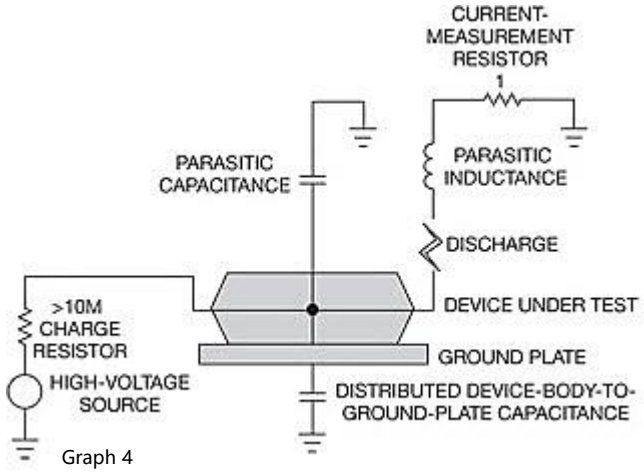
ESDEMC
EXPERT ESD/EMC SOLUTIONS

ESD抗扰度测试

- 带电器件模型(Charged Device Model - CDM) [4]
  - 带电器件对其他金属部件或对地平面放电，例如集成电路装配时可能发生
  - ESD S5.3.1-2009
  - 器件由导电平板充电
  - 为非接触式放电，例如，当接地物体向带电引脚靠近时，会发生CDM放电
  - 测试电压达2000V
  - 放电电流达30A (验证模块电容为4pF, 260ps 上升时间)



Graph 4



上升时间 (t_r) – ~200ps, 脉冲宽度(50%-50%) (t_d) - ~400ps

CDM 测试装置

ESDEMC
EXPERT ESD/EMC SOLUTIONS

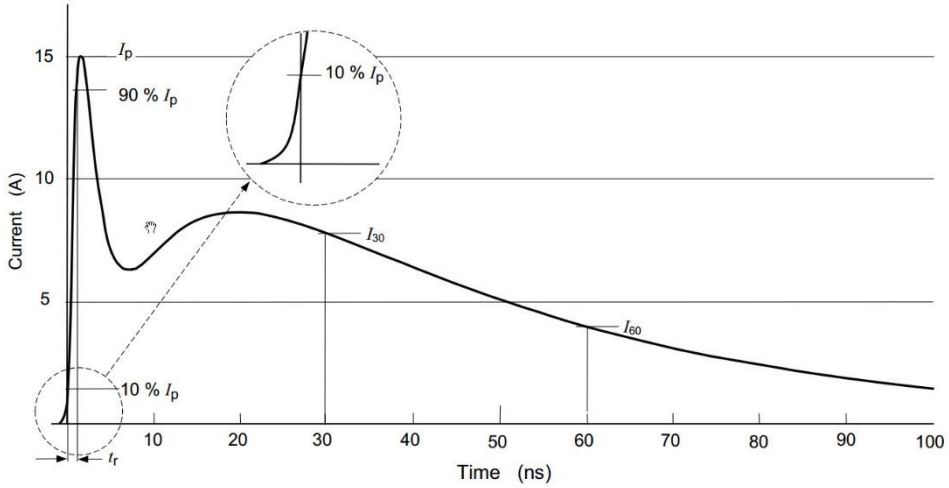
ESD抗扰度测试

- IEC 61000-4-2标准:2008版 [5]
  - 带电人体持金属对受试系统设备（DUT）放电
  - 系统级测试

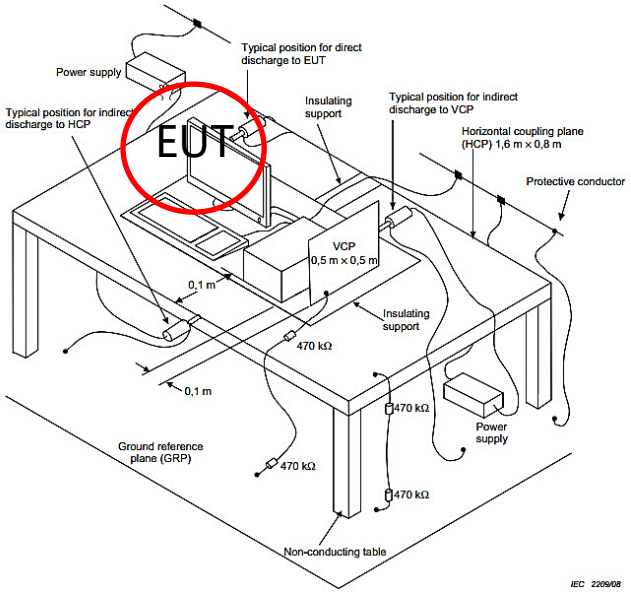
Level	Indicated voltage kV	First peak current of discharge ±15 % A	Rise time t_r (±25 %) ns	Current (±30 %) at 30 ns A	Current (±30 %) at 60 ns A
1	2	7,5	0,8	4	2
2	4	15	0,8	8	4
3	6	22,5	0,8	12	6
4	8	30	0,8	16	8

The reference point for measuring the time for the current at 30 ns and 60 ns is the instant when the current first reaches 10 % of the 1st peak of the discharge current.

NOTE The rise time, t_r, is the time interval between 10 % and 90 % value of 1st peak current.



4kV接触式放电，理想电流波形

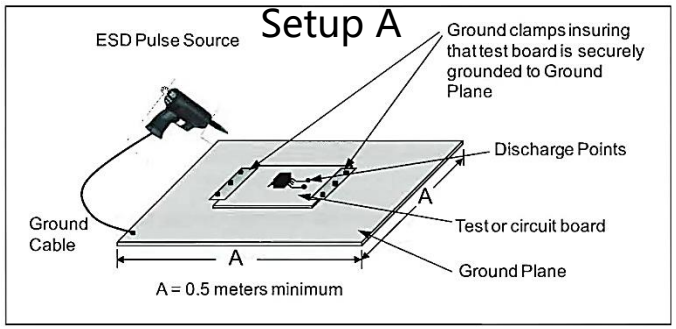


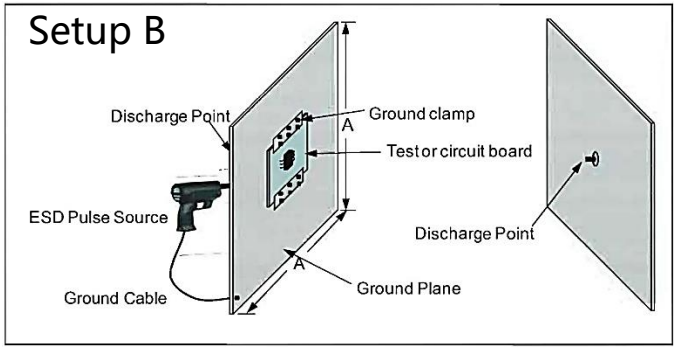
IEC 测试装置

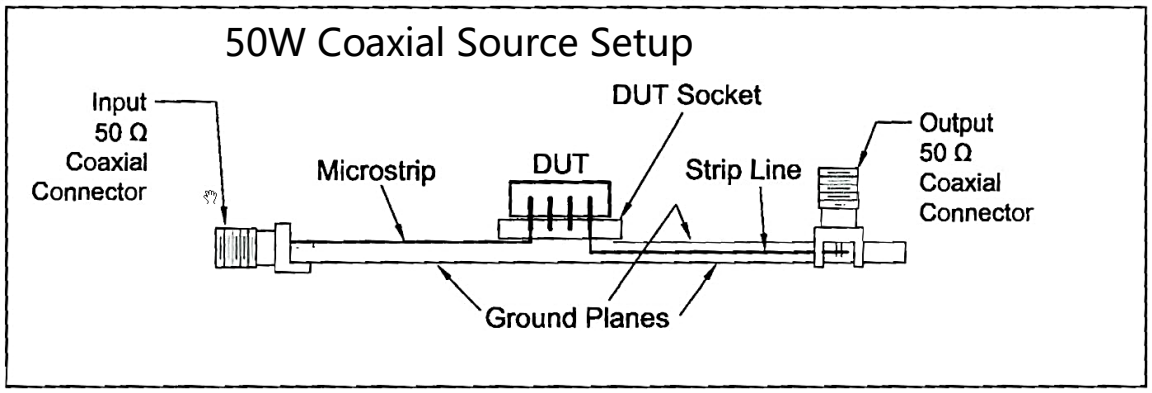
ESDEMC
EXPERT ESD/EMC SOLUTIONS

ESD抗扰度测试

- 人体金属模型(Human Metal Model - HMM) [6]
  - 充电人体手持金属放电
  - ANSI/ESD SP5.6-2009
  - **元件级**测试，与IEC 61000-4-2类似
  - 电流波形参数与IEC 61000-4-2标准相同
  - **TLP** 50Ω 系统测试更具可靠性，并可同时自动进行故障检测。







ESDEMC
EXPERT ESD/EMC SOLUTIONS

什么是TLP测试?

- **传输线脉冲(Transmission-Line Pulse - TLP) 测试**是一种通过测量时域的电流电压来研究集成电路及其特性的ESD测试方法。
- 历史:
  - 由于对电磁脉冲环境感兴趣， Wunsch 和 Bell 于20世纪60年代研究了半导体结的脉冲功率故障[7]。
  - 20世纪60年代，Bradley, Higgins等人用带电传输线生成了矩形波[8]。
  - 20世纪80年代， Maloney和Khurana提出了用传输线脉冲对ESD建模[9]。
  - 第一台商用TLP系统由Barth Electronics在20世纪90年代中期提出[10]。

ESDEMC
EXPERT ESD/EMC SOLUTIONS

什么是TLP测试?

TLP标准

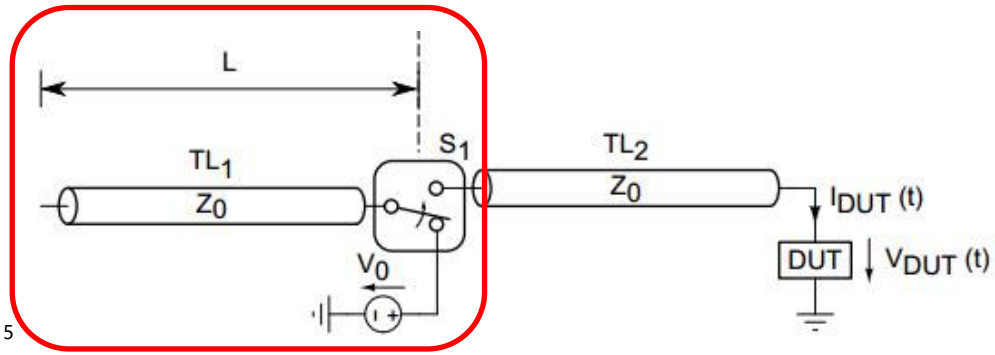
- **标准TLP (STM5.5.1-2014)**
  - 0.2 至 10ns 上升时间
  - 10ns 至 ms级脉冲宽度(典型值为100ns)
  - 至少200MHz带宽示波器
  - 至少200MHz带宽电压探头
  - 至少200MHz带宽电流探头

- **超快TLP (SP5.5.2-2007)**
  - 典型值： <= 200ps 上升时间
  - 1ns - 10ns 脉冲宽度
  - 至少2.5GHz带宽，5Gsa/s采样率示波器
  - 至少1GHz带宽电压探头
  - 至少2GHz带宽电压探头

ESDEMC
EXPERT ESD/EMC SOLUTIONS

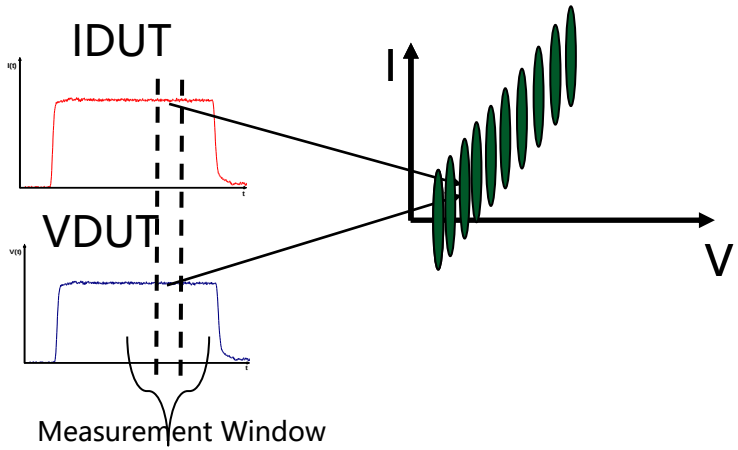
什么是TLP测试?

- TLP脉冲发生器基本结构：长度为L的充电线(TL1)，开关(S1)和高压电源(Vo) 。



Graph 5

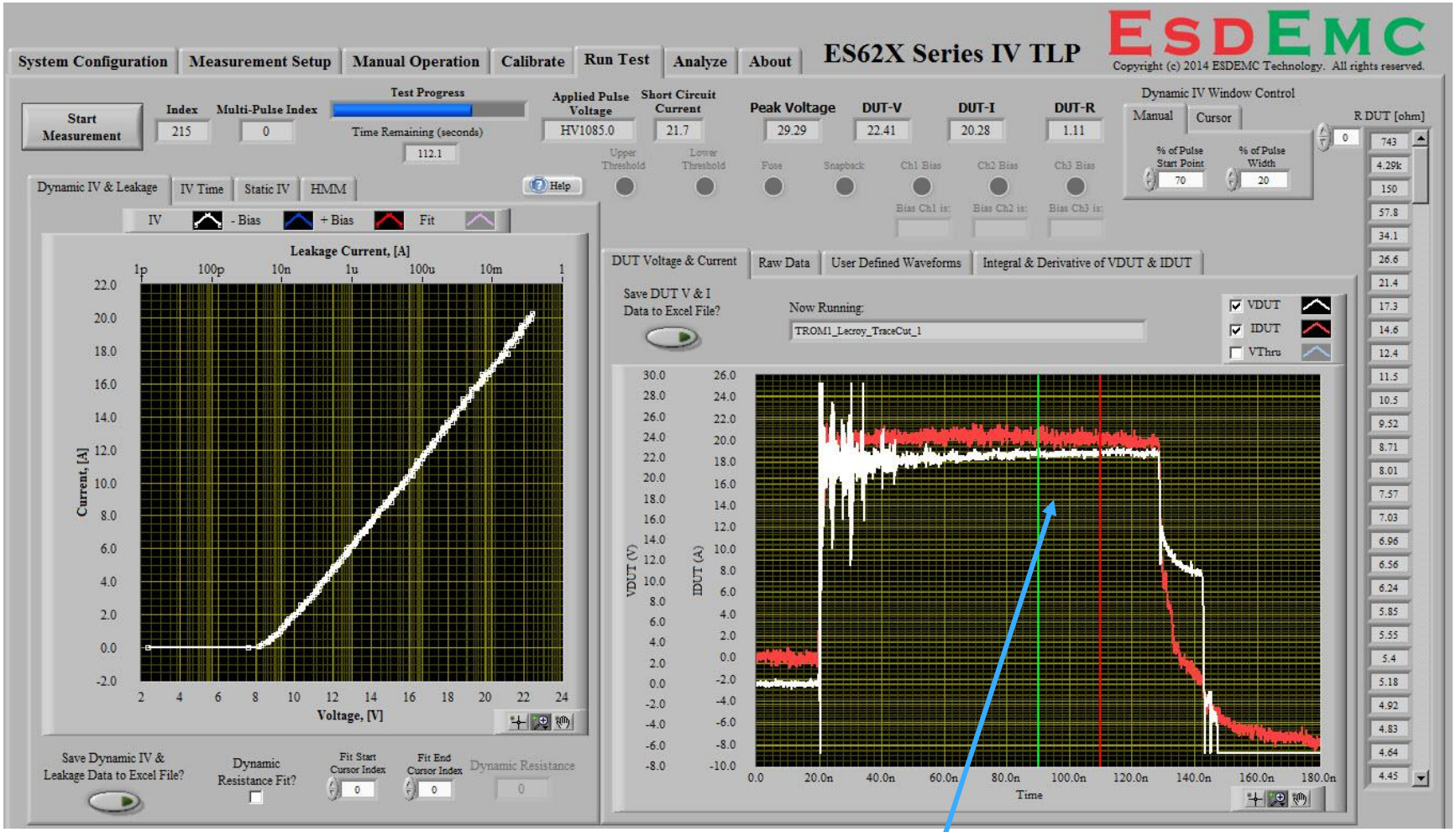
- 充电线长度决定脉冲宽度
- 标准TLP的典型值为100ns脉冲宽度，1ns上升时间
- 逐步增加脉冲幅度，直至DUT出现故障或达到最大电压
- DUT故障通常通过测量DC漏电流来判断
- 通常取脉冲时间70%-90%区域（测量窗口）的测量值来获取I-V曲线。



ESDEMC
EXPERT ESD/EMC SOLUTIONS

什么是TLP测试?

- TVS二极管I-V 特性曲线测量(测量窗口：70% 至 90% 脉冲时间)

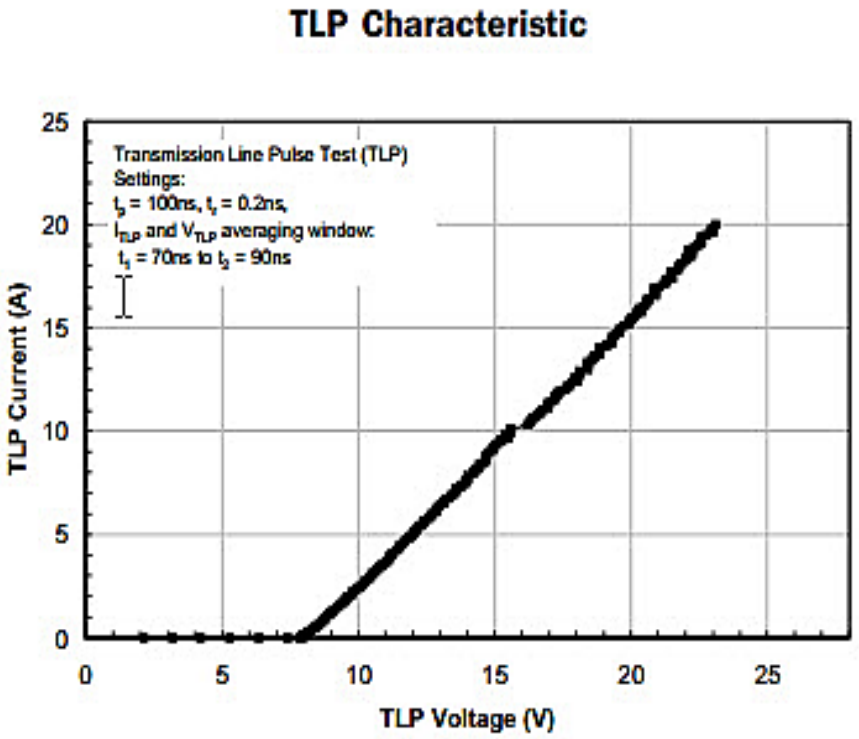


测量窗口(70% 至 90% 脉冲时间)

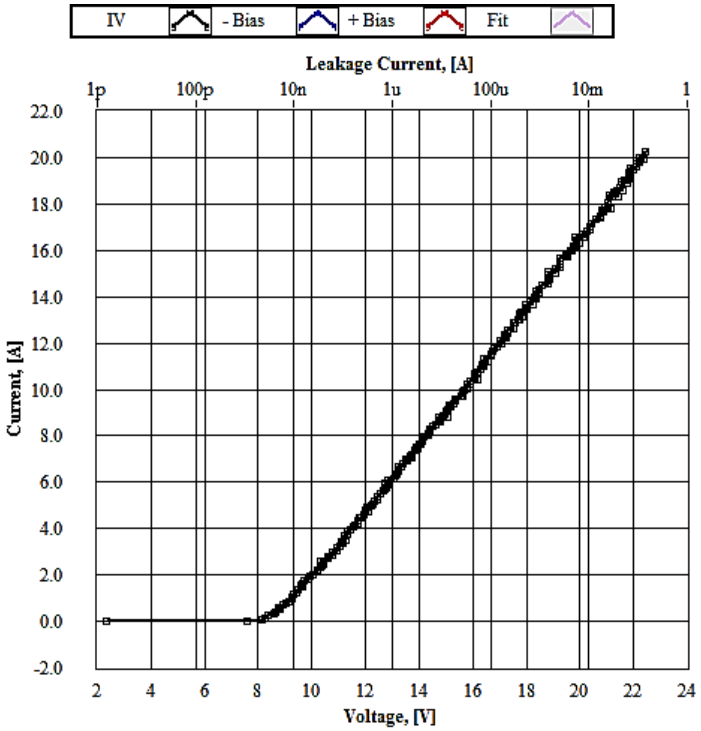
ESDEMC
EXPERT ESD/EMC SOLUTIONS

什么是TLP测试?

- TVS二极管I-V 特性曲线测量(70% 至 90% 脉冲时间)
- 100ns 脉宽



Semtech uClamp0541Z 数据表

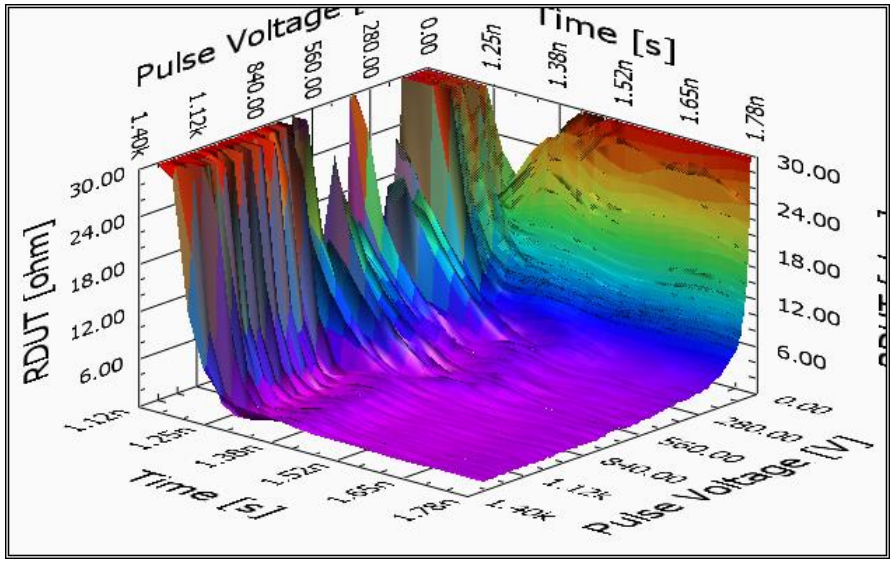


ESDEMC TLP 测试结果

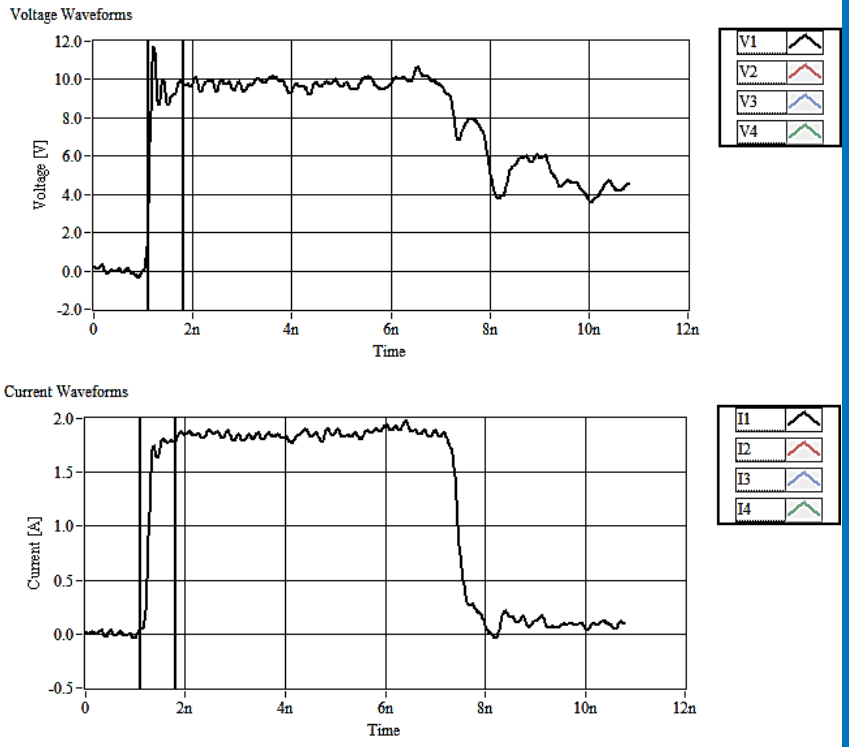
ESDEMC
EXPERT ESD/EMC SOLUTIONS

什么是TLP测试?

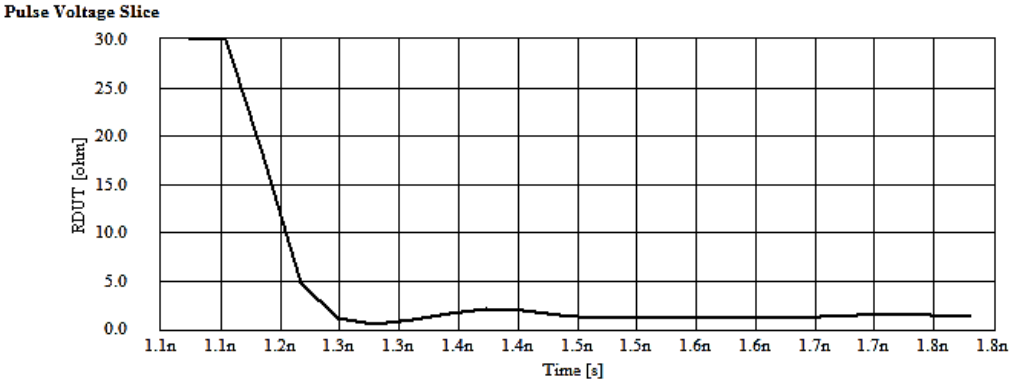
- 超快TLP测试: TVS二极管的开启特性 （脉冲开始的几个纳秒）



DUT电阻-时间-脉冲电压瀑布图



6V
TLP脉冲



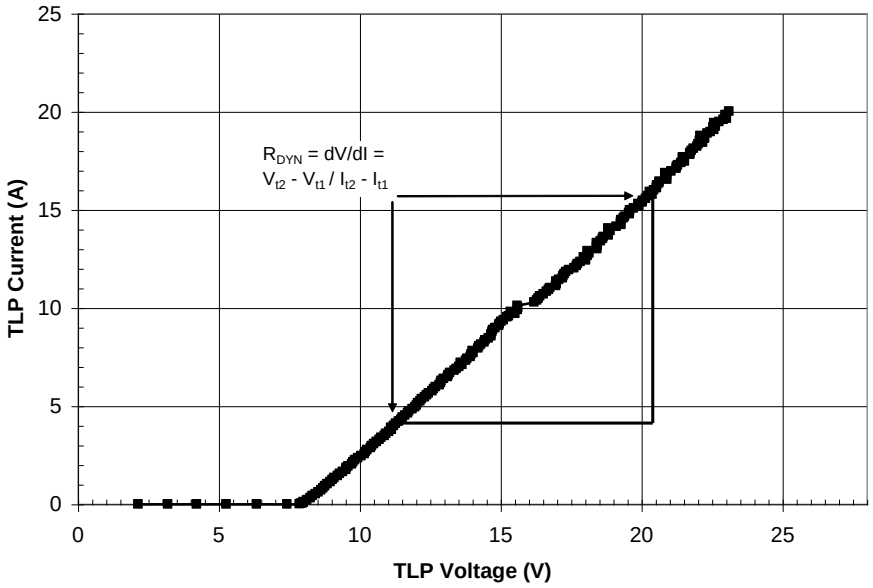
DUT电阻值上限取决于绘图目的

ESDEMC
EXPERT ESD/EMC SOLUTIONS

标准TLP的典型应用

1. 用TLP获取I-V曲线，例如，**保护器件的动态阻抗**
   (动态阻抗定义：I-V曲线的dV/dI)

$$R_{dyn} = (V_{t2} - V_{t1})/(I_{t2} - I_{t1})$$



动态阻抗是ESD保护器件一个非常重要的参数。
动态阻抗越低，表明更多的ESD电流会流经保护器件，更少的电流会流经被保护设备。

- 瞬态电压抑制器（TVS） – 几百mΩ至几Ω
- 多层压敏电阻 – 对于低电容设备，有几Ω或更高的阻抗

ESDEMC
EXPERT ESD/EMC SOLUTIONS

标准TLP的典型应用

2. 用TLP和故障自动检测装置**测试DUT的ESD抗扰度/敏感度**

系统/IC/模块的ESD抗扰度通常由不同ESD测试装置来进行评估。由瞬时高能量造成的故障可以通过上升时间/脉冲宽度受控的TLP脉冲或者RC电路向50欧姆系统放电得到。TLP测试结果可用于估测HBM, IEC61000-4-2，HMM的失效等级。

ESD热失效相关*(注意): ***TVS IEC 1 kV level = 2 A , 100 ns TLP pulse level***

IC HBM 1 kV level = 1.5 A, 100 ns TLP pulse level

请参考TLP测试用法的相关文献，不同设备的敏感性不同!

Correlation between transmission-line-pulsing I-V curve and human-body-model, *Jon Barth, John Richner*

ESD Relations between system level ESD and (vf-)TLP, *T. Smedes, J. van Zwol, G. de Raad, T. Brodbeck, H. Wolf*

A TLP-based Human Metal Model ESD-Generator for Device Qualification according to IEC 61000-4-2

Yiqun Cao 1, David Johnsson 1, Bastian Arndt 2 and Matthias Stecher

Pitfalls when correlating TLP, HBM and MM testing, *Guido Notermans, Peter de Jong and Fred Kuper*

A Failure Levels Study of Non-Snapback ESD Devices for Automotive Applications, *Yiqun Cao , Ulrich Glaser , Stephan Frei and Matthias Stecher*

Correlation Between TLP, HMM, and System-Level ESD Pulses for Cu Metallization, *Y. Xi, S. Malobabic, V. Vashchenko, and J. Liou*

Capacitive Coupled TLP (CC-TLP) and the Correlation with the CDM, *Heinrich Wolf, Horst Gieser, Karlheinz Bock , Agha Jahanzeb, Charvaka Duvvury, Yen-Yi Lin*

..... (please check for your device and applications)

注意: 1. 标准TLP不提供类似IEC61000-4-2标准脉冲的第一个峰，所以由第一个峰引起的设备故障不能用TLP测试检测。超快TLP可以提供上升时间短、脉宽窄的矩形脉冲，可用来进行此类测试。

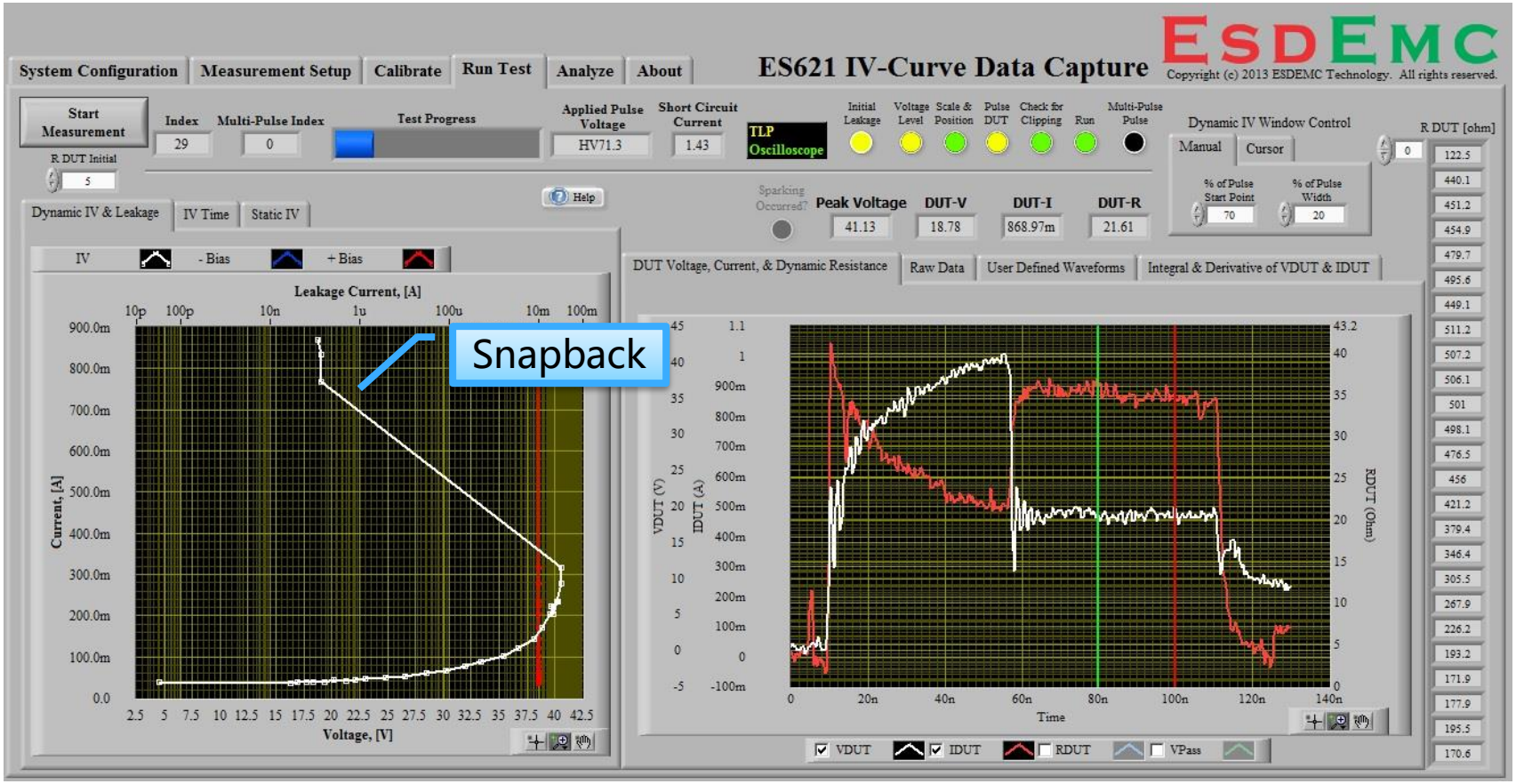
2. 标准TLP是基于50欧姆阻抗的，而其他ESD模型基于不同的阻抗系统，所以设备完全开启之前的电压可能会有很大不同，从而导致不同的失效类型。

ESDEMC
EXPERT ESD/EMC SOLUTIONS

N沟道 MOSFET的snapback测量

TLP的典型应用

3. 测试设备的I-V曲线，确定**设备的安全工作区**



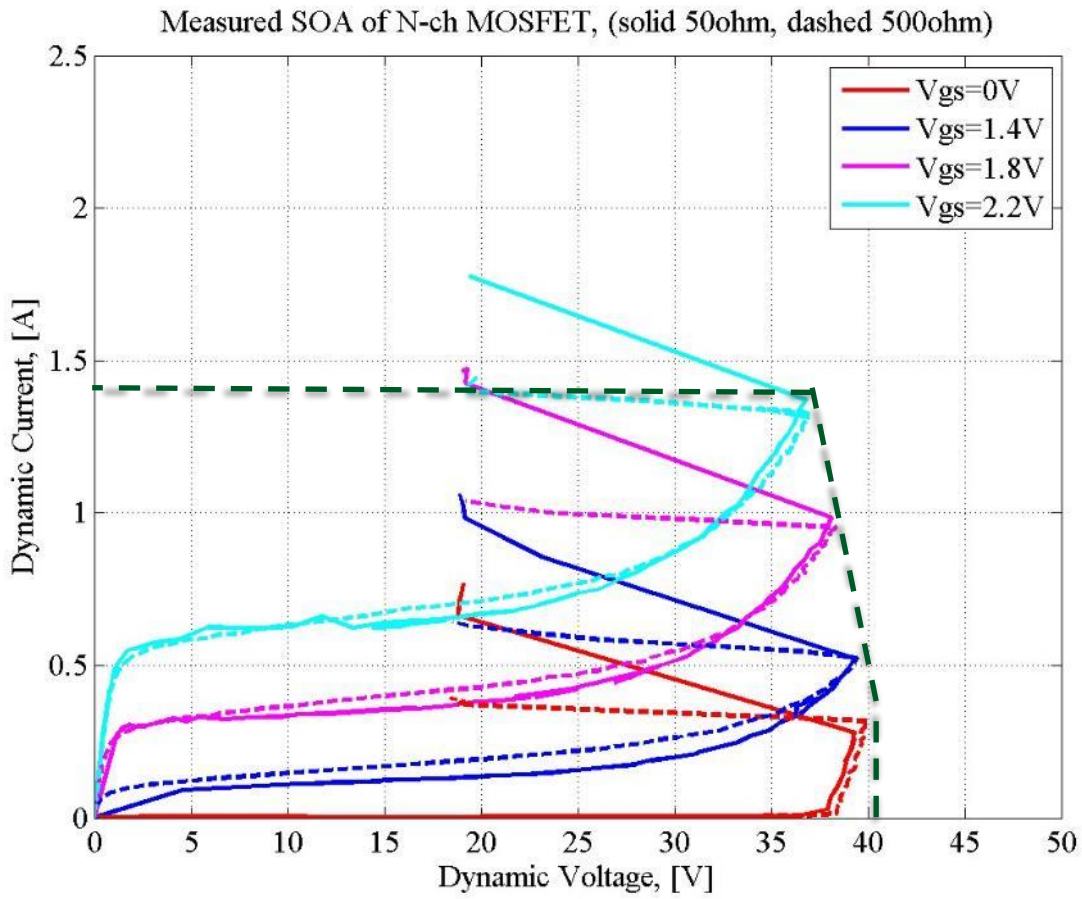
100ns TLP：100ns 脉宽，<=200ps 上升时间, TDR叠加测量 (入射波反射波的方法)

Snapback是由于DUT的动态阻抗在100ns脉宽应力作用下变化导致的。

ESDEMC
EXPERT ESD/EMC SOLUTIONS

N沟道MOSFET的电安全工作区

安全工作区(Safe operating area - SOA) 是元件的一个重要电气特性，用来表征元件的ESD/EOS瞬态限制。



ESDEMC
EXPERT ESD/EMC SOLUTIONS

标准TLP的典型应用

4. 表征器件的开启/关断瞬态特性 (3D 瀑布图)
   例如，ESD保护器件的响应速度

5. 表征器件充电的恢复效果
   例如，二极管的反向和正向恢复

6. 表征瞬态脉冲下器件的线性特性
   例如，高电压下的电容变化

7. 表征设备的击穿特性
   例如，触摸板传感器微带线在静电放电时的火花和熔断。

8. 表征共模扼流圈和以太网变压器的饱和特性

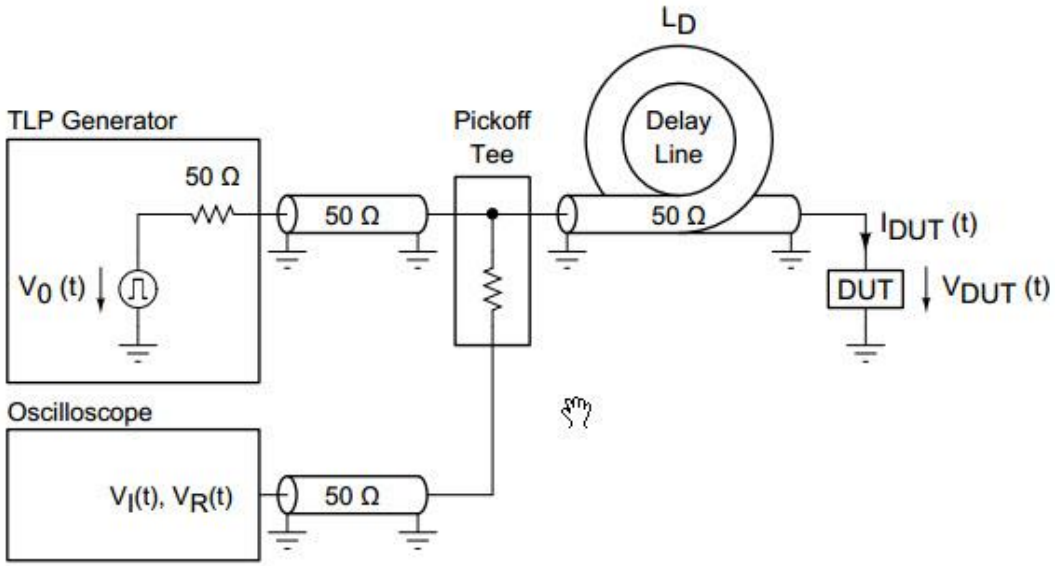
9. 测量多层电容器电容的非线性特性....

- 注意，TLP还有许多系统级应用，将会在另一个PPT中说明，如果需要，请与我们联系。

ESDEMC
EXPERT ESD/EMC SOLUTIONS

什么是TLP测试

- **超快TLP(Very Fast TLP, VF-TLP)**
  - 通常用来表征设备的钳位速度和栅氧化层穿通
  - 脉冲宽度非常窄 (< 10ns)
  - 上升时间小于脉冲宽度的15% (100ps to 500ps) at least? Or less than?
  - 超快TLP测量装置（通常由低损延迟线和T型宽带电压传感器，或宽带定向耦合器，或一对离DUT距离非常近的宽带定向电流和电压探头等组）可以单独并精确的测量入射和反射波
  - 需要使用频域电缆损耗去耦合

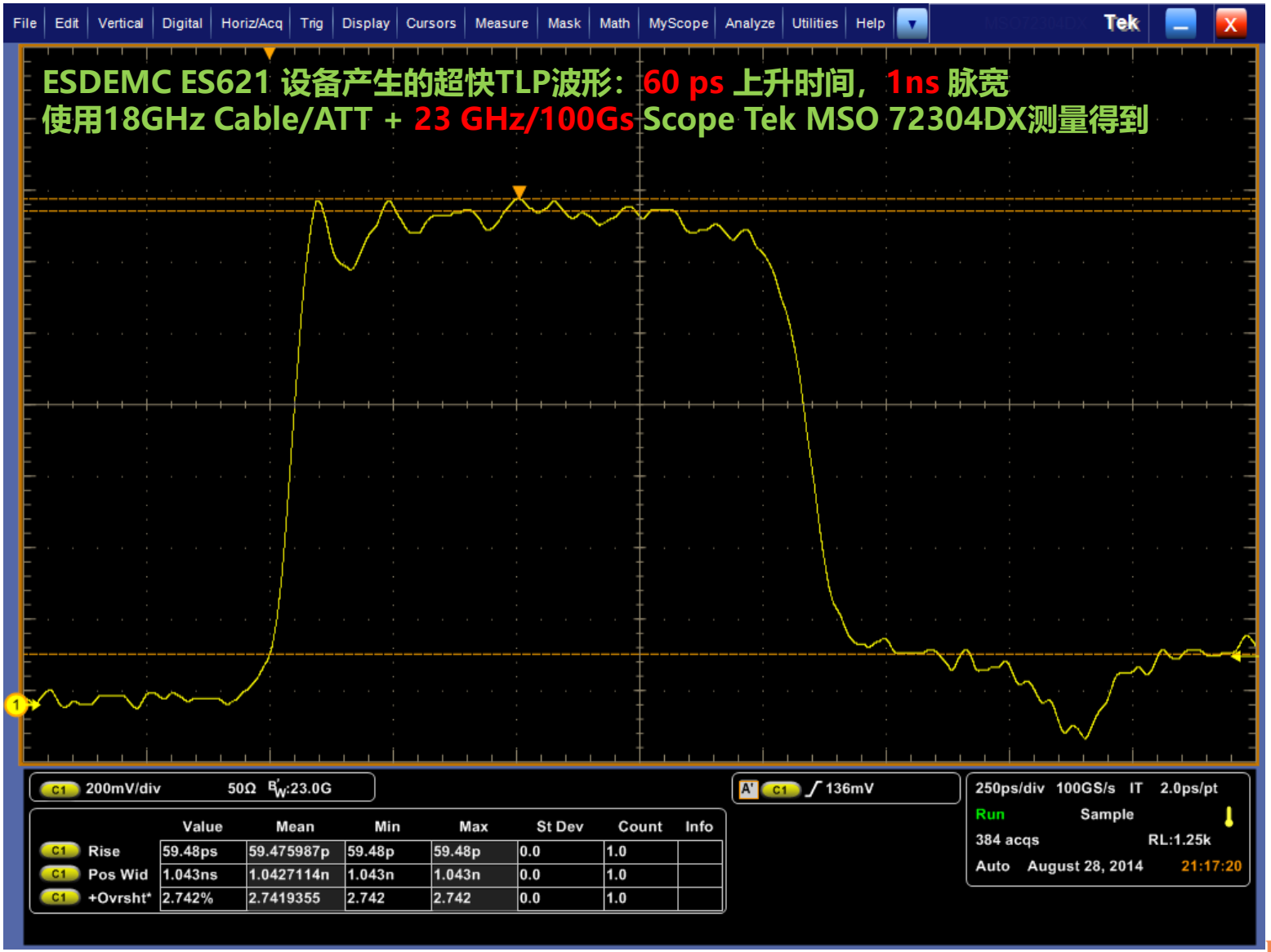


Graph 6

A Typical VF-TLP Measurement Setup with Delay Line

ESDEMC
EXPERT ESD/EMC SOLUTIONS

超快TLP脉冲

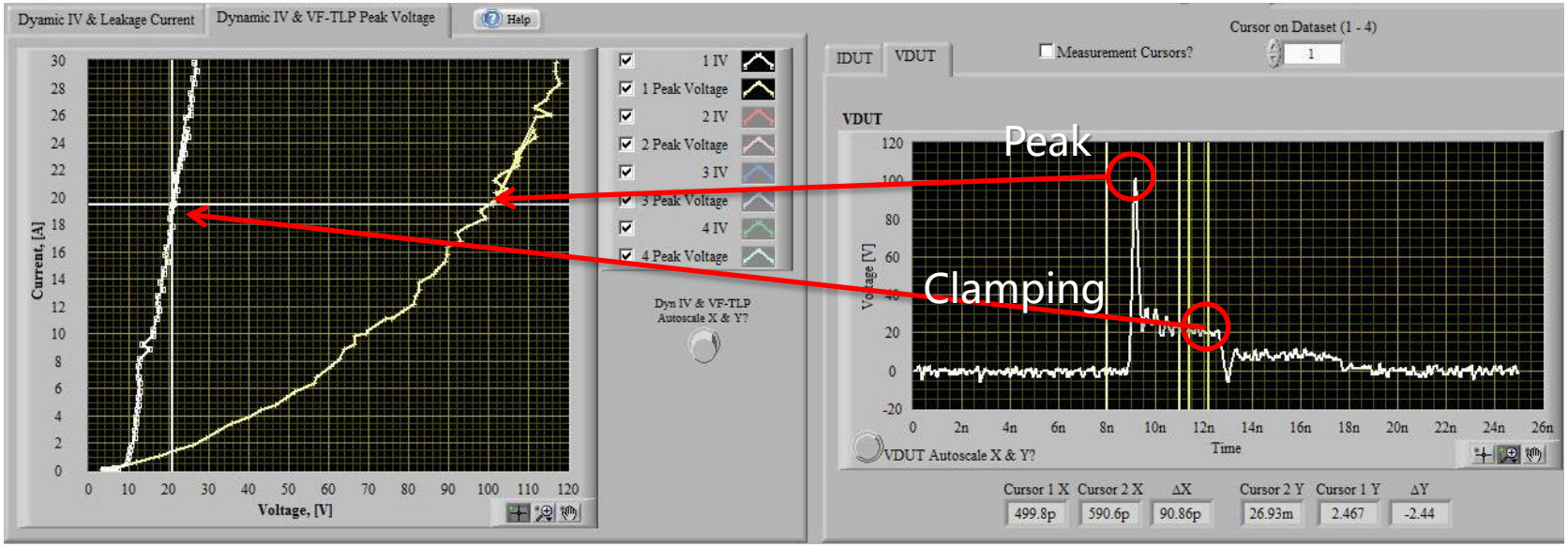


ESDEMC TECHNOLOGY LLC

ESDEMC
EXPERT ESD/EMC SOLUTIONS

TLP测试

- 使用TLP检测ESD保护电路**可通过的峰值电压和钳位电压**
  - 峰值电压是对脉冲上升/下降沿速率的初始响应
  - 钳位电压是保护器件完全开启并钳位后的输出电压
  - 一些器件对短时峰值电压敏感（高电场强度），因此两个参数对了解设备敏感度和设计最佳ESD保护方案都很重要。



ESDEMC
EXPERT ESD/EMC SOLUTIONS

ESD抗扰度测试 vs. TLP 测试 (脉冲参数)

	HBM	MM	IEC (2nd Peak)	IEC (1st Peak)	CDM
典型最大电压值*	4000V	400V		8kV (接触式)	2000V
典型最大电流值*	< 3A (对地)	< 7A (对地)	16A (@30ns)	30A	30A
上升时间*	2 – 10ns	~ns – 10ns	~ns	800ps	< 200ps
脉宽*	130 – 170ns	66 – 90ns	~100ns	~5ns	< 400ps
对应的TLP类型	标准TLP	标准TLP	标准TLP	超快TLP	超快TLP
典型失效模式	结点损伤，金属渗透，金属层熔化，接触点打火，栅氧化物损伤[11]	结点损伤，熔化，栅氧化物损伤[11]	熔化失效	氧化穿透	栅氧化物损伤，，电荷俘获，结点损伤[11]

* 典型值在各相关标准中有注明.

ESDEMC
EXPERT ESD/EMC SOLUTIONS

TLP测试 VS.其他ESD测试的优点

- **波形定义明确**
  - ESD发生器的标准中，电路和波形的定义都有太多不确定因素（没有测试路径的阻抗控制，只有特性时间内30%的容差……）。这使得不同的ESD发生器在不同的测试条件下会得到非常不同的ESD测试结果。TLP脉冲的波形干净一致。

- **测试装置可重复性高**
  - 手持ESD发生器可能导致测试装置的不一致，然而，TLP测试的夹具能够提供更易控制的测试装置。

- **自动快速测试，测量，生成报告!**
  - 通常，TLP测试有全自动化控制的脉冲，DC漏电流，I-V 曲线实时更新和故障自动检测。

- **能够记录设备特性，为ESD分析和设计提供重要信息！**
  - 从TLP测试中可以提取设备的许多有用瞬态特性信息，可用于设备的分析，建模和系统级ESD设计(System-Efficient ESD Design – SEED)。而传统的ESD测试只能得到用于Pass/Fail的结果。

ESDEMC
EXPERT ESD/EMC SOLUTIONS

一般测试步骤

- 校准: （仅当测试装置改变时需要）短路-开路-齐纳-负载 (SOZL, Short – Open – Zener – Load)
  - 短路和开路测量分别提供串联和并联电阻值
  - 齐纳和负载测量分别提供电压和电流修正系数
  - 每个数月或当测试装置改变时，需要进行校准This calibration should be performed every few months or if equipment is changed
- 测试标准件
  - 测量一个已知设备或器件，用于验证测试系统的正确性
- 生成报告
  - 脉冲宽度
  - 上升时间
  - 故障类别和等级（DC漏电流，熔断，snapback)
  - 出现故障时的TLP脉冲电压，DUT测试端口电压和电流
  - 可提供动态阻抗
  - Snapback (eSOA)

ESDEMC
EXPERT ESD/EMC SOLUTIONS

TLP系统配置注意事项

- **什么情况下需要TLP测试?**
  - 评估ESD保护器件性能（比较动态阻抗R_{dyn}和钳位速度）
  - 评估设备和模块的ESD失效等级
    - 当需要不同的脉冲形状(TLP, HMM, HBM ...)，脉冲宽度，上升时间 或者不同的电流注入等级(40A, 90A, 160A ...)时，可使用TLP测试
  - 评估安全工作区域
    - TLP可提供各种不同范围的脉冲宽度和注入等级
  - 触摸板的击穿和熔断敏感度
    - TLP可提供不同的脉冲注入和测量

- **需要配置什么设备?**
  - 脉冲发生器 —— 生成 TLP / VF-TLP / HMM / HBM 等...
  - 设备测量探头 —— PCB对应的SMA接头，IC测试夹具，探针台
  - 单端接地或差分注入 —— 高压带宽分离器和反相器
  - 电流和电压测量方法 —— 探头直接测量
  - 瞬态数据获取 —— 示波器（带宽由应用范围决定）
  - 偏置和直流测量—— SMU(source measurement unit)/电源/皮安表

ESDEMC
EXPERT ESD/EMC SOLUTIONS

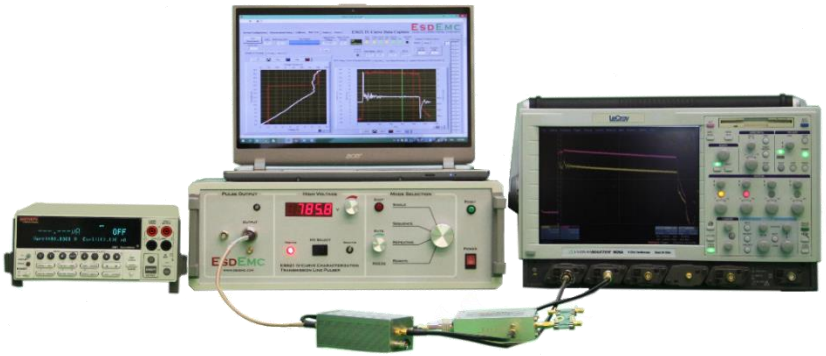
商业TLP 系统规格比较

- 标准TLP系统
  - 常用规格： **2kV开路电压/ 40A短路电流**
    - ESDEMC公司目前可提供高达**7kV / 140A** 的TLP系统,是世界上脉冲注入和IV曲线测量规格最高的系统
    - 其他生产商能提供的最高规格：**4kV / 80A, 或者 2kV / 40A**

- 超快TLP系统
  - 常用规格： 注入等级达到**1kV / 20A**, 有<=100ps的干净，快速，稳定的上升时间，宽范围模拟测量带宽（2.5 ~ 4GHz)以及数字频率补偿。
    - ESDEMC公司目前可提供的 超快TLP系统：
      - TLP脉冲可达**1kV / 20A，上升时间 为60ps**或者**5 kV / 100 A， 上升时间为200ps**
      - 高达6GHz模拟带宽测量，以及网络分析仪S参数所有端口频率补偿算法

ESDEMC
EXPERT ESD/EMC SOLUTIONS

世界顶级规格TLP动态IV曲线测量系统



2011 IV-TLP系统开始研发
2013 达到顶级规格
2014 最好的IV-TLP系统之一

规格/功能	ESDEMC ES620/ES621	其他公司的系统
最快上升时间	约60ps (世界最快)	100 ps, 200 ps
最长脉冲宽度	2000 us (1ms正在研发中)	1600 us, 400 ns
最大注入电流等级	160 A	80 A, 40A, 30A...
标准2D IV曲线分析	可以	可以
先进的3D IVT曲线分析	可以，目前是唯一一家	不可以，需要进行额外分析
电压测量方法	电阻直接测量，重叠TDR测量，非重叠TDR测量	通常只有1-2种
电流测量方法	电阻直接测量，电阻率方程，电感直接测量，重叠TDR，非重叠TDR	通常只有1-2种
错误校验方法	SOLZ校验, 所有端口S参数频率补偿, 触发定时校准	SOLZ校验
差分TLP脉冲和IV测试	可以，目前是唯一一家	不可以

ESDEMC TECHNOLOGY LLC

ESDEMC
EXPERT ESD/EMC SOLUTIONS

TLP测试的常见问题

- **TLP系统的价格是多少?**
  - 大多数商用TLP系统目前价格为10万至25万美元
    - ESDEMC公司提供ES620超便携低价版系统，价格约为8万至20万美金
    - ESDEMC承诺，当与其他商家的TLP系统价格相同时，我们的系统更好

- **客户能用自己的设备配置TLP系统吗?**
  - 大多数商用TLP系统不支持多种仪器配置，但ESDEMC公司的TLP软件兼容度高，客户可选择使用自己的仪器进行配置 (Agilent, Tek, Lecroy, Rigol, Keithley等...)。你只需点击几下，进行设置更改即可!

ESDEMC
EXPERT ESD/EMC SOLUTIONS

TLP测试的常见问题

- **TLP系统需要多大的带宽?**
  - 带宽取决于你所测量的IV窗口。大多数测量使用100ns TLP脉冲，若选取100ns脉冲的70%-90%时间窗口测量动态阻抗和脉冲失效等级，需要的带宽为200MHz。ESDA TLP标准测试需要更高带宽范围。
  - 如果你想测量脉冲注入的前几个ns时的设备特性，则需使用超快TLP发生器，它可产生干净稳定的上升沿，此时，推荐使用4GHz – 8GHz带宽的示波器。

ESDEMC
EXPERT ESD/EMC SOLUTIONS

谢谢!

- 如果您有关于ESD测试和应用的任何问题，请与我们联系info@esdemc.com，我们乐意为您提供帮助!

- 我们会持续更新PPT内容，并提供免费咨询。我们会发放最新技术说明和每季度促销信息，如果需要，请订阅。

- 接下来，是ESDEMC Technology公司简介

EsdEmc

Expert ESD/EMC Solutions

ES/ESD Solution

EMC Test Solution

HV System Design

RF System Design

我们致力于ESD/EMC解决方法，为您量身打造HV/RF系统设计
创立于2011年，美国，密苏里，罗拉

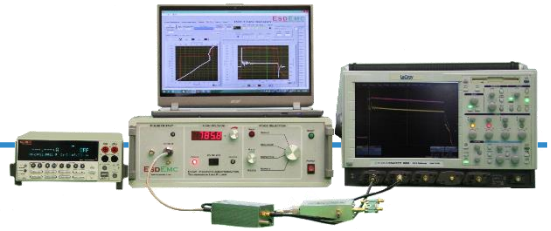
我们将会是本领域最好的商业解决方案提供商之一

by ESD/EMC Engineers, for ESD/EMC Engineers

发展成果(2011.03 至今)

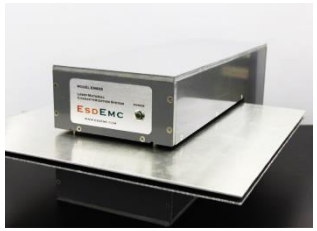
静电放电/瞬态

- **世界顶级规格**传输线脉冲系统（TLP/VFTLP）
- **世界首个商用** 电缆放电系统(Cable Discharge Event - CDE)
- ESD发生器，ESD电流靶，适配线
- 其他附加功能…



电磁兼容/射频

- 微波材料表征系统 (5-22 GHz)
- IC strip TEM 室 (4kV/ DC-5.5 GHz)
- 宽带射频放大器 (高达40 GHz)
- 宽带功率放大器(4GHz/25W)
- 其他附加功能…



其他主要产品

- 宽带高压脉冲衰减器 (对称的, 4kV / 3.5GHz)
- 示波器ESD抑制器 (高达6 GHz)
- 高压脉冲差分分离器(1MHz to 2GHz)
- 更多了解，请访问ESDEMC.COM网站

ESDEMC TECHNOLOGY LLC

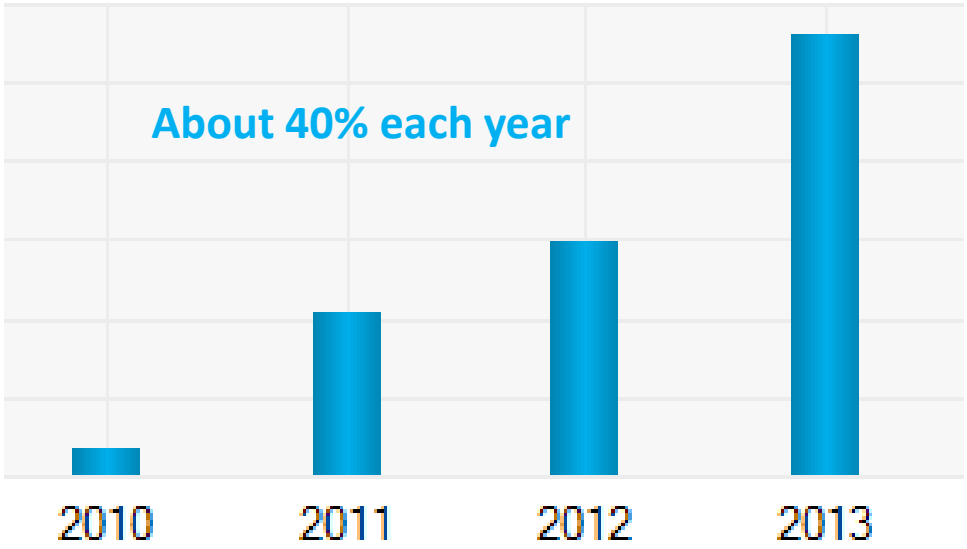
ESDEMC
EXPERT ESD/EMC SOLUTIONS

目前的部分客户(2011至2013)

ESDEMC TECHNOLOGY LLC

EsdEmc
Expert ESD/EMC Solutions

公司的成长(2011 to 2013)



Niche: Solutions by ESD/EMC experts, innovative & flexible, focused on ESD/EMC design, analysis and debugging

Growth:

2010.09	Business setup in Founder's home
2011.03 to now	Group of 5 professionals

ESDEMC公司地理位置优越，我们与世界顶级EMC学术研究实验室MST EMC为邻。

ESDEMC TECHNOLOGY LLC

ESDEMC
EXPERT ESD/EMC SOLUTIONS

ESDEMC Group @ 2012 IEEE EMC Symposium

ESDEMC
EXPERT ESD/EMC SOLUTIONS

参考

1. Martin Rodgaard, 2007, ESD – Electrostatic Discharge, Retrieved Jan 13, 2015 from: http://hibp.ecse.rpi.edu/~connor/education/Surge/Presentations/ESD_mr.pdf
2. ESDA/JEDEC Joint Standard for Electrostatic Discharge Sensitivity Testing - Human Body Model (HBM) – Component Level, ANSI/ANSI/ESDA/JEDEC JS-001-2010, April 2010.
3. ESD Association Standard Test Method for Electrostatic Discharge Sensitivity Testing - Machine Model – Component Level, ESD STM5.2-2012, July 2013.
4. ESD Association Standard for Electrostatic Discharge Sensitivity Testing - Charge Device Model (CDM) – Component Level, ESD S5.3.1-2009, December 2009.
5. International Electrotechnical Commission, Electromagnetic Compatibility (EMC) – Part 4-2: Testing and measurement techniques – Electrostatic discharge immunity test, IEC 61000-4-2:2008, 2008.
6. ESD Association Standard Practice for Electrostatic Discharge Sensitivity Testing - Human Metal Model (HMM) – Component Level, ANSI/ESD SP5.6-2009, September 2009.
7. D.C. Wunsch and R.R. Bell, "Determination of Threshold Failure Levels of Semiconductor Diodes and Transistors due to Pulse Voltages," *IEEE Trans. Nuc. Sci.*, NS-15, pp. 244-259, 1968.
8. D.J. Bradley, J.F. Higgins, M.H. Key and S. Majumdar, "A Simple Laser-triggered Spark Gap for Kilovolt Pulses of Accurately Variable Timing," *Opto-Electronics Letters*, vol. 1, pp. 62-64, 1969.
9. T.J. Maloney and N. Khurana, "Transmission Line Pulsing Techniques for Circuit Modeling of ESD Phenomena," *1985 EOS/ESD Symposium Conference Proceedings*, pp. 49 -54, 1985.
10. W. Simburger, "AN 210 Effective ESD Protection Design at System Level Using VF-TLP Characterization Methodology," Infineon Application Note 210, Revision 1.3, December 2012.
11. D. Byrd, T. Kugelstadt, 2011, Understanding and Comparing the Differences in ESD Testing, Retrieved Jan 14 2015 from: http://www.edn.com/design/test-and-measurement/4368466/Understanding-and-comparing-the-differences-in-ESD-testing

ESDEMC
EXPERT ESD/EMC SOLUTIONS

参考 Cont'd

Graph 1 & 2: (n.a.), 2013, How to Select Transient Voltage Suppressors (TVS Diode)?, Retrieved Jan 13 2015 from: http://www.completepowerelectronics.com/tvs-diode-selection-tutorial/

Graph 3 & 4: D. Byrd, T. Kugelstadt, 2011, Understanding and Comparing the Differences in ESD Testing, Retrieved Jan 14 2015 from: http://www.edn.com/design/test-and-measurement/4368466/Understanding-and-comparing-the-differences-in-ESD-testing

Graph 5 & 6: Reference 10

Picture 1: Eric Puszczewicz, 2011, Electrostatic Discharge - ESD Basics and Protection, Retrieved Jan 13 2015 from: http://www.slideshare.net/ericpuszczewicz/esd-basics-by-transforming-technologies

Picture 2: Ron Kurtus, 2015, Static Electricity Sparks, Retrieved Jan 13 2015 from: http://www.school-for-champions.com/science/static_sparks.htm#.VLU51yvF9MY

Picture 3: K. Vermeer, 2011, Static dissipative ESD footware, Retrieved Jan 15 2015 from: http://electronics.stackexchange.com/questions/23107/static-dissipative-esd-footware

Picture 4: (n.a.), (n.d.), Anti-Static Design – ESD Protection, Retrieved Jan 15 2015 from: http://www.ecs.com.tw/ECSWebSite/Product/Product_Detail.aspx?DetailID=1446&MenuID=17&LanID=0

Picture 5: (n.a), 2000, Maxim Leads the Way in ESD Protection, Retrieved Jan 15 2015 from: http://www.maximintegrated.com/en/app-notes/index.mvp/id/639

Picture 6: T. G. Nagy, (n.d.), Effective ESD Transient Voltage Surge Suppression in New, High Speed Circuits, Retrieved Jan 15 2015 from: http://www.compliance-club.com/archive/old_archive/020930.htm

Picture 7: P. Yu, 2010, Component Failure Analysis – Hermetic Packaging, Retrieved Jan 15 2015 from: http://www.empf.org/empfasis/2010/Apr10/help-410.html

Picture 8: P. Corr, 2014, Laser Diodes: Laser diode operation 101: A user's guide, Retrieved Jan 15 2015 from: http://www.laserfocusworld.com/articles/print/volume-50/issue-03/features/laser-diodes-laser-diode-operation-101-a-user-s-guide.html

Picture 9: S. Pefhany, 2014, FET Electrostatic Damage, Retrieved Jan 15 2015 from: http://electronics.stackexchange.com/questions/97605/fet-electrostatic-damage