

## 利用ADG5412F解决模拟输入的IEC系统保护

作者: David Forde、David Aherne、Jeffrey Ryan

### 简介

在恶劣电磁环境中工作的电子系统须按照特定标准对其输入和输出端口加以保护,以防止器件受到静电放电(ESD)、电快速瞬变(EFT/突波)、浪涌事件影响。

本应用笔记说明ADI公司新一代集成过压保护(OVP)功能的故障防护系列开关,结合极少的外部元件,能够加快符合IEC 61000-4 ESD、EFT和浪涌事件标准的保护架构的设计过程。本应用笔记阐述了过压故障防护原理,并对可以实现IEC标准水平高可靠性的电路进行了说明。

本应用笔记所述的瞬变电压抑制器(TVS)设计窗口概念,在元件选择方面为系统设计人员提供了更大的灵活性,并能使系统设计得以简化同时实现更高的精度。

本应用笔记阐释了该IEC水平的保护解决方案如何将下游保护要求降至相当于1 kV人体模型(HBM) ESD的水平。

### 电磁兼容性

IEC 61000规范定义了一组电磁兼容性(EMC)抗扰度要求,适用于在住宅、商业和轻工业环境中使用的电气和电子设备。这套规范中有三个重要的高压瞬变规范:

- IEC 61000-4-2 ESD
- IEC 61000-4-4 EFT
- IEC 61000-4-5浪涌耐受性

所有这些规范都定义了测试方法,用以评估电子和电气设备对指定现象的耐受性。

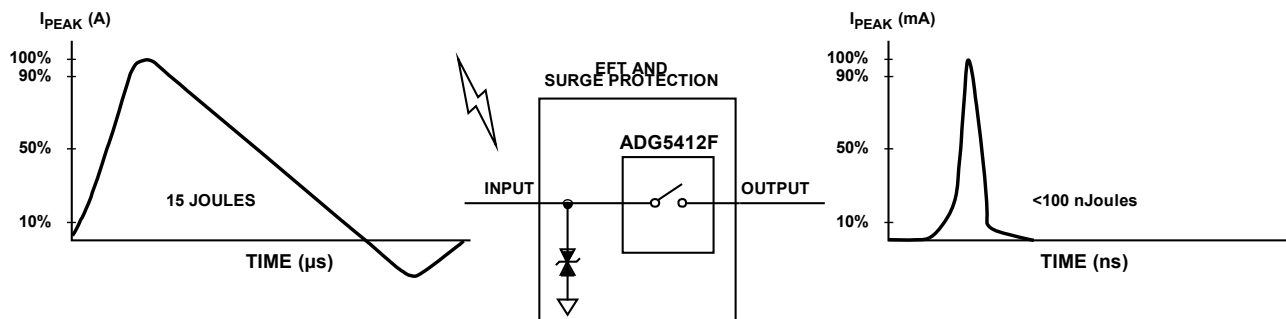


图1. 完整保护解决方案

## 目录

简介.....	1	静电放电测试, IEC61000-4-2 .....	6
电磁兼容性.....	1	电快速瞬变脉冲群(EFT) .....	8
修订历史 .....	2	EFT 测试, IEC61000-4-4 .....	9
过压故障保护 .....	3	浪涌 .....	10
系统级保护电路 .....	4	浪涌测试, IEC61000-4-5 .....	10
TVS 选择 .....	4	结论 .....	11
系统级保护 .....	5	参考文献 .....	12
静电放电(ESD) .....	6		

## 修订历史

2017年7月—修订版0: 初始版

## 过压故障保护

ADI公司高可靠性的故障防护开关和多路复用器产品组合 (ADG5208F和ADG5412F) 提供高达 $\pm 55$  V的OVP功能。这些器件还有高达 $\pm 55$  V的掉电保护、过压故障检测、防闩锁、高达5.5 kV的HBM ESD防护等级。除了实现业界领先的高可靠性以外, 这些具有OVP功能的开关还保持了业界领先的模拟性能, 可以应用于高阻抗以及低阻抗系统。

断电、热插拔连接、电源时序问题和接线错误是持续直流或瞬变过压的常见原因。将具有OVP功能的模拟开关放在系统的输入或输出节点, 就可以保护系统输入和输出免受在有电或无电情况下高达 $\pm 55$  V的过压影响。该类模拟开关会隔离故障, 将输入端与电路其余部分断开。还可以保护下游电路, 因为故障不会通过箝位二极管传导进入系统。

用于开关、放大器、模数转换器(ADC)和数模转换器(DAC)等的传统互补金属氧化物半导体(CMOS)架构, 在器件输入端和输出端上均有ESD保护二极管。图2显示了ADI公司具有OVP功能的模拟开关的功能框图。传统输入保护ESD二极管对被一个双向ESD保护单元取代, 其位于输入端点(Sx)和内部开关单元之间, 触发电压约为70 V。因此在输入端发生过压时, 开关输入端的电平不再箝位到供电轨, 开关输入端可承受高达 $\pm 55$  V的电压。双向ESD保护单元提供高达5.5 kV HBM ESD防护能力。

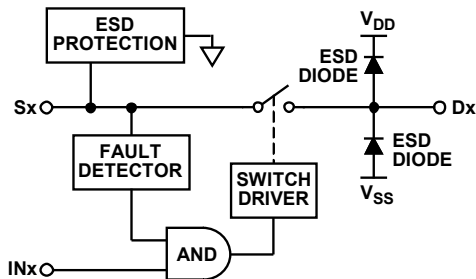


图2. 具有OVP功能的模拟开关功能框图

开关内部故障检测电路持续监控输入端电平, 并将其与故障基准电平 (通常为 $V_{DD}$ 和 $V_{SS}$ ) 相比较。当输入检测到过压状态时, 受影响的通道约在500 ns后关闭, 输入端进入高阻态, 将故障与任何敏感的下游电路完全隔离。在开关未作出反应的这500 ns期间, 开关输出端的上下二极管对输出电压进行箝位, 同样起到保护下游电路的作用。图3显示了该输出电压保护随时间的变化。

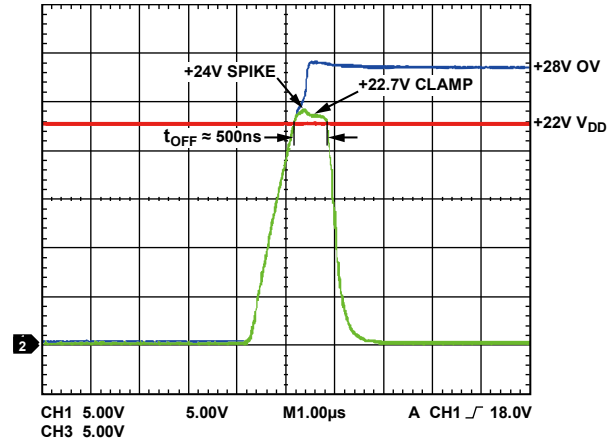


图3. 输出电压随时间的变化

该开关的高可靠性表现为如下方面:

- $\pm 55$  V交流和持续直流过压保护
- 掉电保护高达 $\pm 55$  V
- 过压故障防护
- 任何情况下都不会发生闩锁
- 5.5 kV HBM ESD额定值

## 系统级保护电路

在系统层面，过压保护、防闩锁和EMC保护（ESD、EFT、浪涌）通常由一系列分立器件实现，由于信号路径中存在的漏电流和额外电阻，所有这些器件都可能造成系统性能和精度下降。

借助ADI公司过压故障防护器件的高可靠性，并结合单个瞬变电压抑制器(TVS)和一个低值电阻( $\leq 30\ \Omega$ )，ADG5412F可以承受高达16 kV IEC ESD（气隙放电）、8 kV IEC ESD（接触放电）、4 kV EFT和4 kV浪涌的高压瞬变。图4显示了该保护电路。

正常工作条件下，TVS器件具有很高的对地阻抗。当在系统输入端存在一个大于TVS击穿电压的瞬变电压时，TVS被击穿并提供低阻抗接地路径，将瞬变电流从开关输入端转移到地，从而输入端电压被箝位。TVS器件的重要参数包括：工作峰值反向电压，低于此电压便不会发生明显的导通；击穿电压，在该电压时发生一定程度的导通；以及最大箝位电压，这是传导额定最大电流时器件上的最大电压。

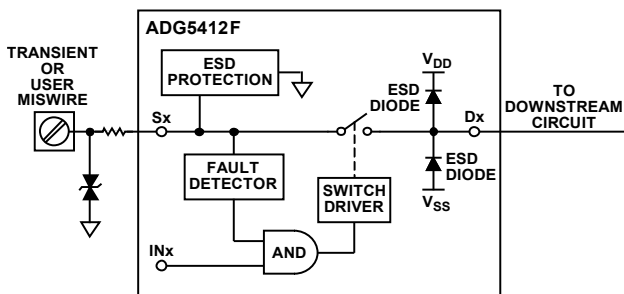


图4. 保护电路图

此电路依照IEC61000-4-2、IEC61000-4-4和IEC61000-4-5标准进行测试，发现ADG5412F器件能够承受非常高的IEC ESD、EFT和浪涌瞬变。

表1显示了ADG5412F结合TVS器件和电阻的不同组合所测得的结果。

表1. TVS器件和电阻的不同组合的测试结果

保护	IEC ESD 接触(kV)	IEC ESD 气隙(kV)	EFT (kV)	浪涌 (kV)
33 V TVS和0 $\Omega$ 电阻	5	未测试	3	4
33 V TVS和10 $\Omega$ 电阻	8	16	4	4
45 V TVS和0 $\Omega$ 电阻	4	未测试	2	4
45 V TVS和15 $\Omega$ 电阻	8	16	4	4
54 V TVS和30 $\Omega$ 电阻	8	16	4	4

ESD和EFT的激励信号具有非常快速的上升时间，经过初始过冲后，瞬变被TVS器件箝位。引起过冲的原因是TVS对上升时间非常快的ESD/EFT脉冲的响应速度不够快，因此需要一个小电阻来提高ESD/EFT防护水平，如表1所示。

## TVS选择

选择TVS器件时，务必确保其最大工作电压既大于要保护的引脚的正常工作电压，又大于接线错误引起的任何可能存在的已知系统过压。TVS最大工作电压与ADG5412F具有的 $\pm 55$  V OVP性能相结合，为TVS选择提供了一个很宽的设计窗口。

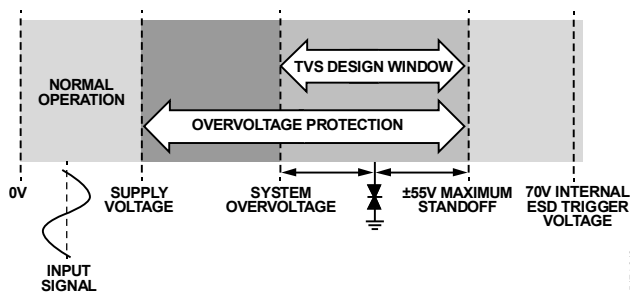


图5. TVS设计窗口

图5显示了一个与外部接口的系统输入端的工作区域。最左边的区域表示正常工作区间，输入电压位于电源电压范围以内。左起第二个区域表示输入端可能存在持续直流或长时间交流过压的范围，原因是断电、接线错误或短路。另外，图中最右侧是ADG5412F内部ESD保护二极管的触发电压。

TVS设计窗口区域取决于开关的 $\pm 55$  V过压保护区间。该窗口由OVP开关的最大关态电压与系统中可能存在的最大过压之差决定。为保护系统输入和敏感下游电路达到IEC标准的抗干扰要求，同时为了始终处在OVP开关的工作范围以内，应选择击穿电压在TVS设计窗口之内的TVS。此设计窗口概念使得系统设计人员可以灵活选择TVS，只要其击穿电压在这个很宽的电压范围以内即可。

选择TVS器件时，另一个要考虑的参数是其最大箝位电压。在浪涌事件期间，当越来越大的电流流过TVS器件时，TVS的箝位电压可以升高到最大箝位电压。对于TVS，此最大箝位电压高于击穿电压。高击穿电压（如54 V）TVS的最大箝位电压大于ADG5412F数据手册中针对源极引脚规定的 $\pm 55$  V直流绝对最大额定值。但是，“浪涌测试，IEC61000-4-5”部分证明，在浪涌瞬变持续时间内，ADG5412F可以承受大于直流最大额定值的电压。这是因为浪涌瞬变的上升时间比ESD脉冲慢得多，故在浪涌瞬变持续时间内，ADG5412F内部ESD保护不会触发。

## 系统级保护

在图4所示电路中，分立TVS和电阻保护ADG5412F免受IEC ESD、EFT和浪涌事件影响。ADG5412F可保护电路免受过压故障、闩锁和热插拔事件的影响。为了全面保护系统输入免受ESD、EFT和浪涌事件影响，不仅要确保OVP器件（ADG5412F）能承受瞬变电压，而且要确保充分抑制ADG5412F漏极(Dx)上离开开关的能量水平，避免下游器件受损。

图6显示了在IEC ESD、EFT和浪涌事件期间，用于量化ADG5412F输出端输出的能量水平的设置。

测试设置复制了一个典型系统，其中ADG5412F保护下游器件的输入。上下二极管代表任何下游电路（如放大器或ADC）中存在的输入ESD保护二极管。在瞬变事件期间，ADG5412F能够有效降低到达下游器件的能量，下一部分中的数据证明了这一点。下游器件的输入ESD保护二极管消除保护电路输出端残留的微小能量，就像在HBM ESD事件期间所做的一样。

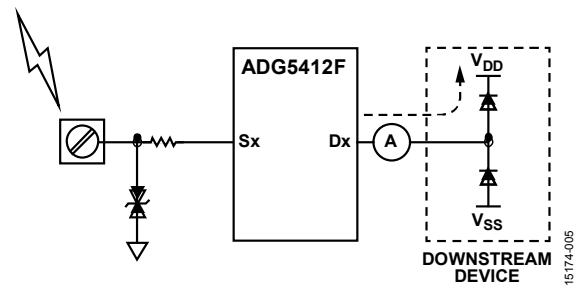


图6. 测试设置

## 静电放电(ESD)

ESD是指静电荷在不同电位的实体之间的突然传输，由靠近接触或电场感应引起。其特征是在短时间内有高电流流过。

IEC 61000-4-2测试的主要目的是确定系统在工作过程中对系统外部ESD事件的抗扰度。IEC 61000-4-2规定要使用两种耦合方法测试：接触放电和气隙放电。接触放电是指放电枪直接与受测装置相连。气隙放电使用更高的测试电压，但不会直接接触受测装置。

在气隙放电测试期间，放电枪的充电电极朝向受测单元移动，直到气隙上发生电弧放电。放电枪不与受测装置直接接触。气隙测试的结果和可重复性会受到多种因素的影响，包括湿度、温度、气压、距离和放电枪逼近受测装置的速率。与接触放电方法相比，气隙放电方法能够更好地反映实际ESD事件，但可重复性较差。

图7显示了规范所述的8 kV接触放电电流波形。需要注意的关键波形参数是不到1 ns的快速上升时间、大约60 ns的短脉冲宽度和30 A的峰值电流。

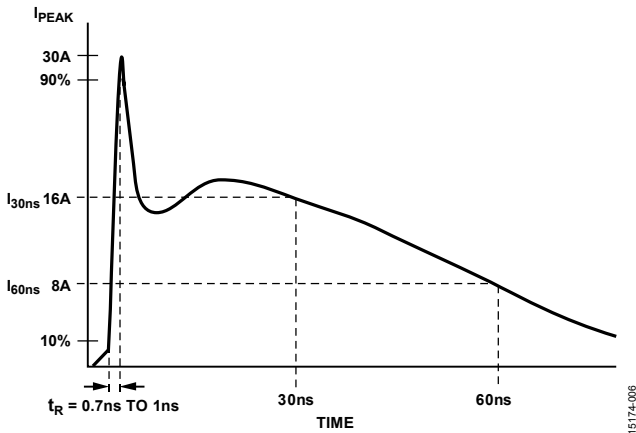


图7. IEC 61000-4-2 ESD波形(8 kV)

该测试是按单次放电进行的。测试点可能承受至少10次正极放电和10次负极放电。推荐的放电间隔为1秒。

将ESD脉冲施加于保护电路输入端时，经过初始过冲后，输入端电压由TVS器件(SMAJ54CA)箝位在54 V。由于脉冲持续时间非常短（大约60 ns），所以ADG5412F内部OVP电路没有时间作出反应，将下游电路与ESD事件隔离开来。但是，ADG5412F输出端的内部保护二极管变为正偏，将ADG5412F的输出电压箝位在V<sub>DD</sub> + 0.7 V。

输出端的这些内部二极管可靠性很高，足以带走大部分电流，从而保护下游器件，使系统免受初始8 kV ESD事件影响。

### 静电放电测试，IEC61000-4-2

图8显示了IEC瞬变事件期间通过电路的电流路径。大部分电流通过TVS器件分流到地（路径I<sub>1</sub>）。路径I<sub>2</sub>显示了开关断开所需的500 ns时间内消散的电流。最后，路径I<sub>3</sub>中的电流是下游器件必须承受的电流水平。

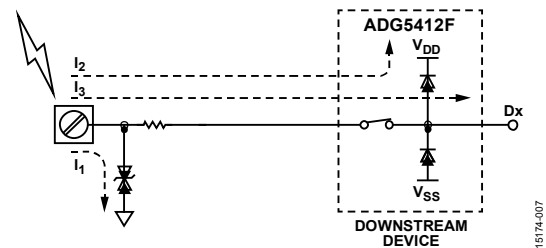


图8. ESD事件期间的电流路径

图9显示了在开关输出端测得的电流,条件是将 $\pm 8$  kV IEC ESD 接触放电脉冲施加于 ADG5412F 输入端,采用 54 V TVS (Bourns SMAJ54CA)和 30  $\Omega$  串联电阻。在 TVS 箝位瞬变电压之前有一个初始过冲(参见“TVS 选择”部分),以免触发 ADG5412F 内部 ESD 保护(需要 30  $\Omega$  电阻)。在 IEC ESD 事件期间,在 ADG5412F 输出端(Dx)测得的峰值电流仅有 678 mA。

输出端测得的峰值电流脉冲宽度大约为 60 ns,可以与 HBM ESD事件相比较。1 kV HBM ESD电击的峰值电流约为 660 mA,持续时间为 500 ns。因此,在图4所示的配置中使用 ADG5412F时,8 kV IEC ESD电击被衰减为不到 1 kV 的 HBM ESD事件。这可以与下游器件的 HBM ESD 额定值相比较。

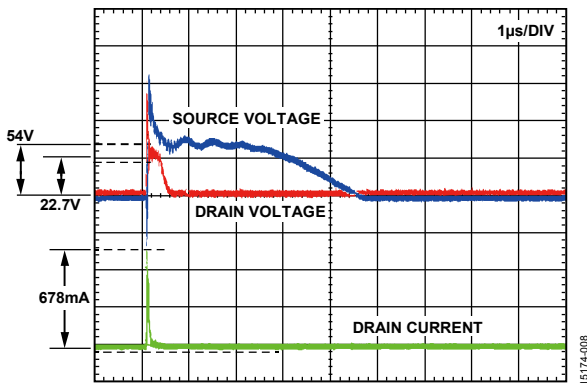


图9. 8 kV事件期间的漏极电压和漏极(Dx)输出电流

类似地,图10显示了在开关输出端测得的电流,条件是将 $\pm 16$  kV IEC ESD气隙放电脉冲施加于 ADG5412F 输入端,采用 54 V TVS (Bourns SMAJ54CA)和 30  $\Omega$  串联电阻。

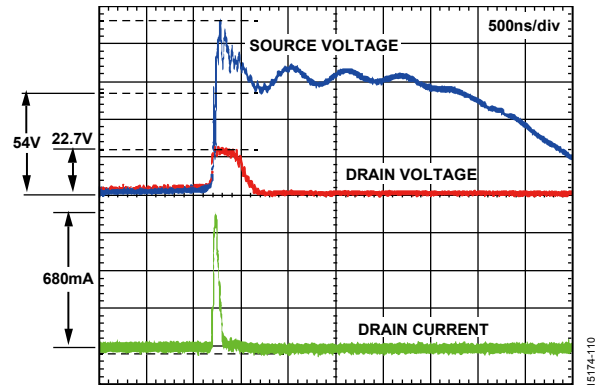


图10. 16 kV气隙放电事件期间的漏极电压和漏极(Dx)输出电流

在 IEC ESD事件期间,在 ADG5412F 输出端测得的峰值电流仅有 680 mA,这几乎与 8 kV 接触放电测试结果相同。

## 电快速瞬变脉冲群(EFT)

EFT测试涉及将快速的瞬变脉冲群耦合到信号线上，以表征与外部开关电路关联的瞬变干扰，这类电路能够以容性方式耦合至信号线。这种测试反映了开关触点抖动，或者因为感性或容性负载切换而产生的瞬变，而所有这些在工业环境中都很常见。IEC 61000-4-4中定义的EFT测试尝试模拟因为这些类型的事件产生的干扰。

图11显示了EFT波形。输出波形由重复的5 kHz高电压瞬变尖峰组成。尖峰间隔300 ms，每个尖峰持续时间为15 ms。每个脉冲具有5 ns的上升时间( $t_R$ )和50 ns的持续时间( $t_D$ )，这些时间在波形的上升和下降沿的50%点之间测量。与ESD瞬变类似，单个EFT脉冲的特性也是快速上升时间和短脉冲宽度。单次脉冲的总能量类似于ESD脉冲。

IEC 61000-4-4规定这些快速突发瞬变通过容性箝位器耦合到输入线路。EFT通过箝位器容性耦合到输入线路，而不是直接接触。为了在系统级测试中复制此耦合板，将一个0.5  $\mu\text{F}$ 耦合电容连接到IC输入端。这是依照IEC 62215标准，它是IEC61000-4-4标准的IC级版本。

将这些EFT脉冲施加于保护电路输入端时，会以类似ESD事件的方式抑制电流。经过初始过冲后，4 kV EFT电压被54 V TVS器件箝位，未导向TVS的大部分残留电流被ADG5412F输出端内部的高可靠性的二极管带走。对于每个尖峰中的每个脉冲，都会重复这个保护动作。

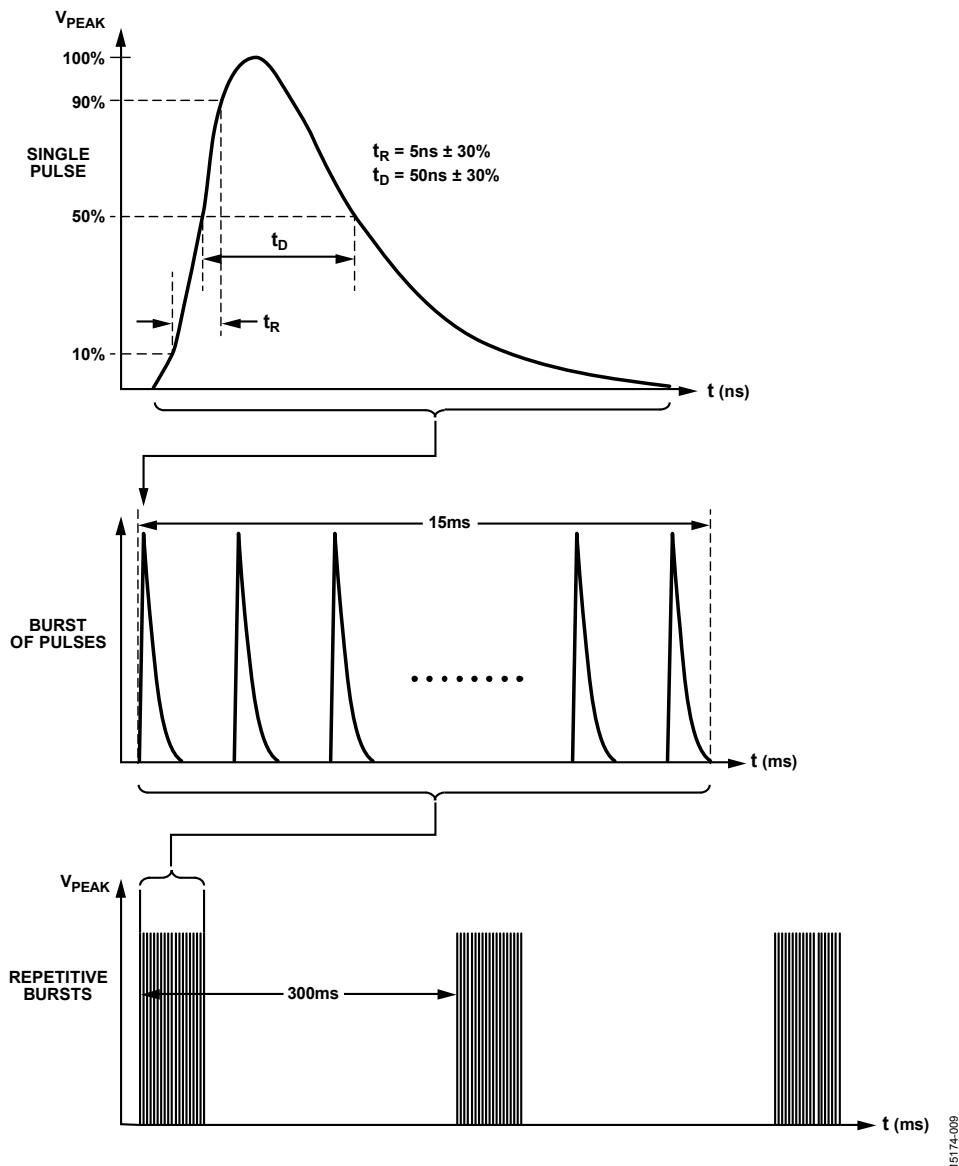


图11. IEC 61000-4-4 EFT波形



### EFT测试, IEC61000-4-4

图12显示将±4 kV IEC EFT脉冲施加于ADG5412F器件输入端, 采用54 V TVS和30 Ω串联电阻。在EFT突波的一个脉冲期间, 输出端测得的峰值电流仅有420 mA。

类似于ESD事件, 该峰值电流脉宽大约60 ns, 可以与HBM ESD事件相比较。750 V HBM ESD电击的峰值电流约为500 mA, 持续时间为500 ns。因此, 在图5所示的配置中使用ADG5412F时, 可将4 kV IEC EFT电击衰减为不到750 V的HBM ESD事件, 这是大部分现代IC都能承受的。

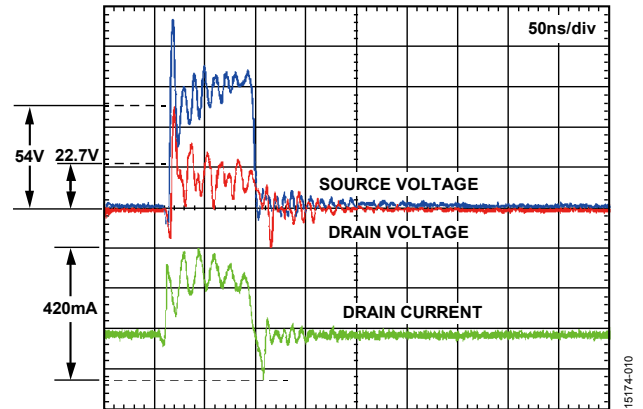


图12. 单次脉冲的EFT电流

## 浪涌

浪涌瞬变通常由开关操作造成的过压情况或雷击造成。开关瞬变的起因可能是电力系统切换、配电系统中的负载变化或各种系统故障（例如安装时与接地系统形成短路和电弧故障）。雷电瞬变的原因可以是附近的雷击将高电流和电压注入电路中。IEC 61000-4-5定义了容易受到这些浪涌现象影响的情况下用于评估电子电气设备抗扰度的波形、测试方法和测试级别。

标准的波形由波形发生器产生，用于表征开路电压和短路电流事件。标准描述了两种波形。10  $\mu\text{s}$ /700  $\mu\text{s}$ 组合波形用于测试要连接到对称通信线路（如电话交换线路）的端口。1.2  $\mu\text{s}$ /50  $\mu\text{s}$ 组合波形用于所有其他情形，特别是短距离信号连接。

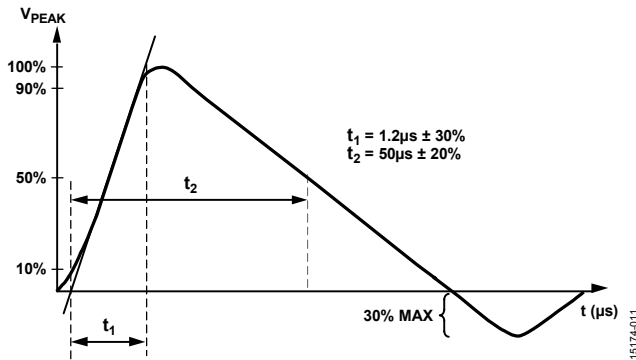


图13. IEC 61000-4-5浪涌1.2  $\mu\text{s}$ /50  $\mu\text{s}$ 波形

图13显示1.2  $\mu\text{s}$ /50  $\mu\text{s}$ 浪涌瞬变波形。ESD和EFT拥有类似的上升时间、脉冲宽度和能量级别。但是，浪涌脉冲的上升时间要慢得多(1.2  $\mu\text{s}$ )，持续时间要长得多，脉冲宽度为50  $\mu\text{s}$ ，这两个值均远大于ESD脉冲和EFT的单个脉冲。浪涌脉冲的能量级别可以比ESD或EFT脉冲能量级别高出

三到四个数量级。因此，浪涌瞬变被认为是最严苛的EMC瞬变规范。在浪涌事件期间，输入端电压被TVS器件箝位。由于浪涌事件持续时间为50  $\mu\text{s}$ ，因此具有OVP功能的开关有充足的时间作出反应，隔离下游电路。仅仅经过500 ns，ADG5412F的OVP功能便将下游器件与瞬变隔离。事实上，这是将50  $\mu\text{s}$ 浪涌输入变成500 ns脉冲，显著降低传输到下游器件的能量。

### 浪涌测试，IEC61000-4-5

将 $\pm 4$  kV浪涌脉冲施加于ADG5412F输入端时（采用54 V TVS和30  $\Omega$ 串联电阻），输出端测得的峰值电流为616 mA。

图4所示的保护电路将具有潜在破坏性的长时间高电流浪涌事件衰减成持续不到500 ns、峰值电流为608 mA的短时间事件。相比之下，1 kV HBM ESD事件的峰值电流约为660 mA，持续时间为500 ns。

图14显示了500 ns后的开关动作，将漏极与浪涌事件隔离。

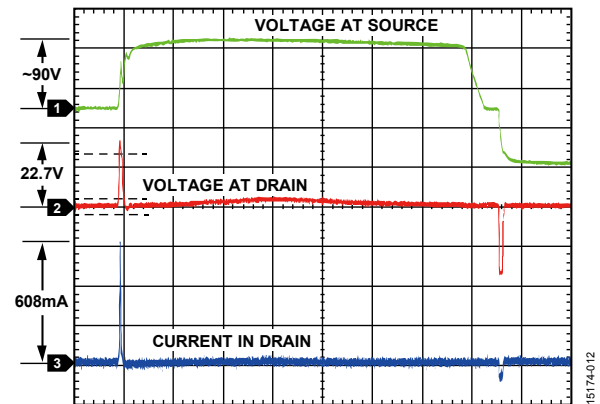


图14. 浪涌事件期间OVP工作原理

## 结论

本应用笔记讨论的保护架构显示了如何利用ADG5412F并结合单个TVS器件和低值串联电阻，保护系统输入或输出节点免受高达16 kV IEC ESD、4 kV EFT和4 kV浪涌瞬变电压的影响。本应用笔记还讨论了所述的保护架构如何将下游电路的保护需求降至仅相当于1 kV HBM ESD的水平。此信息为系统设计人员提供了设计系统输入输出保护电路并实现下列优势所需的知识：

- 简化保护设计。
- 加速产品上市。
- 提高保护电路性能，因为所需的分立元件减少。
- 减小信号路径中的串联电阻阻值。
- 由于TVS设计窗口很宽，TVS选择更方便。
- 达到下列标准的系统级保护：
  - IEC61000-4-2 16 kV气隙放电。
  - IEC61000-4-2 8 kV接触放电。
  - IEC61000-4-4 4 kV。
  - IEC61000-4-5 4 kV。
- 交流和持续直流过压保护高达±55 V。
- 掉电保护高达±55 V。

## 参考文献

*电磁兼容性(EMC)第4-2节*: “测试和测量技巧—静电放电抗扰性试验” (IEC 61000-4-2:2008, 2.0版)。

*电磁兼容性(EMC)第4-4节*: “测试和测量技巧—电快速瞬变脉冲群抗扰度测试” (IEC 61000-4-4:2012, 3.0版)。

*电磁兼容性(EMC)第4-5节*: “测试和测量技巧—浪涌抗扰性试验” (IEC 61000-4-5:2005, 2.0版)。

*JEDEC JS-001*: “人体模型静电放电测试标准” (ESDA/JEDEC JTR001-01-12)。

*Manning, Michael. 应用工程师问答—40: 恶劣工作环境中的开关和多路复用器设计考虑 (模拟对话, 2011)。*

*O’ Sullivan, Paul. 用过压故障保护模拟开关代替分立保护器件 (模拟对话, 2016)。*