

应用说明

ANP143 | TVS 二极管的基础知识、功能及其应用



Heinz Zenkner 博士

1. 基础理论

TVS 二极管（瞬态电压抑制器）用于保护电路免受高压峰值的影响。它们专为反向电压工作而设计，当反向电压超过所谓的击穿电压时，它们会分走绝大部分浪涌电流。它们属于大功率齐纳二极管，是雪崩二极管的一种。TVS 二极管可以承受较高的功率峰值（数百或数千瓦），但齐纳二极管的电压容差相对较窄。TVS 二极管的寄生电容通常高于齐纳二极管。TVS 二极管有单向和双向两种。单向 TVS 二极管在一个方向上可阻断额定电压，而在另一个方向上则与正常的正向偏置二极管无异。双向 TVS 二极管可在两个方向上阻断额定电压（适用于保护交流电应用）。单向 TVS 二极管的导通时间比对应的双向 TVS 二极管快得多（例如，5 ps 对比 5 ns）。

单向和双向 TVS 二极管的电气符号如图 1 所示。

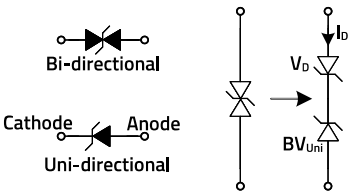
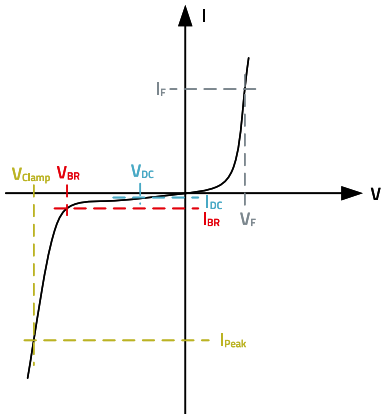


图 1. 单向和双向 TVS 二极管的电气符号。右：双向 TVS 二极管的等效电路。

图 1 右侧的插图展示了如何想象一个双向 TVS 二极管；它是由两个“反向”连接的 TVS 二极管组成的电路。二极管的典型电压-电流曲线图如图 2 所示。

WE-TVSP Power TVS Diode, 824500101

Properties	Test conditions	Value	Unit	Tol.
DC Operating Voltage	V_{DC}	10	V	max.
(Reverse) Breakdown Voltage	V_{BR} 1 mA	11.7	V	$\pm 5\%$
Clamping Voltage	V_{Clamp} I_{PEAK}	17	V	max.
(Reverse) Peak Pulse Current	I_{Peak} 10/1000 μs	23.5	A	max.
(Forward) Peak Pulse Current	I_{Peak}	40	A	max.
Leakage Current	I_{Leak} VDC	5	μA	max.
Steady State Power Dissipation	P_{Diss} $T_A = 50^\circ C$	3.3	W	max.
Power Dissipation	P_{Diss} 10/1000 μs	400	W	max.
Polarity	Unidirectional			



WE-TVSP Power TVS Diode, 824500101

Properties	Test conditions	Value	Unit	Tol.
DC Operating Voltage	V_{DC}	10	V	max.
(Reverse) Breakdown Voltage	V_{BR} 1 mA	11.7	V	$\pm 5\%$
Clamping Voltage	V_{Clamp} I_{PEAK}	17	V	max.
(Reverse) Peak Pulse Current	I_{Peak} 10/1000 μs	23.5	A	max.
(Forward) Peak Pulse Current	I_{Peak}	40	A	max.
Leakage Current	I_{Leak} VDC	5	μA	max.
Steady State Power Dissipation	P_{Diss} $T_A = 50^\circ C$	3.3	W	max.
Power Dissipation	P_{Diss} 10/1000 μs	400	W	max.
Polarity	Unidirectional			

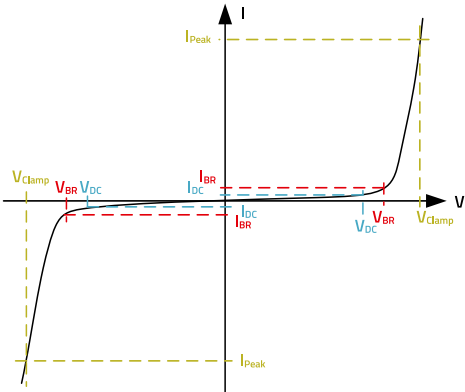


图 2. 单向和双向 TVS 二极管示意图。

曲线图和 WE 数据表中的参数有如下含义：

直流工作电压 (V_{DC})，通道工作电压 (V_{ch})

工作电压的最大峰值，不得超过 V_{DC} 。如果施加在 TVS 二极管上的电压低于该阈值，则 TVS 二极管会对受保护电路产生高阻抗。如若相反，则会产生过大的漏电流，并且可能会导致 TVS 二极管永久失效。

反向击穿电压 (V_{BR})

这是 TVS 二极管开始导通规定的 1 mA 电流的电压阈值，通常也被称为击穿电压。根据数据表， V_{BR} 值应高于待保护电路的最大工作电压值，以便 TVS 二极管在器件正常工作条件下处于阻断状态。

钳位电压 (V_{Clamp})

瞬态过电压将被限制在 V_{Clamp} 定义的值内，即限制在受保护电路中出现的最大电压值。 V_{Clamp} 的值是根据特定的脉冲峰值电流 (I_{Peak}) 而定义的。

脉冲峰值电流 (I_{Peak})

这是 TVS 二极管能够承受而不会损坏的最大浪涌电流。脉冲峰值电流是根据浪涌电流的瞬态波形决定的，在大多数工业应用中规定的波形为 8/20 μs ，其中 8 μs 是达到峰值所需的上升时间 (t_1)，20 μs 是直到电流下降到峰值 50% 的脉冲持续时间 (t_2)。

漏电流 (I_{Leak})

泄漏电流在 V_{DC} 电压下测量，是反向导通的剩余电流。

功率损耗 (P_{Diss})

功率损耗 P_{Diss} 代表二极管所能吸收的功率。不要将脉冲峰值功率损耗和稳态功率损耗混淆在一起，二者是有区别的。

脉冲峰值功率损耗

TVS 二极管在特定的瞬态脉冲波形中所能耗散的最大功率峰值，TVS 二极管的功率损耗测试波形通常为 10/1000 μs 脉冲（10 μs 为上升时间，1000 μs 衰减至峰值的一半）。

稳态功率损耗

TVS 二极管在正常工作条件下可持续吸收的功率。

低电容 TVS 二极管

有一种 TVS 二极管被称为低电容 TVS 二极管（或超高速系列，femtoF）。它们的电容比传统 TVS 二极管更低，通常在 0.1 至 0.5 pF 之间，专门设计用于保护 USB、HDMI，以太网以及射频应用等需要高速传输数据的电路。低电容是通过与反向偏置的 TVS 二极管串联一个正向偏置的通用二极管来实现，其等效结构如图 3 所示。

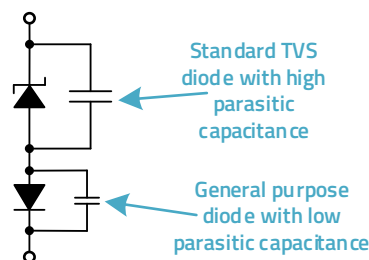


图 3. 低电容 TVS 二极管（超低电容 TVS 二极管）的等效结构。

属性	测试条件	符号	值	单位	容差
直流工作电压		V_{DC}	6	V	max.
电容	1 MHz	C_{typ}	0.05	pF	typ.
电容	1 MHz	C_{max}	0.15	pF	max.
漏电流	6 V_{DC}	$I_{L,max}$	0.05	μA	max.
触发电压	TLP Measurement	V_{Tr}	250	V	typ.
钳位电压	8 kV Contact, 30 ns	V_{Cl}	40	V	typ.
ESD 耐受性	8 kV Contact		1000		min.

表 1. 8231706A “femtoF” TVS 二极管的电气特性。

2. 具有"回滞"效应的 TVS 二极管

理想情况下的 TVS 二极管能完全阻断电流，即当输入电压小于击穿电压时，电流为零。如果输入电压大于击穿电压，TVS 二极管的电阻无限接近于零，这样就能有效抑制瞬态电压。正常情况下 TVS 二极管的钳位方式是在一定电压下开始导通，并限制二极管两端的电压降。由于漏电流和微小内阻的存在，这种二极管与理想状态下的二极管有一定的差别（图 2）。

TVS 二极管的内部由 PN 结组成，其具有明确的击穿电压。如果输入的瞬态电压超过击穿电压，则 TVS 二极管会开始导通电流，以实现对被保护电路的保护。然而，带有 PN 结的 TVS 型二极管没有少数载流子，因此内阻较大且钳位特性较差。在半导体技术中，也有采用双极 NPN/PNP 结来实现 TVS 的方法，即通过雪崩效应触发双极晶体管，从而实现钳位特性。晶体管的基极充斥着少数载流子，由于雪崩电流会通过晶体管基极的双极放大而增加，双极 TVS 因此可以拥有较低且稳定的钳位电压。

这种类型的"TVS 二极管"是基于 MOS-FET 元件的内部结构而成，其天然要比 PN 结 TVS 二极管的等效结构（图 1）更加复杂。

根据掺杂材料的不同，每个 NMOS-FET 都包含一个寄生双极性晶体管 (BJT)。在 NMOS 器件的正常工作中，寄生双极性晶体管不会发生作用。如图 4 所示，寄生 BJT 的射极 (E) 位于源极 (Source)，集电极 (C) 位于漏极 (Drain)，而在适当的条件下，下面的 p 体区可以充当它的基极 (B)。

此时，必须解释一下所谓的"碰撞离化"，以方便理解之后的概念：移动的电子或空穴（正电荷载流子）在电场的影响下移动。在弱电场中，它的移动不会改变其状态。然而，在强电场下，如同在元件的端子处有高电压的情况，移动的自由电荷载流子会与束缚电荷载流子碰撞，然后这些电荷载流子就会脱离形成新的自由电荷载流子。这些新的电荷载流子又会重复这一过程，从而产生雪崩电流。

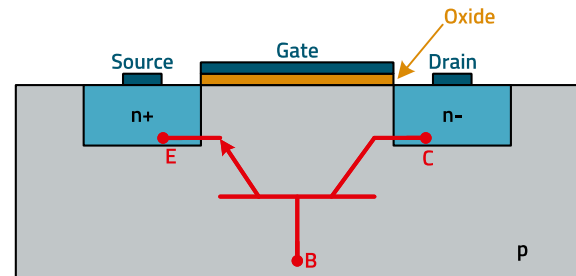


图 4. NMOS-FET 中的寄生双极性晶体管 (BJT)。

当雪崩电流流向寄生 BJT 的基极时，基极电流会导通 BJT，开始导通集电极和射极之间的电流。最有趣的是，一旦器件被打开，即被触发，启动这一过程的强电场将不再被需要，即便其消失，电流依然可以持续导通。电流的传导会随着电流的增强而维持，但射极和集电极之间的电压会变低很多。这种在相对较高电压下触发，然后在较低电压下恢复传导的现象被称为"回滞效应"。

高带宽数据和信号总线需要多通道 TVS 二极管阵列来提供 ESD 保护，图 5 左侧是双通道瞬态保护系统的电路图示例，右侧是 TVS 二极管阵列的功能电路图。

图 6 上部显示了四通道阵列核心的截面图，下部显示了其等效电路图。TVS 阵列由大量串联的高压侧和低压侧控向二极管 (Steering-Diode) 组成，高压侧控向二极管连接到 V_{CC} ，低压侧控向二极管连接到地。此外，这些高压侧和低压侧控向二极管并联到一个齐纳二极管上，即 TVS 二极管 (另见图 5)。这些控向二极管的体积更小，结电容也更低。

p-WELL 是在 n 型半导体中掺入 p 型杂质的区域。这就在 n 型衬底中形成了一个局部的 p 型材料区域。

n-WELL 是指在 p 型半导体中掺入 n 型杂质的区域。这就在 p 型衬底中形成了一个局部的 n 型材料区域。

在实践中，要实现图 6 中的功能具有一定挑战性。当前制造 TVS 阵列的技术面临着一个技术上的难题，即多个 PN 结二极管是可以通过标准 CMOS 处理步骤在半导体基板上制造，但其会伴随固有的寄生 PNP 和 NPN 晶体管。当出现瞬态电压时，TVS 阵列中的寄生 NPN 或 PNP 晶体管被导通并“锁定”，从而引起短促而强烈的反冲电压，即回滞效应，这一点已在双极晶体管中作过解释 (图 4)。这种效应发生在 PMOSFET 或 NMOSFET 的源极-体区-二极管与 P 基底结中的 N+ 之间，在此形成寄生可控硅 (SCR) 作为寄生器件 (图 7)。

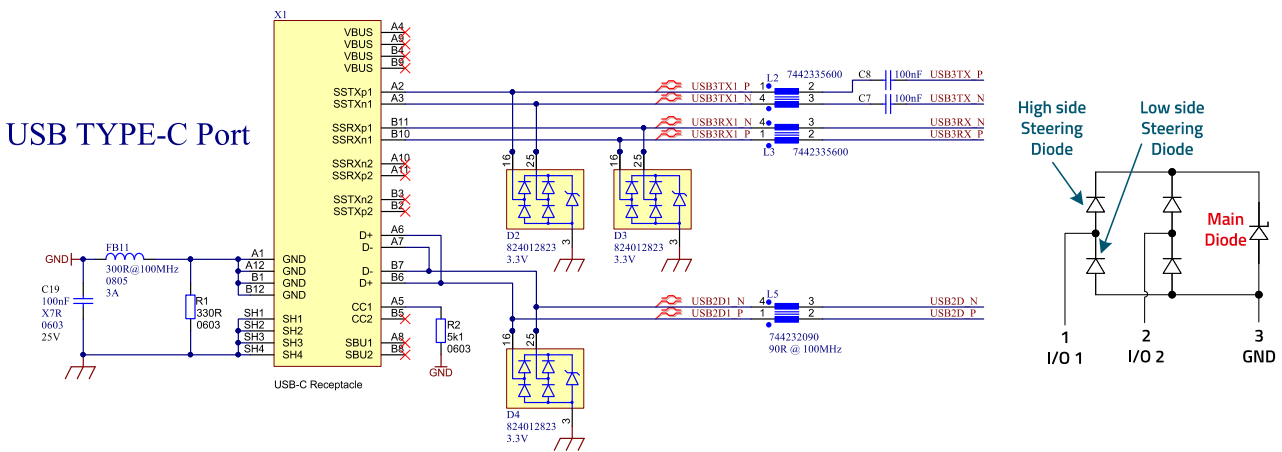


图 5. 使用 TVS 二极管阵列对 USB 接口进行瞬态脉冲保护。

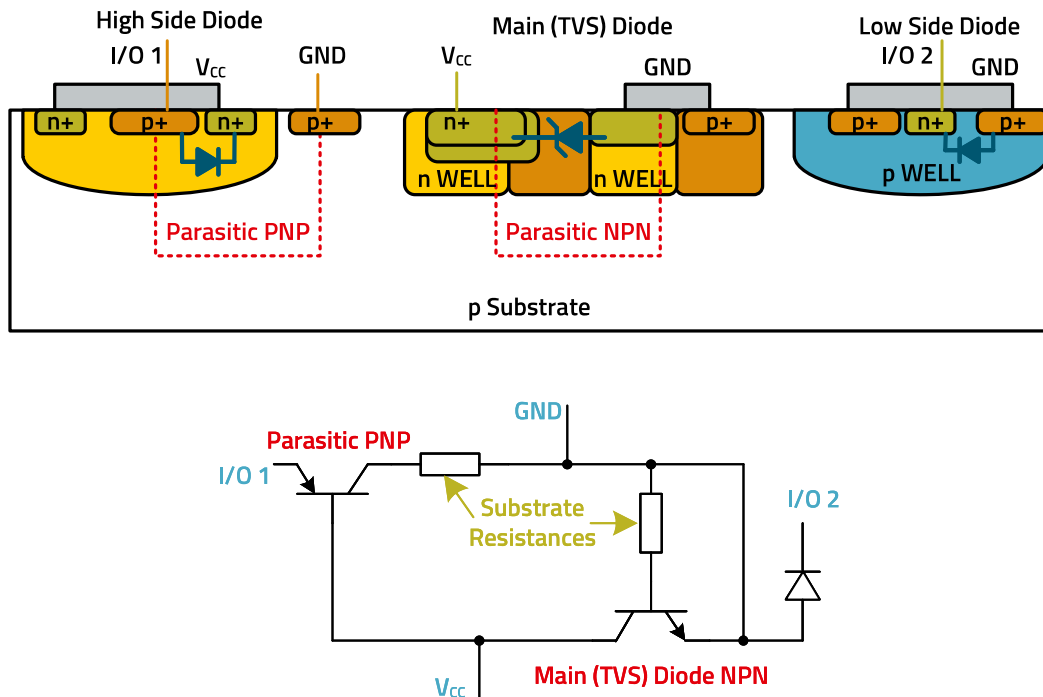


图 6. 四通道 TVS 二极管阵列的核心示意图及其等效电路图。

当触发 SCR 时，P+区（阳极，An）和 N+区（阴极，Ca）之间会形成强大的电流路径。这反过来又导致了钳位效应。图 8 显示了各种硅元件的 VI 特性曲线以供比较：传统半导体二极管、NPN 双极性晶体管 (BJT) 和可控硅电路。

普通二极管 (图 8 左) 在一定电压 (即所谓的击穿电压 V_{BR}) 下会发生齐纳击穿或雪崩击穿。对于击穿电压 V_{BR} 低于 5.5 V 的二极管，齐纳击穿占主导地位；对于击穿电压 V_{BR} 高于 5.5 V 的二极管，雪崩击穿占主导地位 (雪崩效应)。达到击穿电压后，电流急剧增加，而电压保持相对恒定。不存在回滞效应。如果不限制电流，二极管就有可能损坏。而对于 npn-BJT (图 8 中心) 而言，如果反向电压过高，也会在集电极-射极区域发生雪崩击穿。在击穿过程中，集电极电流会急剧上升，并出现回滞效应，即如果电流继续上升，集电极电压会急剧下降。如果电流无法得到控制，就会导致晶体管损坏。可控硅 (图 8 右) 由于有四个半导体层 (p-n-p-n) 的存在，它的击穿机制更为复杂。当阳极-阴极路径上的电压达到临界阈值并且传导电流也超过一定阈值时 (I_{hold})，才会发生击穿。击穿后，可控硅进入到导电状态，即使外加电压再次下降，可控硅仍能保持导电状态，直到电流下降到低于阈值电流 (I_{hold}) 的水平线。如同之前的 BJT 一样，这一现象便是可控硅的回滞效应。

要实现有效的 ESD 保护，触发电压不应过高，以免损坏受保护的电路。此外，较低的阈值电压 V_{hold} 应高于电路的正常工作电压。为了确保这一点，最大工作电压不应超过 V_{DC} 或 V_{Ch} 。如果 TVS 二极管选择不当，则有发生门锁效应的风险。该效应的主要原因为，当瞬态过电压发生时，比如在 USB 接口发生时，外部过电压 (ESD) 会高于 TVS 的击穿电压，从而导致 TVS 二极管启动。如果要受保护的电路使用了错误类型的 TVS 二极管，其阈值电压 V_{hold} 会低于正常工作电压，即使外部过电压已结束，TVS 二极管仍会保持导通。在这种情况下，电源会短路或 TVS 二极管会烧毁，在最坏的情况下可能会损坏整个仪器。同样，在高温条件下，可控硅会通过寄生 NPN-BJT 的 NP 结所产生的高漏电流而触发，进而导致门锁效应。因此，应注意数据表中的参数。

图 9 显示了具有回滞效应的单向和双向 TVS 二极管的示意图。

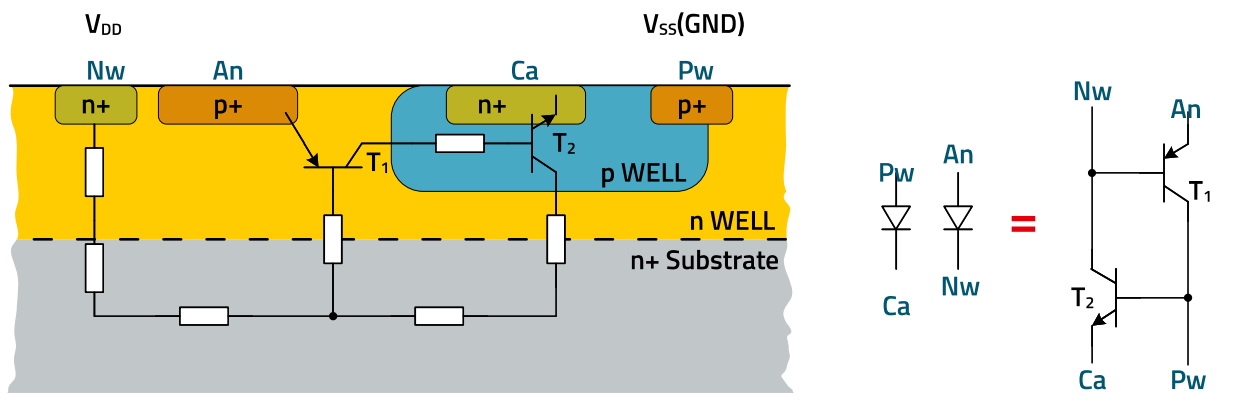


图 7. CMOS 工艺中可控硅的结构示意图和等效电路图。可控硅由二极管的交叉耦合所产生的寄生 BJT 构成。

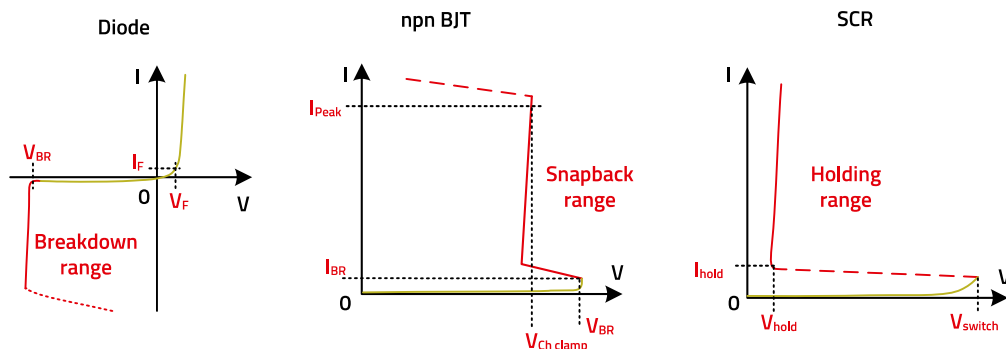


图 8. 传统半导体二极管、N-P-N 双极性晶体管 (BJT) 和可控硅的 VI 特性曲线。

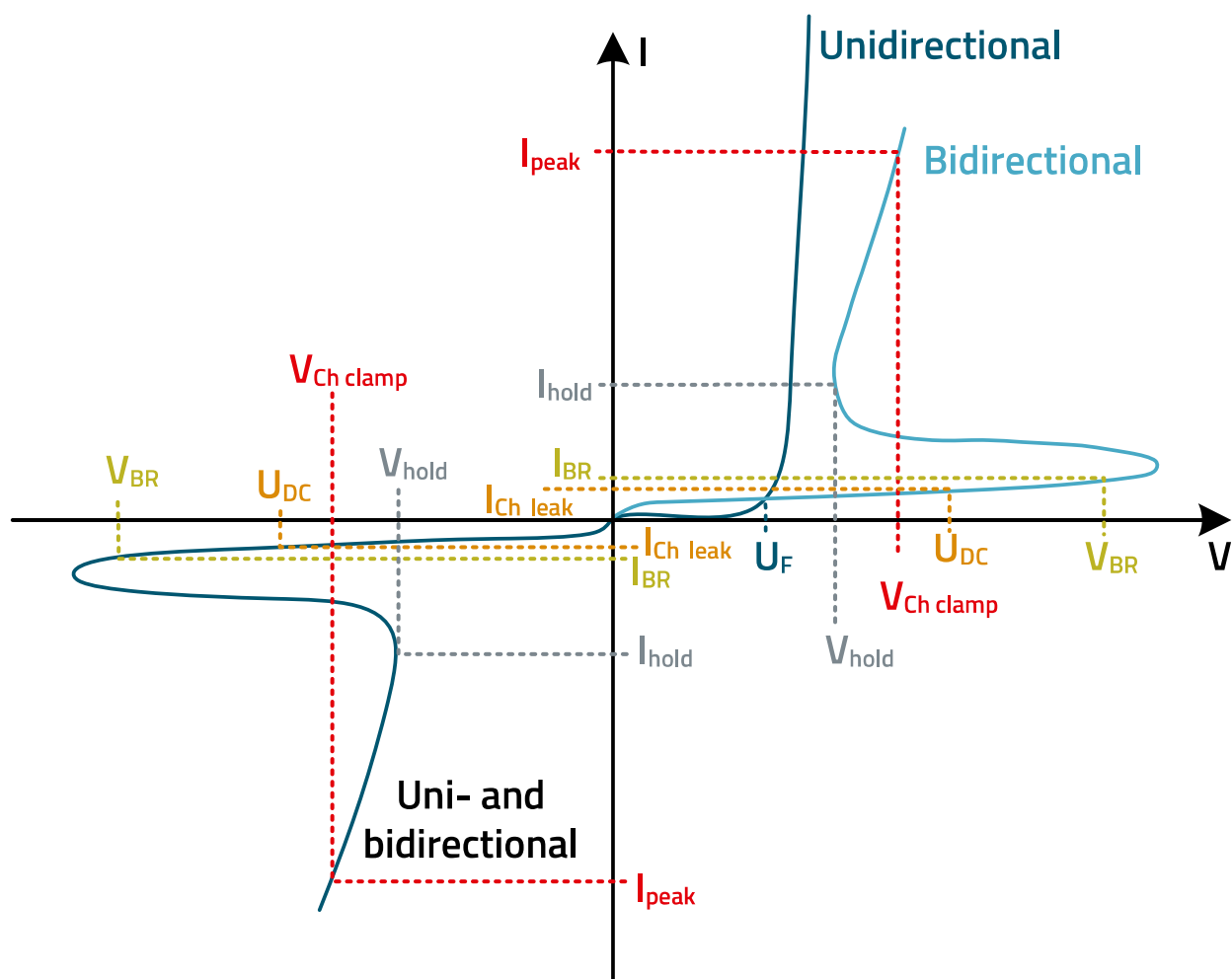


图 9. 带有回滞效应的双向 TVS 二极管 VI 特性曲线图。

3. 用于信号线和数据线的混合型 TVS 二极管

电压限制元件必须在不影响电路正常工作的情况下提供瞬态过电压保护。这相当困难，因为这两点往往相互影响。用于高频信号接口的 TVS 二极管应具有低电容，以避免电容负载对信号的干扰。然而，元件吸收能量的能力取决于耗尽层的大小。耗尽层越大，吸收能量的上限越高。缺点是元件的电容也会随着耗尽层尺寸的增大而增大。如第一节所示，降低有效电容的常用方法是将低电容二极管电路与 TVS 结合使用 (图 3)。

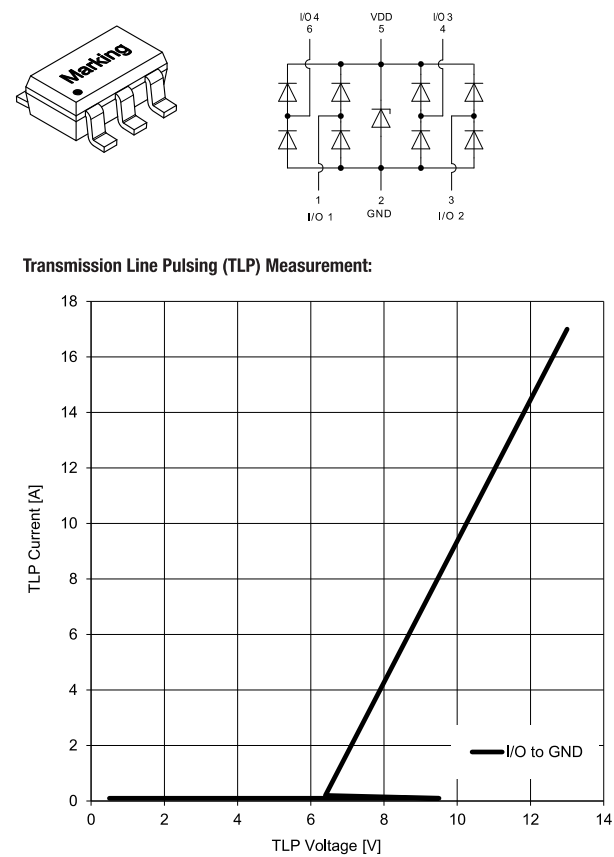


图 10. 带 TVS 二极管的二极管阵列，用于 4 个通道，WE-TVS High Speed 系列，824015。

为保护 USB 3.1 等多通道且对称的信号总线，可将多个二极管电路组合成一个“阵列”。图 10 显示了一个例子。VI 曲线采用传输线脉冲 (TLP) 方法进行测量，以获得明确钳位电压 $V_{CH\ clamp}$ 下所需的信号上升时间。这是一种常见的测量方法，在 IEC 62615:2010 中作出了规定，并已确立用于证明元件在 ESD 条件下的性能。该方法保证了测量的精确性和可重复性。

TVS 二极管的电容实际上被传统二极管“隐藏”在电路中。二极管必须能承受瞬态电流，并且其反向击穿电压大于 TVS 二极管的击穿电压。

Electrical Properties:						
Properties	Test conditions	Value			Unit	ToI.
		min.	typ.	max.		
Channel Operating Voltage	V_{CH} I/O to GND			5	V	
DC Operating Voltage	V_{DC} V_{DD} to GND		6		V	max.
(Reverse) Breakdown Voltage	V_{BR} I/O to GND; $I_{BR}=1\text{ mA}$	6.1			V	
Leakage Current	I_{LEAK} $V_{DD}=V_{DD}; V_{CH}=0\text{ V}$		5		μA	max.
Channel (Reverse) Leakage Current	$I_{CH\ LEAK}$ I/O to GND $V_{DD}=V_{DD}; V_{CH}=V_{CH}; V_{CH}=0\text{ V}$			1	μA	
Forward Voltage	V_F GND to I/O; $I_F=15\text{ mA}$		0.7	1	V	
(Channel) Input Capacitance	C_{CH} I/O to GND $V_{DD}=5\text{ V}; V_{CH}=2.5\text{ V}; V_{CH}=0\text{ V}; f=1\text{ MHz}$		1	1.5	pF	
Channel to Channel Input Capacitance	C_{CROSS} between I/O pins $V_{DD}=5\text{ V}; V_{CH}=2.5\text{ V}; V_{CH}=0\text{ V}; f=1\text{ MHz}$		0.1	0.2	pF	
Channel ESD Clamping Voltage	$V_{CH\ CLAMP\ ESD}$ IEC 61000-4-2 +8 kV (TLP=16 A) Contact Mode, I/O to GND		13		V	
Channel Surge Clamping Voltage	$V_{CH\ CLAMP}$ I/O to GND 5 A, $t_p = 8/20\text{ }\mu\text{s}$		7.8	8.5	V	
Polarity	Unidirectional					

由此产生的阵列由多个功能区组成。集成和后续的封装确保了高速数据传输应用所需的参数。因此，不同的集成电路组合可用于不同的应用，以达到所需的电气参数，因此也可方便地用于电路中。较为典型的等效电路如图 11 所示。

4. TVS 二极管阵列在直流和交流电下的特性

下文将展示 TVS 二极管阵列 WE-TVS 824015 实验室测试的各种结果，以说明此类元件的功能、可能的应用及其局限性。图 12 显示了阵列的原理图和电气参数。

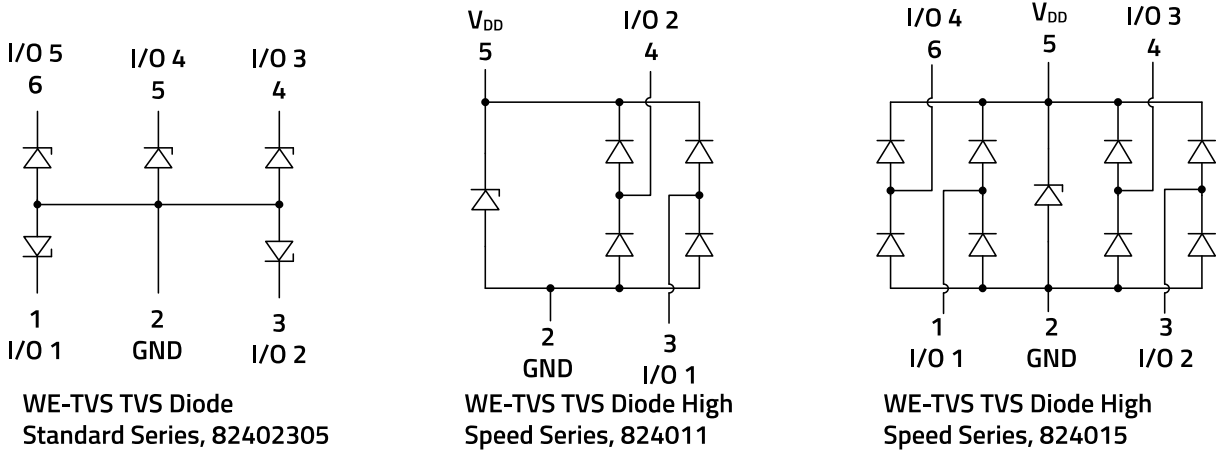
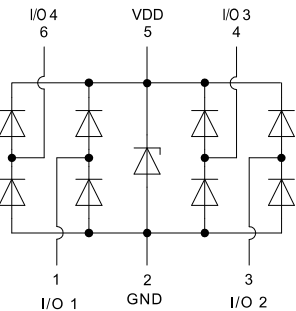
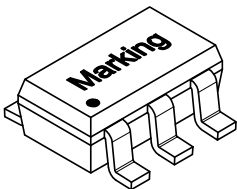


图 11. 各种 TVS 二极管阵列。



Electrical Properties:

Properties		Test conditions	Value			Unit	Tol.
			min.	typ.	max.		
Channel Operating Voltage	V_{Ch}	I/O to GND			5	V	
DC Operating Voltage	V_{DC}	V_{DD} to GND	6			V	max.
(Reverse) Breakdown Voltage	V_{BR}	I/O to GND; $I_{BR}=1\text{ mA}$	6.1			V	
Leakage Current	I_{Leak}	V_{DD} to GND; $V_{DD}=V_{DC}$; $V_{GND}=0\text{ V}$	5			μA	max.
Channel (Reverse) Leakage Current	$I_{Ch Leak}$	I/O to GND $V_{DD}=V_{DC}$; $V_{I/O}=V_{Ch}$; $V_{GND}=0\text{ V}$			1	μA	
Forward Voltage	V_F	GND to I/O; $I_F=15\text{ mA}$		0.7	1	V	
(Channel) Input Capacitance	C_{Ch}	I/O to GND $V_{DD}=5\text{ V}$; $V_{I/O}=2.5\text{ V}$; $V_{GND}=0\text{ V}$; $f=1\text{ MHz}$		1	1.5	pF	
Channel to Channel Input Capacitance	C_{Cross}	between I/O pins $V_{DD}=5\text{ V}$; $V_{I/O}=2.5\text{ V}$; $V_{GND}=0\text{ V}$; $f=1\text{ MHz}$		0.1	0.2	pF	
Channel ESD Clamping Voltage	$V_{Ch Clamp ESD}$	IEC 61000-4-2 +8 kV (TLP=16 A) Contact Mode, I/O to GND		13		V	
Channel Surge Clamping Voltage	$V_{Ch Clamp}$	I/O to GND 5 A, $t_p = 8/20\text{ }\mu\text{s}$		7.8	8.5	V	
Polarity		Unidirectional					

图 12. TVS 二极管阵列 WE-TVS 824015 的等效电路图和电气参数。

4.1 TVS 二极管的钳位特性

本章解释了安全和受控钳位特性的必要条件，展示回滞效应，并描述了在有缺陷的印刷电路板设计中使用该元件时的所产生的效应。用于数据采集的测试装置是一种常规实验室装置，可在任意设备齐全的实验室中进行复现。元件数据表中规定的数值是使用传输线脉冲发生器测量的，该发生器具有较高的再现性和较低的误差。我们选择了图 13 所示的实验装置

来测量钳位效应。使用 1.5 GHz 有源探头和测量带宽为 1 GHz 的存储示波器进行测量，以便能够捕捉这一高速过程。

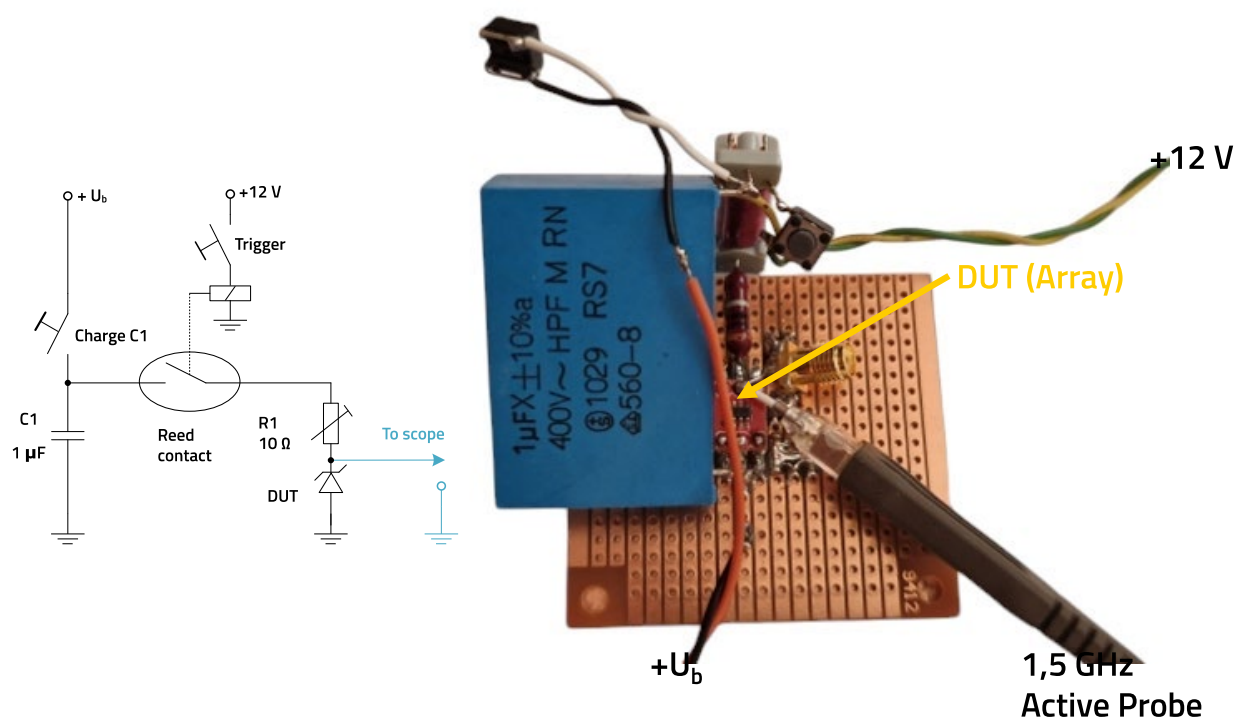


图 13. 用于测量 TVS 二极管钳位特性的设置。

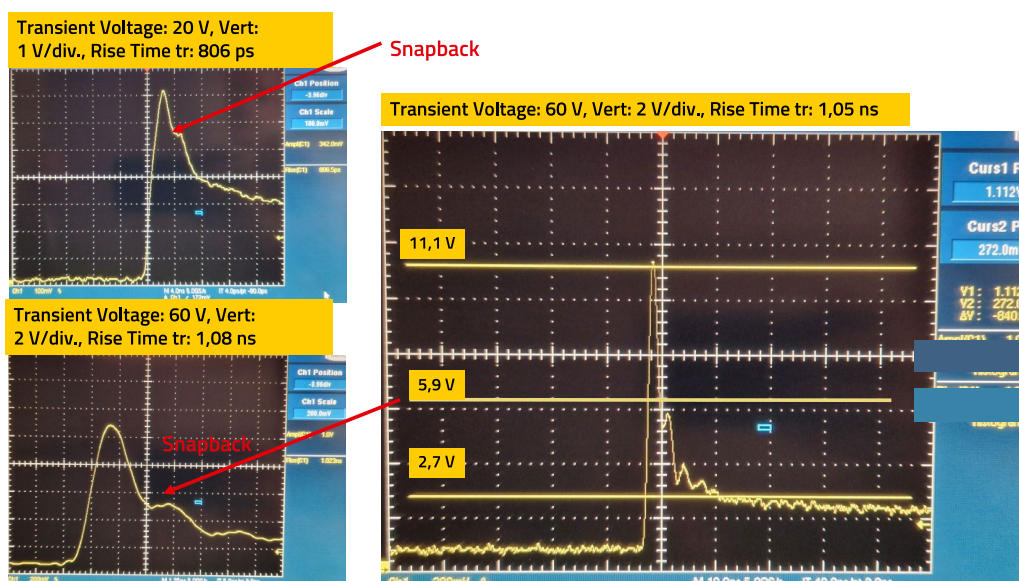


图 14. TVS 二极管阵列的钳位特性。

除了特定组件参数外，钳位性能在很大程度上取决于其它一些参数，包括

- 电源（此处为放电电容器 C1）的阻抗和能量。
- 从电源到 TVS 二极管供电线路的阻抗，此处由 R1 定义。
- 接地（GND）阻抗，电源与 TVS 二极管之间的阻抗。

为了在没有开关弹跳的情况下进行放电，在设置中使用了气密式干簧管继电器(gas-filled REED relay)，并通过辅助电压对其进行控制。测量结果如图 14 所示。

这里使用的 TVS 二极管在约 11.2 V 时以 60 V 的放电电压（瞬态电压）开始导通，钳位电压可在约 5.9 V 时识别为一个斜坡，之后随着继电器中断电容器上的电压，电路中的电压逐渐降低（图 13）。

图 15 显示了传统 TVS 二极管与阵列 TVS 二极管的性能对比。两者的区别非常明显，传统二极管在约 8 V 时钳位，不会产生回滞效应，而 TVS 二极管在 8.5 V 时才开始导通，然后限制在约 5.8 V。与图 14 中的设置相比，本例中的由于电容保持连接，因此电压衰减超出了测量范围。

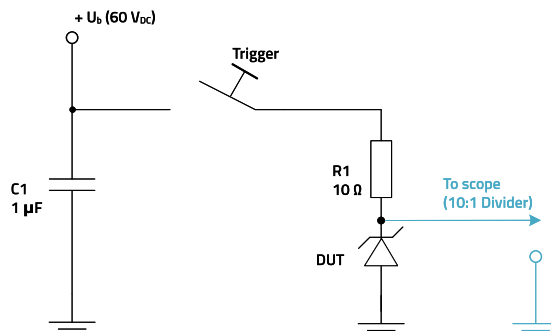
理论部分介绍了 TVS 二极管本身是由晶体管组成的复杂结构，晶体管通过相互连锁效应产生钳位。这一动态过程包括 VI 曲线的过渡区域，在这一区域内，特性的斜率为负值，因

此电阻也为负值。当 TVS 二极管上的电压在击穿后降至较低值，相反电流持续上升，即产生回滞效应（图 9）。

这意味着，在 VI 曲线的某一区域，电流的增加会导致电压的降低，这被称为负微分电阻。这意味着在过渡区域可以产生振荡行为，这种振荡行为可以显现出来，甚至可能出现于电路应用中。为此，有必要仔细研究待钳位电压的上升斜率，特别是击穿电压附近的区域。为此，我们选择了一种可通过串联电阻调节二极管电流的结构。测试装置和测量结果如图 16 所示。

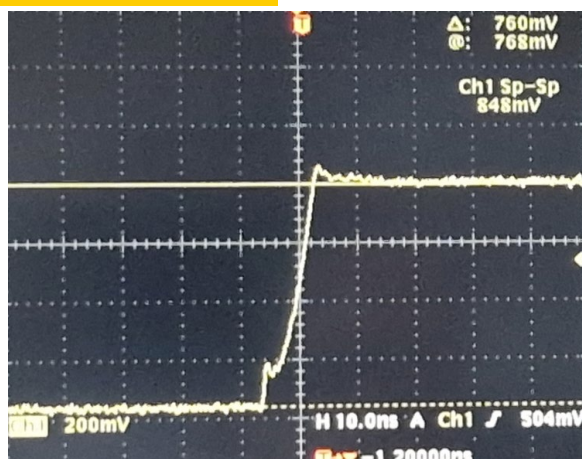
在钳位电流较低时(2.5 A)，钳位行为不会产生回滞效应。电压被限制在 7.8 V。从 3.4 mA 开始，元件开始振荡，在 4.5 mA 左右达到最大振幅，在 8.0 mA 左右开始随着电流的增加而衰减。从 4.5 mA 开始，回滞效应出现。在 10 mA 以上的较高电流区域，如电流为 20 mA 时的示意图所示，元件显示出预期的电压限制效果，没有振荡行为，但有回滞效应。还应指出的是，振荡的发生不仅取决于钳位电流，还取决于负载，即振荡元件的阻抗。图 17 显示了频域和时域的振荡情况。测量时，电路中使用了一个 3.3 kΩ 的串联电阻。基频振荡的频率范围在 1.5 至 12 MHz 之间。

振荡行为始于约 2 mA 的电流，15 mA 时信号振幅明显变小，超过 20 mA 时振荡停止。当然，您可以将该阵列用作



TVS Diode WE-TVSP 824500600

Divider 10:1, 2 V/div.



TVS-Dioden Arrays WE-TVS 824015.

Divider 1:1, 1 V/div.

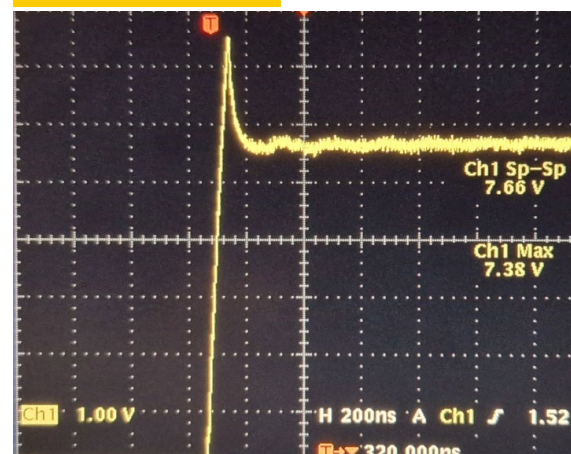


图 15. 常规 TVS 二极管 824500600 与 TVS 阵列 824015 的钳位特性对比。

振荡器，但对于其作为电压限制元件的预期功能而言，该元件的这种特性意味着什么呢？在正常情况下，当出现瞬态干扰信号时，最高 20 mA 的低电流区域会在几纳秒内被跨过。但是，如果干扰信号的上升时间很短，元件就会受到短暂的刺激从而产生振荡。如果有用信号上出现持续时间较长的干扰峰值并略高于 TVS 元件的击穿电压，这会变得非常致命。图 18 举例说明了这种情况。TVS 二极管的击穿电压对于这种应用来说过低。

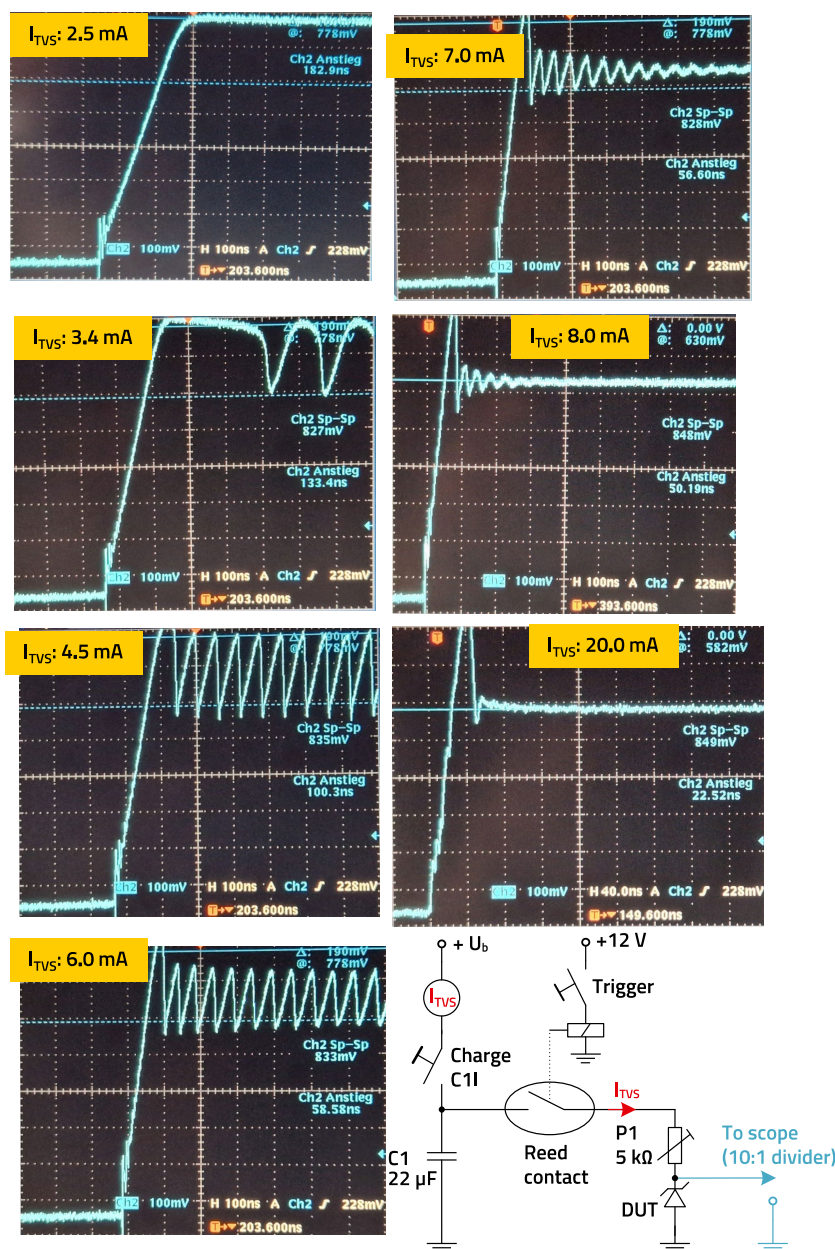


图 16. 测试设置与 TVS 部件在时域下的特性表现。

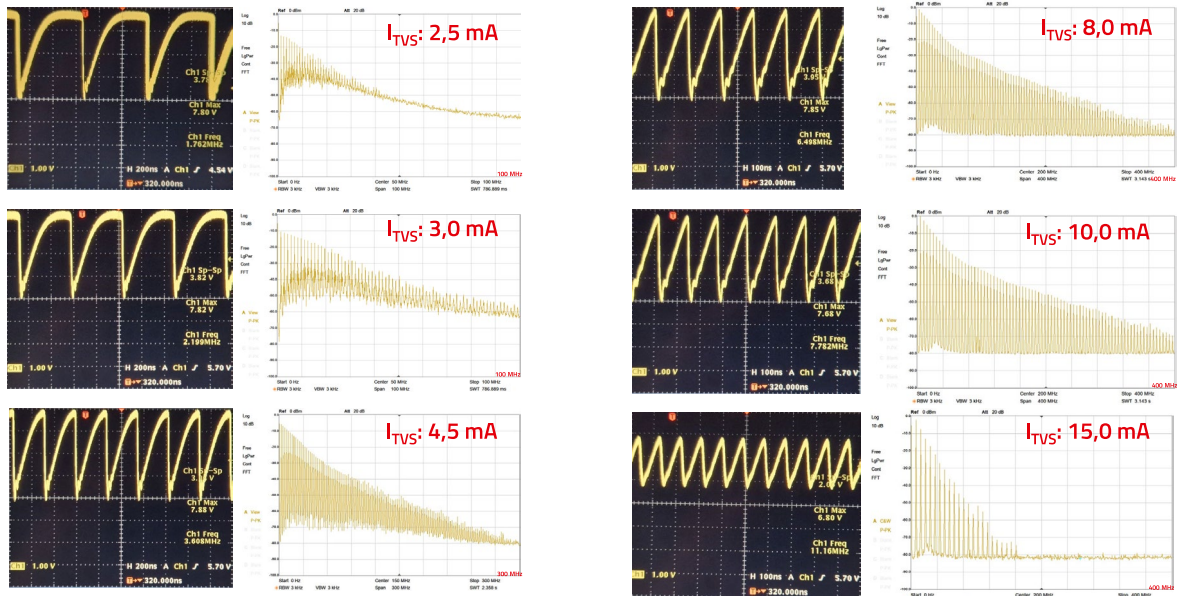


图 17. TVS 部件的振荡与电流 (I_{TV}) 之间的关系。

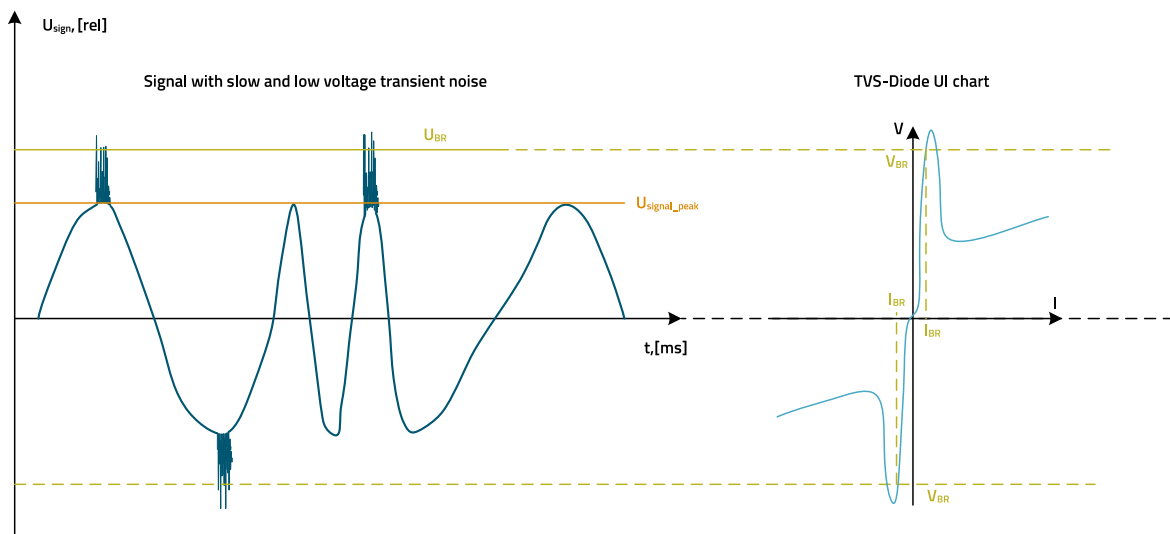


图 18. 伴随有用信号的小幅度干扰信号。

4.2 TVS 二极管阵列的信号特性

TVS 二极管阵列的主要用途是保护信号接口。在使用这些阵列时，信号特性应尽可能不受影响。这里，振幅特性和频率特性都很重要。频率特性主要与系统阻抗和阵列的寄生电容有关。因此，下文将更详细地讨论并非直接由等效电路图得出的振幅特性，该电路图在图 19 中有不同的表示方法。

根据图 19 右下方由转向二极管组成的桥式电路的图示，可以看到 I/O 1 和 I/O 2 之间的最大信号电平差取决于 V_{DD} 和 GND 之间的偏置电压。为了确定阈值，选择了图 20 所示的结构。I/O1 和 I/O2 之间的信号电压未接地，并作为对称信号使用。实际例子包括了 USB、HDMI 和以太网信号。电容器 C1 对可能出现的直流电压进行去耦，以保护信号发生器。R1 对信号发生器和阵列之间的信号进行去耦，以检测失真。电解电容 C2 相当于实际应用中的滤波器和辅助电容，可使

交流电信号短路，R2 则用作负载，即在实验室电源电压降低时放电。

通过比较 CH1 和 CH2 两个通道的信号，不难看出偏置电压 V_{DD} 必须多大才能通过阵列避免失真。可以看出，两者之间的关系并不是线性的。图 21 显示了偏置电压对信号影响的示例。

可以看出，失真范围从信号振幅约为 $1.3 V_{PP}$ 时开始。幅度超过这一水平时，二极管的偏置电压必须在 V_{DD} 和 GND（直流偏置）之间。图 21 最后一幅图中的不对称是由于 TVS 二极管的起始正向电流 I_F 造成的。信号电压与偏置电压的函数关系图如图 22 所示。

蓝色曲线表示偏置电压 V_{DD} ，它是实现无失真信号电压 V_{SS} 的必要条件。从红色差值曲线 ($V_{PP} - V_{DD}$) 可以看出，该曲线不是线性的。在大约 $1.35 V_{PP}$ 的信号电平范围，只需较低

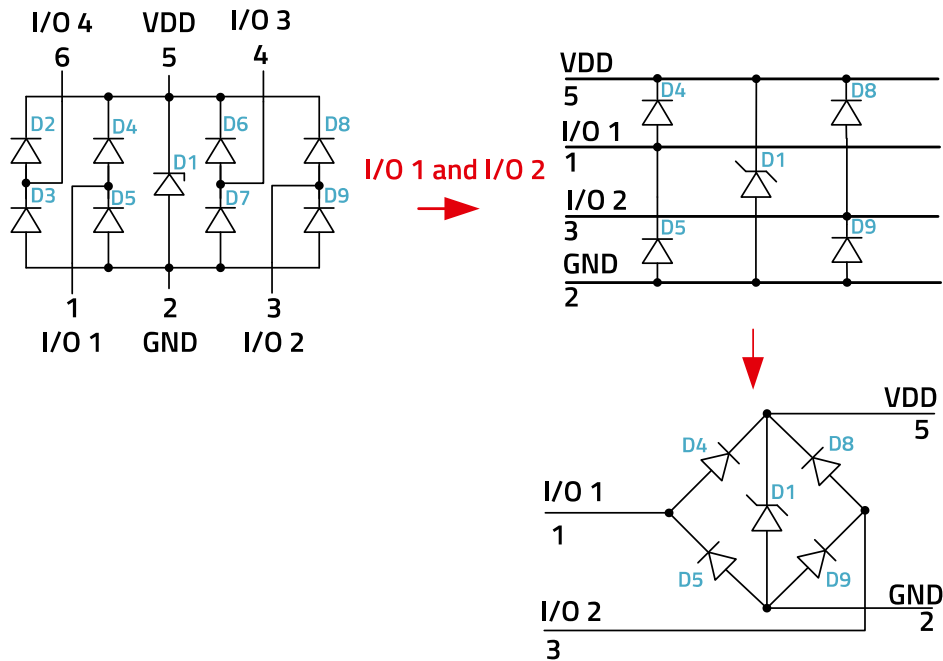


图 19. TVS 二极管阵列两个通道的不同示意图。

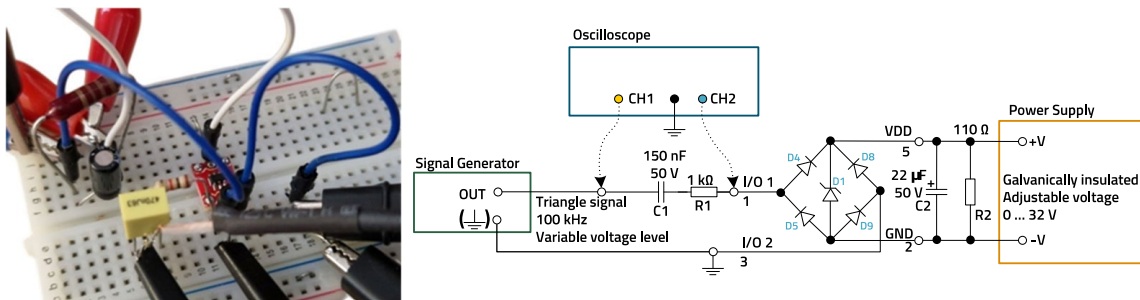
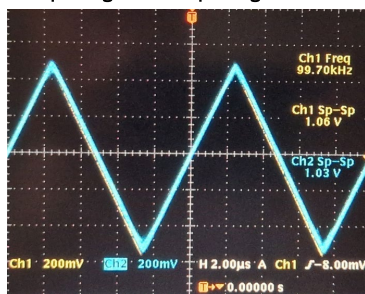


图 20. 用于测量最大输入振幅 V_{PP} 与偏置电压 V_{DD} 的函数关系。

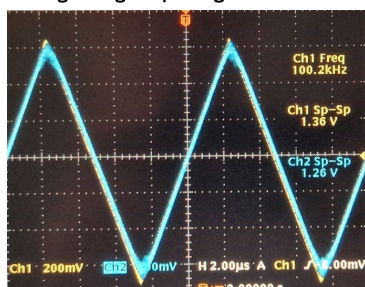
的偏置电压即可补偿失真。信号电压越大，偏置电压就必须越大，且差值并不恒定。

非线性结果来源于“转向二极管”的二极管特性，如图 23 所示。可以看出，从大约 0.8 V 开始进入正向区，即根据图 20，如果图 22 中的蓝色曲线， V_{DD} 小于 V_{PP} ，则两个转向二极管可以从高于 $1.6 V_{PP}$ 的信号电压开始影响信号。

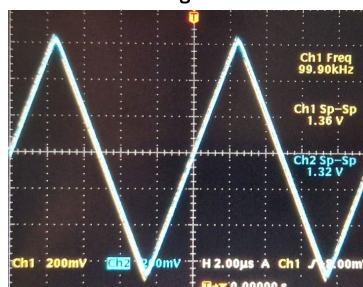
Input signal $1,0 V_{PP}$, no Bias voltage
→ Input signal = Output signal



Input signal $1,35 V_{PP}$, no Bias voltage
→ Beginning output signal distortion



Compensation of the distortion by
620 mV Bias voltage



Example of a strong distortion
Input: $2,5 V_{PP}$, no Bias voltage

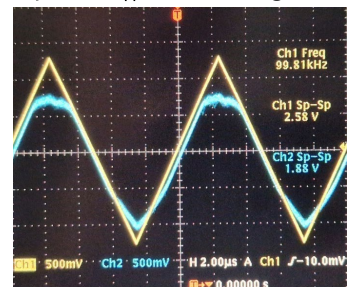


图 21. 取决于偏置电压的信号影响示例。

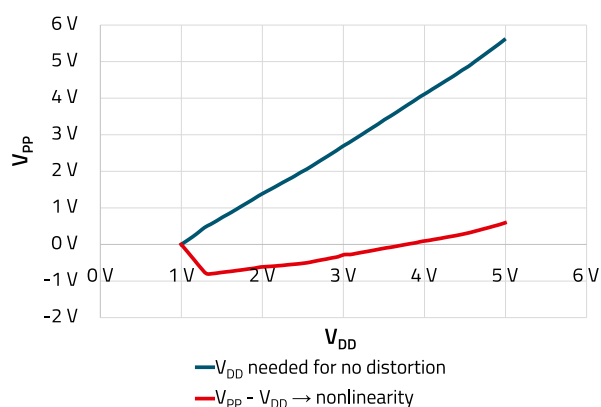


图 22. 信号电压与偏置电压的函数关系图。

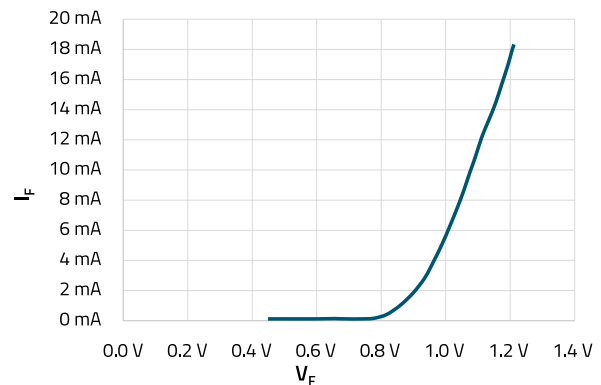


图 23. “转向二极管”的二极管特性。

4.3 TVS 二极管不同阵列的变化

下文将对不同阵列进行比较，以说明其功能和可能的应用。
实验室装置及相应的电路图见图 24。

测量时，输入 100 kHz 三角波信号，电平逐渐升高。当三个通道中的一个通道的电平受到限制时，直流电压 V_{CCa} 相应增加，以获得转向二极管的偏移。以下是结果概览；“备注”栏中有对图表的简要解释，图末有更详细的解释。

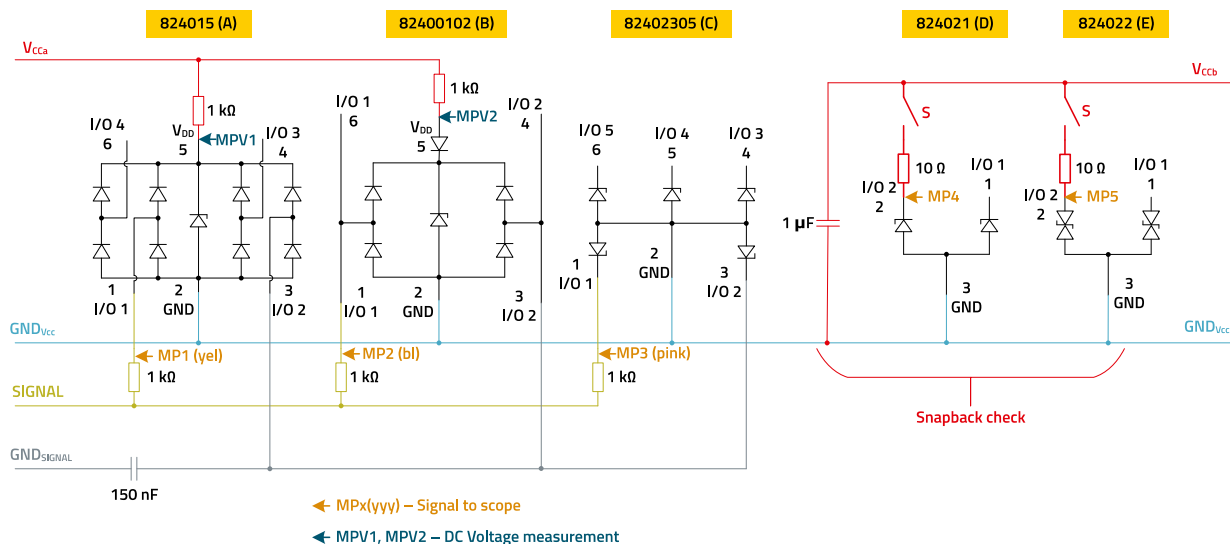
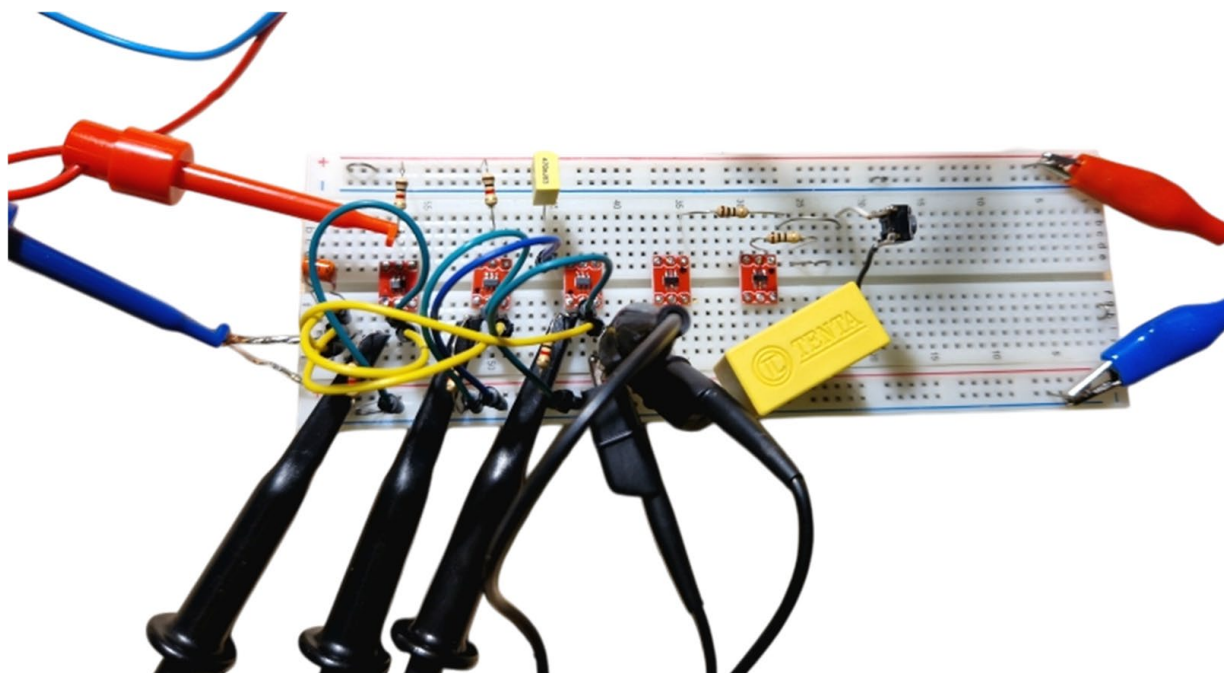


图 24. 用于比较不同 TVS 二极管阵列的实验室装置及相关电路图。

应用说明

ANP143 | TVS 二极管：基础知识、功能及其应用

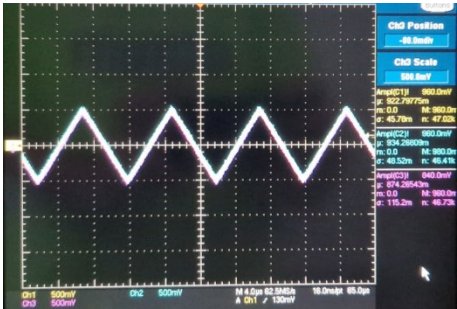
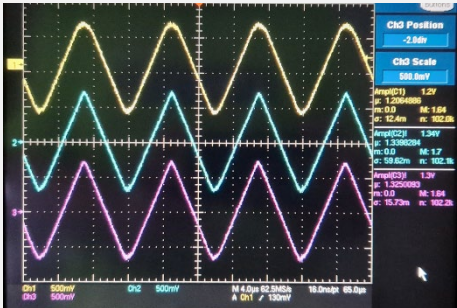
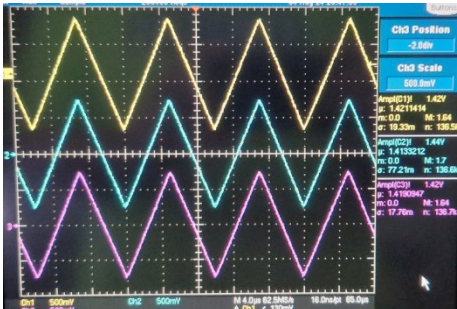
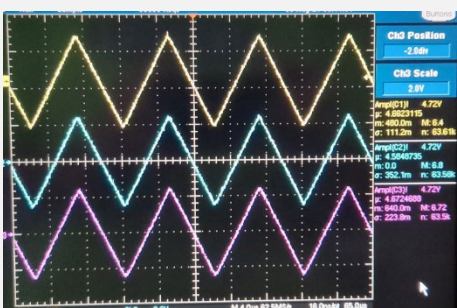
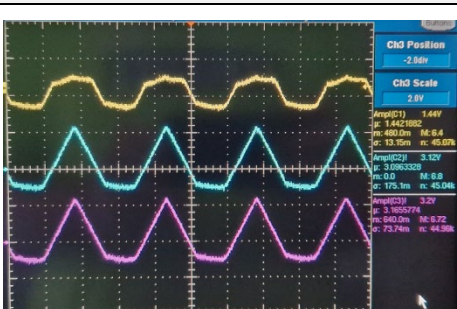
信号振幅 [V _{SS}]	V _{CCa} [V _{DC}]	图片	备注
1,0	0		所有三个信号均未失真，此 处信号重叠显示。
1,5	0		- 824015, 从 1.3 V _{SS} 开始限制两个半波。 - 所有 3 个阵列, 从 1.5 V _{SS} 负半波开始限幅。
1,5	3,3		所有三个信号均未失真 如果 V _{CCa} 增至 +5 V, 信号电平可增至约 6.3 V _{SS} 。
5,0	5,0		在 5 V 偏置电压下, 所有三个信号在 5.0 V _{SS} 电平时都不会失真。
5,0	0		对于正信号, 两个阵列 82400102 和 82402305 可以在没有偏置电压的情况下工作。

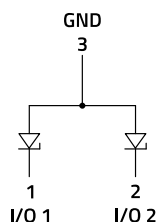
图 25. 不同 TVS 二极管阵列的信号特性比较 (根据图 24, 左侧部分)。

阵列 824015 从转向二极管的正向电压开始限制信号，即从约 0.7 V 开始，相当于 $2 \times 0.7 V_{SS}$ （图 25 中的第 2 幅图）。偏置电压会给二极管带来反向偏移电压，因此信号可以增加至偏移电压加上正向电压（图 25 中的第 3 幅图）。在图 25 的最后一张图中，阵列 824015 的信号电平（黄色曲线）超过了转向二极管的正向电压，在没有偏置电压的情况下，信号电平被限制在约 $1.4 V_{PP}$ 。相反，阵列 82400102（蓝色曲线）中的阻断二极管作用于 V_{DD} ，信号的正半波不受限制。不过，负半波通过 GND 受到限制。在阵列 82402305（紫色曲线）中，正半波不会超过齐纳击穿电压，而负半波则通过与 GND 的连接被限制在 V_F 。

4.4 应用说明

下面的测量显示了两个 TVS 二极管阵列 824021 和 824022 的性能（图 24，右侧）。设置中的“瞬态电压”为 100 V，通过预充电的 $1.5 \mu F$ 电容器放电。连接阵列的电源线特意做长。图 26 中的测量结果显示了典型的回滞效应；测量结果还证实了阵列 824022 中双向 TVS 二极管的钳位电压低了约 1 V。由于电压电源的寄生电感，可以看到电压出现了谐振振铃。此外，两个二极管的击穿电压 V_{BR} 相对较高，在 26 至 31 V 之间。

WE-TVS TVS Diode 824021
Channel ESD clamping
voltage: 10 V typ.



WE-TVS TVS Diode 824022
Channel ESD clamping
voltage: 9 V typ.

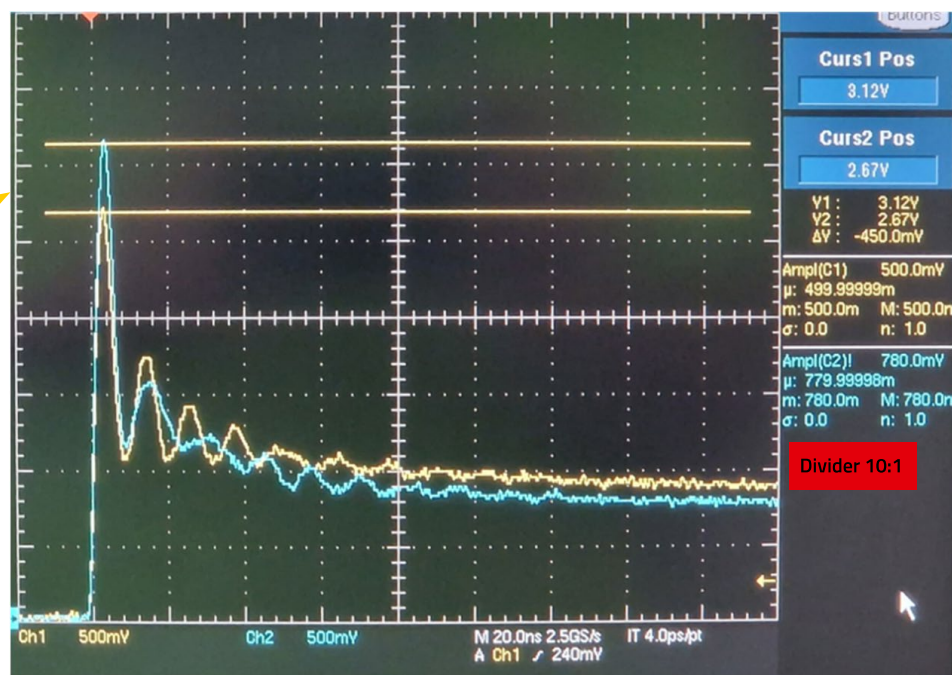
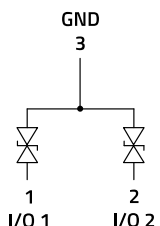
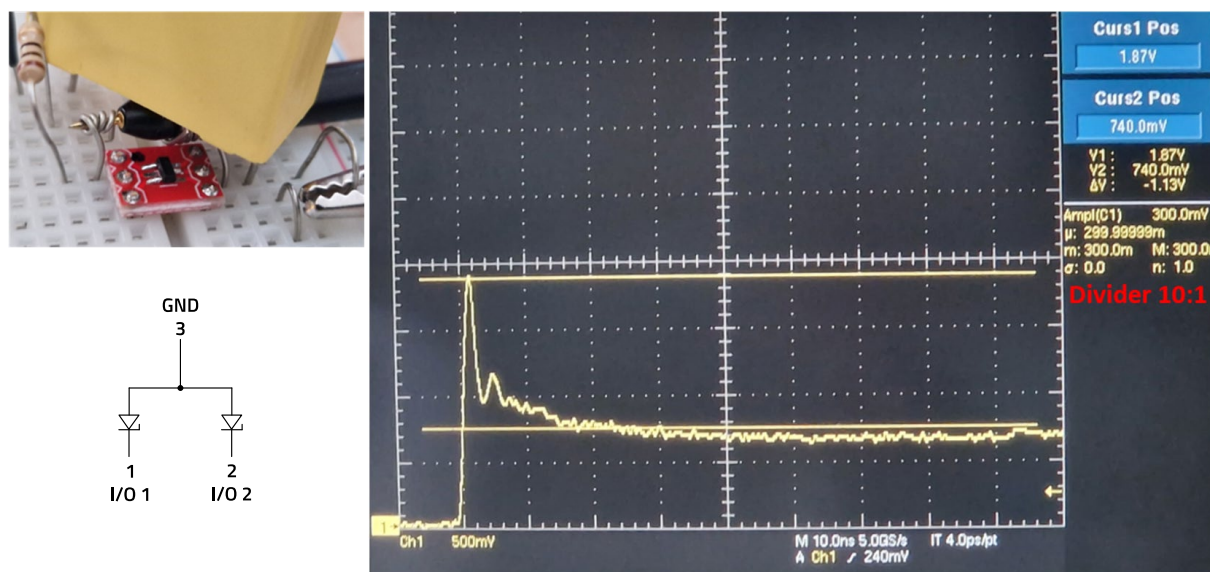


图 26. 两个阵列的钳位性能，相应电路在图 24，右侧部分。

这清楚地表明了符合高频要求的设计，即实际上符合高频要求的电路布局的重要性。TVS 二极管必须在电流路径中拥有较低阻抗，这样才能达到预期效果。下面的测量结果是在更好的设置条件下进行的。图 27 显示了 824021 阵列的测量设置和相应的测量结果。这里的击穿电压仅为 18.7 V，钳位电压为 7.4 V。

最后，将展示实际应用案例。USB 3.1 接口的电路图如图 28 所示。信号线由 TVS 二极管阵列提供瞬态过压保护。接地参考点是外壳，因为过电压（如静电电荷）也以外壳或地面为接地参考点。



WE-TVS TVS Diode 824021

图 27. 测量击穿电压和钳位电压的设置和结果。

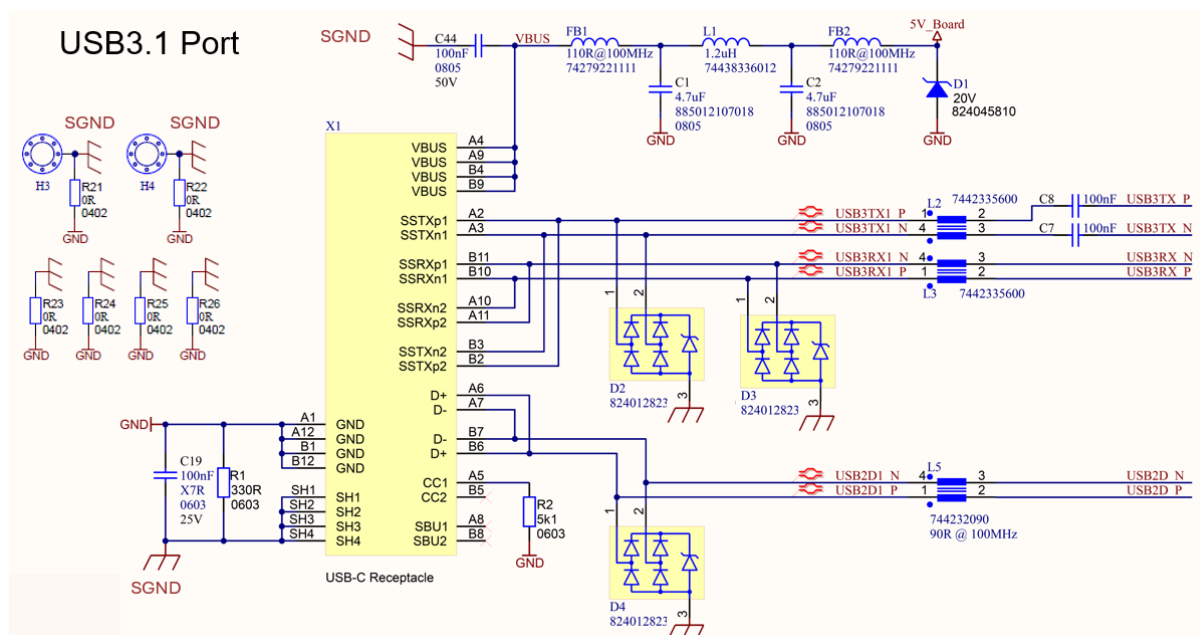


图 28. USB 3.1 接口电路图。

图 29 显示了 TVS 二极管阵列区域的布局。阵列位于信号路径中，地线直接连接到 SGND 区域，以确保尽可能短的地线连接。

这里的 SGND 是外壳的接地，如图 29 左侧所示。USB 控制器的地线位于电感 L2、L3 和 L5 之后，是“GND”。SGND 和 GND 之间通过图 28 左上角的 R21 - R26 和图 29 中的 R1、C19、C44 连接。详细说明请参阅参考设计 RD016 和 RD022，可从官网主页上下载。

4.5 更多应用和电路示例

下文概述了 TVS 二极管和 TVS 二极管阵列的多种应用用途。针对每个应用类别介绍了不同的电路，以便简单地转换到其他应用中。

4.5.1 直流电压输入端的瞬态过电压保护措施

TVS 二极管在以下电路中用于限制过电压，无论是 EMC 意义上的瞬态干扰还是“信号过电压”引起的过电压。

4.5.1.1 桥式连接二极管的保护措施

图 30 中的电路显示了带有变压器和桥式电路的部分电源。

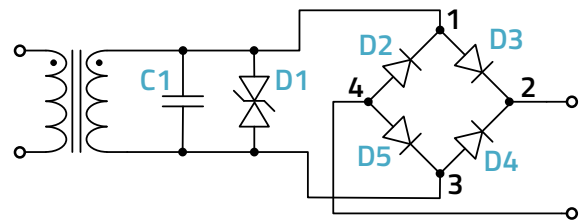


图 30. TVS 二极管用于保护桥式二极管。

双向 TVS 二极管 D1 可保护桥式二极管 D2-D4 免受瞬态差分过电压的影响，但是共模瞬态过电压不受此限制。电容器 C1 可减弱低能量的高频瞬态过电压，而 TVS 二极管则可减弱典型的脉冲群和浪涌瞬态过电压。在该电路中适合使用正向电压较低的肖特基桥式二极管，因为这些二极管通常也具有较低的最大反向电压。C1 通常应在 5 - 10 nF 之间，TVS 二极管的钳位电压必须低于肖特基二极管的最大反向电压。

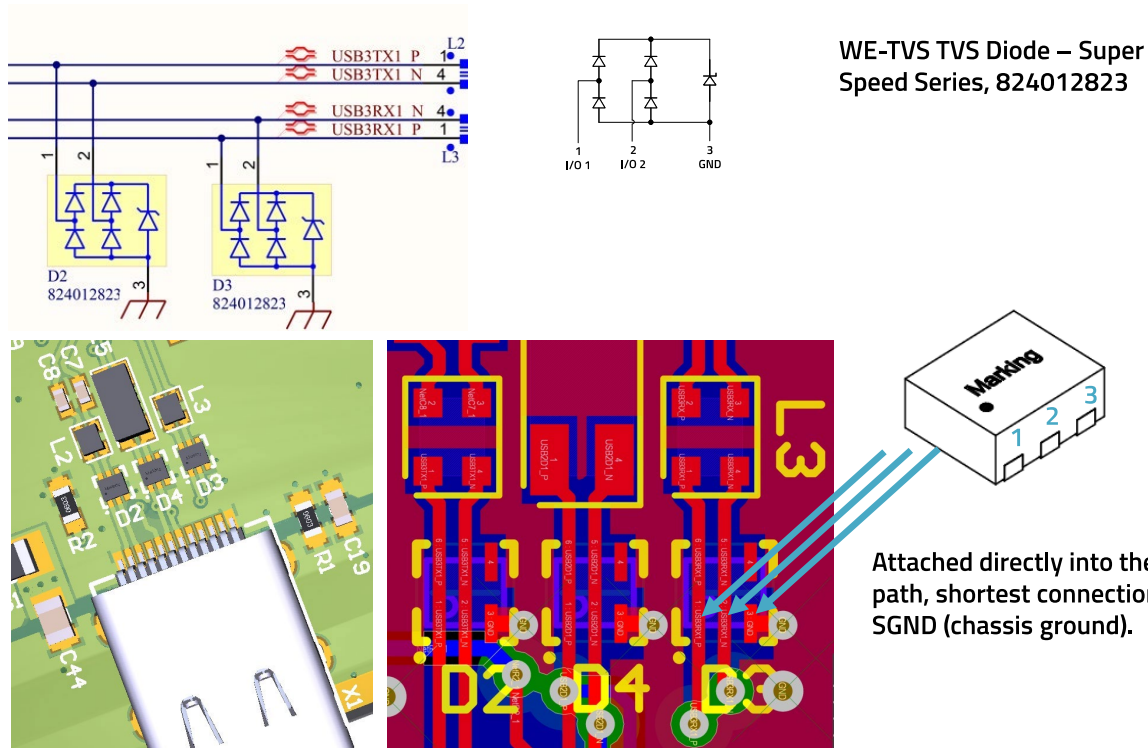


图 29. TVS 二极管阵列的 USB 3.1 接口布局。

4.5.1.2 设备直流输入端的保护措施

图 31 中的电路显示了为直流电输入端提供瞬态保护的滤波器。

在共模扼流圈的初级侧，TVS 二极管 D22、D29 和滤波电容器 C106、C107 与外壳接地 (SGND) 相连。编号为 824520241 的 TVS 二极管的击穿电压为 28.1 V，可限制共模时出现的瞬态过电压。这些电容器与电流补偿扼流圈 L13 以及电容器 C108 和 C109 一起，在每个电流路径 (X4/1 和 X4/2) 上构成 π 型滤波器。双向 TVS 二极管 D1 可限制差分过电压，其可能由位于同一附近电路中的电感负载的开关操作引起。

二极管的钳位电压必须低于后续 DC-DC 控制器的最大允许输入电压。在扼流圈 L13 的次级侧，C109 / C2 过渡处，电子设备和外壳的接地相互连接。图 31 还显示了滤波器的布局。可以清楚地看到，TVS 二极管直接置于接口输入端，并被“插入到”电流通路上，即直接接入导体通路供电线路，以防止旁路电流的形成。如需了解更多信息，请参阅参考设计 RD041，该设计可从 WE 官网主页下载。

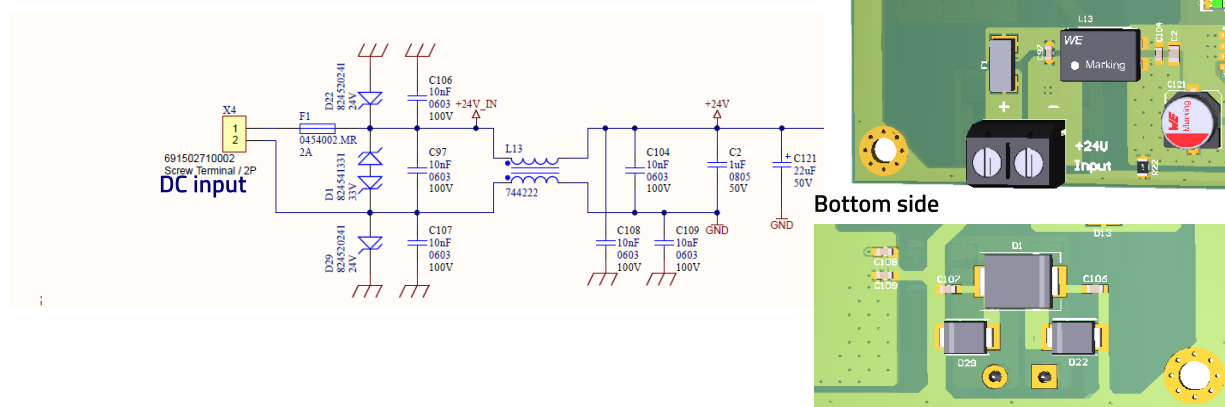


图 31. 直流电输入端的保护。

4.5.1.3 传感器输入端的保护措施

图 32 所示的电路是测量设备中的仪表放大器。IN- 和 IN+ 为浮置输入端，用于测量系统中的电压。

待测电压通过惠斯通电桥输入至运算放大器的非反相输入端。双向 TVS 二极管可限制对主接地（S_GND，外壳）的瞬态电压，主接地同时也是共模干扰的参考接地。

二极管的钳位电压为 10.3 V，而寄生电容典型值 $> 1 \text{ nF}$ 。其与电桥的电阻一起构成运算放大器输入端的低通滤波器。如果预计会出现较高的差分过电压，则可以安装一个额外的双向 TVS 二极管来代替 C1；然后用一个线桥来代替 J4。

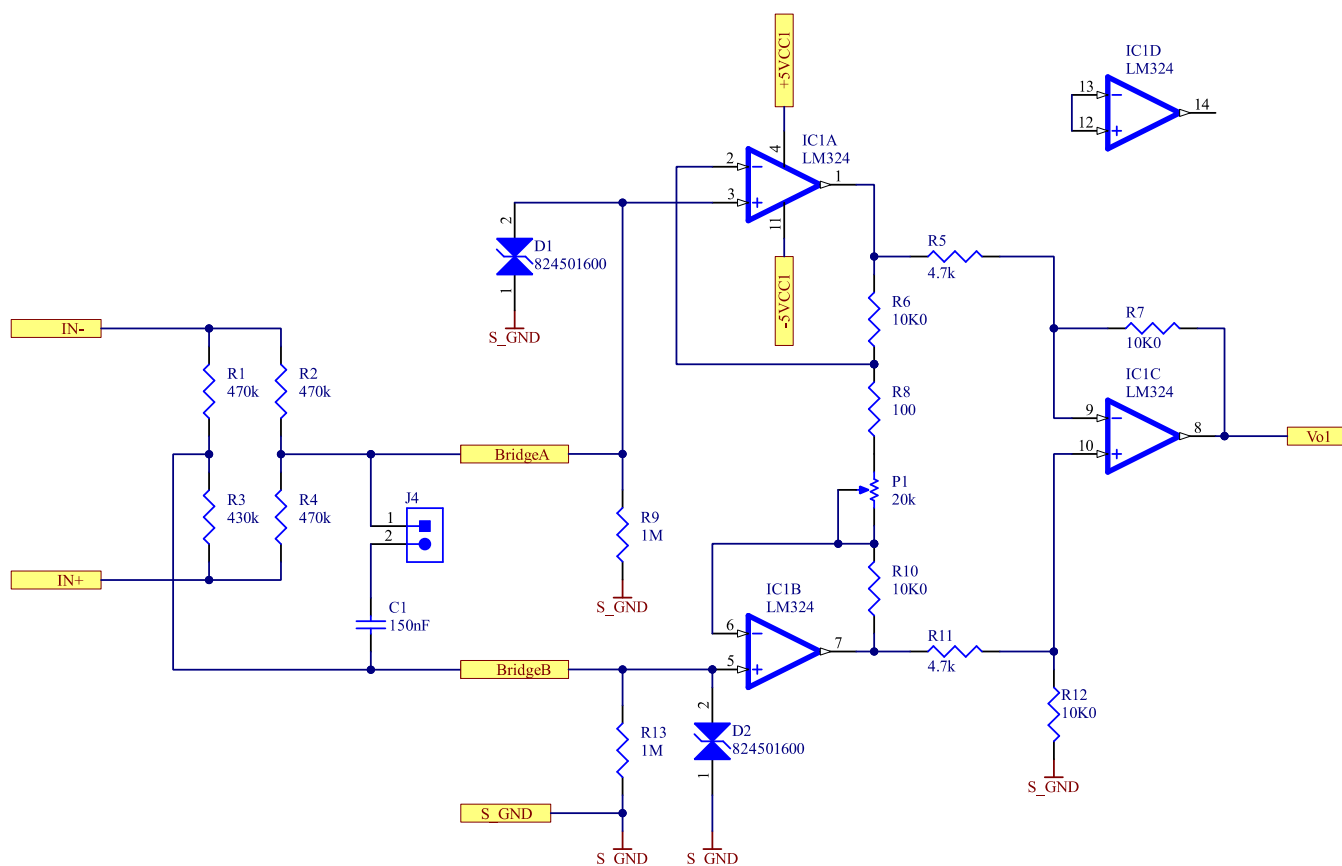


图 32. 传感器输入端的保护措施。

4.5.2 HDMI 接口的保护措施

HDMI 接口是当今许多电子设备的重要部分。为了最大限度地降低 HDMI 接口的 ESD 损坏风险，制造商不仅要对接连接器或外壳进行测试，还要对引脚直接放电，以提高 ESD 抗性。为尽量减少信号失真，传输通道 D0、D1、D2 和 CLK 必须完成阻抗匹配，用于 ESD 保护的 TVS 二极管必须具有较低的寄生电容。

TVS 二极管与待保护线路之间以及二极管与接地层之间的线路必须尽可能短，以尽量减少电感对钳位电压值的影响，因为线路的寄生电感会给 ESD 保护装置的钳位电压增加额外的电压降。图 33 显示了具有 ESD 保护功能的 HDMI 部分接口。

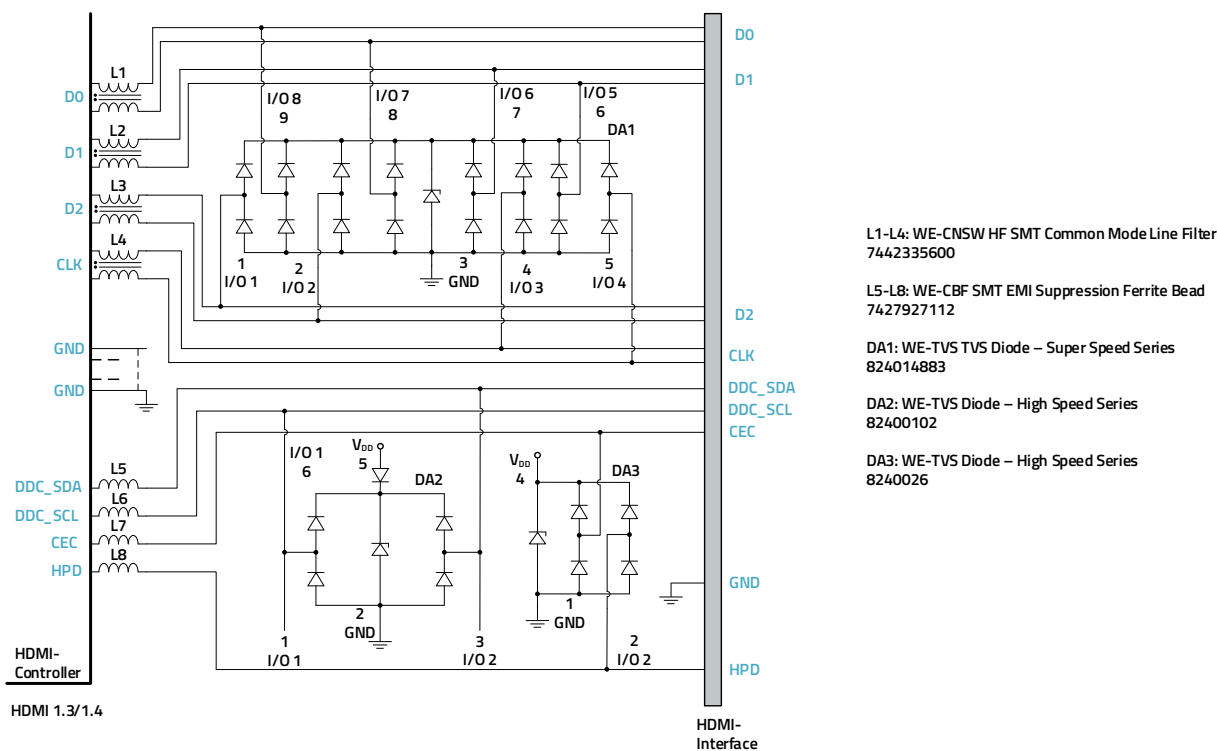


图 33. 带 ESD 保护功能的 HDMI 部分接口电路图。

为什么在 DDC_SDA 和 DDC_SCL 线路中使用带有附加二极管的 TVS 阵列 (DA2)？如果 HDMI 接收端连接到 HDMI 信号源 (见图 34)，当信号源关闭时 (图 34 右)，若接收端处于启动状态，则可能会通过信号源处 TVS 二极管阵列中的保护二极管产生一条漏电流通路。如图 34 所示，TVS 二极管阵列 82400102 已考虑到这一问题，并通过安装一个反置保护二极管来有效防止这一问题。

5. 结束语

本 Appnote 详细介绍了 TVS 二极管的构造、工作原理以及这些元件的优缺点。在应用中必须考虑到这些复杂元件的电气参数，以便实现所需的瞬态过压保护。此外，还必须正确设计电路布局，以免寄生效应对 TVS 二极管的功能产生较大影响。大量示例说明了该如何正确使用这些元件。

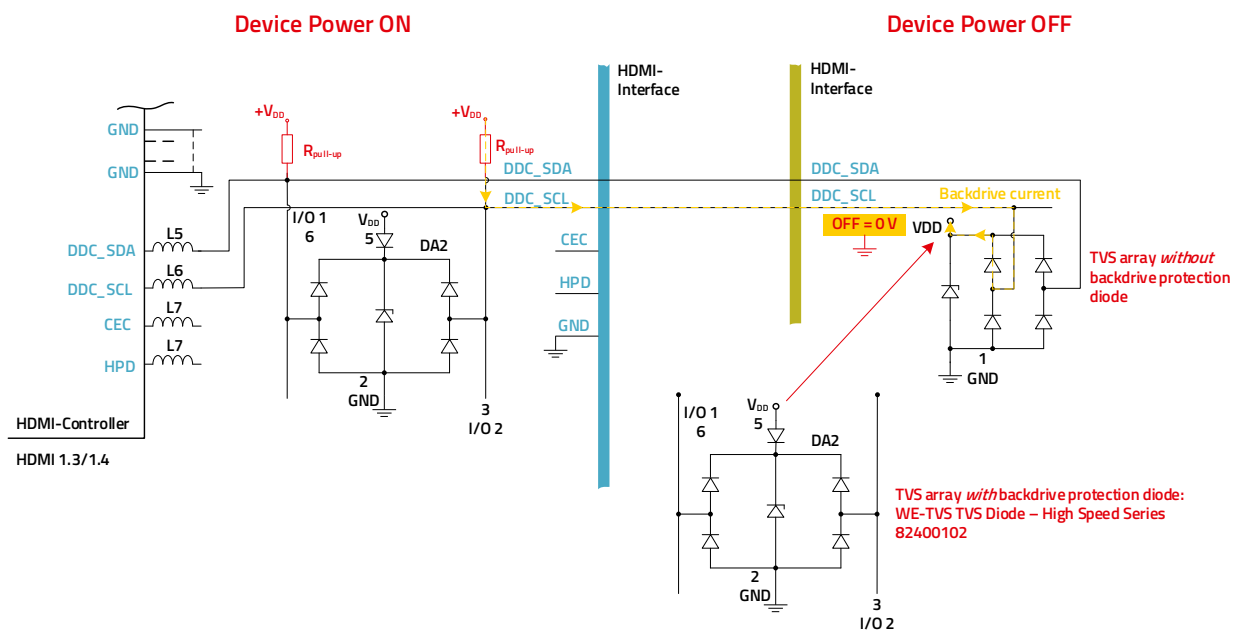


图 34. HDMI 接口系统示意图，用于说明回流电问题。

A. 附录

A.1 文献

- [1] Decreasing the Loading Effect of the TVS Diode Using a Transmission Line for RF and Microwave Applications, Emad Zia Khodadadian and Mojtaba Joodaki, LETTERS ON ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY PRACTICE AND APPLICATIONS, VOL. 3, NO. 1, MARCH 2021.
- [2] How to select a Surge Diode, Texas Instruments, Application Report, SLVAE37–January 2019.
- [3] Latch-up free vertical TVS Diode Array structure using trench isolation, United States Patent, Patent No.: US 7,880,223 B2, Date of Patent: Feb. 1, 2011.
- [4] Latch-Up, Texas Instruments, White Paper SCAA124–April 2015.
- [5] Electrostatic discharge protection, United States patent, Patent No.: US005416351A, Date of Patent: May 16, 1995.
- [6] Transient suppressing device and method, United States patent, Patent No.: US 6,392,266 B1, Date of Patent: May 21, 2002.
- [7] Transient voltage suppression device, United States patent, Patent No.: US 6,867,436 B1, Date of Patent: Mar. 15, 2005.
- [8] Transient voltage suppressor without leakage current, United States patent, Patent No.: US 8,785,971 B2, Jul. 22, 2014.
- [9] Compound semiconductor materials, silicon diode wafers, URL: <https://www.powerwaywafer.com/de/silicon-diode-wafer.html>
- [10] Snapback behavior determines ESD protection effectiveness, Semi-Wiki, URL: <https://semiwiki.com/eda/magwel/7189-snapback-behavior-determines-esd-protection-effectiveness/>
- [11] Embedded. Ninja, TVS-Diodes, URL: <https://blog.mbedded.ninja/electronics/components/diodes/tvs-diodes/>
- [12] Referenzdesign Notes RD016, RD022, Würth Elektronik eiSos, URL: <https://www.we-online.com/en/components/products/WE-LAN-RJ45>
- [13] Würth Elektronik eiSos, Reference design note REF041, Design of a Single Pair Ethernet System with Power over Data Lines, URL: <https://www.we-online.com/en/components/products/WE-STST>
- [14] Würth Elektronik eiSos, Application design note ANS020, Digital Isolators, URL: <https://www.we-online.com/en/components/products/di/digital-isolators-without-power>

IMPORTANT NOTICE

The Application Note is based on our knowledge and experience of typical requirements concerning these areas. It serves as general guidance and should not be construed as a commitment for the suitability for customer applications by Würth Elektronik eiSos GmbH & Co. KG. The information in the Application Note is subject to change without notice. This document and parts thereof must not be reproduced or copied without written permission, and contents thereof must not be imparted to a third party nor be used for any unauthorized purpose.

Würth Elektronik eiSos GmbH & Co. KG and its subsidiaries and affiliates (WE) are not liable for application assistance of any kind. Customers may use WE's assistance and product recommendations for their applications and design. The responsibility for the applicability and use of WE Products in a particular customer design is always solely within the authority of the customer. Due to this fact it is up to the customer to evaluate and investigate, where appropriate, and decide whether the device with the specific product characteristics described in the product specification is valid and suitable for the respective customer application or not.

The technical specifications are stated in the current data sheet of the products. Therefore the customers shall use the data sheets and are cautioned to verify that data sheets are current. The current data sheets can be downloaded at www.we-online.com. Customers shall strictly observe any product-specific notes, cautions and warnings. WE reserves the right to make corrections, modifications, enhancements, improvements, and other changes to its products and services.

WE DOES NOT WARRANT OR REPRESENT THAT ANY LICENSE,

EITHER EXPRESS OR IMPLIED, IS GRANTED UNDER ANY PATENT RIGHT, COPYRIGHT, MASK WORK RIGHT, OR OTHER INTELLECTUAL PROPERTY RIGHT RELATING TO ANY COMBINATION, MACHINE, OR PROCESS IN WHICH WE PRODUCTS OR SERVICES ARE USED. INFORMATION PUBLISHED BY WE REGARDING THIRD-PARTY PRODUCTS OR SERVICES DOES NOT CONSTITUTE A LICENSE FROM WE TO USE SUCH PRODUCTS OR SERVICES OR A WARRANTY OR ENDORSEMENT THEREOF.

WE products are not authorized for use in safety-critical applications, or where a failure of the product is reasonably expected to cause severe personal injury or death. Moreover, WE products are neither designed nor intended for use in areas such as military, aerospace, aviation, nuclear control, submarine, transportation (automotive control, train control, ship control), transportation signal, disaster prevention, medical, public information network etc. Customers shall inform WE about the intent of such usage before design-in stage. In certain customer applications requiring a very high level of safety and in which the malfunction or failure of an electronic component could endanger human life or health, customers must ensure that they have all necessary expertise in the safety and regulatory ramifications of their applications. Customers acknowledge and agree that they are solely responsible for all legal, regulatory and safety-related requirements concerning their products and any use of WE products in such safety-critical applications, notwithstanding any applications-related information or support that may be provided by WE.

CUSTOMERS SHALL INDEMNIFY WE AGAINST ANY DAMAGES ARISING OUT OF THE USE OF WE PRODUCTS IN SUCH SAFETY-CRITICAL APPLICATION.

USEFUL LINKS



Application Notes

www.we-online.com/appnotes



REDEXPERT Design Platform

www.we-online.com/redexpert



Toolbox

www.we-online.com/toolbox



Product Catalog

www.we-online.com/products

CONTACT INFORMATION



appnotes@we-online.com

Tel. +49 7942 945 - 0



Würth Elektronik eiSos GmbH & Co. KG

Max-Eyth-Str. 1 74638 Waldenburg Germany

www.we-online.com

REVISION HISTORY

Document Version	Release Date	Changes
ANP143a	2025/06/10	Initial release of the application note

Note: The current version of the document and the release date are indicated in the footer of each page of this document.