

TVS 二极管标称参数与静电放电防护能力研究

郭 瑶* 徐晓英 叶宇辉 高兵生

(武汉理工大学理学院, 武汉, 430070)

2015-01-16 收稿, 2015-03-06 收改稿

摘要:通过搭建 ESD 测试系统, 测量 TVS 二极管的 ESD 防护性能, 比较其标称参数与 ESD 防护性能之间的关系。结果表明, TVS 二极管的反向击穿电压在一定程度上能够反映 ESD 防护能力, 反向击穿电压与 ESD 峰值电流、ESD 钳位电压呈线性关系, 标称钳位电压略低于实际 ESD 钳位电压, 而其他标称参数与 ESD 防护能力关联较小。标称参数难以全面反映器件的 ESD 防护能力。

关键词:瞬变电压抑制二极管; 标称参数; 静电放电测试方法; 静电放电防护能力

中图分类号: TN312 文献标识码: A 文章编号: 1000-3819(2015)04-0383-05

Study on the Relation between TVS Nominal Parameters and Its ESD Protective Ability

GUO Yao XU Xiaoying YE Yuhui GAO Bingsheng

(School of Sciences, Wuhan University of Technology, Wuhan, 430070 CHN)

Abstract: The ESD protection performance of TVS diode was measured by a newly-built ESD test system and compared with its nominal parameters. The experiment shows that reverse breakdown voltage can reflect ESD protection to some extent. It has linear relationship with ESD peak current and ESD clamping voltage, while the nominal clamping voltage is slightly lower than the actual ESD clamping voltage. However, other nominal parameters have less relationship with ESD protective ability. Therefore, nominal parameters of TVS cannot show its ESD protective ability comprehensively.

Key words: transient voltage suppressor diode; nominal parameter; ESD test method; electrostatic discharge protective ability

EEACC: 2560

引 言

目前集成化、多功能化的电子产品应用广泛, 而且产品的工艺尺寸不断缩小, 这使得静电放电 (ESD) 问题日益严峻^[1-2]。静电危害会导致产品故障或性能下降, 降低使用寿命。如何提高产品的静

电放电防护能力受到学者们的广泛关注, 使用 ESD 防护器件是有效的解决方案之一^[3]。但目前没有统一的标准来评估静电防护器件的防护性能, 这给 ESD 防护器件的选择和 ESD 防护设计带来了诸多的不利。本文以常用的防护器件瞬变电压抑制二极管为对象, 研究其标称参数与 ESD 防护性能的相关性。

* 联系作者: E-mail: guoyao0904@163.com

1 TVS 二极管简介

TVS 即瞬变电压抑制二极管 (Transient voltage suppressor diode), 是一种常用的静电防护器件^[4-5], 将其并联到保护结构两端, 能够及时泄放瞬态大电流, 实现电路防护。

1.1 TVS 二极管的工作原理

TVS 是一种半导体二极管, 内部是由硅通过扩散工艺形成的 PN 结^[6-7]。TVS 用作静电防护时, 内部 PN 结处于反向偏置状态。在一定电压范围内, PN 结截止, 仅有很小的漏电流流过, TVS 表现为高阻抗状态。当反向电压高于 PN 结反向击穿电压时, 由于 PN 结的内电场很强, 少数载流子受到强电场作用, 获得很大的能量, 并与其他原子发生碰撞, 形成新的电子、空穴对, 增加了载流子数量, 新的载流子又会在强电场作用下碰撞形成更多的电子、空穴对, 造成连锁反应, 使反向电流迅速增大, 此时 TVS 表现为低阻抗状态, 并吸收大量脉冲功率, 使两极间电压钳位在一个预定值。利用 TVS 的雪崩击穿特性, 可实现 ESD 防护^[8]。

1.2 TVS 二极管的标称参数

TVS 的数据手册中给出了一系列标称参数。一个双向 TVS 的典型参数如图 1 所示。其中, I_T 是测试电流, 常为 1 mA; V_{BR} 是测试电流条件下的击穿电压, 即内部 PN 结雪崩击穿电压值; V_{RWM} 是反向工作峰值电压, 略小于击穿电压; I_R 是器件端电压为 V_{RWM} 时的最大反向漏电流; I_{PP} 是规定脉冲条件下 (10/1 000 μ s 标准指数波形) 最大反向峰值电流; V_C 是反向电流达到峰值 I_{PP} 时的钳位电压。手册中还列出标称功率值, 为在测试波形下的峰值消散功率 $P_{PK} = I_{PP} \cdot V_C$ 。

上述 TVS 的典型参数在一定程度上能表征其工作特性, 但并不能全面地反映 TVS 器件对静电放电的响应。

2 静电放电实验研究

2.1 ESD 防护参数

衡量保护器件抗静电放电能力的参数主要有: 器件鲁棒性、静态工作参数、动态保护工作参数。器

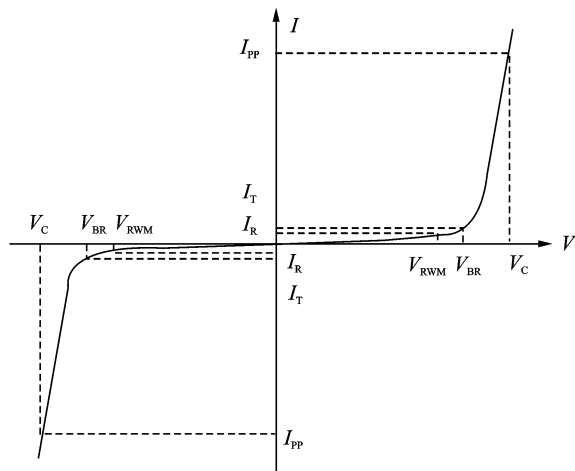


图 1 双向 TVS 的典型参数

Fig. 1 Typical parameters of bi-TVS

件鲁棒性指器件自身对静电放电的耐受能力, 健壮的鲁棒性能保证器件正常工作而不受损伤。静态工作参数的意义在于受保护结构或系统正常工作时, 保护器件不会降低系统工作性能, 尤其是保证输入输出信号的完整性, 主要参数有漏电流、电容值等。动态保护工作参数则能够表征系统受到静电放电脉冲攻击时, 器件泄放脉冲电流、保护后级组件不受 ESD 脉冲损伤的能力, 主要参数有导通时间、钳位时间、钳位电压、峰值电压、峰值电流等。

TVS 二极管的鲁棒性较高, 通常都能满足电路设计要求, 不是选件的首要考虑因素。由于工艺原因, TVS 二极管的静态工作参数相差不大 (尤其是同一生产商的情况下), 静态工作参数常作为参考参数衡量器件是否满足设计要求。根据 ESD 设计窗的要求进行 ESD 设计时, 动态保护工作参数是设计师们主要的考虑因素。静态工作参数和鲁棒性都可以直接测量。本文搭建系统测量 TVS 的动态保护工作参数, 并结合标称参数, 分析 TVS 的 ESD 防护能力。

2.2 实验方案

为了能够有效评估器件的 ESD 防护能力, 并模拟真实工作情况, 本文设计的测试方法原理如图 2 所示。其中, 50 Ω 电阻模拟了后级受保护结构, 它由特征阻抗一定的测试系统构成, 能够直观地测量得到保护器件的电压钳位能力; 电流采样电阻用于观测器件的泄流能力, 用电流靶实现。使用 ESD 防护器件的目的是提升系统 ESD 抗扰度, 系统级测试标准为 IEC 61000-4-2 标准^[9], 因此放电源选取为

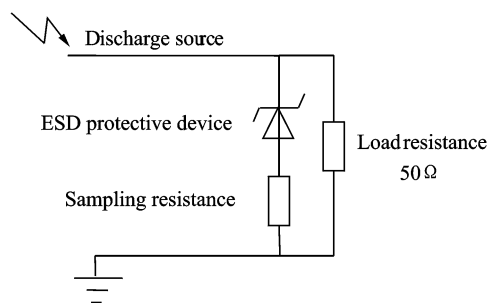


图 2 测试方法原理图

Fig. 2 The principle diagram of the test method

该标准中规定的人体金属模型接触式放电波形。

3 测试结果与数据分析

3.1 TVS 器件对静电放电的响应

根据原理图搭建测试系统,并选取多个不同型号的 TVS 器件,依次设置放电电压为 2、4、6、8 kV,进行放电实验。根据电压和电流响应波形,得到器件对静电脉冲的响应规律。不同型号的响应规律相似,以型号为 P6KE68CA 的 TVS 二极管为例说明,图 3 和图 4 为测试结果。

从图 3 和 4 图中可以看出,在静电放电脉冲开始后,电压迅速上升,TVS 触发导通,电流瞬间增大,同时电压在几纳秒内降低到某一恒定值并维持稳定,而电流则升至峰值。之后随着脉冲的减弱,电流也随之降低,直至静电放电脉冲结束。

比较不同放电电压的波形,除峰值有所不同外,

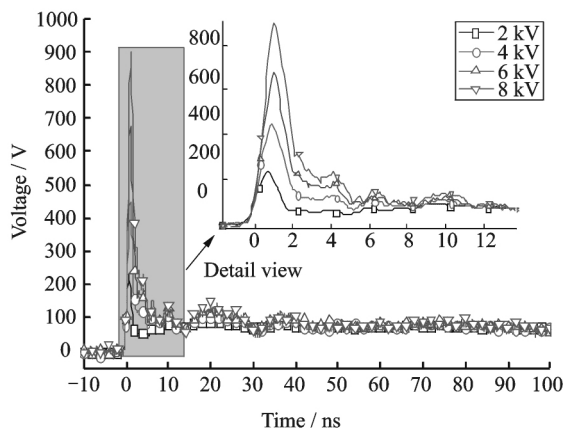


图 3 型号为 P6KE68CA 的 TVS 二极管在不同放电电压下的电压响应波形

Fig. 3 The voltage response waveforms under different discharge voltages for TVS P6KE68CA

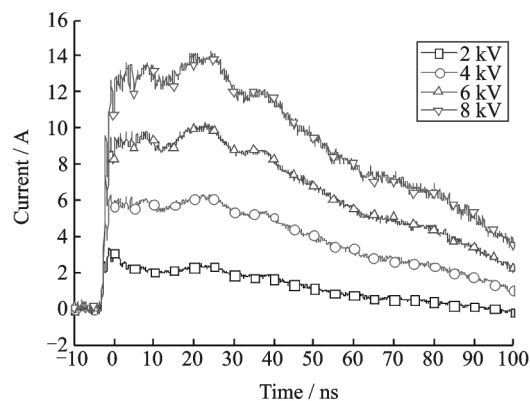


图 4 型号为 P6KE68CA 的 TVS 二极管在不同放电电压下的电流响应波形

Fig. 4 The current response waveforms under different discharge voltages for TVS P6KE68CA

其余部分几乎重合,这表明 TVS 对不同放电电压响应的的时间以及钳位效果相同。峰值电压主要受引线电感以及器件响应速度的影响,随放电电压的升高而升高。在脉冲刚开始的几纳秒内,TVS 器件并没有完全触发,其电压幅值主要取决于注入静电放电脉冲的大小;待 TVS 完全导通后,ESD 钳位电压变化不大,在 85~110 V 之间,主要因为 TVS 的导通电阻较小,大电流仅引起电压的微小变化。同时,由于钳位电压相对稳定,当放电电压增加时,电流也随之增大,将 ESD 脉冲的能量释放到大地。

3.2 TVS 二极管的标称参数与 ESD 防护能力的关联

TVS 二极管的标称参数中,反向工作峰值电压和最大反向漏电流主要反映 TVS 在截止状态下的工作状况,而 TVS 的静电放电防护能力则与其在反向击穿状态下的参数有关,主要有反向击穿电压、最大反向峰值电流、钳位电压以及标称功率等。

(1) 反向击穿电压

选取标称功率为 600 W、反向击穿电压分别为 18、33、68、91、120 V 的 TVS 二极管进行测试,整理各器件在放电电压为 2、4、8 kV 情况下的峰值电压、钳位电压和峰值电流,并进行线性拟合分析,如图 5~7 所示。图中实心点为实测数据点,直线为数据点的线性拟合曲线。

在图 5 中,峰值电压的变化非常小,主要因为静电放电波形具有很陡峭的上升沿,其上升时间小于 TVS 响应时间,因此 TVS 没能削弱该波形的第一个峰值,该峰值主要取决于放电电压。在图 6 和图 7 中,TVS 的 ESD 钳位电压随着器件反向击穿电压

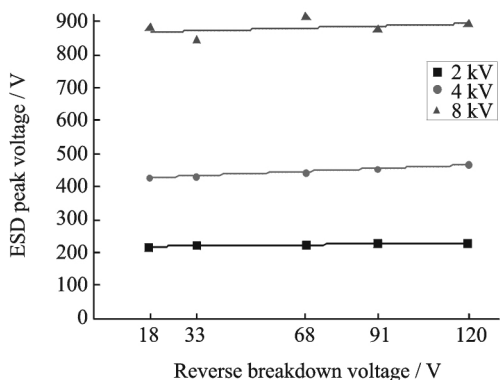


图5 ESD 峰值电压与 TVS 反向击穿电压的关系

Fig. 5 Relations between peak voltage and TVS reverse breakdown voltage

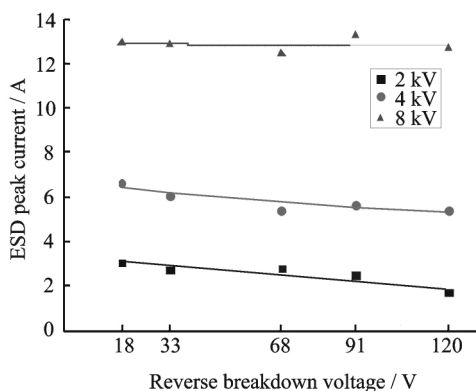


图6 ESD 峰值电流与 TVS 反向击穿电压的关系

Fig. 6 Relations between peak current and TVS reverse breakdown voltage

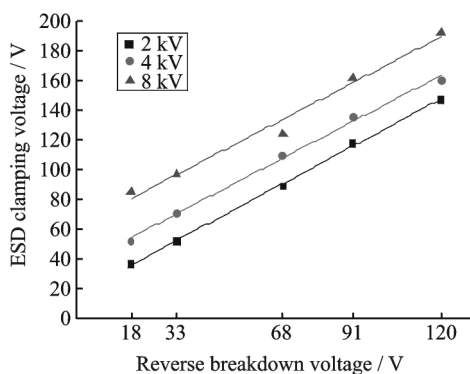


图7 ESD 钳位电压与 TVS 反向击穿电压的关系

Fig. 7 Relations between clamping voltage and TVS reverse breakdown voltage

的增加而增加,且略高于器件反向击穿电压,但峰值电流随着反向击穿电压的升高而略有下降,这说明器件的反向击穿电压虽不能直接表明器件的 ESD 防护水平,但能定性的反映器件的 ESD 动态保护特性。

(2) 标称功率

TVS 标称功率是在 $10/1\,000\ \mu\text{s}$ 的指数波形下测量得到的峰值功率,但该测试波形与静电放电波形不同,因此需要讨论该标称功率与器件 ESD 防护效果的关系。分别选取标称功率为 600 W 和 1 500 W 的几组 TVS 进行测试,其中一组的测试结果如图 8 和图 9 所示。

从图 8 和图 9 中可以看出,标称功率不同的 TVS 器件对同一放电电压的响应曲线几乎重合,标称功率与 ESD 动态保护特性无关。而且 ESD 峰值功率要远大于器件标称功率,但器件仍能正常工作,说明标称功率不能直观反映器件对 ESD 的耐受能力。若要评定 TVS 的鲁棒性,还需要进行 ESD 抗扰度测试。

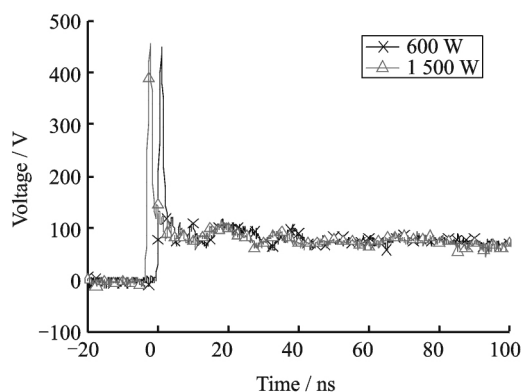


图8 不同功率 TVS 在 4 kV 放电电压下的电压响应

Fig. 8 The voltage response waveform under 4 kV discharge voltage with different power

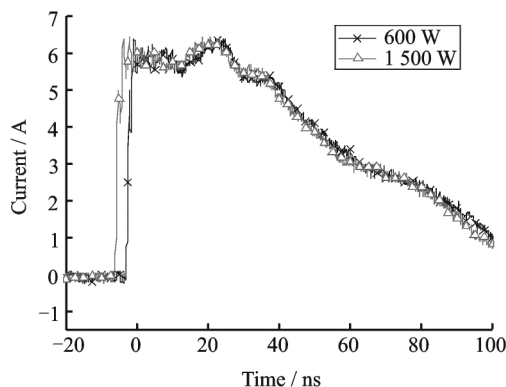


图9 不同功率 TVS 在 4 kV 放电电压下的电流响应

Fig. 9 The current response waveform under 4 kV discharge voltage with different power

(3) 钳位电压

由于 TVS 二极管并非理想器件,存在较小的导通阻抗,剧烈变化的电流仍能引起电压的微弱变化,因此只能给出 TVS 器件对 ESD 响应的钳位电压的范围,难以定义具体的 ESD 钳位电压值。但结合图

3 可以看出,ESD 钳位电压范围约为 85~110 V,略高于标称参数的钳位电压 68 V。而且其他 TVS 器件也具有相同的规律,即 ESD 钳位电压范围略高于标称参数钳位电压值。

其他标称参数,由于测试波形选取不同或应用范围不一致,与 ESD 防护能力不相关,不进行研究。

4 总 结

TVS 的技术手册中给出了反向击穿电压、钳位电压、峰值电流等参数,但其测量波形与静电放电波形有很大不同,因此手册中的参数不能有效反映 TVS 的静电放电防护能力。本文用人体金属模型作为放电源,对 TVS 二极管进行了 ESD 测试,并重点分析其标称参数与 ESD 动态保护特性的关系。

研究结果表明,器件标称功率既与 ESD 动态防护特性无关,也不能直观反映器件的鲁棒性水平,但标称功率与静态工作特性和器件鲁棒性是否关联有待深入研究;标称钳位电压值与 ESD 钳位电压值具有相同的数量级,但标称值略低于 ESD 的钳位值,不能直接将标称值应用于 ESD 设计中;反向击穿电压与 ESD 防护能力关联性最大,却难以直接反映 ESD 防护的具体参数值,但 ESD 峰值电流、ESD 钳位电压与反向击穿电压呈线性关系,基于本文所绘曲线,可以对 TVS 器件的 ESD 防护参数进行估计,同时也可根据实际需求(如电路所需钳位电压、泄放电流大小等)选择 TVS 二极管的型号。总之,TVS 二极管的标称参数并不能全面地反映器件的 ESD 防护能力,选用 TVS 二极管进行 ESD 设计时,还需进行详细测试以确定选件标准。本文的研究给工程师在选择 TVS 进行静电放电防护设计时提供了理论基础和指导性意见。

参 考 文 献

- [1] Bonfert D, Gieser H, Bock K, et al. Pulsed behavior of polymer protection devices[C]. 32nd International Spring Seminar on Electronics Technology, Brno, Czech Republic: IEEE Computer Society, 2009:1-6.
- [2] 刘尚合,武占成. 静电放电及危害防护[M]. 北京:北京邮电大学出版社,2004:1-268.
- [3] Tam W, Kok C, Siu S, et al. Snapback breakdown ESD device based on zener diodes on silicon-on-insulator technology[J]. Microelectronics Reliability, 2014, 54(6-7): 1163-1168.
- [4] 何卫. TVS 器件钝化技术与可靠性研究[D]. 华中科技大学,2007.
- [5] 王振兴,武占成,张希军,等. ESD 防护器件测试系统性能研究[J]. 河北科技大学学报,2011,32(S1): 67-70.
- [6] 彭圻平,阮军洲,刘永恩. 电子设备中的 ESD 保护设计[J]. 无线电工程,2013,43(6):61-64.
- [7] 肖敏. 工艺参数对 TVS 器件电性能的影响[D]. 华中科技大学,2007.
- [8] Wu D, Tan Z, Ma L, et al. The failure modeling analysis of bipolar silicon transistor device caused by ESD [C]. Applied Mechanics and Materials. Chongqing, China: Trans Tech Publications Ltd, 2013:929-932.
- [9] IEC61000-4-2. Electromagnetic compatibility(EMC), Part4-2: testing and measurement techniques electrostatic discharge immunity test[S]. Geneva, Switzerland: 2001.



郭 瑶(GUO Yao) 女,1989 年生,硕士,主要从事静电放电及其危害防护方向的研究。