

基于 TVS 的电子设备 ESD 保护方法研究

吴 斌,陶 卫,赵 阳,马宝萍,李世锦

(南京师范大学电气与自动化工程学院,江苏 南京 210042)

[摘要] 针对静电放电(electrostatic discharge, ESD)脉冲电流对电子设备内部芯片造成破坏,本文采用瞬态二极管(transient voltage suppressor, TVS)作为 ESD 抑制器件,分析了 TVS 的防护机理,考虑到高频情况下寄生参数的存在,建立了 ESD 保护电路模型. 通过比较 TVS 抑制前后的负载两端的电压波形,研究其抑制性. 最后通过实验验证了 TVS 的防护效果.

[关键词] 静电放电,瞬态抑制二极管,静电放电保护,寄生参数

[中图分类号] TM461; TN03 [文献标志码] A [文章编号] 1672-1292(2017)02-0019-05

Research on Electrostatic Discharge Protection Method of Electronic Equipment Based on the TVS

Wu Bin, Tao Wei, Zhao Yang, Ma Baoping, Li Shijin

(School of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

Abstract: Aiming at the electrostatic discharge (ESD) pulse current undermining the internal chip of the electronic device, in the paper, transient voltage suppressor has been used as electrostatic discharge suppression device, the protection mechanism of TVS has been analyzed. The circuit model for the ESD protection is proposed under considering the existence of parasitic parameters in high frequency. The suppression of TVS is studied by comparing the voltage waveforms of the load before and after using TVS. Finally, the protection effect is verified by an experiment.

Key words: electrostatic discharge, TVS, electrostatic discharge protection, parasitic parameters

随着电子技术和器件工艺的迅猛发展,设备的工作电压越来越低,使得静电放电(electrostatic discharge, ESD)耐压能力也越来越差,因此 ESD 引起的电子设备失效或损坏的情况越来越多. 各种电子器件的集成度大幅度提高,而且做到了低功耗、高可靠、多功能. ESD 是一种常见的自然干扰源,有高电位、强电场、瞬时大电流的特点. 因此,设备制造方在设计电子设备时,会针对 ESD 采取充分的防护措施. 在做 ESD 防护措施时,主要从工艺结构、机壳、屏蔽、接地、布线、器件选择等方面考虑^[1-3].

瞬态二极管(transient voltage suppressor, TVS)作为静电保护器件,早期部分学者从半导体器件物理角度出发,考虑高频寄生参数,建立 TVS 器件电路模型^[4]. 鉴于此,本文通过建立考虑 TVS 管高频寄生参数的 ESD 保护电路,分析高频下 TVS 保护电路的时域特性,得出其抑制效果. 最后通过将其应用于 ESD 整改中,分析了 TVS 整改措施的具体方法,最终该款产品能够达到相应的静电抗扰度要求. 本文的整改方法为一些产品提供了有效的抑制措施和整改方案,具有很好的参考价值.

1 TVS 的防护机理

本文采用的 ESD 保护器件为 TVS 管^[5-7]. TVS 管是由特殊的 P-N 半导体结组成,是一种对 ESD 防护具有工程意义的二极管形式器件. 当瞬态高能量冲击 TVS 管的反向两端时,它能以 10^{-12} s 的速率,将两端的高阻值变为低阻值,使两极间的电压维持在一个预设值,可以有效地保护元器件.

收稿日期:2017-03-08.

基金项目:江苏省教育厅高校科研成果产业化推进项目(JHB2011-20).

通讯联系人:赵阳,教授,博士生导师,研究方向:电磁兼容技术与应用. E-mail: zhaoyang2@njnu.edu.cn

如图 1 所示,TVS 管和稳压二极管一样,主要都是使用其反向特性. 其中, U_R 是在发生反向击穿之前的临界电压,称为最大转折电压. U_B 表示 TVS 管的击穿电压, I_T 为其对应的反向电流,其值一般为 1 mA. U_C 表示 TVS 管的最大钳位电压, I_{pp} 表示 TVS 的峰值电流. 当工作在反向特性时,电子设备两端的电压会被 TVS 管钳制在 $U_B \sim U_C$ 的范围内. 与稳压二极管不同的是, I_{pp} 的大小可达到几百安培,且 TVS 管的响应时间为 10^{-12} s.

2 静电放电保护电路建模与仿真

2.1 静电放电发生器建模

实际的静电放电模拟器如图 2 所示,其中 C_1 为充电电容, R_1 为放电电阻, U_2 为放电开关. 由于 ESD 静电电流具有高频特性,因此电阻 R_1 的自身电感虽然小,但不能忽略. 在进行理论分析时,需要在电路的外部加一个电压用来提供能量,不考虑放电开关的影响^[8-9].

根据静电放电模拟器的实际结构,建立了基于 ESD 模拟器电路的静电放电等效电路,采用 MATLAB/Simulink 功能实现电路搭建,如图 3 所示. 其中 C_3 、 L_2 、 R_3 均为发生器回路的寄生参数, C_2 是发生器对地电容, L_3 是连接线电感, R_2 是负载.

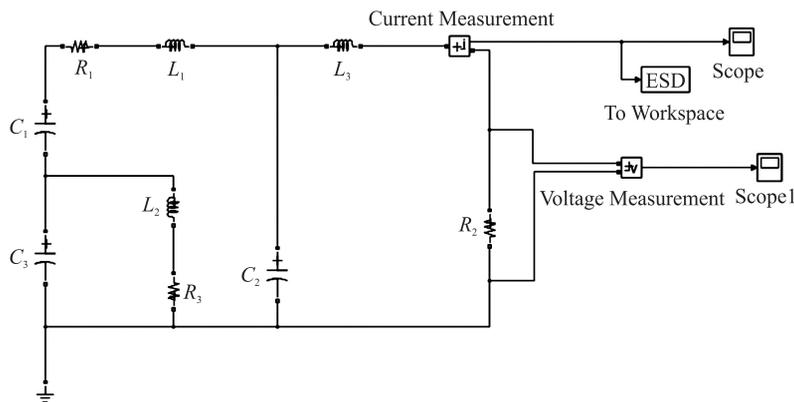


图 3 ESD 发生器模型

Fig. 3 Model of ESD generator

2.2 静电放电保护电路建模

一般在实际的电路设计中,需要将电子元器件的非理想参数考虑进去. 在高频状态下,考虑 TVS 的非理想特性,仿真中对非理想模型进行建模,如图 4 所示.

图 4 中, L_s 表示寄生电感, R_s 表示自身电阻, R_p 表示击穿电阻, C_j 表示结电容, U_{BR} 表示击穿电压. 影响 TVS 抑制效果的参数是 L_s 、 R_s 、 C_j .

2.2.1 寄生电感

TVS 的寄生电感是由直插型二极管两端的管脚引线电感或寄生串联电感引起的. 计算方法为

$$L_s = 200 \times 10^{-9} \times l \times \left[2.3 \times \ln \left(\frac{4l}{d} - 0.75 \right) \right] \quad (1)$$

式中, l 为直导线的长度(m), d 为直导线的直径(m).

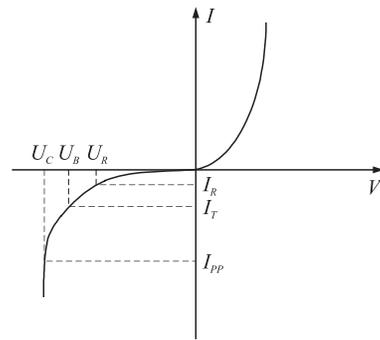


图 1 TVS 管的 I-V 曲线图

Fig. 1 I-V curve diagram of TVS

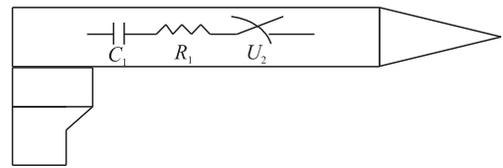


图 2 ESD 模拟器构造

Fig. 2 Construction of ESD simulator

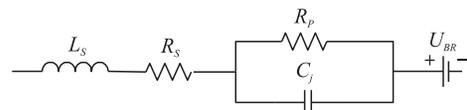


图 4 非理想二极管建模图

Fig. 4 Model diagram of non-ideal diode

2.2.2 自身电阻

TVS 的自身电阻由引线电阻产生,另外 TVS 在导通状态时产生等效电阻. 在低频条件下,TVS 管的自身电阻可由圆形截面导体的电阻公式(2)计算出

$$R_s = l/\sigma s = l/\sigma \pi a^2. \quad (2)$$

式中, l 、 a 、 σ 、 s 依次为导线的长度(m)、半径(m)、电导率(S/m)、横截面积(m^2).

在高频的条件下,TVS 射频电阻为

$$R_s = \frac{1}{2} \pi \delta \sigma = \frac{1}{2} \pi \sqrt{\frac{f \mu}{\pi \sigma}}, \quad (3)$$

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{2} \pi \alpha \delta \sigma} = \sqrt{\frac{2}{2 \pi f \mu \sigma}} = \sqrt{\frac{1}{\pi f \mu \sigma}}.$$

2.2.3 结电容

TVS 的结电容 C_j 的大小在 $10 \sim 10^4$ pF,计算方法为

$$C_j = \frac{11.9 A \epsilon_0}{\left[\frac{11.9 \epsilon_0}{0.4 \times 10^{-4}} (1 - U_A) \right]^{1/2} (1 - U_A)^{1/2}}. \quad (4)$$

式中, U_A 为反向偏压(V), ϵ_0 为真空介电常数(F/m), A 为结面积(m^2).

在 ESD 发生器模型的负载两端并联非理想状态下的 TVS 管,即为 ESD 保护电路模型,如图 5 所示.

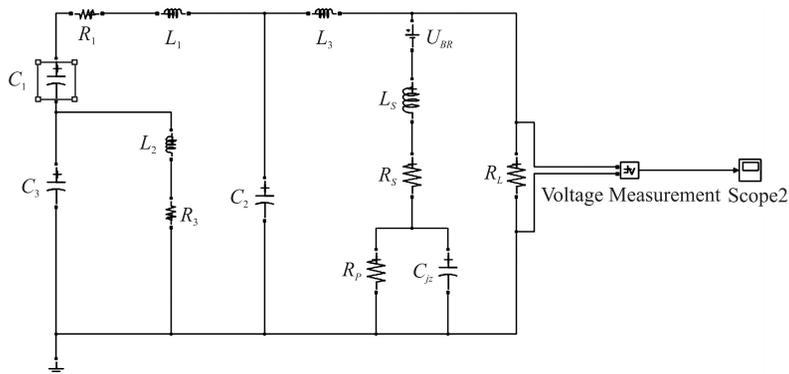


图 5 ESD 保护电路模型

Fig. 5 ESD protection circuit model

采用 MATLAB/Simulink 对图 3 与图 5 进行仿真,仿真结果如图 6 所示.

由图 6 可以看出,采取 TVS 进行 ESD 防护后,负载两端的电压明显降低,从而能有效地保护敏感芯片,保证被保护电路能正常工作.

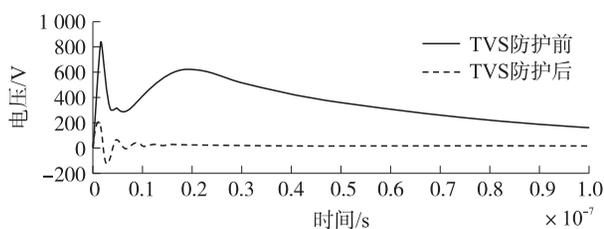


图 6 TVS 防护前后的对比图

Fig. 6 Comparison diagram before and after TVS protection

2.3 高频寄生参数对 TVS 管特性的影响

2.3.1 寄生电感的影响

由于 TVS 管的寄生电感是由直插型二极管两端的管脚引线电感或寄生串联电感引起的,设 $l=1$ cm,

$d=0.15$ cm,由式(1)可得出寄生电感约等于 15 nH. 根据图 5 所示 TVS 管的 ESD 保护电路模型,取寄生电感分别为 5 nH,10 nH,15 nH,运用 MATLAB/Simulink 仿真各寄生电感下的 TVS 管的 ESD 保护电路.

从图 7 可以看出,当保持串联电阻与结电容不变时,寄生电感决定 TVS 管两端电压的大小,电感越大,TVS 管两端的峰值电压越大,ESD 的冲击越高. 在 10 ns 内,由于高脉冲能量的冲击,容易对 TVS 管造成损坏,使 TVS 管失效,从而降低 TVS 管的静电防护能力. 因此在工程应用里,尽量选择寄生电感较小的 TVS 作为抑制器件.

2.3.2 串联电阻的影响

TVS 的串联电阻由引线电阻产生,即 TVS 在导通状态时的等效电阻。保持 TVS 管的寄生电感、结电容不变,改变串联电阻的大小,取串联电阻分别为 0.1Ω 、 0.5Ω 、 1Ω ,运用 Matlab/Simulink 仿真各阻值下的 TVS 管的 ESD 保护电路,如图 8 所示。

从图 8 所示的 TVS 管峰值电压局部放大图可以看出,峰值电压随着串联电阻的增大而增大,会产生少量的冲击电压,对 TVS 管造成威胁,同时负载两端的电压也会随着电阻值的增大而增大,对负载造成严重影响。

2.3.3 结电容的影响

保持寄生电感,串联电阻不变,改变结电容。根据式(4),取结电容分别为 5 pF 、 50 pF 、 500 pF ,运用 MATLAB/Simulink 仿真各结电容下的 TVS 管的 ESD 保护电路,仿真结果如图 9 所示。

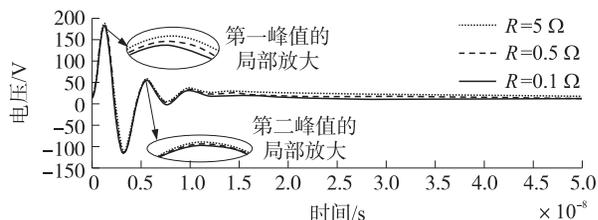


图 8 不同串联电阻对 TVS 的影响

Fig. 8 Influence of different series resistors on TVS

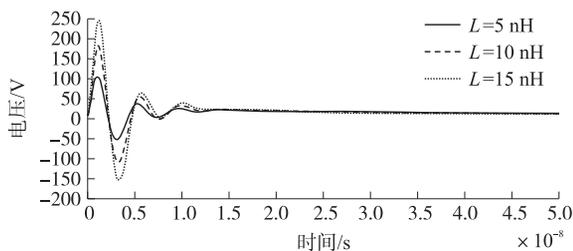


图 7 不同寄生电感对 TVS 的影响

Fig. 7 Influence of different parasitic inductors on TVS

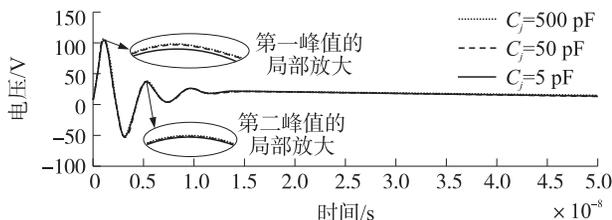


图 9 不同结电容对 TVS 的影响

Fig. 9 Influence of different junction capacitance on TVS

由图 9 所示的 TVS 管峰值电压局部放大图可以看出,当寄生电感、串联电阻保持不变,结电容取不同值时,三个波形具有高度的一致性,故结电容对负载两端的电压影响较小,在参数影响因素中可忽略不计。

综上所述,得出负载两端的峰值电压与寄生电感和串联电阻有关,与结电容无关,且电压随着寄生电感、串联电阻的增大而增大,且寄生电感起决定作用,因此在选用 TVS 时,应选择寄生电感与串联电阻较小的 TVS。

3 基于 TVS 管的 ESD 防护的实验验证

3.1 问题描述

按中华人民共和国医药行业标准,接触放电应通过 6 kV 的 ESD 测试实验。采用静电枪进行接触放电测试,该多功能超声透药仪(如图 10)不能通过电压为 6 kV 的放电测试。当 6 kV 放电时,该多功能超声透药仪的电致孔和电导两个功能模块绿灯未全亮,且频率功能模块有一个红灯不亮(如图 11)。



图 10 多功能超声透药仪

Fig. 10 Multifunctional ultrasonic medicine permeation apparatus



图 11 多功能超声透药仪在 6 kV 放电测试时异常工作

Fig. 11 Multifunctional ultrasonic medicine permeation apparatus works abnormally at 6 kV discharge test

3.2 问题诊断与分析

设备外壳是金属材料并覆盖有绝缘漆层,外壳盖上壳体完整,无明显孔缝,上表面有多个显示器,外

接部分金属配件,背面有裸露金属螺丝. 外壳打开后,其内部有带显示器的 PCB 电路板. 内壳为金属材质,覆盖有绝缘漆层. 电路中有很多芯片,但缺乏静电防护措施. 在进行接触 ESD 测试时,裸露的金属将高频的 ESD 脉冲电流导入 PCB 电路,由于没有地形,不能将静电脉冲电流导入大地,也没有器件将静电脉冲电流挡在芯片外部,因此涌入 ESD 脉冲电流的芯片不能正常工作,设备不能通过测试. 在进行气隙放电电荷耦合放电测试时,由于电磁场的感应,ESD 脉冲电流涌入 PCB 电路,导致设备不正常工作.

3.3 防护措施

单片机 VCC 与地之间接 5 V TVS,信号对地并 5 V TVS,开关 SM1、SM2 信号线分别对负极并 5 V TVS,连接两个传感器的信号线,连接两个板子的信号线直接对负极并 5 V TVS. 显示板单片机电源对地并 5 V TVS. 数码管 VCC 都对地并 5 V TVS. 采用 8 kV 的空气放电测试,显示模块的电致孔和电导两个功能模块绿灯正常显示. 具体处理方法如图 12 和图 13 所示.

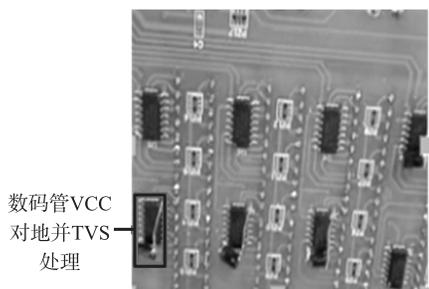


图 12 数码管 VCC 对地并 TVS

Fig. 12 VCC of digital tube parallel TVS to ground

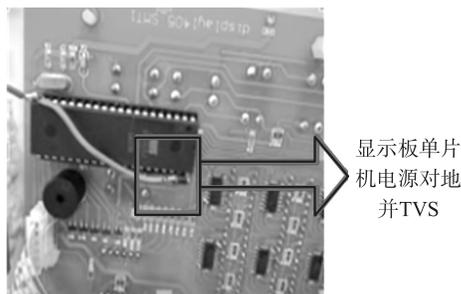


图 13 单片机电源对地并 TVS

Fig. 13 Power supply of single chip parallel TVS to ground

经过测试,当设备进行如上处理后,其抗接触放电能力提高到了 6 kV,如图 14 所示,屏幕显示正常,前后抑制效果对比见表 1,故以上措施有效,同时设备已通过静电测试.

表 1 在显示板单片机电源和数码管 VCC 对地并 TVS 前后对比

Table 1 Comparison before and after paralleling TVS to ground in the display board microcontroller power supply and digital tube VCC

TVS 管处理前	TVS 管处理后
当 6 kV 放电时,屏幕显示不正常	6 kV 接触放电,显示模块的电致孔和电导两个功能模块绿灯正常显示



图 14 TVS 管防护后的测试图

Fig. 14 Test diagram after protection of TVS

4 结语

本文针对 ESD 对电子设备造成功能性损坏,采用 TVS 作为 ESD 防护器件,分析了 TVS 的防护机理,以 TVS 作为 ESD 保护电路的防护器件,采用 MATLAB/Simulink 建模仿真,研究 TVS 的防护特性,最后以多功能超声透药仪的 ESD 防护实验来验证了 TVS 的抑制效果.

[参考文献] (References)

[1] 赵阳,封志明,黄学军. 电磁兼容测试方法与工程应用[M]. 北京:电子工业出版社,2010:1-12.
ZHAO Y, FENG Z M, HUANG X J. EMC test methods and engineering applications[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010: 1-12. (in Chinese)

[2] ZHAO Y, SEE K Y. Fundamental of electromagnetic compatibility and application[M]. Beijing: China Machine Press, 2006: 1-20.

[3] WANG K, POMMERENKE D, CHUNDRU R, et al. Numerical modeling of electrostatic discharge generators[J]. IEEE transactions on electromagnetic compatibility, 2003, 45(2): 258-271.

(下转第 29 页)

[参考文献] (References)

- [1] 毛俊,马骏,苗津铨. 超低功耗高精度超声测距报警系统研究[J]. 自动化技术与应用,2016,35(3):68-72.
MAO J,MA J,MIAO J Q. Study of ultra low power consumption and high precision ultrasonic distance measurement and alarm[J]. Techniques of automation and applications,2016,35(3):68-72.(in Chinese)
- [2] 刘赞,王波,刘智超. 一种基于超声测距技术的超声液位仪设计[J]. 传感器与微系统,2014,33(9):91-93.
LIU Y,WANG B,LIU Z C. Design of an ultrasonic liquid level meter based on ultrasonic ranging technology[J]. Transducer and microsystem technologies,2014,33(9):91-93.(in Chinese)
- [3] 刘军,张洋,严汉宇. 原子教你玩STM32(寄存器版)[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2013:13-18.
LIU J,ZHANG Y,YAN H Y. Atom teach you to play STM32(register version)[M]. Beijing:Beihang University Press,2013:13-18.(in Chinese)
- [4] 万明习. 生物医学超声学[M]. 北京:科学出版社,2010:134-136.
WAN M X. Biomedical ultrasonics[M]. Beijing: Science Press,2010:134-136.(in Chinese)
- [5] 丁镇生. 电子电路设计与应用手册[M]. 北京:电子工业出版社,2013:137-139.
DING Z S. Electronic circuit design and application manual[M]. Beijing:Electronic Industry Press,2013:137-139.(in Chinese)
- [6] 杜功焕,朱哲民,龚秀芬. 声学基础[M]. 南京:南京大学出版社,2012:223-226.
DU G H,ZHU Z M,GONG X F. Basic acoustics[M]. Nanjing:Nanjing University Press,2012:223-226.(in Chinese)
- [7] 宋雪松,李冬明,崔长胜. 手把手教你学51单片机[M]. 北京:清华大学出版社,2014:303-304.
SONG X S,LI D M,CUI C S. Taught you how to learn 51 single chip microcomputer[M]. Beijing:Tsinghua University Press,2014:303-304.(in Chinese)
- [8] 赵浪涛,赵永花,柴清. 高精度超声波测距方法的研究[J]. 电气自动化,2015,37(3):112-114.
ZHAO L T,ZHAO Y H,CHAI Q. A research on high-precision ultrasonic distance measurement[J]. Electrical automation,2015,37(3):112-114.(in Chinese)

[责任编辑:陈 庆]

(上接第23页)

- [4] 罗广孝,崔翔,张卫东,等. TVS 静电抑制器等效电路参数估算及应用[J]. 中国电机工程学报,2013,33(16):204-211.
LUO G X,CUI X,ZHANG W D. Equivalent circuit parameter estimation and application of TVS electrostatic discharge suppressor[J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(16):204-211.(in Chinese)
- [5] CHUANG C,KER M. On-chip transient voltage suppressor integrated with silicon-based transceiver IC for system-level ESD protection[J]. IEEE transactions on industrial electronics,2014,61(10):5615-5621.
- [6] BICLEANU D P,NICUTA A M. Approach on electrostatic discharge protection structures based on transient voltage suppressor diodes[J]. International symposium on advanced topics in electrical engineering,2013,239(239):1-4.
- [7] WANG Z,WU Z,ZHANG X,et al. Investigation of the effect of the ESD to the transient voltage suppressor[J]. International conference on electronics and optoelectronics,2011,8908(2):V3-133-V3-135.
- [8] 刘素玲,段平光,李霞,等. 静电放电模拟器电路建模分析[J]. 电波科学学报,2009,24(6):1172-1178.
LIU S L,DUAN P G,LI X,et al. Analysis of electrostatic discharge simulator circuit modeling[J]. Chinese journal of radio science,2009,24(6):1172-1178.(in Chinese)
- [9] SEKINE T,ASAI H,LEE J S. Unified circuit modeling technique for the simulation of electrostatic discharge (ESD) injected by an ESD generator[J]. Journal of cellular physiology,2012,227(6):2461-2469.

[责任编辑:陈 庆]