

文章编号: 1672-2892(2012)05-0633-06

脉冲激光试验评估模拟电路单粒子效应

马英起, 封国强, 上官士鹏, 陈 睿, 朱 翔, 韩建伟

(中国科学院 空间科学与应用研究中心, 北京 100190)

摘 要: 利用脉冲激光对典型模拟电路的单粒子效应进行了试验评估及加固技术试验验证, 研究 2 种不同工艺的运算放大器的单粒子瞬态脉冲(SET)效应, 在特定工作条件下两者 SET 脉冲特征规律及响应阈值分别为 79.4 pJ 和 115.4 pJ, 分析了 SET 脉冲产生和传播特征及对后续数字电路和电源模块系统电路的影响。针对 SET 效应对系统电路的危害性, 设置了合理的滤波电路来完成系统电路级加固, 并通过了相关故障注入试验验证, 取得了较好的加固效果。

关键词: 模拟电路; 脉冲激光; 单粒子效应; 单粒子瞬态脉冲

中图分类号: TN911.71

文献标识码: A

Pulsed laser test of single event effects in analog circuits

MA Ying-qi, FENG Guo-qiang, SHANGGUAN Shi-peng, CHEN Rui, ZHU Xiang, HAN Jian-wei
(Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Pulsed laser Tests of Single Event Effects in the typical analog circuits were proposed. The Single Event Transient(SET) test evaluation method characteristics and the response thresholds of operational amplifiers at 79.4 pJ and 115.4 pJ were investigated with the experimental simulation by pulsed laser test facility. The influence of SET on subsequent digital circuits and power supply module system were qualitatively analyzed. According to the hazard of SET effect on circuit system, reasonable filter circuits were completed. The system level hardening by the related fault injection experiments were established which had good radiation hardening effects.

Key words: analog circuits; pulsed laser; single event effects; Single Event Transient

航天器电子系统中, 各种功率开关和电源模块等系统电路的重要部分都采用模拟电路来实现控制, 模拟电路在速度和功耗等系统性能上起着关键作用。相对数字电路而言, 模拟电路更容易受到噪声和串扰等干扰因素的影响, 特别是在空间辐射环境中较容易受到单粒子效应的影响。从 1992 年到 2001 年, 美国宇航局陆续发现了 TOPEX/Poseidon, TDRS, CASSINI, SOHO, TERRA 和 MAP 等一系列卫星电路故障或异常都是由模拟电路被瞬态电压或者电流触发导致的^[1]。随后研究者对各种功能的模拟电路, 尤其是运算放大器开展了大量试验, 利用重离子加速器和脉冲激光模拟等手段测试了 50 多种模拟器件^[2]的单粒子瞬态脉冲(SET)效应, 获得了器件 SET 阈值和波形特征等试验数据, 试验结果统计发现大多数运算放大器的放大级是对 SET 最敏感的部分, 其产生的瞬态脉冲经增益级放大后, 会对后续电路产生相当的扰动。已有研究结果^[3]表明, 在特定电路偏置下, 模拟器件的单粒子效应阈值存在较低的情况, 某些集成电路中的线性器件甚至可以由低能(小于 30 MeV)质子直接诱发产生; 同时模拟器件产生的瞬态扰动大摆幅信号可对其驱动的数字电路产生严重影响, 进而能引起整个电子系统的失效。因此, 研究模拟电路的单粒子效应, 进行相关试验评估和抗单粒子效应加固技术, 具有重要的实际应用价值, 已成为近年来的研究热点。

通过在轨飞行试验研究是比较直接地实现单粒子效应评估的有效方法, 像欧洲 CNES 2008 年发射的 Jason2 卫星设置了在轨单粒子效应测试平台来获取模拟器件如 LM124 的真实空间飞行数据^[4], 但存在研究周期长, 资源条件限制多等影响因素。一般抗单粒子效应加固的试验评估及故障验证仍然是通过地面试验模拟及仿真来完成的, 常用的几种地面试验模拟源主要包括粒子加速器提供的重离子、质子、中子源, 放射源如 Am-241 α 源及铜源等, 以及脉冲激光。同时, 针对模拟电路的加固技术也迅速开展, 2008 年在第 27 届数字航空信息系统会议上,

收稿日期: 2012-04-23; 修回日期: 2012-05-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40974113); 中国科学院知识创新工程青年基金资助项目(082111A175)

Laura Dominik 等人整理了单粒子效应抗辐射加固评估的基本方法^[5], 与控制有关的器件和单元主要采用奇偶性检测、看门狗计时器及表决电路等一系列软件与硬件结合的方法来实现对整个系统的加固。

本文主要利用脉冲激光试验测试方法, 选择典型模拟电路针对其 SET 效应进行了试验评估和加固技术研究。其中, 试验分析了特定工作条件下模拟电路的 SET 特征、响应阈值等系列定量评估方法; 同时分析了 SET 脉冲产生和传播特性及对后续数字电路和电源模块系统电路的影响。通过增加系统抗 SET 噪声能力, 即在一定工作带宽条件下, 设置合理的滤波电路的方式实现了系统电路级抗单粒子效应加固; 经过故障注入试验验证, 所选取的滤波电路能够起到很好的 SET 效应减缓效果。

1 试验评估验证装置及方法

1.1 试验装置

采用国内首台自主研发的中科院国家空间科学中心纳秒脉冲激光试验装置 NPLSEE-1 进行试验测试, 装置相关技术指标见表 1。NPLSEE-1 的核心包括脉冲激光器、可控光聚焦及衰减系统、自控三维测试平台、定位成像系统及单粒子效应检测系统。

表1 试验装置的相关技术指标
Table1 Technical specifications of the pulsed laser single event effects test facility

facility	laser wavelength/nm	pulse width/ns	spot size/ μm	maximum energy/ μJ	scanning step/ μm	repetition frequency/kHz	error range of energy
NPLSEE-1	1 064	25	3	25	0.625	1-50	<3%(8 h)

1.2 试验方法

SET 特征与数字电路的单粒子翻转特征明显不同, 表现形式及探测过程更为复杂化, 对其探测不再仅是翻转位的探测, 而是对 SET 信号特征的综合探测。SET 特征综合波形极性、脉冲幅度和脉冲宽度这 3 个因素, 与器件受粒子轰击的部位、器件工作状态如偏置电压及输出端负载等边界条件密切相关。脉冲极性根据器件工作状态的不同可分为正脉冲、负脉冲或双极性脉冲, 其中大的负脉冲往往是从高电平降低幅度很大, 对器件可能具有破坏性影响; SET 脉冲幅度需要设置相应的甄别电压来实现信号的触发与采集; 模拟 SET 脉冲宽度分析可以分为初相和恢复相, 初相是瞬态电流或电压改变的瞬间变化, 时间往往较短, 恢复相是器件内部载流子复合重新平衡的过程, 恢复相受器件敏感单元的电容和电压负载影响较大。对于模拟集成电路而言, 其输出的扰动脉冲针对不同的后续应用电路, 不同极性、不同脉冲宽度和幅度的脉冲可能会产生不同程度的影响, 因此对 SET 特征各个因素的分析都非常重要及必要, 需要准确评估 SET 效应对应用电子系统的实际影响程度。

脉冲激光单粒子效应测试方法的突出优势是能够高效准确地实现敏感区域的定位及阈值确定, 结合相关测试器件的工艺及功能分布版图, 能实现单粒子错误物理位置及功能区域的三维定位。不同工艺尺寸及功能的器件具备不同的单粒子效应表现特征, 相关阈值电压及电流等参数探测的触发选取需根据具体的应用电路容限来确定。

2 运算放大器 SET 试验

模拟电路如运算放大器和比较器等是电子系统中最常见的基本构成单元, 为线性电路。大多数线性电路采用结隔离方式, 在空间辐射环境中易产生 SET 效应。经过统计发现很少有商用线性器件是对 SET 效应不敏感的^[1], 因此有必要针对系统中单个模拟器件进行单粒子效应的细化研究。其中, 运算放大器的单粒子效应应用最为广泛, 相关研究也最为显著, 按工艺可分为标准硅工艺即硅 NPN-PNP 双极工艺、标准硅工艺结合结型场效应管工艺、在标准硅工艺中结合 MOS 工艺这 3 种类型的运算放大器。

本文分别选取了标准硅工艺的国产运算放大器 SF3503 和在标准硅工艺中加入了结型场效应管工艺的运算放大器 TL084 这 2 种典型结构的运放进行了 SET 效应研究, 主要内容包含: 运放 SF3503 及 TL084 的 SET 脉冲特征及响应阈值; SET 脉冲产生和传播的时间特性; 电压跟随器工作模式下的不同脉冲激光能量的 SET 响应特征、敏感区域分布及不同负载下的 SET 特性。

2.1 运算放大器 SF3503

设定国产运算放大器 SF3503 工作状态为做缓冲级或隔离级的电压跟随器模式, 器件正负工作电源电压 $V_{cc}=\pm 15\text{ V}$, 输入电压 $V_{in}=5\text{ V}$, 输出电压 $V_{out}=5\text{ V}$, 输出端接数字示波器用于探测 SET 脉冲波形, 工作电流为 6 mA 。SF3503 版芯结构中所有的晶体管可划分为输入级、中间放大级及输出级这 3 个区域。

通过固定能量利用脉冲激光对器件全芯片逐点扫描,根据器件敏感度预估初始固定脉冲激光能量,设定阈值触发电平,从低到高改变扫描能量,统计各敏感单元的 SET 阈值幅度和宽度的试验数据见表 2。根据器件版图确定各个敏感点所对应的敏感晶体管,可以看出各个 SET 敏感晶体管主要分布在输入级区域和中间放大级区域内,其中正输入级晶体管 Q2 是较为特殊的纵向 PNP 管, Q5 和 Q6 为横向 PNP 管结构; Q16 为 NPN 管,是放大级中的主要晶体管,对输入信号起放大作用;比较发现, Q16 敏感程度最高。由于金属线分布不规则和掺杂不均匀等因素导致表面分布并不规则,存在误差,但同时由于非金属区域入射脉冲激光的电离电荷迅速扩散到金属线下的灵敏层中,故正面照射脉冲激光诱发 SET 效应具有误差允许范围内的定量测试可行性。

表 2 SF3503 电压跟随器的 SET 效应阈值能量及其波形特征

No. of sensitive unit	corresponding transistor	threshold energy/pJ	SET amplitude/V	SET width/ μ s	type
1	Q16	79.4	6.0	7.80	negative
2	Q2, Q6	281.3	6.0	3.64	negative
3	Q5	375.9	6.0	4.40	negative
4	Q11	280.9	5.4	0.72	double
5	Q22	368.6	5.2	2.25	positive

所有芯片的敏感单元扫描确定后,逐一定点对各敏感单元改变入射脉冲激光能量,得到单个敏感晶体管 SET 特征变化过程,图 1 针对敏感程度最高 Q16 晶体管区域对不同脉冲激光能量即不同等效传能线密度(Linear Energy Transfer, LET)值下 SET 脉冲波形进行了对比,可得知 Q16 晶体管 SET 阈值较小,随着等效 LET 值增加, SET 脉冲幅度和宽度逐渐增大,等效 LET 值达到 40 MeV $\cdot$ cm²/mg 左右时, SET 脉冲特征达到饱和状态。

2.2 运算放大器 TL084

设定 TL084 测试电路试验条件与 SF3503 电压跟随器模式下的工作条件相同,仅对 TL084 的 SET 径向敏感微区分布进行了研究,不同 SET 阈值及特征见表 3,运放 TL084 的 SET 波形特征随等效 LET 变化情况见图 2。从试验结果可以看出,与 SF3503 器件类似,在同一种工作模式下,不同敏感点的阈值能量和波形特征差别较大,说明 SET 效应与器件不同位置的不同器件结构相关性很大。试验针对敏感区域 1 的最敏感点位置分别采集了在特征等效 LET 值包括阈值、等效 LET 值为 37 MeV $\cdot$ cm²/mg 和 75 MeV $\cdot$ cm²/mg 时的 SET 波形。

综合对比 2 种不同工艺的运算放大器脉冲激光单粒子效应测试结果可以发现,结型场效应管工艺 TL084 的 SET 阈值相对较高,响应速度更快,导致脉冲宽度更小,对后续电路的影响也就相对小,从抗辐射加固角度看,相对而言更适合在空间辐射环境中进行应用。

3 SET 对后续数字电路的影响

组合逻辑电路中单粒子效应往往来自其上行控制或存储电路。当 SET 脉冲宽度与器件的后续数字电路的响应频谱宽度相近时,脉冲宽度和幅度足够大的 SET 脉冲将会对后续电路产生影响。以下通过运放 SF3503 为例来分析 SET 对后续电路的影响。

选择 Ti 公司生产的非反相缓冲门电路 CD74AC244 连接 SF3503 的输出端口进行测试,其工作驱动电压为 5 V,两者试验电路的原理见图 3。

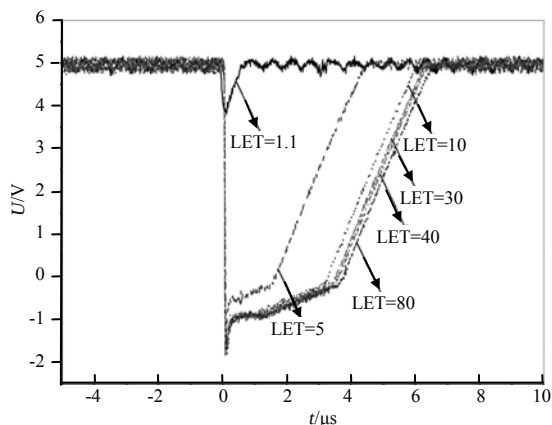


Fig.1 SET waveforms under different equivalent LET values of SF3503 voltage follower

图 1 SF3503 电压跟随器的不同等效 LET 值下的 SET 脉冲波形

表 3 TL084 电压跟随器的 SET 效应阈值能量及其波形特征

Table 3 SETs threshold energy and waveform characteristics of TL084 voltage follower

No. of sensitive unit	threshold energy/pJ	SET amplitude/V	SET width/ns
1	115.4	1.2	250
2	413.4	2.0	500
3	389.2	1.5	400

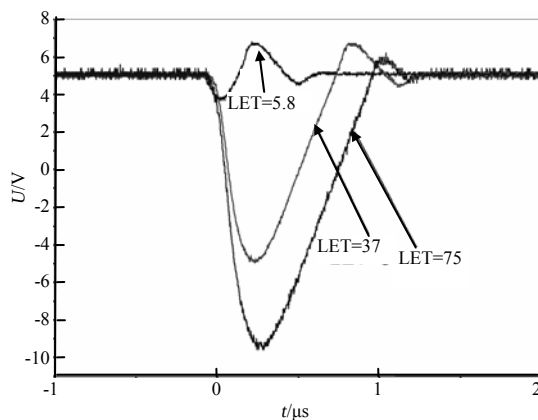


Fig.2 SETs waveform under different equivalent LET values of TL084 voltage follower

图 2 TL084 电压跟随器的 SET 特征随等效 LET 值的变化图

测试运算放大器 SF3503 产生的 SET 效应对后续数字电路的影响,设计 SF3503 工作于电压比较器模式,电源电压设定在 $\pm 6\text{ V}$,输出电压为 4.6 V ,使用等效 LET 为 $14\text{ MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$ 的脉冲激光微束辐照试验电路中的运算放大器产生 1 个 $4\text{ V}, 16\text{ }\mu\text{s}$ 的 SET 负脉冲,该扰动脉冲通过电连接传播到非反相缓冲门的输入端,使数字门的输出端也产生了 1 个同相的瞬时脉冲信号,见图 4。其中,上方曲线代表 SF3503 产生的 SET 扰动脉冲信号,下方曲线代表非反相缓冲门电路的输出脉冲信号的波形。从图 4 对比可知,SET 对后续电路的潜在影响较大,在达到一定触发阈值后,对非反相缓冲门而言,SET 的宽度大小成为影响后续电路的主要因素,只有当 SET 宽度达到一定的幅值后,后续电路才会做出响应,产生噪声或者改变电压状态等有效影响,这需要根据后续电路的触发特性来确定 SET 幅度和宽度的临界值及判定标准。同时,从前述试验评估结果及其分析可知, SF3503 的 SET 效应敏感度很高,其等效 LET 阈值仅为 $1.1\text{ MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$,直接在空间任务中应用将对后续的数字电路及逻辑电路产生影响,会对整个电子系统的可靠性带来极大的安全隐患。因此有必要在空间应用前,对其 SET 效应进行全面、准确的评估,以确定需要采取何种有效的 SET 效应减缓设计和抗辐射加固方法。

4 电源模块单粒子效应试验

以 VPT 公司的 VPL0505S 型 DC/DC 电源模块为测试对象,测试分析了其内嵌的 TLV2371 型运放芯片发生单粒子效应对整个 DC/DC 电源模块系统电路的影响。测试过程中, VPL0505S 型 DC/DC 输入为 5 V ,电压输出固定为 3.3 V ,输出端接标准配置 $100\text{ }\mu\text{F}$ 电容进行滤波,正常工作电路电流为 390 mA 左右。TLV2371 型运放能够实现 2 个高低电平极限的输入输出的关断控制能力,其 CMOS 工艺的输入端口使能控制利用了高阻传感器接口,使之具有很好的直流特性及低压运行工作能力。

在以能量为 10.8 nJ 的脉冲激光对芯片进行扫描的过程中,出现了图 5 的 DC/DC 电流和电压瞬态脉冲波形,其工作电压幅度在 $20\text{ }\mu\text{s}$ 时间范围内瞬间减小了 3 V 左右。可见模拟电路的 SET 效应能够对整个电源模块系统电路造成大的电流和电压幅度瞬态脉冲波动,当瞬态持续时间超过整个电路的容许范围时,将发生系统掉电等一系列故障,对整个航天器电子系统造成重大影响,开展有效载荷的二次电源 DC/DC 电源模块的 SET 效应及抗干扰研究具有重要意义^[6]。

5 SET 加固技术及故障注入验证

经过上述 SET 评估影响分析可知,瞬态脉冲的电学表现为随机发生的电压或电流扰动。SET 效应减缓及加固技术核心是对模拟信号形式的瞬态脉冲实现时间滤波和空间冗余。通常情况下,主要考虑从两方面进行抗辐射

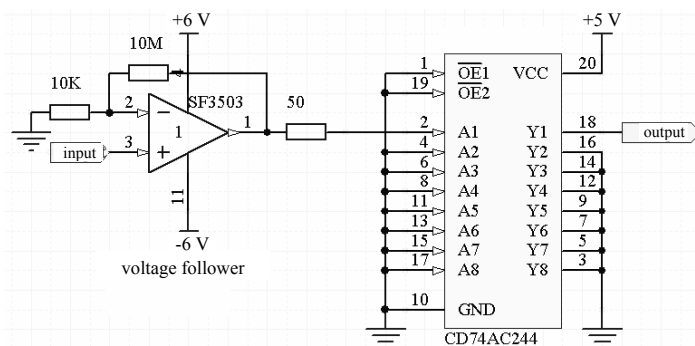


Fig.3 SF3503 test circuit diagram of SET effects on subsequent digital circuits
图 3 SF3503 的 SET 效应对后续数字电路影响试验电路图

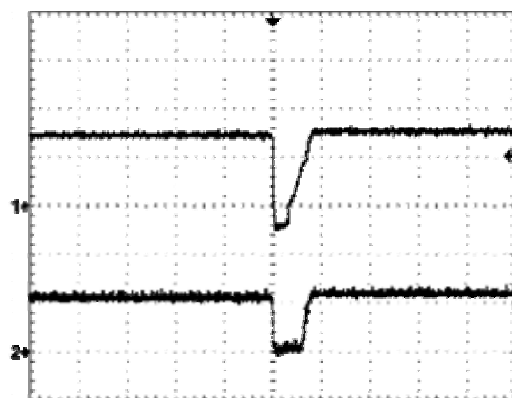


Fig.4 SF3503 test result of SET effects on subsequent digital circuits
图 4 SF3503 的 SET 效应对后续数字门电路的影响试验结果图

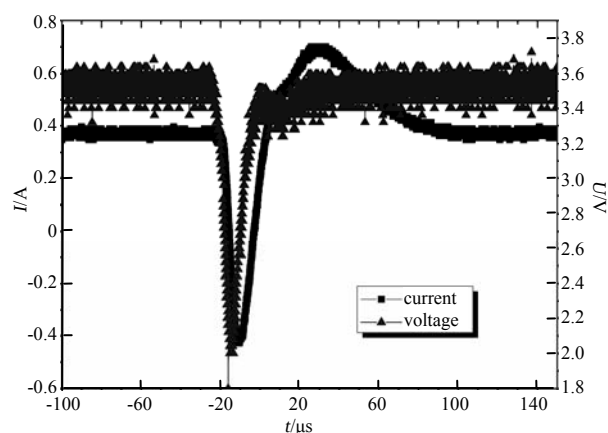


Fig.5 DC/DC current and voltage pulse waveforms with 10.8 nJ pulsed laser scanning energy

图 5 10.8 nJ 的脉冲激光能量扫描下出现的 DC/DC 电流和电压瞬态脉冲波形

加固:器件级加固和电路级加固。前者核心加固原理是通过在反馈循环中加电阻电容来增大单粒子效应临界电荷,并通过特殊工艺来减少单粒子效应过程中的收集电荷;后者是在输出端口接多数表决逻辑电路,例如 LM139 型运放的抗 SET 效应加固版,IS-139ASRH 型运放就是通过三模冗余的方式来完成的^[7]。

本文选择从电路级加固的另一个角度——通过增加系统抗 SET 噪声能力来实现抗辐射加固要求,即在一定工作带宽条件下,在器件输出端加载电阻和电容,通过设置合理的滤波电路的方式实现 SET 效应减缓,选择合理的 RC 常数,在保证电路正常功效的前提下提高电路抗 SET 效应能力,能有效提高其应用安全性能^[8]。选择运放 TL084 作为加固研究对象,设计不同大小的滤波电路;同时从故障注入角度利用脉冲激光试验方法对加固设计进行验证,在等效 LET 值为 $75 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$ 时,空间辐射环境对半导体器件的单粒子效应影响较大,选定此等效 LET 值对应的脉冲激光能量对 TL084 进行 SET 故障注入试验,不同滤波条件下的 SET 波形试验测试结果见图 6。可看出,随着电阻值的增大,SET 脉冲宽度和幅度逐渐变小。在电阻为 $19.92 \text{ k}\Omega$,电容为 30 pF 时,电路的输出电压不再明显变化,但其 SET 幅度由无电阻时的 13 V 变为 5 V ,此滤波电路的 RC 值适合 TL084 的 SET 脉冲输出减缓;在电阻为 $510 \text{ k}\Omega$ 时,电路的输出电压由 5 V 变为 3.2 V ,虽然 SET 幅度大大减小,但同时也影响了器件的正常功效,故未采用此滤波电路的 RC 值。

6 结论

综上所述,分析模拟电路单粒子效应需要综合考虑器件各方面因素,其特征表现复杂,对后续数字电路及系统电路的影响较明显,必须采取有效措施对其进行试验评估及加固防护。通过脉冲激光这种有效的方法能够准确高效地实现对模拟电路的单粒子效应特征获取及影响的定量分析,同时实现对单粒子效应减缓技术和抗辐射加固设计进行故障注入验证,在航天电子系统可靠性保障工作中,评估结果具有较强的数据参考价值、工程设计指导意义和广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] Stephen Buchner. Single-Event Transients in Bipolar Linear Integrated Circuits[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2006,53(6):3079–3102.
- [2] Savage M W, Turflinger T, Howard J W, et al. A Compendium of Single Event Transient Data[C]// IEEE NSREC 2001 Data Workshop Proceedings. Vancouver, BC: [s.n.], 2001:134–141.
- [3] Nichols D K, Coss J R, Miyahira T, et al. Heavy ion and proton induced single event transients in comparators[J]. IEEE Trans. on Nucl. Sci., 1996,43(6):2960–2967.
- [4] Duzellier S, Inguimbert C, Nuns T, et al. Probing with Heavy Ions the SET Sensitivity of Linear Devices[J]. IEEE Trans. on Nuclear Science, 2008,55(6):3321–3327.
- [5] Laura Dominik. System Mitigation Techniques for Single Event Effects[C]// 27th Digital Avionics Systems Conference, St. Paul, MN: [s.n.], 2008:5.C.2–1–5.C.2–12.
- [6] 王小朋, 于平, 李东景. 空间有效载荷二次电源抗干扰设计[J]. 信息与电子工程, 2011,9(4):439–443. (WANG Xiaopeng, YU Ping, LI Dongjing. Anti-interference design for secondary power on space payload[J]. Information and Electronic Engineering, 2011,9(4):439–443.)
- [7] van onno N W, Doyle B R. Design considerations and verification testing of an SEE-hardened quad comparator[J]. IEEE Trans. on Nucl. Sci., 2001,48(6):1859–1863.
- [8] 马良柱, 宋志强, 刘统玉, 等. 大功率半导体激光器驱动电路[J]. 信息与电子工程, 2010,8(4):441–443. (MA Liangzhu, SONG Zhiqiang, LIU Tongyu, et al. Power driving circuit of laser diode[J]. Information and Electronic Engineering, 2010,8(4):441–443.)

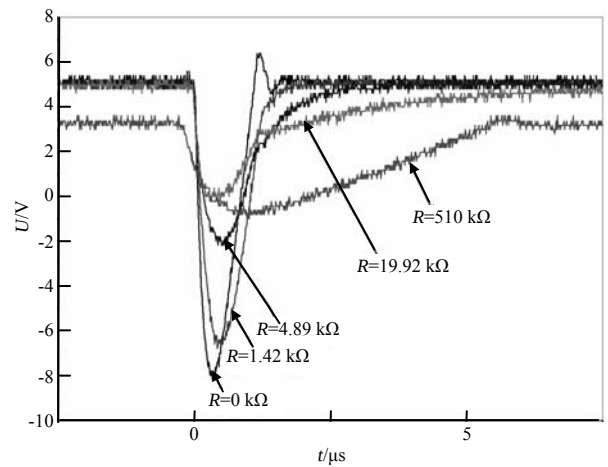


Fig.6 Different SET waveforms under different filtering for TL084
图 6 TL084 不同滤波后的 SET 波形图

作者简介:



马英起(1983-),男,济南市人,博士,助理研究员,主要从事空间单粒子效应、空间环境探测等方面的研究和应用,针对航天产品进行抗单粒子效应加固分析、设计和试验.email: myq@nssc.ac.cn.

上官士鹏(1985-),男,山东省临沂市人,硕士,实习研究员,主要从事脉冲激光单粒子效应试验研究.

朱翔(1985-),男,合肥市人,硕士,助理研究员,主要从事宇航用集成电路空间辐射效应测试及抗辐射加固电路设计.

封国强(1979-),男,河北省邯郸市人,硕士,助理研究员,主要从事宇航半导体芯片空间辐射效应及抗辐射加固研究.

陈睿(1982-),男,湖北省黄冈市人,硕士,实习研究员,主要从事空间辐射效应机理仿真及试验研究.

韩建伟(1970-),男,北京市人,研究员,博士生导师,主要从事航天工程空间环境效应研究.

☆☆

第8届“Annual IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems”通知

The 8th Annual IEEE International Conference on
NANO Nano/Micro Engineered and Molecular Systems
NEMS 2013 April 7-10, 2013, Suzhou, China

Abstract Deadline: October 15, 2012 <http://www.ieee-nems.org/2013>

General Chair Haixia Zhang Peking University General Co-Chairs Chang-Jin Kim University of California, Los Angeles Lining Sun Soochow University Technical Program Chair Yuelin Wang Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, CAS Organization Chair Zheng Cui Suzhou Institute of Nanotech and Nanobionics, CAS	Conference Scope 1. Nanophotonics 2. Nanomaterials 3. Nanomedicine 4. Nanobiology, Nano-bio-informatics 5. Molecular Sensors, Actuators, and Systems 6. Carbon Nanotube and Graphene based Devices and Systems 7. Microfluidics and Nanofluidics 8. Micro and Nano Heat Transfer 9. Micro and Nano Fabrication 10. Nanoscale Robotics, Assembly, and Automation 11. Micro and Nano Sensors and Actuators 12. Integration of M/NEMS
---	---

IEEE CIMS SIMIT SIP chinano