

功率 MOSFET 器件单粒子烧毁²⁵²Cf 源 模拟试验研究

杨世宇, 曹 洲, 薛玉雄

(兰州物理研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 本工作涉及利用²⁵²Cf 源进行辐射效应试验研究的方法。结合功率 MOSFET 器件单粒子烧毁测试技术, 对功率 MOSFET 器件辐射效应进行模拟试验研究。研究表明: 在空间辐射环境下, 功率 MOSFET 器件尽量使用在低电压范围内; 在电路设计中附加必要的限流电阻是 1 种十分有效的抗单粒子烧毁措施。

关键词: 单粒子烧毁; 辐射环境; 功率 MOSFET 器件; ²⁵²Cf 源

中图分类号: TN406

文献标识码: A

文章编号: 1000-6931(2007)03-0361-05

Experiment Research on Single Event Burnout of Power MOSFET Devices With ²⁵²Cf Source

YANG Shi-yu, CAO Zhou, XUE Yu-xiong

(Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The method in simulation of radiation effect test by ²⁵²Cf source was introduced, and the single event burnout experiment was carried out. The research result indicates that power MOSFET devices should be operated at the lowest voltage range under the radiation environment in the space, and adding a resistor to confine the current in the circuit is an effective reinforce to avoid single event burnout.

Key words: single event burnout; radiation environment; power MOSFET; ²⁵²Cf source

航天器在空间飞行, 一直处在带电粒子构成的辐射环境中。空间辐射环境中的高能质子、中子、重离子等均能导致航天器电子系统中的半导体器件和集成电路发生单粒子效应。功率 MOSFET 器件在实际使用中工作稳定, 便于集成, 并具有很快的开关速度和良好的电压控制能力。因此, 功率 MOSFET 器件在空间电子系统中的应用非常广泛。但在辐射环境

下, 重离子诱发的单粒子烧毁 (SEB) 现象会使电路系统出现短暂故障, 或直接导致 MOSFET 器件损坏^[1,2]。因此, 功率 MOSFET 器件的 SEB 实验结果对于该类器件在空间电子系统中的应用至关重要。

1 模拟试验系统

²⁵²Cf 源单粒子效应模拟试验系统是实验

室条件下进行单粒子效应模拟试验的有效评估手段。 ^{252}Cf 自发裂变放出重离子碎片的 LET 值大于空间辐射环境中的带电粒子的 LET 值^[3], 可用来测试器件的单粒子翻转饱和截面, 进行器件单粒子翻转加固性能评估。主要特点是模拟重离子方便, 在 Si 中的射程较短 (6~15.5 μm), 多用于敏感区较浅的器件单粒子效应研究。

^{252}Cf 源单粒子效应模拟试验系统以 ^{252}Cf 辐射源为主, 结合必要的真空系统和机械移动装置。本实验室的 ^{252}Cf 源单粒子效应模拟试验系统主要由 ^{252}Cf 放射源、真空系统和真空室、XY 移动平台、Z 向定位装置构成, 主要参数指标为: ^{252}Cf 源的原始源强为 1.85×10^5 Bq, 目前活度约为 5×10^3 Bq, LET 值为 $42 \text{ MeV} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$, 在硅材料中的射程是 6~16.5 μm ; 系统真空度 10^{-3} Pa, 真空室内样品架移动精度为 1 mm。

目前, 用于单粒子烧毁的测试方法主要有两种: 破坏性测试方法和非破坏性测试方法。破坏性测试方法主要用于初步模拟实验研究中的单粒子烧毁现象实验验证, 也可以用于测试系统中限流电阻的大小。但是, 破坏性测试方法在实际试验过程中有相当大的局限性, 破坏性测试方法不能给出一个样品的烧毁截面, 如果要获取有统计意义的试验数据必须损坏许多实验样品^[4]。所以, 在实验研究中结合实际条件选用非破坏性测试原理。非破坏性测试方法的关键是在功率器件的漏极和源极之间加入一个阻值较大的负载电阻。当功率 MOSFET 器件误导通时, 电路中的电压将降落在负载电阻上, 限制了功率 MOSFET 器件对电路中电子-空穴对的迅速收集, 使得电路中的电流不能持续增加, 从而保护了功率 MOSFET 器件不会被突然到来的大电流脉冲烧毁。

利用示波器捕捉发生单粒子烧毁时的电流脉冲, 对脉冲的特点进行分析研究发现, 单粒子烧毁脉冲的电参数具有幅值变化大、脉宽窄等特点, 并在漏-源关闭和导通时与地之间存在着较大的差压。

在系统设计中选用非破坏性测试方案。电流限制和重离子诱发的烧毁脉冲信号由负载电阻实现。在单粒子烧毁瞬时脉冲电流计数技术

中, 主要集中解决了脉冲电流的获取和消除共模电压信号对测试系统的影响。针对该脉冲信号为窄脉冲、宽周期的特点, 利用信号处理单元对脉冲信号进行了限幅、展宽等处理。在设计系统时, 采用隔离技术, 每一个环节由独立的模块完成。单粒子烧毁测试系统能够实现 SEB 现象的自动测量和计数。测试系统原理框图示于图 1。

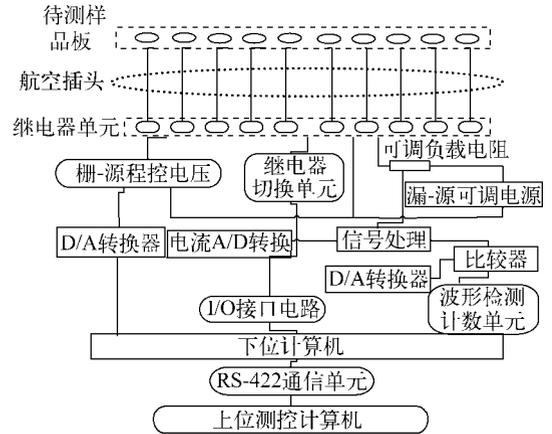


图 1 功率 MOSFET 器件 SEB 测试系统原理框图

Fig. 1 Scheme of SEB test system for power MOSFET devices

2 单粒子烧毁 ^{252}Cf 源模拟实验

功率 MOSFET 器件单粒子烧毁初步模拟实验选取 N 沟道的功率器件 IRF250、2N6798 作为实验样品, 辐照源为 ^{252}Cf 源。在实验过程中, 用示波器和多个不同类型的 N 沟道试验样品反复验证了功率 MOSFET 器件在一定条件下发生单粒子烧毁的特性。

将实验样品置于真空室内, 使用 ^{252}Cf 源裂变碎片进行辐照, 选择单一的栅-源电压 V_{GS} 在以后辐照过程中保持不变。逐渐增大漏-源电压 V_{DS} , 当 V_{DS} 增加到其临界值时, 测试系统和示波器均可观察到明显的 SEB 现象。在实验过程中, 实验样品 2N6798 在 V_{DS} 为 165、180 V 时均发生了单粒子烧毁现象, 但因保护电阻太小而损坏了多个样品。在模拟实验中, 辐照源与 DUT (待测器件) 之间的距离、 V_{GS} (IRF250 未导通) 均保持不变, 不断改变 V_{DS} , 记录各个时段的电压脉冲数 (烧毁次数), 计算出烧毁截面。计算 SEB 截面 σ 的方法如下:

$$\sigma = N/(S\varphi)$$

式中: N 为脉冲个数,由测试系统测得; S 为辐照时间; φ 为粒子注量率,根据裂变强度计算得出,当辐射源与芯片距离为10 mm时,样品芯片单位面积上的注入率为 $100 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

3 模拟实验结果

3.1 V_{DS} 的临界值

表1列出各个实验样品发生SEB现象时 V_{DS} 的临界值。分析表1可知:高电压、大电流的功率器件APT60M75和APT10090HLI的单粒子烧毁漏-源电压分别达到样品额定电压的57%和49%,原因在于高电压条件下样品对于电子-空穴对的收集能力大幅增强。这对于样品应用在重离子辐射环境下是很不利的。

表1 试验样品出现SEB的 V_{DS} 临界值

Table 1 V_{DS} threshold for samples occurred SEB

样品型号	额定电压/V	V_{DS} 临界值/V
APT60M75(1#)	600	335
APT60M75(2#)	600	340
APT10090HLI	1 000	490
2N6784	200	190
2N6847	-200	-194
2N6798	200	165
2N7219	200	177
IRF120	120	120
IRF250	200	155

3.2 V_{DS} 对 SEB 截面的影响

将试验中取得的实验数据进行归纳整理,计算出各个实验样品在各个电压点的单粒子烧毁截面。分析图2中的实验数据可以看出,APT60M75(2#样品)的烧毁截面在阈值电压以上随 V_{DS} 的增加而呈现持续上升的趋势。图2中的试验结果表明,APT60M75样品在²⁵²Cf源裂变碎片照射下,在 V_{DS} 从330上升到370 V的过程中,烧毁截面由小于 $6.10 \times 10^{-7} \text{ cm}^2$ 逐渐升至 $4.936 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$ 。从图3

也可以看出,单粒子烧毁截面随电压的升高有明显上升的趋势。这说明,电压越高,相同时间内发生单粒子烧毁的次数越多,器件被单粒子烧毁效应损坏的概率也越大。

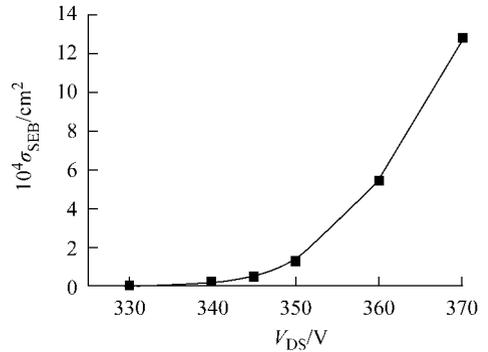


图2 APT60M75 样品烧毁截面随取样电压变化曲线

Fig. 2 Burnout cross section versus drain-source voltage for APT60M75

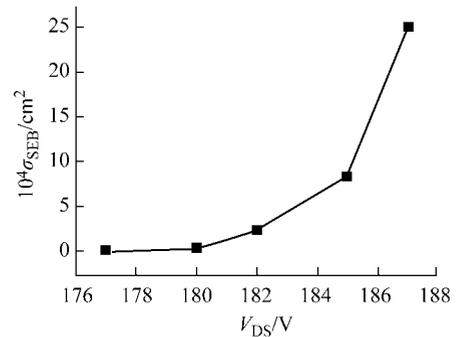


图3 2N7219 烧毁截面随取样电压变化曲线

Fig. 3 Burnout cross section versus drain-source voltage for 2N7219

3.3 样品的工作状态对 SEB 敏感性的影响

选试验样品2N6766, V_{GS} 为参数变量,辐照源与DUT之间的距离 D 、 V_{DS} 保持不变($V_{\text{DS}} = 195 \text{ V}$),记录各个时段的脉冲个数,计算出的烧毁截面示于图4。由图4中可以看出,在漏-源电压一定的条件下,栅元电压从0 V一直增加到3 V的过程中,样品始终未导通,其烧毁截面有缓慢的上升趋势,但变化并不明显。当 V_{GS} 上升到3.5 V,这时的漏-源之间导通,再未观察到明显的单粒子烧毁现象。试验结果表明,MOSFET器件在未导通状态下工作比导通状态下更易发生单粒子烧毁现象。

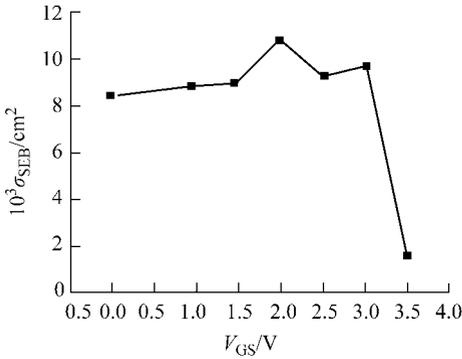


图4 2N6766 单粒子烧毁截面随栅-源电压变化曲线

Fig. 4 2N6766 burnout cross section versus gate-source voltage for 2N6766

4 SEB 脉冲波形

用示波器监视样品取样电阻上的电压。在每一次误导通的情况下,均可观察到一完整的SEB电压(电流)烧毁脉冲。经初步筛选和归类,选出典型烧毁波形示于图5。

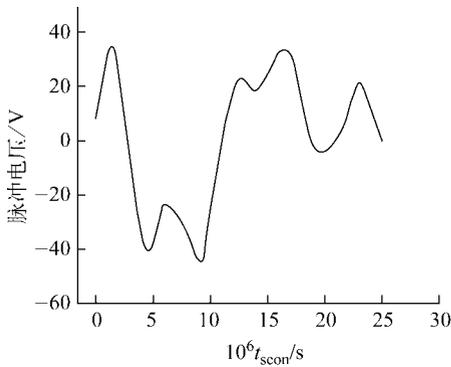


图5 单粒子烧毁脉冲波形

Fig. 5 Single event burnout pulse waveform
样品为 2N6798, 辐射源为 ^{252}Cf , 真空度为 0.34 Pa,
 $V_{DS}=190\text{ V}, V_{GS}=0\text{ V}$

^{252}Cf 源模拟实验获取的单粒子烧毁脉冲波形与重离子的单粒子烧毁脉冲波形相似, 具有较大的脉宽, 并具有连续的、不规则的多个峰值, 其中, 最大脉冲的峰值通常为正常取样电压的 3~5 倍^[5,6]。如果不加保护, 器件经此脉冲冲击后不能再使用, 而且被损坏的实验样品有明显的、小范围的烧焦区域。2N6798 试验样品发生单粒子烧毁部位的放大图像示于图 6。这说明, 单粒子烧毁产生的电流脉冲能量很大^[7]。

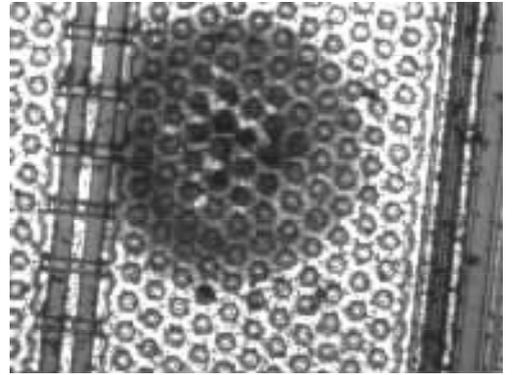


图6 2N6798 烧毁部位放大 500 倍图像

Fig. 6 Optical view of burnout area on surface of power MOSFET die for 2N6798

5 功率 MOSFET 器件抗 SEB 加固设计方法

根据试验结果分析, 功率 MOSFET 器件在空间辐射环境中的使用应尽量处在低电压范围内。通过对任一实验样品的结果分析均可得出, 在单粒子烧毁的阈值电压以上的某一个范围内, 单粒子烧毁对电压升降极为敏感; 在单粒子烧毁的阈值电压以下, 无论怎样改变其他偏置条件, 均不会发生单粒子烧毁。应尽可能选用额定电压高的功率 MOSFET 器件作为开关电路。在空间辐射环境中, 选用额定电压高的功率 MOSFET 器件(例如, 2N6770 的额定漏-源工作电压为 500 V)在低电压模式下工作是很安全的。

在实验过程中观测到, 针对单粒子烧毁, 电路设计中附加必要的限流电阻是一种十分有效的抗单粒子烧毁措施。因为, 在测试系统设计及研制中所采用的非破坏性测试技术的主要措施之一就是 在器件漏极上加保护电阻 (1.5 kΩ), 从而有效抑制了单粒子烧毁脉冲电流对器件的破坏能力, 保护了实验样品, 成功获取了实验数据。

6 结论

^{252}Cf 源单粒子效应模拟试验系统是在实验室条件下模拟单粒子效应的有效评估手段, 其主要特点是模拟重离子方便。根据试验结果分析, 功率 MOSFET 器件在空间辐射环境中

的使用尽量处在低电压范围内;在电路设计中附加必要的限流电阻是 1 种十分有效的抗单粒子烧毁措施。

参考文献:

- [1] WASKIEWICZ A E, GRONINGER J W. Burn-out of power MOS transistors with heavy ion of californium-252[J]. IEEE Trans Nuc Sci, 1986, NS-33: 1 710-1 714.
- [2] ADOLPHSEN J W, BARTH J L. First observation of proton induced power mosfet burnout in space[J]. IEEE Trans Nuc Sci, 1996,43: 2 921-2 924.
- [3] 曹洲,杨世宇,达道安. 功率 MOSFET 单粒子烧毁测试技术研究[J]. 真空与低温,2004, 10(1): 21-25.
CAO Zhou, YANG Shiyu, DA Daoan. Testing of single event burnout induced by heavy ion in power MOSFET [J]. Vacuum and Cryogenics, 2004, 10(1):21-25(in Chinese).
- [4] 李志常,李淑媛. 高 LET 值的获得及其在 SEB 效应研究中的应用[J]. 宇航学报,2004,25(4): 453-458.
LI Zhichang, LI Shuyuan. Achievement of high LET values and its application in study of SEB effect[J]. Journal of Astronautics, 2004,25(4): 453-458(in Chinese).
- [5] KUBOYAMA S, MATSTUDA S, KANNO T. Mechanism for single event burnout of power mosfets its characterrization technique[J]. IEEE Trans Nuc Sci, 1992,39:1 698-1 703.
- [6] ALLENSPACH M, DACHS C, JOHNSON G H, et al. SEGR and SEB in N-channel power MOSFETs[J]. IEEE Trans Nuc Sci, 1996,43: 2 927-2 931.
- [7] STASSINOPOULOS E G, BRUCKER G J, CALVEL P, et al. Charge generation by heavy ions in power MOSFETs, burnout space prediction, and dynamic seb sensitivity [J]. IEEE Trans Nuc Sci,1992,39:1 704-1 711.