

文章编号: 2095-4980(2016)01-0143-05

国产中高压抗辐照功率 MOSFET 单粒子效应

高 博, 王立新, 刘 刚, 罗家俊, 韩郑生, 王路璐, 邓海涛

(中国科学院 微电子研究所, 北京 100029)

摘 要:功率金属-氧化物半导体场效应晶体管(MOSFET)空间使用时易遭受重离子轰击产生单粒子效应(单粒子烧毁和单粒子栅穿)。本文对国产新型中、高压(额定电压 250 V, 500 V)抗辐照功率 MOSFET 的单粒子辐射效应进行了研究, 并采取了有针对性的加固措施, 使器件的抗单粒子能力显著提升。结果表明: 对 250 V KW2 型功率 MOSFET 器件进行 Bi 粒子辐照, 在栅压等于 0 V 时, 安全工作的漏极电压达到 250 V; 对 500 V KW5 型功率 MOSFET 器件进行 Xe 粒子辐照, 在栅压等于 0 V 时, 安全工作的漏极电压达到 400 V, 并且当栅压为 -15 V 时, 安全工作的漏极电压也达到 400 V, 说明国产中、高压功率 MOSFET 器件有较好的抗单粒子能力。

关键字:功率金属-氧化物半导体场效应晶体管; 单粒子效应; 抗辐射加固

中图分类号: TN386

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201601.0143

Single event effects for domestic radiation-hardened power MOSFET devices

GAO Bo, WANG Lixin, LIU Gang, LUO Jiajun, HAN Zhengsheng, WANG Lulu, DENG Haitao
(Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: The single event effects of power Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor (MOSFET) are easy to be induced by impacts of heavy ion when they are used in space environment, such as single event burnout and Single Event Gate Rupture(SEGR). The single event effects of domestic new type anti-irradiation power MOSFETs with medium or high voltage(rated voltages are 250 V and 500 V) are studied in this paper. Targeted reinforcement measures are taken and the ability of devices to resist single event effect is significantly improved. Experiment results indicate that the 250 V power MOSFET is irradiated by Bi particles, the drain voltage of safety work reaches 250 V when gate voltage is 0 V; the 500 V power MOSFET is irradiated by Xe particles, the drain voltage of safety work reaches 400 V when gate voltage is 0 V, and the drain voltage of safety work can also reach 400 V when gate voltage is -15 V. The experiment results show that the domestic power MOSFET with medium or high voltage has a good ability to resist single event effect.

Key words: power Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor; single event effects; radiation hardened

由于功率金属-氧化物半导体场效应晶体管(MOSFET)具有输入阻抗高, 驱动功率低, 开关速度快, 热稳定性好等特点, 同时还具有负温度系数、无双极晶体管所谓的二次击穿等优点, 在航空、航天、核工程等极端复杂环境下的应用越来越广泛^[1-3]。

众所周知, 空间中存在着大量的带电粒子及宇宙射线, 单粒子辐射损伤会引起电子元器件性能退化^[4-8], 降低卫星的可靠性。功率 MOSFET 应用于卫星及航天器的电子系统时, 极易被重离子诱发单粒子效应(单粒子烧毁和单粒子栅穿), 尤其是功率 MOSFET 在受到辐照后导致电源电压和功耗造成剧烈波动, 将对卫星及航天器的电子系统产生灾难性的后果, 影响卫星及航天器的在轨使用寿命。随着航天事业的发展, 我国对电子元器件的辐射损伤效应、机理、加固技术的研究越来越多, 取得了许多重要成果^[9-11]。

目前, 一些新型长寿命卫星采用了 100 V 高压母线阵列, 出于对卫星电源控制和调节的目的, 在新卫星的电

收稿日期: 2015-07-01; 修回日期: 2015-09-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61204110); 中国科学院重点实验室基金资助项目(CXJJ-15S079)

源系统中, 不可避免地使用到一些大功率 MOSFET。由于采用了高压一次电源母线, 这些器件相应地具有较高的工作电压, 所以在空间中遭受高能质子或者重离子轰击时, 发生单粒子效应的可能性比采用低压一次电源母线时高。这就要求功率 MOSFET 在额定电压尽可能高的同时, 保证器件具有较高的抗单粒子水平。

1 实验方法

1.1 实验样品

实验样品采用抗辐射加固工艺研制的 N 沟功率 MOSFET, 封装形式为 TO-254AA 和 SMD-2。器件纵向结构图如图 1 所示, 典型参数特性指标如表 1 所示。额定电压 500 V 的 KW5 型抗辐照功率 MOSFET 主要用于 DC-DC(Direct Current)模块, 额定电压 250 V 的 KW2 型抗辐照功率 MOSFET 主要用于固态功率控制器(Solid State Power Controller, SSPC)模块。

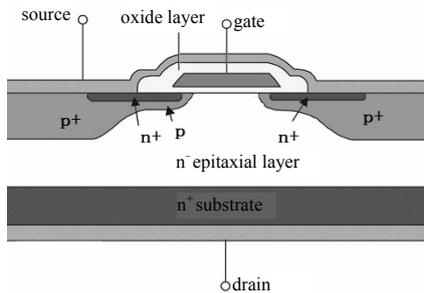


Fig.1 Cross-section views of the power MOSFET structure
图 1 功率 MOSFET 纵向结构剖面图

表 1 受试器件主要静态参数指标要求

Table1 Electrical characteristics of the devices under test

sample types	$U_{GS(th)}/V$	BU_{DSS}/V	R_{ON}/Ω	I_{DSS}/A	I_{GSS}/A
KW5	2-4	≥ 500	≤ 0.6	$\leq 2.5 \times 10^{-5}$	$\leq 1 \times 10^{-7}$
KW2	2-4	≥ 250	≤ 0.03	$\leq 2.5 \times 10^{-5}$	$\leq 1 \times 10^{-7}$

1.2 实验条件

单粒子辐照试验在中科院兰州近物所的回旋加速器上进行。入射粒子种类、能量、线性能量传输(Linear Energy Transfer, LET)值、射程如表 2 所示。注量率是($1 \times 10^4 \sim 1 \times 10^5$) ions/($cm^2 \cdot s$), 总注量是($1 \times 10^6 \sim 1 \times 10^7$) ions/ cm^2 。单粒子辐照试验时, U_{GS} 分别选取 0 V, -5 V, -10 V, -15 V, U_{DS} 从 100 V 开始逐渐增加, 直到器件发生单粒子效应。

表 2 单粒子试验相关参数

Table2 The related parameters of radiation experiment

ion species	energy/MeV	LET/(MeV· $mg^{-1} \cdot cm^2$)	range/ μm
Xe	868.29	65.1	64.7
Bi	682.50	99.0	43.3

1.3 实验过程

按照 MIL_STD_750E-1080 单粒子烧毁与单粒子栅穿试验方法对功率 MOSFET 进行单粒子辐照试验。将包含受试器件的电路板置于粒子束流中, 进行单粒子辐照试验, 辐照前测试器件的电参数。包括 $U_{GS(th)}$, BU_{DSS} , $R_{DS(ON)}$, I_{DSS} (阈值电压、击穿电压、导通电阻、漏极电流)等参数测试, 确保受试器件合格。实验时, 固定栅源电压, 逐渐增大漏源电压, 直到发生单粒子效应或漏源电压等于额定电压; 变化栅源电压, 继续按照上述步骤逐步增大漏源电压。研制了“半导体功率器件单粒子效应测试系统”, 对受试器件栅、漏上的电压、电流进行实时监测。单粒子辐照试验示意图如图 2 所示。

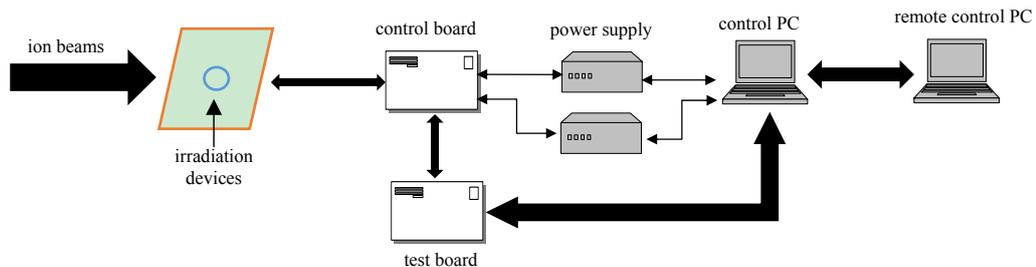


Fig.2 Schematic diagram of single event effect irradiation experiments

图 2 单粒子辐照实验示意图

2 试验结果

在注量率 1×10^4 ions/($\text{cm}^2 \cdot \text{s}$), 总注量 1×10^6 ions/ cm^2 条件下对 KW5 型抗辐射功率 MOSFET 进行单粒子辐照试验时, 器件在不同栅偏置条件时发生单粒子效应如下: 在 $U_{GS}=0$ V, $U_{DS}=420$ V 时, 发生单粒子效应; 在 $U_{GS}=-5$ V, $U_{DS}=420$ V 时, 发生单粒子效应; 在 $U_{GS}=-10$ V, $U_{DS}=420$ V 时, 发生单粒子效应; 在 $U_{GS}=-15$ V, $U_{DS}=420$ V 时, 发生单粒子效应。在栅压 0 V 到 -15 V, 漏压 400 V 时, 器件均未发生单粒子效应。器件辐照时的数据见表 3。器件的单粒子安全工作区如图 3 所示, 从图中可以看出, 栅压从 0 V 到 -15 V, 漏压为 400 V 时, 器件均未发生单粒子效应。

表 3 KW5 型器件单粒子辐照数据

Table3 The single event effect irradiation data of samples KW5

No.	U_{GS}/V	U_{DS}/V	Yes or No?
11#	-15	100	No
11#	-15	150	No
11#	-15	200	No
11#	-15	250	No
11#	-15	300	No
11#	-15	350	No
11#	-15	400	No
11#	-15	450	Yes
12#	-15	420	Yes
13#	-10	400	No
13#	-10	420	Yes
14#	-5	400	No
14#	-5	420	Yes
15#	0	400	No
15#	0	420	Yes

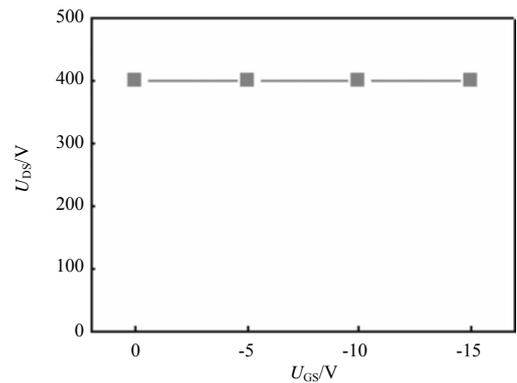


Fig.3 Single event effect safe operating area of samples KW5

图 3 单粒子辐照试验时, KW5 抗辐照功率 MOSFET 安全工作区

作为 DC-DC 母线电源的核心元器件, 功率 MOSFET 芯片在 DC-DC 中使用, 要求的可靠性和抗辐照能力远高于 DC-DC 本身。为更好地评估功率 MOSFET 在 DC-DC 实际使用中的抗辐射能力, 对功率 MOSFET 在栅压 0 V、漏压 400 V 的偏置条件下进行了总注量为 1×10^7 ions/ cm^2 单粒子辐照试验。实验结果表明, 在此条件下 ($U_{GS}=0$ V, $U_{DS}=400$ V, 总注量= 1×10^7 ions/ cm^2) 器件未发生单粒子效应。

在注量率 1×10^5 ions/($\text{cm}^2 \cdot \text{s}$), 总注量 1×10^6 ions/ cm^2 条件下对 KW2 抗辐射功率 MOSFET 进行单粒子辐照试验时, 器件在不同栅偏置条件时发生单粒子效应如下: 在 $U_{GS}=0$ V, $U_{DS}=250$ V 时, 未发生单粒子效应; 在 $U_{GS}=-5$ V, $U_{DS}=25$ V 时, 未发生单粒子效应; 在 $U_{GS}=-5$ V, $U_{DS}=50$ V 时, 发生单粒子效应; 在 $U_{GS}=-10$ V, $U_{DS}=25$ V 时, 未发生单粒子效应; 在 $U_{GS}=-5$ V, $U_{DS}=50$ V 时, 发生单粒子效应。器件辐照时的数据见表 4, 器件的单粒子安全工作区如图 4 所示。

表 4 KW2 型器件单粒子辐照数据

Table4 The single event effect irradiation data of samples KW2

No.	U_{GS}/V	U_{DS}/V	Yes or No
1#	-10	25	No
1#	-10	50	Yes
2#	-5	25	No
2#	-5	50	Yes
3#	0	150	No
3#	0	175	No
3#	0	200	No
3#	0	225	No
3#	0	250	No

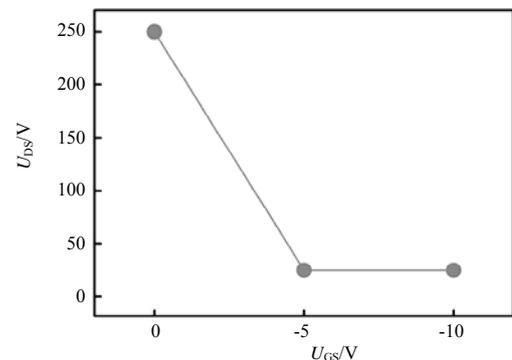


Fig.4 Single event effect safe operating area of samples KW2

图 4 单粒子辐照试验时, KW2 抗辐照功率 MOSFET 安全工作区

3 结果讨论

功率 MOSFET 的单粒子效应主要是指单粒子栅穿和单粒子烧毁, 这 2 种效应都是器件致命的失效模式^[12-13]。

单粒子烧毁是单粒子辐照时功率 MOSFET 承压的耗尽区产生大量电子空穴对,在漏极高压的作用下,形成大电流,当横向流过 P 体区的电流足够大时,就会在寄生三极管的基区电阻上产生可能超过 0.7 V 的压降,使寄生三极管开启,形成电流放大效应。耗尽区内高的电场导致雪崩倍增出现。在漏极高压维持一段时间后不断增大的电流促使寄生三极管进入二次击穿,击穿电压下降。电流密度的局部高度集中最终将导致 MOSFET 的烧毁。功率 MOSFET 的单粒子栅穿是高能粒子入射 MOS 器件的栅介质,引起了栅介质的击穿。粒子入射到 MOSFET 时,空穴会沿电场向器件表面运动,瞬时产生的大量空穴无法导出,会在栅介质下方的颈区堆积。这些空穴会在栅介质上增加一个瞬态电场,导致氧化层内电场超过临界击穿电场,引起栅氧介质击穿,栅极泄漏电流增加,功率 MOSFET 失去栅控能力。

国产抗辐射功率 MOSFET 进一步优化了器件结构与工

艺,实现抗单粒子性能的大幅提升。一是通过优化离子注入剂量、能量与掺杂分布,提高载流子复合效率,使重离子入射后产生的电子空穴对尽快复合,降低载流子的倍增效应,提升了抗单粒子烧毁(Single Event Burnout, SEB)、单粒子栅穿(SEGR)能力。二是通过优化器件元胞结构及拓扑结构,改变重离子入射后产生的电子空穴对抽取路径,提高载流子抽取效率,降低重离子对器件的影响,提升了抗 SEB,SEGR 能力。三是优化器件结构,增加负反馈电阻,降低载流子抽取时发射极效率,降低器件内部寄生三极管对电流的放大作用,提升了抗 SEB 能力。图 5 是优化前 KW5 型抗辐射功率 MOSFET 的单粒子安全工作区,从图中看到优化前器件的单粒子安全工作区较低。在 $U_{GS}=0$ V 时器件安全工作的漏压不到 200 V,在 $U_{GS}=-10$ V 时器件安全工作的漏压不到额定电压的 10%。从图中看到,未优化器件的抗 SEB 能力和抗 SEGR 的能力较差,不能满足模块使用要求。

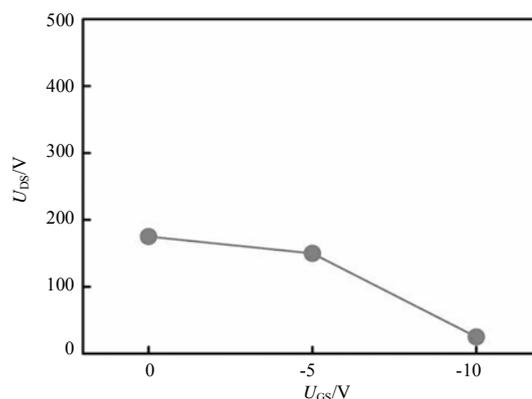


Fig.5 Single event effect safe operating area of samples KW5 before optimization
图 5 优化前, KW5 抗辐射功率 MOSFET 单粒子辐照时安全工作区

4 结论

从实验结果中可以看到,对于 500 V 抗辐射功率 MOSFET 器件 KW5,在最恶劣的栅偏置条件下($U_{GS}=-15$ V),KW5 型功率 MOSFET 仍可以在 400 V 下工作,表明此款功率 MOSFET 具有较好的抗单粒子性能。随着负栅压的增大,器件的单粒子安全工作区并未缩小,说明 KW5 抗 SEGR 加固得到有效提高。对于 250 V 抗辐射功率 MOSFET 器件 KW2,在 $U_{GS}=0$ V, $U_{DS}=250$ V 偏置条件下器件仍可安全工作。实验结果不仅为 KW5, KW2 的航天应用提供了技术参考,也为抗辐射加固功率 MOSFET 系列产品的研制提供了可行的方案。

参考文献:

- [1] DODD P E, SHANEYFELT M R, DRAPER B L, et al. Development of a radiation-hardened lateral power MOSFET for POL applications[J]. IEEE Trans. Nucl. Sci., 2009, 56(6): 3456–3462.
- [2] HARAN A, BARAK J, DAVID, et al. Mapping of Single Event Burnout in Power MOSFETs[J]. IEEE Trans. Nucl. Sci., 2007, 54(6): 2488–2494.
- [3] PRIVAT A, TOUBOUL A D, PETIT M, et al. Impact of Single Event Gate Rupture and Latent Defects on Power MOSFETs Switching Operation[J]. IEEE Trans. Nucl. Sci., 2014, 61(4): 1856–1864.
- [4] ZHANG E X, NEWAZ A K M, WANG B, et al. Low-energy X-ray and ozone-exposure induced defect formation in graphene materials and devices[J]. IEEE Trans. Nucl. Sci., 2011, 58(6): 2961–2967.
- [5] IROM F, NGUYEN D N, UNDERWOOD M L, et al. Effects of scaling in SEE and TID response of high density NAND flash memories[J]. IEEE Trans. Nucl. Sci., 2010, 57(6): 3329–3335.
- [6] HANDS A, MORRIS P, RYDEN K, et al. Single event effects in power MOSFETs due to atmospheric and thermal neutrons[J]. IEEE Trans. Nucl. Sci., 2011, 58(6): 2687–2694.
- [7] MILLER F, LUU A, PRUD'HOMME F, et al. Characterization of single event burnout in power MOSFET using backside laser testing[J]. IEEE Trans. Nucl. Sci., 2006, 53(6): 3145–3152.
- [8] LIU S, LAUNSTEIN J M, FERLET-CAVROIS V. Effects of ion species on SEB failure voltage of power DMOSFET[J]. IEEE Trans. Nucl. Sci., 2011, 58(6): 2991–2997.

- [9] 马英起,封国强,上官士鹏,等. 脉冲激光试验评估模拟电路单粒子效应[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2012,10(5):633-638. (MA Yingqi,FENG Guoqiang,SHANGGUAN Shipeng,et al. Pulsed laser test of single event effects in analog circuits[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2012,10(5):633-638.)
- [10] 李沫,孙鹏,宋宇,等. 半导体器件辐射电离效应的激光模拟方法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2015,13(1):160-168. (LI Mo,SUN Peng,SONG Yu,et al. Basic principles and research progress of laser simulation of ionization radiation effect in semiconductor devices[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2015,13(1):160-168.)
- [11] 韩建伟,封国强,蔡明辉,等. 脉冲激光试验在宇航器件和电路系统抗单粒子效应设计中的初步应用[J]. 航天器环境工程, 2011,28(2):121-125. (HAN Jianwei,FENG Guoqiang,CAI Minghui,et al. Application of pulsed laser test on the anti single event effects of aerospace components and circuitry designing[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2011,28(2):121-125.)
- [12] PERETTI G,DEMARCO G,ROMERO E,et al. 3D thermal and mechanical analysis of a single event burnout[J]. IEEE Trans. Nucl. Sci., 2015,62(4):1879-1887.
- [13] TITUS J L. An updated perspective of Single Event Gate Rupture and Single Event Burnout in power MOSFETs[J]. IEEE Trans. Nucl. Sci., 2013,60(3):1912-1928.

作者简介:



高 博(1983-), 男, 新疆维吾尔自治区米泉市人, 副研究员, 目前主要从事高可靠器件辐射损伤效应、加固技术方面研究工作. email:gaobo@ime.ac.cn.

王立新(1976-), 男, 河北省廊坊市人, 博士, 研究员, 主要研究方向为功率器件研发.

刘 刚(1979-), 男, 石家庄市人, 硕士, 副研究员, 主要研究方向为元器件辐射效应、机理及加固技术.

韩郑生(1962-), 男, 郑州市人, 博士, 研究员, 主要研究方向为基于 SOI 工艺数字电路研发.

罗家俊(1973-), 男, 江西省赣州市人, 博士, 研究员, 主要研究方向为基于 SOI 工艺数字电路研发.

王路璐(1983-), 女, 四川省资阳市人, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为功率器件失效分析技术、可靠性技术.

邓海涛(1986-), 男, 天津市人, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为功率器件失效分析技术、可靠性技术.

(上接第 135 页)

作者简介:



陈 亮(1988-), 男, 湖南省宁乡人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为模拟集成电路设计. email:chenlianggcdx@163.com.

谢 亮(1982-), 男, 湖南省郴州市人, 博士, 主要研究方向为 ASIC 设计、ADC、红外传感方向.

金湘亮(1974-), 男, 湖南省邵阳市人, 博士、教授, 主要研究方向为 SOC 设计、系统设计.