

# 应用于空间系统的 Power MOSFET 辐射响应特性

刘刚<sup>1,2</sup> 余学锋<sup>1</sup> 任迪远<sup>1</sup> 牛振红<sup>1,2</sup> 高嵩<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> (中国科学院新疆理化技术研究所 乌鲁木齐 830011)

<sup>2</sup> (中国科学院研究生院 北京 100049)

**摘要** 为给金属氧化物半导体场效应功率管(Power MOSFET)在航天系统中的应用提供辐照数据基础和依据。用<sup>60</sup>Co源对将应用于空间系统的两种Power MOSFET进行了不同总剂量的辐照实验。从微观氧化物陷阱电荷和界面态的辐射感生角度,分析了Power MOSFET器件在<sup>60</sup>Co $\gamma$ 射线辐射下的总剂量和剂量率效应以及辐照后70℃退火特性。试验表明与N沟道Power MOSFET相比,P沟道Power MOSFET可能更适合空间应用。

**关键词** 金属氧化物半导体场效应功率管, 辐射响应, 退火特性

**中图分类号** TN432, TN32, TN405.5, TP273

应用于空间系统的电子元器件电路,在空间带电粒子和射线的照射下,其性能会受辐照累积剂量的影响,甚至功能失效。因此,对于卫星等空间系统的电子元器件进行抗辐射能力的测试和评估非常必要。

与其它电路相比,金属氧化物半导体场效应功率管(Power MOSFET)的性能对卫星的可靠性保证更为关键。作为卫星中常用的二次电源的功率开关,其性能下降也可能会造成卫星功能失效。故在确保Power MOSFET可靠性的基础之上,其抗辐射能力应有较高要求<sup>[1-3]</sup>。

将市售商品(Commercial off-the-shelf, COTS)应用于航天系统,已是航天发展的新趋势。然而,生产商一般不提供此类器件的抗辐射性能的数据<sup>[4]</sup>。本文对国际整流器公司(International Rectifier)生产的两种Power MOSFET进行了总剂量辐照试验,分析研究其辐射损伤特性,并按有关标准要求评估其抗辐射能力,为其在航天系统中的应用提供辐照数据基础和依据。

## 1 样品及实验方法

实验用Power MOSFET样品为International Rectifier产品,N沟道(NMOS)12只,P沟道(PMOS)3只。在中国科学院新疆理化技术研究所<sup>60</sup>Co源辐照,源强 $1.3 \times 10^{15}$ Bq,剂量率为 $0.094 \text{Gy}(\text{Si}) \text{ s}^{-1}$ 。用该所的CMOS器件数据采集系统测试器件性能,辐照时偏置电压为 $V_{\text{GS}}=10\text{V}$ (NMOS)和 $V_{\text{GS}}=-10\text{V}$ (PMOS),辐照后退火温度为70℃。

辐照中,进行器件的静态功耗电流 $I_{\text{DD}}$ 、阈值(开启)电压 $V_{\text{th}}$ 和电流电压传输特性曲线等性能监测。测量 $V_{\text{th}}$ 时, $V_{\text{GS}}=V_{\text{DS}}$ , $I_{\text{D}}=250\mu\text{A}$ ( $V_{\text{DS}}$ 为源漏间电压, $I_{\text{D}}$ 为通过漏端的电流);测量 $I_{\text{DD}}$ 时,对于NPN, $V_{\text{DS}}=160\text{V}$ , $V_{\text{GS}}=0\text{V}$ ;对于PNP, $V_{\text{DS}}=-80\text{V}$ , $V_{\text{GS}}=0\text{V}$ 。

按照国家标准《半导体器件辐射加固实验方法 $\gamma$ 总剂量辐照实验》(GJB62.2-89),对器件进行辐照实验,将辐照剂量设为200Gy(NMOS)和100Gy(PMOS),辐照期间在不同剂量点进行参数测试,辐照后常温(25℃)退火15h。再对器件追加辐照总剂量的50%,再进行70℃168h的退火试验,退火期间在不同时间段进行参数测量。所有测试均在辐照或退火后20min内完成。

## 2 实验结果及分析

图1(a)和图1(b)分别为NMOS与PMOS功率管的电流转移特性曲线在辐照及退火条件下的变化关系。图1(a)中曲线1、2和3的 $I$ - $V$ 曲线随辐照累积剂量增加而水平负漂,截止电流基本不变,这种 $I$ - $V$ 曲线的负漂主要是由于器件栅氧化层在辐射中感生氧化物正电荷所致。曲线4是辐照后常温退火15h后的 $I$ - $V$ 曲线,与曲线1、2、3相比,常温退火后 $I$ - $V$ 曲线底端上升并出现非平行的畸变。这是界面陷阱俘获电荷数量增大并导致与硅表面能带弯曲的缘故,说明退火使界面态生长过程加快。曲线5为追加50%剂量辐照后的 $I$ - $V$ 曲线,基本与曲线4平行,说明NMOS功率管在辐照期间起主要

第一作者:刘刚,男,1979年7月出生,2003年毕业于河北工业大学应用物理系,目前为新疆理化技术研究所硕士研究生,主要从事体硅和SOI CMOS器件的抗辐射机理研究

收稿日期:初稿 2005-11-21,修回 2006-04-18

作用的是氧化物正电荷积累。曲线6、7是器件辐照后， $I-V$ 曲线在70℃退火时的变化情况。随退火时间的增加，曲线6、7正向回漂，同时曲线斜率越来越小，表明辐照后70℃退火时，器件辐射感生氧化物电荷开始退火，但界面态仍在继续生长。由图

1(b)可见，P沟功率管的 $I-V$ 曲线随着辐照累积剂量的增加而负向漂移，并导致PMOS管的开启电压绝对值不断增大；辐照后常温或70℃退火，器件的 $I-V$ 曲线基本不变，表明退火对PMOS管的辐射响应特性的影响不大。

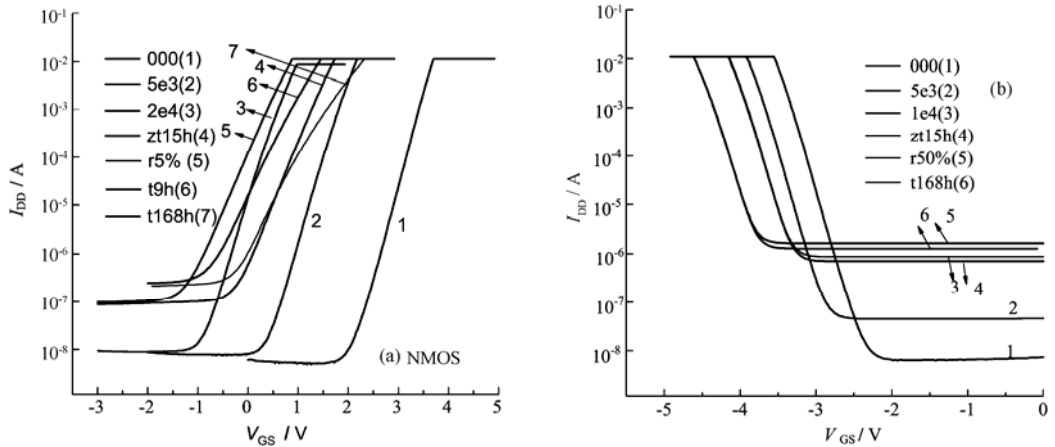


Fig.1 The  $I-V$  curves of power MOSFET chips irradiated to 100Gy (PMOS) or 200Gy (NMOS) and annealed at 25℃ and 70℃

图2中曲线1与曲线2分别给出NMOS与PMOS器件在静态辐照偏置条件下，阈值电压 $V_{th}$ 随辐照累积剂量和退火累积时间的变化关系。N沟器件的 $V_{th}$ 随辐照剂量的增加而减小，总剂量到200Gy时 $V_{th}$ 已降为0.36V，经15h常温退火， $V_{th}$ 回漂至1.4V左右，追加50%剂量辐照后， $V_{th}$ 降为0.16V，经70℃168h退火， $V_{th}$ 恢复到1.2V。对于NMOS管，辐照过程中氧化物电荷与界面态陷阱电荷同时感生，氧化物电荷的增加引起 $V_{th}$ 负漂，界面态陷阱电荷增加引起 $V_{th}$ 正漂。辐照过程中，氧化物电荷产生较多，故 $V_{th}$ 负漂移，退火过程辐射感生界面

态陷阱电荷超过空穴陷阱电荷，出现 $V_{th}$ 反弹。

图2中曲线2显示PMOS管的 $V_{th}$ 随辐照剂量的增加而减小，总剂量辐照到100Gy时， $V_{th}$ 负漂到-3.8V，经15h常温退火， $V_{th}$ 基本不变，追加50%剂量辐照后， $V_{th}$ 负漂到-4.24V，经70℃168h退火， $V_{th}$ 基本不变。对于PMOS管，辐射感生空穴陷阱电荷和界面陷阱电荷会 $V_{th}$ 负漂，故曲线2有较大的净净电压负向漂移。此类器件辐照后室温和70℃退火，电参数变化都很小，退火过程中器件氧化物陷阱电荷和界面陷阱电荷产生都很少，对PMOS器件的辐射损伤特性基本无影响<sup>[4,5]</sup>。

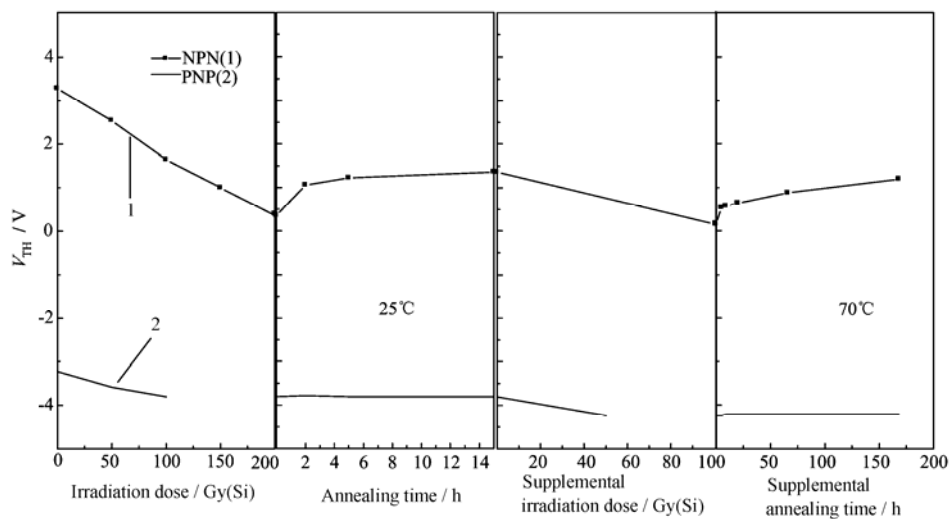


Fig.2 The  $V_{th}$  of power MOSFET chips irradiated to 100 Gy (PMOS) or 200 Gy (NMOS) and annealed at 25℃ and 70℃  
1. NMOS, 2. PMOS

图 3 和图 4 分别给出 NMOS 与 PMOS 器件在动态辐照偏置条件下，静态功耗电流随辐照累积剂量和退火累积时间的变化关系的典型曲线。

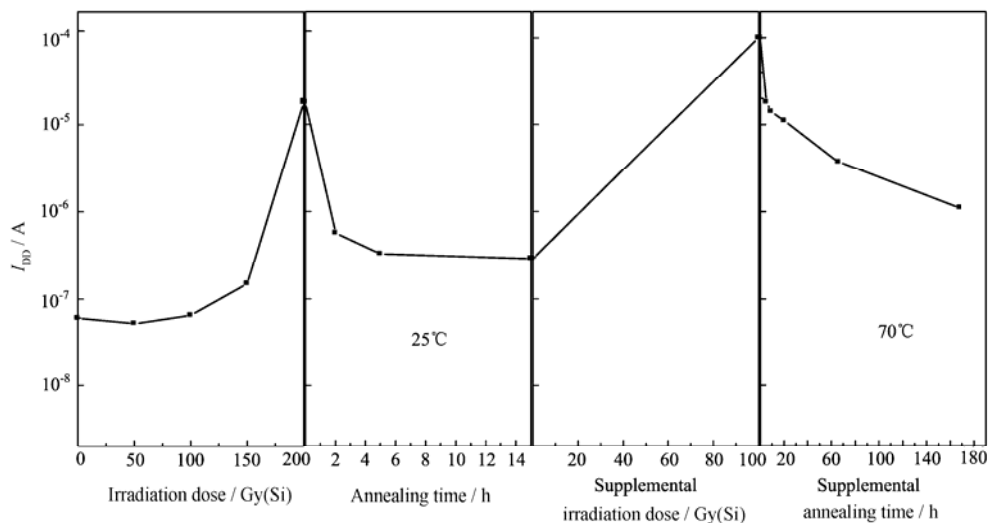


Fig.3 The  $I_{SS}$  static power current of N type MOSFET chips irradiated to 200 Gy and annealed at 25°C and 70°C

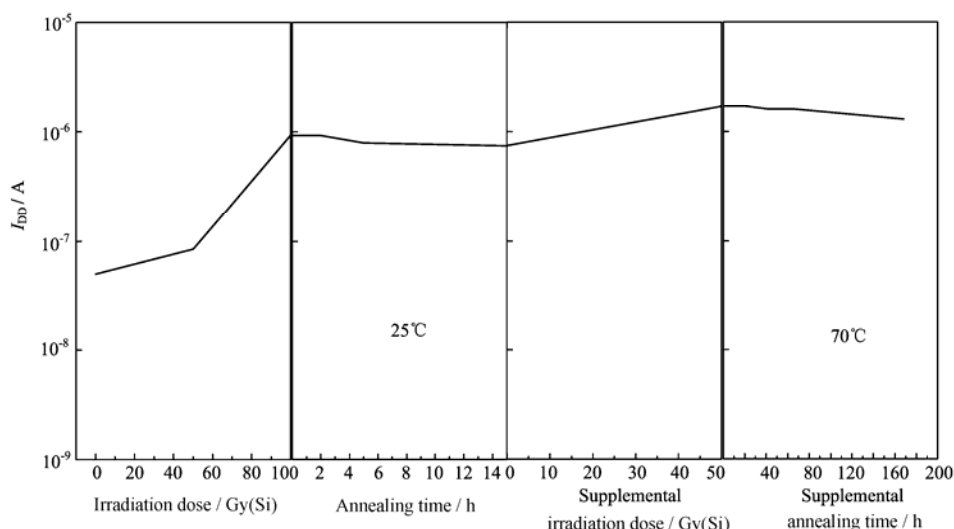


Fig.4 The  $I_{SS}$  static power current of P type MOSFET chips irradiated to 200 Gy and annealed at 25°C and 70°C

由图 3 可以看到，NMOS 器件随着总剂量累积静态功耗电流的增加，辐照后常温与 70°C 退火条件下，器件的静态功耗电流都随着退火时间的增加而减小，其变化趋势与相应阈电压的变化相类似。

由图 4 可见，PMOS 器件随总剂量累积静态功耗电流增加，辐照后室温与 70°C 退火条件下，器件的静态功耗电流基本不再变化，表明退火过程对器件辐射感生的氧化物正电荷和界面态状态基本不起影响。

### 3 结论

由上述 NMOS 器件和 PMOS 器件的总剂量辐射响应特性可见，随着辐射剂量的增加，NMOS 器件的  $I-V$  曲线水平负漂，在一定累积剂量下甚至可漂移过零，从而造成截止状态的丧失，辐照后器件的界面态继续增长，使 NMOS 器件负载能力下降、开关速度变慢；而 PMOS 器件的  $I-V$  曲线和阈电压虽然也都负漂，但由于 Power MOSFET 的工作电压比普通的 MOS 器件高，因此辐照引起的阈电压漂

移并不影响 PMOS 器件的导通和关断功能, 只可能影响器件的开关速度, 退火过程中, PMOS 器件并不继续损伤。由此我们有理由认为, 与所试验的 N 型 Power MOSFET 相比, 试验器件 P 沟 Power MOSFET 可能更适合空间应用。

#### 参考文献

- 1 任迪远, 陆妩, 郭旗, 等. 半导体学报, 2004, **25**(6): 731-734  
REN Diyuan, LU Wu, GUO Qi, *et al.* Chinese Journal of Semiconductors, 2004, **25**(6): 731
- 2 Bendada E, Raïs K. The European Physical Journal Applied Physics, 1999, (5), 91
- 3 WASKIEWICZ A E, GRONINGER J W. IEEE Trans Nuc Sci, 1986, NS-33: 1710
- 4 余学峰, 任迪远, 张国强, 等. 用于空间环境的 CMOS 器件的辐照方法和加固评判研究, 卫星抗辐射加固技术学术交流文集, 1993, 88  
YU Xuefeng, REN Diyuan, Zhang Guoqiang, *et al.* Study on assessment method of radiation hardening of CMOS Applied in the Space, 1993, 88
- 5 张国强, 博士论文“含 F、Cl、N MOS 结构的电离辐射/热载子效应、机理及加固技术研究”, 清华大学 1998, 6-16  
ZHANG Guoqiang. Doctoral dissertation, A Study of effects, mechanism and hardness techniques of ionizing radiation/hot carrier injection in MOS structures containing F or Cl or N, Tsinghua University 1998, 6-16

### Radiation effects and annealing of power MOSFET for space applications

LIU Gang<sup>1,2</sup> YU Xuefeng<sup>1</sup> REN Diyuan<sup>1</sup> NIU Zhenhong<sup>1,2</sup> GAO Song<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> (Xinjiang Institute of Photographic Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011)

<sup>2</sup> (Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

**ABSTRACT** Two kinds of power MOSFET were irradiated by <sup>60</sup>Co  $\gamma$ -rays in order to investigate their resistance to cosmic rays. The total dose radiation responses and voltage-current characteristics after 70°C annealing were studied based on the changes of oxide charges and interface states induced by the irradiation. The results show that the P channel devices are more radiation resistant than the N channel devices.

**KEYWORDS** Power MOSFET, Irradiation response, Annealing characteristics

**CLC** TN432, TN32, TN405.5, TP273