

文章编号: 2095-4980(2022)09-0897-06

## H<sub>2</sub>和H<sub>2</sub>O对双极器件抗辐射性能的影响规律和机制

马武英<sup>1,2</sup>, 缙石龙<sup>1,2</sup>, 郭红霞<sup>2</sup>, 姚志斌<sup>2</sup>, 何宝平<sup>2</sup>, 王祖军<sup>2</sup>, 盛江坤<sup>2</sup>

(1. 西安交通大学 核科学与技术学院, 陕西 西安 710049; 2. 西北核技术研究所 强脉冲辐射环境模拟与效应国家重点实验室, 陕西 西安 710024)

**摘要:** 为了深入研究H<sub>2</sub>和H<sub>2</sub>O进入氧化层后对双极器件辐射效应的影响机制, 以栅控双极晶体管为研究载体, 分别开展了不同浓度H<sub>2</sub>浸泡中的辐照试验和温湿度试验后的总剂量辐照试验。试验结果表明, 随着氢气浸泡浓度的增加, 器件的抗辐射能力逐渐降低; 而温湿度试验后, 由于水汽的进入, 器件在随后的辐照试验过程中辐射损伤呈增大趋势。在此基础上, 利用栅控栅扫描法进行氧化层辐射感生缺陷的定量分离, 发现H<sub>2</sub>和H<sub>2</sub>O进入器件氧化层后, 均会造成辐射感生界面陷阱电荷Nit的增加, 并在一定程度上降低辐射感生氧化物陷阱电荷Not的量, 结合理论分析进一步给出了H<sub>2</sub>和H<sub>2</sub>O造成器件损伤增强的潜在机制。研究成果对于辐射环境用电子系统的抗辐射性能评价和应用具有参考意义。

**关键词:** 双极器件; 电离总剂量; 湿度; 氢;  $\gamma$ 射线

**中图分类号:** TN406

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11805/TKYDA2022003

## Effect of H<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O on the total dose effect of bipolar devices

MA Wuying<sup>1,2</sup>, GOU Shilong<sup>1,2</sup>, GUO Hongxia<sup>2</sup>, YAO Zhibin<sup>2</sup>, HE Baoping<sup>2</sup>, WANG Zujun<sup>2</sup>, SHENG Jiangkun<sup>2</sup>

(1. School of Nuclear Science and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an Shaanxi 710049, China; 2. State Key Laboratory of Intense Pulsed Radiation Simulation and Effect, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an Shaanxi 710024, China)

**Abstract:** In order to study the effect of H<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O on the radiation effect of domestic bipolar devices, a typical gate-controlled bipolar transistor is designed, and the irradiation tests in different concentrations of H<sub>2</sub> are carried out, as well as the total dose irradiation tests after the temperature and humidity tests. The results show that the anti-radiation ability of the device decreases gradually with the increase of hydrogen concentration. After the temperature and humidity test, the radiation damage of the device increases with the entry of H<sub>2</sub>O. On this basis, gate scanning method is employed to quantitatively separate the radiation-induced defects of the oxide layer. It is found that both H<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O will cause the increase of the radiation-induced interface trap charge Nit after entering into the oxide layer. In addition, the potential mechanism of H<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O induced damage enhancement is given by theoretical analysis. The research results are of great value to the evaluation of the anti-radiation performance of electronic systems in radiation environment.

**Keywords:** bipolar devices; Total Ionization Dose(TID); humidity; hydrogen; gamma ray

为实现航天电子系统在辐射环境中的高可靠、长寿命目标, 研究人员制定了完备的总剂量效应考核试验方法与标准<sup>[1-3]</sup>。然而, 这些标准方法的制定主要针对同批次产品进行抽样, 随后开展总剂量效应器件考核试验, 并未考虑随着器件长时间存储过程中环境因素对器件抗总剂量能力可能产生的影响, 如长时间存储封装材料释放氢、存储过程中水汽的进入、以及制造过程中氢进入富氢材料随后随着时间推移缓慢释放氢等因素。然而, 随着辐射效应研究的深入, 越来越多的研究表明含氢物质在辐射感生缺陷形成过程中起着决定性的作用。这些含氢物质随着时间的增长, 逐渐扩散进入器件氧化层后并不会改变器件的常规电学特性, 仅在器件遭受辐射时, 才会产生作用并改变器件的辐射效应规律。这些现象的存在对现有电子器件总剂量效应考核方法的准确性和保守性提出了挑战<sup>[4-8]</sup>。

收稿日期: 2022-01-02; 修回日期: 2022-02-25

基金项目: 国家重点实验室基金资助项目(SKLIPR1802)

国外对  $H_2$  和  $H_2O$  对器件抗辐射能力的影响给予了一定关注, 并开展了相应的研究工作, 如 KOHLER R A 等<sup>[9]</sup> 研究发现密封陶瓷封装中的氢(0.3%~0.6% $H_2$ )能增加金属氧化物半导体(Complementary Metal Oxide Semiconductor, CMOS)器件的辐射诱导电荷积累; CHEN Xiaojie 等<sup>[6,10]</sup>以栅控双极晶体管为研究载体, 研究了  $H_2$  对双极器件总剂量效应的影响, 发现  $H_2$  的存在会增加辐射感生界面陷阱和氧化陷阱电荷的量, 同时开展了  $H_2$  作为一种低剂量率辐射损伤增强效应(Enhanced Low Dose Rate Sensitivity, ELDRS)加速试验方法的研究<sup>[5]</sup>; KARMARKAR A P 等<sup>[11]</sup>对非密封封装 MOS 器件在存储 17 年后开展辐射效应研究, 发现其界面陷阱电荷显著增加, 其主要原因是由于器件吸收空气中的水分造成。SHANEYFELT M R 等<sup>[12]</sup>对圣地亚实验室 CMOS 工艺线绝缘体上的硅(Silicon-On-Insulator, SOI)抗辐射加固器件开展温湿度试验后的辐照试验, 结果表明该工艺线产品的抗辐射性能不会受水汽的影响。而国内在氢和水汽进入方面开展的研究工作相对较少, 可见报道有: 哈尔滨工业大学开展了基于氢气浸泡的双极器件辐射损伤加速试验方法的研究, 并利用深能级瞬态谱分离方法获得了氢气对辐射感生缺陷影响规律<sup>[13]</sup>。总的来说, 从对物理机制来看,  $H_2O$  和  $H_2$  进入氧化层会对器件辐射感生缺陷形成产生影响, 从而改变器件的抗辐射能力, 但受工艺条件影响, 不同类型器件的辐射效应受  $H_2O$  和  $H_2$  影响不同。因此, 为满足辐射环境用电子系统总剂量效应考核需求, 有必要针对国产双极工艺线, 开展  $H_2O$  和  $H_2$  对其辐射效应的影响机制研究。栅控晶体管由于能有效地实现双极工艺器件辐射感生缺陷的定量分离, 获得界面陷阱电荷随辐照的变化规律, 近年来在双极工艺辐射效应和加固技术研究方面得到了应用。本文以国产工艺栅控双极晶体管为载体, 开展了  $H_2$  浓度和  $H_2O$  对双极器件辐射感生产物的影响规律和损伤机制研究。

## 1 实验对象及方法

实验样品为栅控横向 PNP 双极晶体管(Gated-Lateral PNP transistors, GLPNP), 其与普通双极 PNP 晶体管的区别是在基区氧化层上方添加了栅电极用于控制基区表面状态, 样品的钝化层为二氧化硅, 厚度约为  $1.2 \mu\text{m}$ , 基区宽度为  $12 \mu\text{m}$ 。

试验过程中对栅控晶体管的常规特性曲线及栅扫描曲线进行测试, 采用栅扫描法对辐射感生产物进行分离, 通过栅电压改变器件氧化层电场和表面电势, 从而获得辐射感生产物对基区辐射电流的影响。基极电流最大值的的变化与界面陷阱的平均浓度变化量( $\Delta N_{it}$ )成正比, 而基极电流最大值对应的栅压变化量与氧化物陷阱电荷平均浓度变化量( $\Delta N_{ot}$ )成正比。 $\Delta N_{it}$  和  $\Delta N_{ot}$  可通过式(1)~(2)计算<sup>[14-15]</sup>:

$$\Delta N_{it} = \frac{2\Delta I_{B-\text{peak}}}{q\sigma v_{th} S_{\text{peak}} n_i \exp\left(\frac{qU_{EB}}{2kT}\right)} \quad (1)$$

$$\Delta N_{ot} = \frac{C_{ox}\Delta U_{\text{peak}}}{q} \quad (2)$$

式中:  $\Delta I_{B-\text{peak}}$  为辐照前后基极电流最大值的变化量;  $\Delta U_{\text{peak}}$  为辐照前后基极电流最大值对应栅极电压的变化量;  $U_{EB}$  为发射结电压;  $n_i$  为 Si 半导体本征载流子浓度;  $S_{\text{peak}}$  为基极电流最大时的基区耗尽层面积;  $v_{th}$  为载流子热速率;  $\sigma$  为载流子复合截面;  $C_{ox}$  为单位面积上的栅电容;  $q, k, T$  分别为电子电荷量、玻兹曼常数和绝对温度。

### 1.1 氢气浸泡辐照试验

为研究氢气浓度对双极器件辐射感生产物的影响机制, 将试验样品分为 4 组, 开展了不同氢气浓度的辐照试验。辐照过程所有样品均采用零偏偏置进行辐照, 辐照剂量率为  $50 \text{ rad}(\text{Si})/\text{s}$ , 总剂量为  $50 \text{ krad}(\text{Si})$ 。自制氢氛围辐照夹具示意图如图 1 所示, 辐照前, 首先利用真空泵对腔体抽真空, 随后通过氢气瓶为腔体充氢气至不同压强, 充装氢气压强分别为  $0.42 \text{ MPa}$ ,  $0.1 \text{ MPa}$ ,  $0.025 \text{ MPa}$  和不进行氢气处理(认为  $H_2$  浓度为  $1 \times 10^{-3} \text{ cm}^{-3}$ )。试验样品钝化层为  $\text{SiO}_2$ , 认为  $H_2$  可迅速进入,  $H_2$  在  $\text{SiO}_2$  中气体的溶解度与温度和压强关系可表示为<sup>[16-17]</sup>:

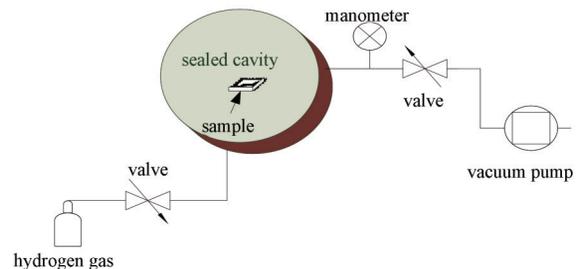


Fig.1 Diagram of hydrogen environment irradiation system  
图 1 氢氛围辐照装置示意图

$$C = K(T)PV \quad (3)$$

式中： $P$ 为压强； $V$ 为H<sub>2</sub>在SiO<sub>2</sub>中溶解位置的浓度， $V=1.07 \times 10^{21}$  sites/cm<sup>3</sup>。其中 $K(T)$ 为温度函数，可表示为：

$$K(T) = \left( \frac{h^2}{2\pi mkT} \right)^{\frac{3}{2}} \times \left( \frac{1}{kT} \right) \times \left[ \frac{e^{-\frac{hv}{2kT}}}{1 - e^{-\frac{hv}{kT}}} \right]^3 \times e^{-\frac{E}{RT}} \quad (4)$$

式中： $h$ 为普朗克常数； $m$ 为溶解原子的质量； $\nu$ 为溶解原子的振动频率， $\nu=4.1 \times 10^{12}$ ； $R$ 为气体常数； $E$ 为结合能，分子氢在SiO<sub>2</sub>界面的结合能为-0.105 eV。经计算试验过程中选择的氢气浓度和压强的关系如表 1 所示。

表 1 不同氢气压强对应的氢气浓度

Table 1 Relationship between hydrogen pressure and concentration

pressure/MPa	0.42	0.1	0.025	untreatment
concentration/cm <sup>-3</sup>	1.2×10 <sup>18</sup>	2.7×10 <sup>17</sup>	6.8×10 <sup>16</sup>	about 1×10 <sup>13</sup>

### 1.2 水汽影响试验

为研究水汽进入对双极器件辐射感生产物的影响机制，将试验样品分为 2 组：一组参照 J-STD-020 湿度试验标准进行温湿度试验(Highly Accelerated Stress Test, HAST)<sup>[18]</sup>，条件为：湿度 80%，温度 80 °C，时间 90 h；另一组为对比样品，不做处理。随后对 2 组试验样品进行总剂量辐照试验，剂量率选用 10 rad(Si)/s，累积总剂量为 100 krad(Si)。在各累积总剂量点 30 rad(Si),50 rad(Si),70 rad(Si)和 100 krad(Si)时对器件的特性进行测试。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 氢气浓度对损伤的影响分析

对栅控晶体管开展不同浓度下的总剂量辐照试验，实验结果表明：总剂量辐照后器件常规特性均发生一定程度的退化，随着H<sub>2</sub>浓度增大，器件辐射损伤逐渐增加。图 2 给出了在不同氢气压强条件下，栅控双极晶体管归一化放大倍数( $\beta/\beta_0$ )在辐照后的退化规律，压强与氢气浓度的关系见表 1。未进行H<sub>2</sub>处理的器件增益退化相对较小，而随着辐照过程氢气浓度的增加，器件辐照后的损伤逐渐增大。

栅控晶体管放大倍数的减小主要是由于基极电流增大导致的，而基区上方Si/SiO<sub>2</sub>界面附近的界面陷阱和氧化物陷阱电荷是使基极电流增大的主要因素<sup>[5]</sup>。为了进一步获得H<sub>2</sub>对辐射感生产物的作用规律，利用栅扫描法对GLPNP晶体管晶体测试。图 3 给出了器件在不同氢气浓度中辐照后的栅扫描曲线变化规律。可以看出，氢气浓度对栅控晶体管栅扫描曲线有很大的影响，尤其是峰值大小和位置。随着辐照过程中氢气压强的增大，器件栅扫描曲线峰值逐渐上升。

结合式(1)和式(2)，利用栅扫描法对器件辐射感生产物氧化物陷阱电荷和界面态进行分离，分离结果如图 4 所示，可以看出：随着氢气浓度增加，辐照产生的界面陷阱电荷逐渐增多，而氧化物陷阱电荷量相对减少。但对于GLPNP器件，界面陷阱对基极电流的影响占主导，并且界面陷阱增加量要远大于氧化物陷阱电荷的增加，因此，随着氢气浓度的增加，器件的辐照损伤表现出增强的趋势。

氢气对氧化层中辐射感生缺陷的作用规律：氢气进入器件后大多数以分子状态存在，当辐照过程中产生氧化物陷阱电荷时(式(5))，氢气会与之反应生成含H缺陷和H<sup>+</sup>(式(6))，含H缺陷再次俘获空穴也会有一定几率放出H<sup>+</sup>(式(7))，H<sup>+</sup>会在边缘电场力的作用下输运到界面，参与界面陷阱的形成过程，从而促进界面陷阱的生长(式(8))。

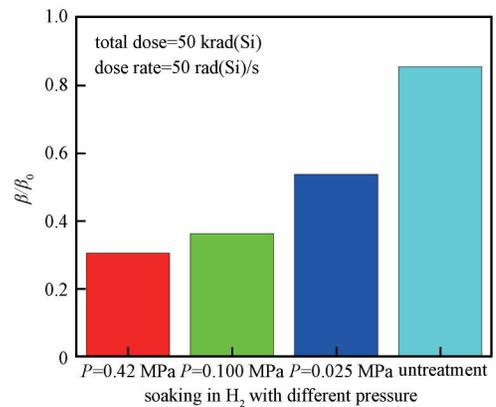


Fig.2 Effect of the soaking in hydrogen on the  $\beta/\beta_0$  of irradiated transistors

图 2 氢气浸泡后与未浸泡条件下归一化的晶体管放大倍数随辐照总剂量变化

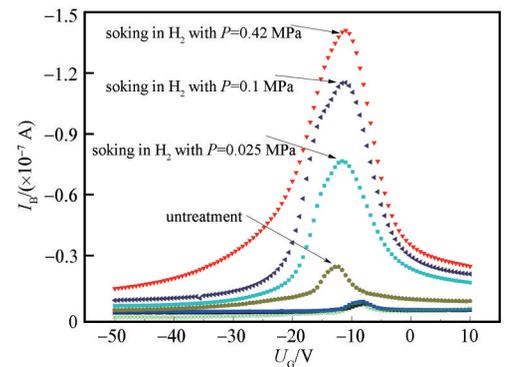


Fig.3 Effect of the soaking in hydrogen on the gate sweeping curve after irradiation

图 3 氢气浸泡对辐照后栅扫描曲线的影响



式中： $U_B$  为氧化层中性陷阱； $U_B H$  为含氢缺陷； $PbH$  为界面 Si-H 键； $Pb^+$  为界面陷阱。

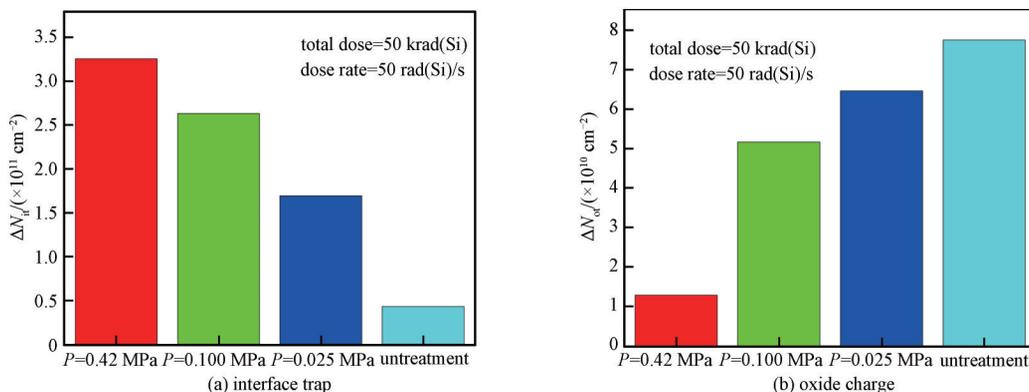


Fig.4 Comparison of irradiation defects after soaking in different hydrogen environments  
图 4 不同氢气浓度处理后的辐照缺陷的差异对比

氧化物陷阱电荷产额随氢浓度的变化趋势与文献[10]报道结果不同，文献中的实验结果给出氧化物陷阱电荷随着氢气浓度的增加而增大。实验结果表明：随着  $H_2$  浓度增加辐射感生产物氧化物陷阱电荷的增加量逐渐较少。分析其主要原因是文献中的器件在辐照后栅扫描曲线出现了峰值展宽现象，造成难以准确获得峰值位置，因此，其氧化物陷阱电荷定量分离结果的可信度存在一定问题。在理论上氢气进入氧化层后裂解能相对较大，因此会先以分子态形式存在，在辐照过程中产生的氧化物陷阱电荷的作用下裂解反应势垒降低，通过反应释放  $H^+$ ，同时形成中性含氢缺陷。因此，随着氧化层中氢气浓度的增加，氧化物陷阱电荷被消耗，从而导致产额会降低，如式(6)过程。由于式(5)具有较低的反应能，可知式(7)的产物很容易俘获空穴又形成氧化物陷阱电荷。因此，根据实验结果可以推测式(7)具有更高的反应能。为了进一步揭示物理过程，对文献[15]中的低剂量辐射损伤增强效应数值模型的反应能进行了调整，并利用模型对不同氢气浓度界面陷阱和氧化物陷阱电荷浓度进行仿真，结果如图 5 所示，从图中可以看出，调整后的模型能更好地与实验结果吻合，进一步证实了  $H_2$  进入氧化层参与的物理反应过程。

### 2.2 $H_2O$ 进入对抗辐射能力影响分析

温湿度试验后器件的抗辐射能力变化如图 6 所示，从图中可以看出：辐照前的温湿度试验并未影响器件电参数特性，但经温湿度试验后的器件在随后的辐照试验过程中呈现出辐射损伤增强的趋势，表现在随着水汽进入栅扫描曲线的峰值大小增加，峰值位置右移。

基于式(1)和式(2)，利用栅扫描法对图 5 中辐射感生产物进行分离，分离结果如图 7(a)和 7(b)所示，图中可以看出经过温湿度试验后，由于水汽的进入，器件辐射感生产物相对于未处理器件呈现出不同增长规律，具体表现为：辐射产生的界面陷阱电荷数量大于未处理器件辐射感生界面陷阱的电荷数量，而氧化物陷阱电荷增加量却小于未处理器件的氧化物陷阱电荷量。

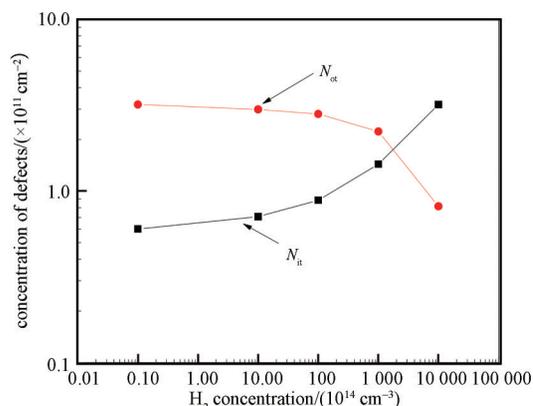


Fig.5 Relationship between radiation defects and hydrogen concentration by simulation  
图 5 氢气浓度对辐射感生产物的影响仿真结果

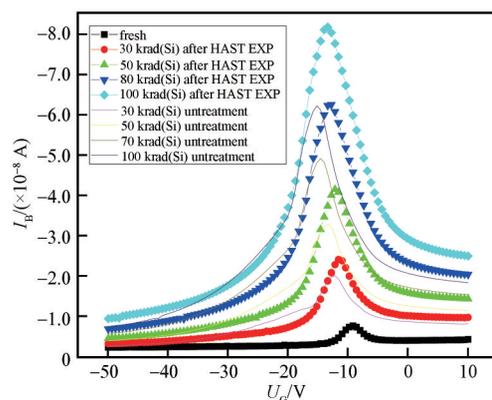


Fig.6 Changes of gate sweeping current  $I_B$  after HAST  
图 6 温湿度试验后器件栅扫描电流的变化趋势

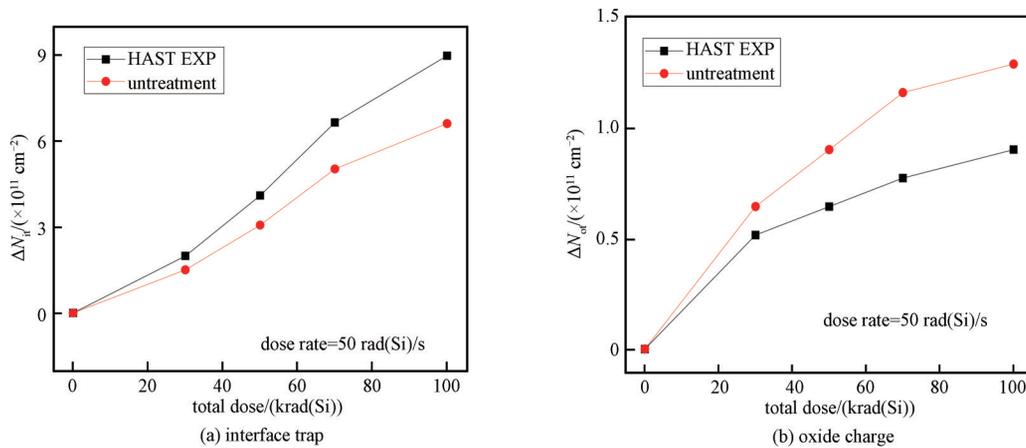


Fig.7 Effect of HAST on radiation defects

图7 HAST试验对辐射感生产物的影响

温湿度试验后氧化层辐射感生缺陷的变化主要归因于水汽进入器件氧化层。 $H_2O$ 在氧化层中具有较高的裂解反应势垒(1.7 eV),因此,进入后不会改变器件常规电特性。但电离辐射在氧化层中产生空穴时, $H_2O$ 裂解反应势垒降低为0.85 eV,使得裂解反应更容易发生,从而释放 $H^+$ ,质子会被输运至界面参与界面陷阱的形成<sup>[19-20]</sup>:



从试验结果来看,水汽的存在会导致氧化物陷阱电荷的含量相对降低,因此可以推测, $H_2O$ 进入氧化层后,还会与氧化物陷阱电荷发生反应(式10),消耗氧化物陷阱电荷,同时生成 $V_{ox}OH$ 和 $H^+$ , $H^+$ 输运至界面导致界面陷阱的增大。



### 3 结论

利用国产双极工艺线制作的栅控双极晶体管研究了 $H_2$ 和 $H_2O$ 对双极器件抗辐射能力的影响规律和作用机制。研究表明,随着氢气浸泡浓度的增加,器件的抗辐射能力逐渐降低。主要由于氢气进入氧化层后会在辐射产生的氧化物陷阱电荷作用下形成 $H^+$ ,随着 $H^+$ 输运至界面使得辐射产生界面陷阱浓度增加,同时氧化物陷阱电荷浓度减少;温湿度试验后,由于水汽的进入,器件在随后的辐照试验过程中辐射损伤呈增大趋势,其主要原因是在辐射感生氧化物陷阱电荷和空穴的作用下 $H_2O$ 会发生裂解反应,形成的 $H^+$ 输运至界面使得辐射感生界面陷阱电荷。论文结合试验和理论分析进一步明确了 $H_2$ 和 $H_2O$ 对辐射感生产物的作用规律和机制,研究成果对于辐射环境用双极器件的考核评估方法建立和加固技术研究具有参考意义。

#### 参考文献:

- [1] 陈伟,唐民,郭晓强,等. 宇航器件空间辐射效应地面模拟试验与评估标准规范体系[J]. 现代应用物理, 2020(2):020102-1-020102-10 (CHEN Wei,TANG Min,GUO Xiaoqiang,et al. System of standard specification in space radiation effects test and evaluation for aerospace electronics[J]. Modern Applied Physics, 2020(2):020102-1-020102-10.)
- [2] DEPARTMENT of DEFENSE. Test method stand microcircuits:MIL-STD-883[S/OL]. <https://assist.daps.dla.mil>.
- [3] EUROPEAN SPACE AGENCY. Total dose steady-state irradiation test method:ESCC detail specification No.22900[S/OL]. <https://escies.org>.
- [4] FLEETWOOD D M,RODGERS M P,TSETSERIS L,et al. Effects of device aging on microelectronics radiation response and reliability[J]. Microelectronics Reliability, 2007,47(7):1075-1085.
- [5] PEASE R L,PLATTETER D G,DUNHAM G W,et al. The effects of hydrogen in hermetically sealed packages on the total dose and dose rate response of bipolar linear circuits[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2007,54(6):2168-2173.
- [6] CHEN X J,BARNABY H J,PHILIPPE Adell,et al. Modeling the dose rate response and the effects of hydrogen in bipolar technologies[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2009,56(6):3196-3202.
- [7] ROWSEY N L,LAW M E,SCHRIMPF R D,et al. A quantitative model for ELDRS and degradation effects in irradiated oxides based on first principles calculations[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2011,58(6):2937-2944.

- [8] FLEETWOOD D M. Effects of hydrogen transport and reactions on microelectronics radiation response and reliability[J]. *Microelectronics Reliability*, 2002,42(5):523–541.
- [9] KOHLER R A, KUSHNER R A, LEE K H. Total dose radiation hardness of MOS devices in hermetic ceramic packages[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1988,35(6):1492–1496.
- [10] CHEN X J, BARNABY H J, VERMEIRE B, et al. Mechanisms of enhanced radiation-induced degradation due to excess molecular hydrogen in bipolar oxides[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2007,54(6):1913–1919.
- [11] KARMARKAR A P, CHOI B K, SCHRIMPF R D, et al. Aging and baking effects on the radiation hardness of MOS capacitors[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2001,48(6):2158–2163.
- [12] SHANEYFELT M R, SCHWANK J R, DODD P E, et al. Effects of moisture on radiation-induced degradation in CMOS SOI transistors[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2010,57(4):1777–1780.
- [13] 赵金宇, 杨剑群, 董磊, 等. 氢气浸泡辐照加速方法在 3DG111 器件上的应用及辐射损伤机理分析[J]. *物理学报*, 2019,68(6):225–231. (ZHAO Jinyu, YANG Jianqun, DONG Lei, et al. Hydrogen soaking irradiation acceleration method: application to and damage mechanism analysis on 3DG111 transistors[J]. *Acta Physica Sinica*, 2019,68(6):225–231.)
- [14] 马武英, 王志宽, 陆妩, 等. 栅控横向 PNP 双极晶体管基极电流峰值展宽效应及电荷分离研究[J]. *物理学报*, 2014,63(11):116101-1–116101-6. (MA Wuying, WANG Zhikuan, LU Wu, et al. The base current broadening effect and charge separation method of gate-controlled lateral PNP bipolar transistors[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014,63(11):116101-1–116101-6.)
- [15] 缙石龙, 马武英, 姚志斌, 等. 基于栅控横向 PNP 双极晶体管的氢氛围中辐照损伤机制[J]. *物理学报*, 2021,70(15):156101-1–156101-8. (GOU Shilong, MA Wuying, YAO Zhibin, et al. Radiation mechanism of gate-controlled lateral PNP bipolar transistors in the hydrogen environment[J]. *Acta Physica Sinica*, 2021,70(15):156101-1–156101-8.)
- [16] ARWICK A D, JOYCE C L, ROBBELL K P. Hydrogen redistribution and gettering in AlCu/Ti thin films[J]. *Journal of Applied Physics*, 1991,69(11):7921–7923.
- [17] SHELBY J E. Molecular diffusion and solubility of hydrogen isotopes in vitreous silica[J]. *Journal of Applied Physics*, 1977,48(8):3387–3394.
- [18] 袁华, 钱敏. 加速浸润方法在塑封可靠性分析中的应用[J]. *电子与封装*, 2010,10(1):35–42. (YUAN Hua, QIAN Min. Study on the accelerated soak method in the reliability evaluation of plastic package[J]. *Electronics & Packaging*, 2010,10(1):35–42.)
- [19] BATYREV I G, TUTTLE B, FLEETWOOD D M, et al. Reactions of water molecules in silica-based network glasses[J]. *Physical Review Letters*, 2008,100(10):105503-1–105503-4.
- [20] BAKOS T, RASHKEEV S N, PANTELIDES S T. H<sub>2</sub>O and O<sub>2</sub> molecules in amorphous SiO<sub>2</sub>: defect formation and annihilation mechanisms[J]. *Physical Review B*, 2004,69(19):195206-1–195206-9.

#### 作者简介:

马武英(1987-), 男, 在读博士研究生, 主要研究方向为电子元器件辐射效应. email:mawuying@nint.ac.cn.

缙石龙(1994-), 男, 硕士, 研究实习员, 主要研究方向为电子元器件辐射效应.

郭红霞(1964-), 女, 博士, 研究员, 主要研究方向为电子元器件辐射效应.

姚志斌(1979-), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为电子元器件辐射效应.

何宝平(1969-), 男, 硕士, 副研究员, 主要研究方向为电子元器件辐射效应.

王祖军(1979-), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为电子元器件辐射效应.

盛江坤(1989-), 男, 在读博士研究生, 工程师, 主要研究方向为电子元器件辐射效应.