



基于栅控横向PNP双极晶体管的氢氛围中辐照损伤机制

缙石龙 马武英 姚志斌 何宝平 盛江坤 薛院院 潘琛

Radiation mechanism of gate-controlled lateral PNP bipolar transistors in the hydrogen environment

Gou Shi-Long Ma Wu-Ying Yao Zhi-Bin He Bao-Ping Sheng Jiang-Kun Xue Yuan-Yuan Pan Chen

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 156101 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20210351

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210351>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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

Hydrogen soaking irradiation acceleration method: application to and damage mechanism analysis on 3DG111 transistors

物理学报. 2019, 68(6): 068501 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181992>

典型模拟电路低剂量率辐照损伤增强效应的研究与评估

Estimation of low-dose-rate degradation on bipolar linear circuits using different accelerated evaluation methods

物理学报. 2018, 67(9): 096101 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180027>

射线总剂量辐照对单轴应变Si纳米n型金属氧化物半导体场效应晶体管栅隧穿电流的影响

Influence of γ -ray total dose radiation effect on the tunneling gate current of the uniaxial strained Si nanometer n-channel metal-oxide-semiconductor field-effect transistor

物理学报. 2017, 66(7): 076101 <https://doi.org/10.7498/aps.66.076101>

Si₃N₄钝化层对横向PNP双极晶体管电离辐射损伤的影响机理

Impact of nitride passivation layer on ionizing irradiation damage on LPNP bipolar transistors

物理学报. 2018, 67(16): 168501 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172215>

65 nm互补金属氧化物半导体场效应和晶体管总剂量效应及损伤机制

Radiation effect and degradation mechanism in 65 nm CMOS transistor

物理学报. 2018, 67(14): 146103 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172542>

基于脉冲方法的超短栅长GaN基高电子迁移率晶体管陷阱效应机理

Mechanisms of trapping effects in short-gate GaN-based high electron mobility transistors with pulsed I-V measurement

物理学报. 2018, 67(17): 178501 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180474>

基于栅控横向 PNP 双极晶体管的 氢氛围中辐照损伤机制*

缙石龙 马武英 姚志斌[†] 何宝平 盛江坤 薛院院 潘琛

(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, 西安 710024)

(2021 年 2 月 23 日收到; 2021 年 3 月 15 日收到修改稿)

为了研究氢气与辐射感生产物之间的作用关系, 以栅控横向 PNP 双极晶体管为研究对象, 分别开展了氢气氛围中浸泡后的辐照实验和辐照后氢气氛围中退火实验, 结果表明: 氢气进入双极晶体管后会使其辐照损伤增强, 并且未浸泡器件辐照后在氢气中退火也会使晶体管辐射损伤增强. 基于栅扫描法分离的辐射感生产物结果表明, 氢气进入晶体管会使得界面陷阱增多, 氧化物陷阱电荷减少, 主要原因是氢气进入氧化层会与辐射产生的氧化物陷阱电荷发生反应, 产生氢离子, 从而使界面陷阱增多. 基于该反应机理, 建立了包含氢气反应和氢离子产生机制的低剂量率辐照损伤增强效应数值模型, 模型仿真得到的界面陷阱及氧化物陷阱电荷面密度数量级和变化趋势均与实验结果一致, 进一步验证了氢气在双极器件中辐照反应机理的正确性, 为双极器件辐照损伤机制研究和在氢氛围中浸泡作为低剂量率辐射损伤增强效应加速评估方法的建立提供了参考和理论支撑.

关键词: 栅控晶体管, 氢气, 低剂量率辐照损伤增强效应, 界面陷阱, 氧化物陷阱电荷

PACS: 61.80.-x, 85.30.Pq, 87.53.-j, 61.80.Ed

DOI: 10.7498/aps.70.20210351

1 引言

国内外研究表明, 氢 (H) 是双极器件产生低剂量辐射损伤增强效应 (enhanced low dose rate sensitivity, ELDRS) 的关键因素之一^[1-6]. 不同的钝化层材料对双极器件是否具有 ELDRS 效应有着很大的影响, 究其原因也是不同材料向器件中引入的 H 的含量不同^[1-3]. 并且由于氢气在当今半导体集成电路制造和封装工艺中无处不在^[4], 部分芯片的封装中含有浓度较高的氢气 (H₂), 比如文献^[5,6]报道, 采用 KOVAR 壳封装的芯片封装腔中含有约 1.2%—1.4% 的氢气, 认为其来源是 KOVAR 上镀金过程释放的气体. 另外, 现有的双极器件 ELDRS 效应加速考核方法主要有高温、变温辐

照以及变剂量率等辐照方法^[7,8]. 针对氢可以使双极器件辐射损伤增强的现象, 有学者提出氢氛围中辐照的 ELDRS 效应加速考核方法^[9-11]. 所以研究氢气对双极器件辐照损伤的影响及其物理机理有着重要的意义.

国外针对氢气对双极器件的 ELDRS 效应的影响进行了大量的实验和理论研究, 尤其是美国亚利桑那州立大学 (ASU) 和喷气推进实验室 (JPL), 证明氢气会直接影响双极器件和电路的 ELDRS 效应^[5,6,12-14]. 但对其物理机理的研究存在着不同的观点, 文献^[13-15]认为氢气扩散进入器件氧化层后会与浅能级氧空位反应形成浅能级的含 H 缺陷, 含 H 缺陷在辐照过程中俘获空穴后释放氢离子 (H⁺), 使界面陷阱增多. 文献^[12]提出的双极器件 ELDRS 数值模型认为, H₂ 分子也会使得氧化

* 强脉冲辐射模拟与效应国家重点实验室 (批准号: SKLIPR1802Z) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: yaozhibin@nint.ac.cn

层中含 H 缺陷增多, 并且会使电子空穴的直接复合系数减小. 文献 [16] 认为氢气进入氧化层后会与带正电的氧化物陷阱电荷反应, 直接释放 H⁺使界面陷阱增多. 国内对氢气辐照实验及其物理机理研究得很少, 文献 [10] 以 3DG111 型双极晶体管为实验载体, 研究了氢气浸泡后的辐照规律, 并用深能级瞬态谱仪 (deep level transient spectroscopy, DLTS) 探测器件中的微观缺陷种类及密度, 认为氢气浸泡后辐照会使得双极晶体管中产生能级较深的界面态和氧化物电荷, 但对氢气进入后具体反应机理没有提及.

可以看出, 国外对氢气辐照实验以及机理研究很多, 氢气对双极器件影响的实验规律也基本一致, 但氢气在氧化层中的反应机制并没有形成统一的认识, 而国内对这方面的研究很少. 为了进一步研究氢气对双极器件 ELDRS 效应影响的物理机理, 本文基于栅控晶体管, 利用钴源开展了氢气浸泡后的辐照实验和未浸泡器件辐照后在氢氛围中退火实验, 对比了辐照前、辐照中、辐照后氢气对栅控晶体管的辐射损伤及辐射感生产物的变化规律的影响, 给出氢气对双极器件辐照损伤规律的影响机制. 另外, 通过建立包含氢气相关反应和 H⁺产生机制的双极器件 ELDRS 效应数值模型, 验证了提出的氢气反应机制的正确性, 为氢气对双极器件 ELDRS 效应影响研究和双极器件在氢氛围中辐照加速考核方法的建立提供了参考和理论支撑.

2 实验对象及方法

双极器件中, 辐射产生的界面陷阱和氧化物陷阱电荷对器件电参数的影响是非线性的, 因此其辐射感生产物不容易分离. 为了研究实验机理, 所用实验样品为便于界面陷阱和氧化物陷阱电荷分离的栅控横向 PNP 双极晶体管 (gated-lateral PNP transistors, GLPNP), 其二维结构如图 1 所示. 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, 钝化层为二氧化硅, 采用陶瓷封装, 基区宽度为 12 μm.

栅控晶体管的辐射感生产物可以用栅扫描法分离, 具体方法是在 GLPNP 晶体管栅极加扫描电压, 使基区靠近 SiO₂ 表面从平带逐渐过渡到耗尽, 再到反型, 在这个过程中测量基极电流. 基极电流最大值的变化与界面陷阱的平均密度变化量 (ΔN_{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密度变化量 (ΔN_{ot}) 成正比 [17]. ΔN_{it} 和 ΔN_{ot} 可通过下式计算 [18]:

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

$$\Delta N_{ot} = C_{ox} \Delta V_{peak} / q, \quad (2)$$

其中 ΔI_{B-peak} 为辐照前后基极电流最大值的变化量; ΔV_{peak} 是辐照前后基极电流最大值对应栅极电压的变化量; V_{EB} 为发射结电压; n_i 为 Si 半导体本征载流子浓度; S_{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; σ 为载流子复合截面; C_{ox} 是单位面积上的栅电容; q , k , T 分别为电子电荷量、玻尔兹曼常数和绝对温度.

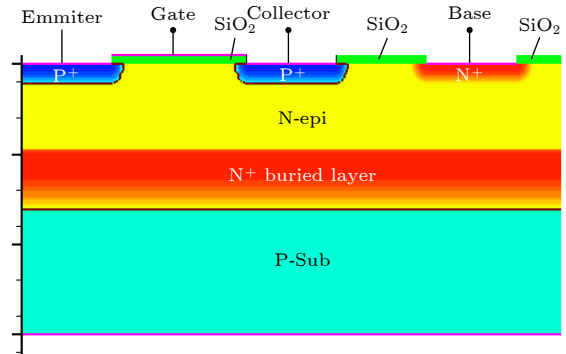


图 1 栅控横向 PNP 双极晶体管二维结构示意图

Fig. 1. Two-dimensional cross section of the gated-lateral PNP transistors.

为了对比氢气对不同状态的栅控晶体管特性的影响, 分别进行了两个实验. 实验 1 是为了观察氢气对器件辐照前和辐照过程中的影响, 其方案为: 选取 10 只 GLPNP 晶体管, 其中 5 只开盖后在充满 100% H₂ 的真空容器中浸泡 60 h, 在浸泡前与浸泡后分别对样品进行测试, 取出后与另外 5 只未开盖的 GLPNP 晶体管一起在钴源上以 5 rad(Si)/s 的剂量率辐照至 50 krad(Si), 在不同的总剂量点取出进行离线测试. 实验 2 是为了观察氢气对辐照后的晶体管特性的影响, 其方案是选取 10 只 GLPNP 晶体管, 在钴源上以 50 rad(Si)/s 的剂量率辐照 100 krad(Si). 然后将器件分为两组, 第一组 5 只器件开盖后放入充满 100% H₂ 的真空容器中退火, 另外一组 5 只器件在空气中退火, 两组器件的退火温度条件都是室温 20 °C, 在不同时间点对器件的电参数进行测量.

辐照和退火过程中所有器件管脚短接, 参数测试采用离线测试, 测试参数主要为器件在共射极时的基极、集电极电流曲线和栅扫描曲线. 共射极偏置时的基极、集电极电流测试条件为: 发射极电压 $V_E = 2$ V, 集电极电压 $V_C = 0$ V, 栅极浮空, 基极电压 V_B 从 2 V 扫描至 1.0 V. 栅扫描曲线测试条件为: $V_C = V_B = 0$ V, $V_E = 0.45$ V, 栅极电压 V_G 从 10 V 扫描至 -50 V, 测试时温度均为室温 20 °C.

3 实验结果

3.1 氢气氛围中浸泡后辐照实验

分别在氢气中浸泡前和浸泡后对器件电参数进行了测试, 结果显示氢气浸泡对未辐照的双极晶体管特性没有影响. 图 2 是在氢气浸泡 60 h 后取出辐照与未浸泡直接辐照的晶体管归一化放大倍数 (β/β_0) 随总剂量的变化曲线. 可以看出, 随辐照总剂量增加, 晶体管放大倍数减小, 说明辐照损伤增大. 在辐照后每一个总剂量点下, 氢气中浸泡的器件放大倍数要小于未浸泡器件, 即氢气浸泡后会使得栅控晶体管辐照损伤增强, 这也与国内外文献中报道的实验现象一致.

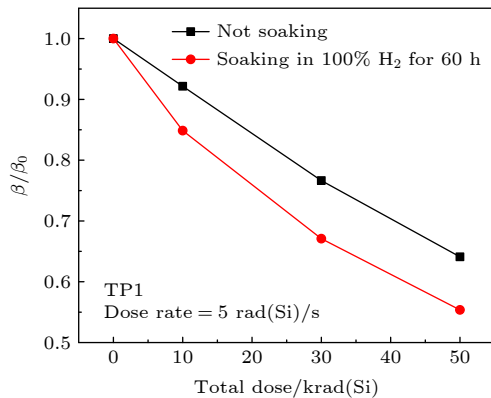


图 2 氢气浸泡后与未浸泡条件下归一化的晶体管放大倍数随辐照总剂量的变化

Fig. 2. Comparison of β/β_0 of transistors with/without soaking in 100% H₂ under γ -ray irradiated.

GLPNP 晶体管放大倍数的减小是由基极电流增大导致的, 而基区上方 Si/SiO₂ 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^[5]. 因此为了研究氢气进入晶体管中使辐照损伤增强的机理, 需要分离 GLPNP 中的界面陷阱和氧化物陷阱电荷. 图 3 是测量得到的氢气浸泡与

未浸泡器件的栅扫描曲线随总剂量的变化. 可以看出, 氢气浸泡后辐照对栅控晶体管栅扫描曲线影响很大, 尤其是峰值大小. 同一总剂量时, 氢气浸泡后的器件栅扫描曲线峰值要远大于未浸泡器件. 图 4 是利用栅扫描曲线和 (1) 式、(2) 式分离出的界面陷阱和氧化物陷阱电荷面密度随总剂量的变化曲线, 其中每条曲线均是 5 只器件的平均值. 可以看出, 随着总剂量增加, 辐照产生的界面陷阱和氧化物陷阱面密度都增大, 对应的晶体管损伤现象是基极电流增大, 放大倍数减小. 对比氢气中浸泡与未浸泡器件, 发现氢气浸泡后辐照产生的界面陷阱与未浸泡器件相比增多, 但氧化物陷阱电荷减少. 而对于 GLPNP 器件, 界面陷阱对基极电流的影响占主导^[19], 并且界面陷阱增加量要大于氧化物陷阱电荷的减少, 因此, 氢气浸泡后器件的辐照损伤是增强的.

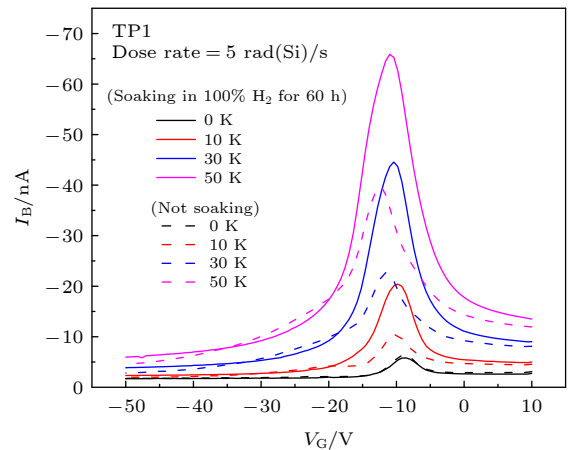


图 3 氢气浸泡后与未浸泡条件下, 不同总剂量时的晶体管栅扫描曲线

Fig. 3. Gate sweep results from experiments with/without soaking in 100% H₂ under γ -ray irradiated.

3.2 辐照后氢气氛围中退火实验

氢气氛围中退火实验是器件辐照结束后分别在氢气中和空气中退火, 对比退火参数的变化. 图 5(a) 和图 5(b) 是两组栅控晶体管辐照前、辐照至 100 krad(Si) 后分别在空气中和氢气中退火不同时间后的栅扫描曲线. 可以看出, 图 5(a) 中晶体管辐照后与辐照前相比栅扫描曲线峰值变化很大, 但在空气中退火不同时间几乎没有变化. 而图 5(b) 中晶体管栅扫描曲线不止在辐照前后变化明显, 而且在氢气中退火过程中栅扫描曲线峰值显著增大, 说明氢气中退火会使栅控晶体管损伤增强.

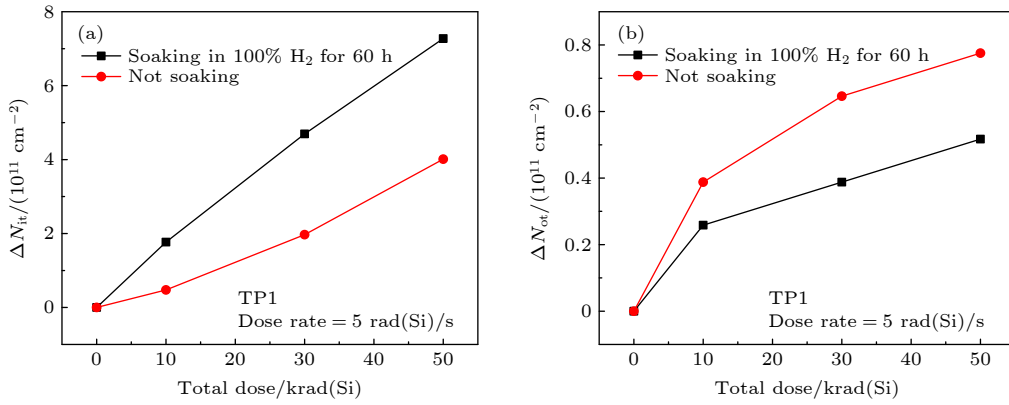


图 4 氢气浸泡后与未浸泡条件下辐射感生产物面密度随总剂量的变化 (a) 界面陷阱; (b) 氧化物陷阱电荷

Fig. 4. Radiation-induced increases in (a) interface traps and (b) oxide trapped charge with/without soaking in 100% H₂ under γ -ray irradiated.

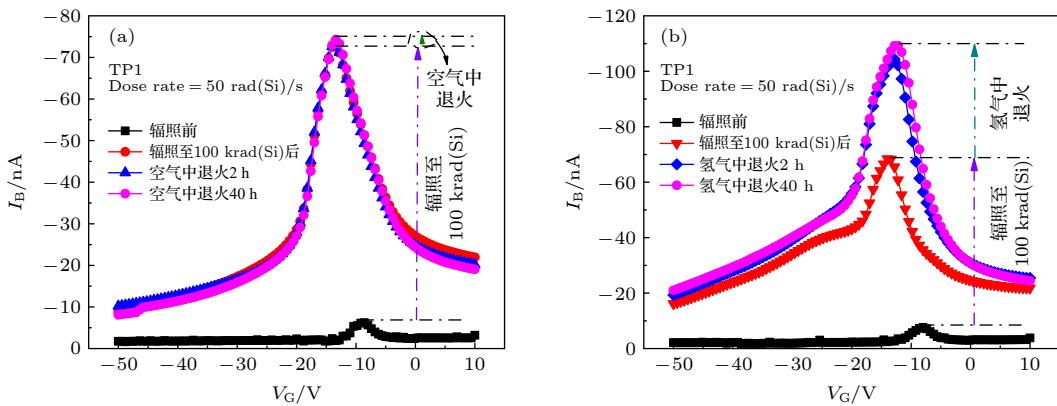


图 5 辐照前、辐照后、以及不同条件下退火后的晶体管栅扫描曲线 (a) 空气中退火; (b) 氢气中退火

Fig. 5. Gate sweep results of pre-irradiation, after-irradiation and annealing: (a) In air; (b) in H₂.

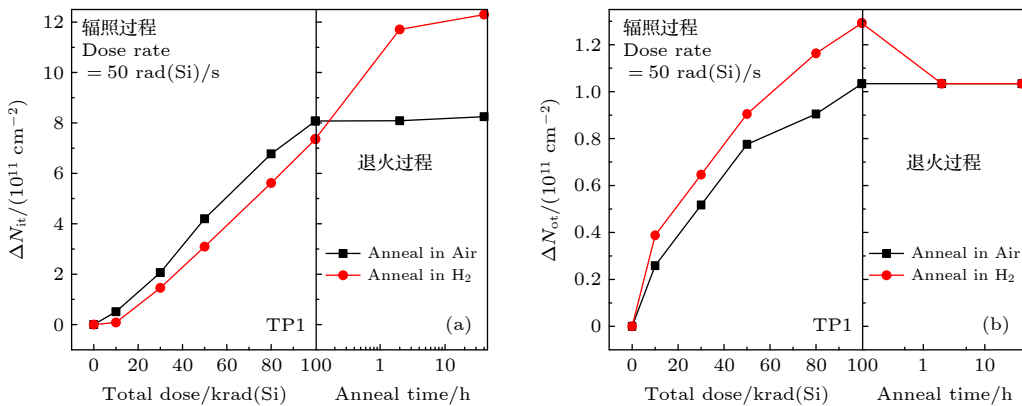


图 6 辐射感生产物随总剂量和不同条件下退火时间的变化 (a) 界面陷阱; (b) 氧化物陷阱电荷

Fig. 6. Radiation-induced increases in (a) interface traps and (b) oxide trapped charge under annealing in air or 100% H₂ for 40 hours.

图 6 是利用栅扫描曲线和 (1) 式、(2) 式分离出的 GLPNP 基区 Si/SiO₂ 界面附近的界面陷阱和氧化层陷阱电荷面密度随总剂量和退火时间的变化曲线。可以看出, 空气中退火的器件界面陷阱

与氧化物陷阱电荷面密度与刚辐照完相比变化不大, 但氢气中退火的器件与刚辐照完相比, 界面陷阱显著增多, 氧化物陷阱电荷减少。

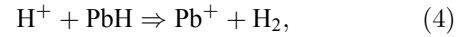
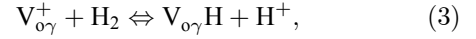
4 物理机理分析与仿真

双极器件氧化层中的氧化物陷阱电荷主要是界面附近的 $V_{O\gamma}$ 型氧空位俘获空穴形成的深能级陷阱电荷. 而界面陷阱是辐照或其他过程使氧化层中产生 H^+ , H^+ 运输到 Si/SiO₂ 界面附近与界面处的弱 Si—H 键反应, 使 Si—H 键断裂, 形成一个带正电的三价硅或缺陷 [20], 因此 H^+ 的产生是使界面陷阱增多的重要因素. 而氢气浸泡后器件辐照损伤增强就是因为氢气进入氧化层后在辐照过程中会产生更多的 H^+ , 从而产生更多界面陷阱. 但是目前对氢气在氧化层中产生 H^+ 的机理还没有达成一致认识.

氢气浸泡后再辐照实验中, 辐照之前氢气进入对器件常规性能没有影响, 但氢气进入后再辐照会使得界面陷阱增多, 氧化物陷阱电荷减少, 使器件辐照损伤增强. 氢气氛围中退火实验中, 栅控晶体管辐照结束后放入氢气中退火会使得界面陷阱快速生长, 但氧化物陷阱电荷减少. 对比两个实验可以发现, 在辐照前、辐照中、辐照后氢气进入晶体管所表现出的变化是不同的, 辐照前氢气进入并不会使晶体管性能发生改变, 但辐照过程中和辐照后氢气进入会使得晶体管性能恶化, 界面陷阱增多、氧化物陷阱电荷减少. 区别是器件辐照之前, 氧化层中界面陷阱和氧化物陷阱电荷很少, 但辐照中或者辐照后氧化层中有大量的界面陷阱和氧化物陷阱电荷. 因此, 氢气浸泡导致栅控晶体管辐照损伤增强的机理可以由图 7 来解释, 图 7(a) 中是辐照前氢气进入器件后大多数以分子状态存在, 氧化层中氧空位也呈电中性; 辐照过程中产生的空穴有一部分会被 $V_{O\gamma}$ 型氧空位俘获产生深能级的 $V_{O\gamma}^+$ 陷阱电荷, 当氧化层中产生的氧化物陷阱电荷足够多

时, 氢气会与之发生裂解反应, 生成含 H 缺陷并释放 H^+ , 如图 7(b) 所示; 含 H 缺陷再俘获空穴也会有一定概率放出 H^+ , H^+ 运输到界面使 Si—H 键断裂从而产生界面陷阱, 如图 7(c) 所示. 如果氢气进入氧化层主要产生含 H 缺陷, 则氢气氛围中退火实验并不会表现出明显的损伤增强现象.

氢气与氧化物陷阱电荷的反应及界面陷阱生长反应可以表示为



其中, $V_{O\gamma}^+$ 是辐照产生的深能级陷阱电荷, $V_{O\gamma}H$ 是产生的单 H 缺陷, PbH 是界面 Si—H 键, Pb^+ 则为界面陷阱.

为了进一步验证 (3) 式和 (4) 式的正确性, 本文在文献 [21] 中所提低剂量辐射损伤增强效应数值模型基础之上, 又考虑了氢气相关反应和不同种类的含 H 缺陷对 H^+ 的贡献, 完善了数值模型. 氧化层中 H^+ 的产生机制除了反应 (1) 之外, 单 H 缺陷 (即反应 (3) 产物 $V_{O\gamma}H$) 和双 H 缺陷 ($V_{O\gamma}H_2$) 俘获空穴后也会释放 H^+ , 它们的相关反应和对应的反应势能如下式所示 [22]:

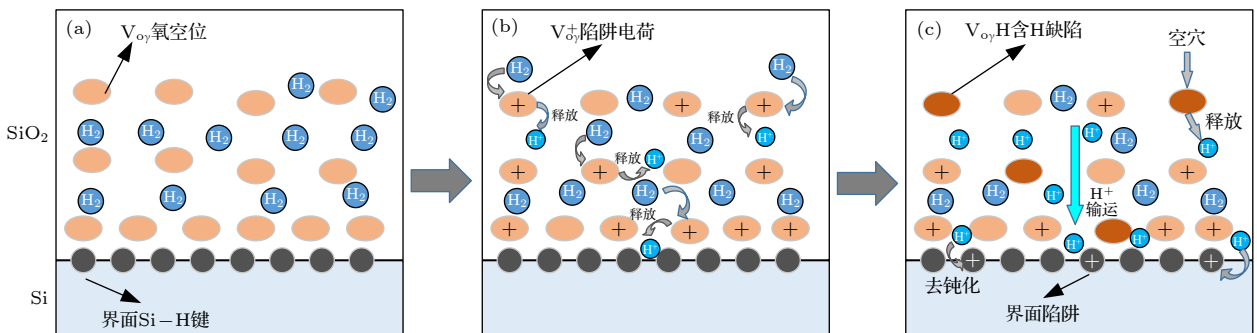
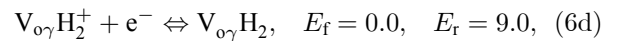
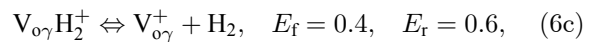
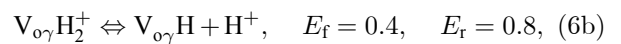
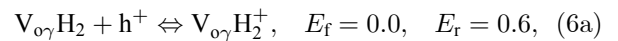
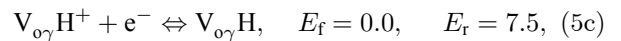
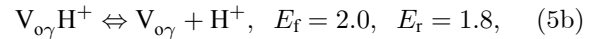
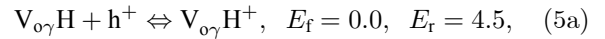


图 7 氢气氛围中浸泡双极器件损伤增强机理示意图

Fig. 7. Schematic diagram of the damage mechanism of bipolar transistors in the hydrogen environment.

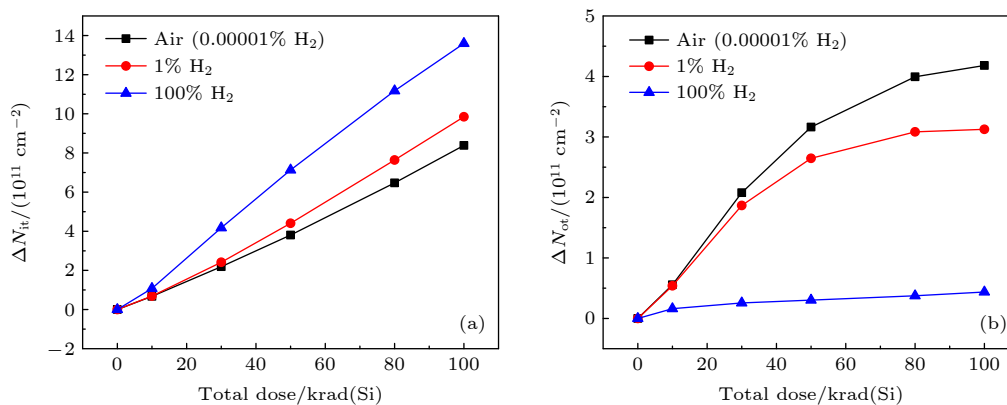


图 8 仿真得到的不同氢气浓度下辐照感生面密度随总剂量变化 (a) 界面陷阱; (b) 氧化物陷阱电荷

Fig. 8. Radiation-induced increases in (a) interface traps and (b) oxide trapped charge with different H₂ density by simulation.

其中 E_f 和 E_r 分别为该反应的正向和逆向反应势能, 单位为 eV, 利用反应势能可以计算出相应的反应系数. 数值模型详细的参数和建模过程已在之前的工作中作了介绍^[21], 其核心是建立电子、空穴、H⁺以及 H₂ 分子的连续性方程和空穴陷阱电荷、界面陷阱等的动态方程, 用反应系数与反应物浓度的乘积表示每种粒子的产生与消失项, 加入辐照产生电子空穴对项和初始复合项, 再建立氧化层中电场分布的泊松方程就可以仿真不同总剂量、氢气浓度或者其他参数变化时的界面陷阱和氧化物陷阱电荷的面密度变化.

图 8 所示是利用数值模型仿真得到的不同氢气浓度条件下界面陷阱和氧化物陷阱电荷面密度随总剂量的变化曲线. 其中 0.00001% H₂ 浓度代表的是空气中的氢气浓度, 即没有经过氢气浸泡的器件, 100% H₂ 浓度表示的是上述实验中氢气浸泡后的器件, 另外选取了 1% H₂ 浓度作为对比. 从图 8 可以看出, 界面陷阱和氧化物陷阱电荷面密度随总剂量的变化趋势与实验结果一致, 不同氢气浓度对应的曲线趋势及数量级均与实验结果一致. 并且随着氧化层中氢气浓度升高, 同一总剂量下的界面陷阱面密度增大, 而氧化物陷阱电荷面密度减小, 这也与氢气浸泡实验中的现象一致. 说明了本数值模型可以用来仿真解释双极器件中辐照损伤规律, 也进一步说明了所提物理机理的正确性.

5 结论

本文通过对栅控横向 PNP 晶体管进行氢气中浸泡后辐照实验和辐照后氢气氛围中退火实验, 给出了氢气使双极器件辐照损伤增强的物理机理, 并

结合数值仿真进行了验证. 结果表明, 氢气浸泡后辐照会使得界面陷阱增多, 氧化物陷阱电荷减少; 辐照后在氢氛围中退火也会使得界面陷阱快速生长, 氧化物陷阱电荷减少. 但由于界面陷阱的增加和影响占主导, 氢气进入会使栅控晶体管辐照损伤增强. 因此, 双极器件氢氛围中辐照的物理机理是氢气会和辐照产生的深能级氧化物陷阱电荷反应, 释放出 H⁺, H⁺ 运输至界面附近促进界面陷阱的产生. 基于该物理过程, 建立了包含氢气相关反应和其他 H⁺ 产生机制的低剂量辐射损伤增强效应数值模型, 仿真结果在数量级和趋势上与实验规律相符, 进一步明确了氢气对双极器件辐照损伤规律的影响机制, 研究成果为双极器件总剂量及 ELDRS 效应研究提供了参考.

参考文献

- [1] Seiler J E, Pease R L, Platteter D G, Maher M C, Dunham G W, Pease R L, Maher M C, Shaneyfelt M R 2004 *IEEE Radiation Effects Data Workshop Atlanta, USA, July 22, 2004* p42
- [2] Shaneyfelt M R, Pease R L, Schwank J R, Maher M C, Hash G L, Fleetwood D M, Dodd P E, Reber C A 2002 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **49** 3171
- [3] Shaneyfelt M R, Pease R L, Maher M C, Schwank J R, Gupta S, Dodd P E, Riewe L C 2003 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **50** 1784
- [4] Adell P C, Rax B, Esqueda I S, Barnaby H J 2015 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **62** 2476
- [5] Pease R L, Adell P C, Rax B G, Chen X J, Barnaby H J, Holbert K E, Hjalmarson H P 2008 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **55** 3169
- [6] Pease R L, Platteter D G, Dunham G W, Seiler J E, Adell P C, Barnaby H J, Chen J 2007 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **54** 2168
- [7] Li X L, Lu W, Wang X, Guo Q, He C F, Sun J, Yu X, Liu M H, Jia J C, Yao S, Wei X Y 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 096101 (in Chinese) [李小龙, 陆妩, 王信, 郭旗, 何承发, 孙静, 于新, 刘默寒, 贾金成, 姚帅, 魏昕宇 2018 *物理学报* **67** 096101]

- [8] Boch J, Velo Y G, Saigne F, Roche N J H, Schrimpf R D, Vaile J R, Dusseau L, Chatry C, Lorfevre E, Ecoffet R, Touboul A D 2009 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **56** 3347
- [9] Pease R L, Adell P C, Rax B, McClure S, Barnaby H J, Kruckmeyer K, Triggs B 2010 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **57** 3419
- [10] Zhao J Y, Yang J Q, Dong L, Li X J 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 068501 (in Chinese) [赵金宇, 杨剑群, 董磊, 李兴冀 2019 物理学报 **68** 068501]
- [11] Adell P C, Pease R L, Barnaby H J, Rax B, Chen X J, McClure S S 2009 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **56** 3326
- [12] Chen X J, Barnaby H J, Adell P, Pease, R L, Vermeire B, Holbert K E 2009 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **56** 3196
- [13] Chen X J, Barnaby H J, Vermeire B, Holbert K, Wright D, Pease R L, Dunham G, Platteter D G, Seiler J, McClure S, Adell P 2007 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **54** 1913
- [14] Batyrev I G, Hughart D, Durand R, Bounasser M, Tuttle B R, Fleetwood D M, Schrimpf R D, Rashkeev S N, Dunham G W, Law M, Pantelides S T 2008 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **55** 3039
- [15] Hjalmarson H P, Pease R L, Witczak S C, Shaneyfelt M R, Schwank J R, Edwards A H, Hembree C E, Mattsson T R 2003 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **50** 1901
- [16] Hjalmarson H P, Pease R L, Devine R A B 2008 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **55** 3009
- [17] Xi S B, Lu W, Ren D Y, Zhou D, Wen L, Sun J, Wu X 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 236103 (in Chinese) [席善斌, 陆妩, 任迪远, 周东, 文林, 孙静, 吴雪 2012 物理学报 **61** 236103]
- [18] Ma W Y, Wang Z K, Lu W, Xi S B, Guo Q, He C F, Wang X, Liu M H, Jiang K 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 116101 (in Chinese) [马武英, 王志宽, 陆妩, 席善斌, 郭旗, 何承发, 王信, 刘默寒, 姜柯 2014 物理学报 **63** 116101]
- [19] Yao Z B 2014 *Ph. D. Dissertation* (Xi' an: Northwest Institute of Nuclear Technology) (in Chinese) [姚志斌 2014 博士学位论文 (西安: 西北核技术研究所)]
- [20] Rashkeev S N, Fleetwood D M, Schrimpf R D, Pantelides S T 2001 *Phys. Rev. Lett.* **87** 165501
- [21] Yao Z B, Chen W, He B P, Ma W Y, Sheng J K, Liu M B, Wang Z J, Jin J S, Zhang S 2018 *Atom. Energ. Sci. Technol.* **52** 1144 (in Chinese) [姚志斌, 陈伟, 何宝平, 马武英, 盛江坤, 刘敏波, 王祖军, 金军山, 张帅 2018 原子能科学技术 **52** 1144]
- [22] Rowsey N L, Law M E, Schrimpf R D, Fleetwood D M, Tuttle B R, Pantelides S T 2011 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **58** 2937

Radiation mechanism of gate-controlled lateral PNP bipolar transistors in the hydrogen environment*

Gou Shi-Long Ma Wu-Ying Yao Zhi-Bin[†] He Bao-Ping
 Sheng Jiang-Kun Xue Yuan-Yuan Pan Chen

(State Key Laboratory of Intense Pulsed Radiation Simulation and Effect, Northwest

Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

(Received 23 February 2021; revised manuscript received 15 March 2021)

Abstract

Hydrogen plays a crucial role in realizing modern silicon devices. Molecular hydrogen may be found in processes of integrated circuit fabrication and packaging, such as wafer cleaning procedure, film depositions, high- and low-temperature anneal and die attachment by forming gas. It has been shown that hydrogen has strong effects on the total dose and dose rate response to bipolar devices. In order to study the relationship between hydrogen and radiation-induced products, we preform two experiments by using gate-lateral PNP transistors. In the first experiment, one set of devices is soaked in 100% hydrogen gas for 60 h and another set is not soaked, they are together irradiated at 5 rad(Si)/s to a total dose of 50 krad(Si). In the second experiment, devices are irradiated at 50 rad(Si)/s to 100 krad(Si), and then one group is annealed in 100% hydrogen gas and the other is annealed in the air for 40 h at the same temperature. The results show that the damage to devices which are soaked in hydrogen before irradiation is stronger than the devices that are not soaked, the anneal characteristics of devices in hydrogen gas are also changed more greatly than in the air. So the hydrogen can enhance the radiation and anneal damage to bipolar transistors. Using the gate-sweep technique, the radiation-induced products are separated and show that the hydrogen that enters into the transistor will cause the interface traps to increase and oxide trapped charge to decrease. The main reason is that the hydrogen can react with the oxide trapped charge to produce protons which can transport to the Si/SiO₂ interface, and then react with H-passivized bond to create interface trap. Based on the reaction mechanism presented in our work, a numerical model of enhanced low dose rate sensitivity including molecular hydrogen reaction and proton generation mechanism is established. The simulation results for the density of interface traps and oxide trapped charge show a trend consistent with the experimental data, which verifies the correctness of the damage mechanism. This research provides not only the basis of the study of damage mechanism of bipolar devices, but also the powerful support for hydrogen soaking irradiation acceleration method.

Keywords: gate-controlled transistor, hydrogen, enhanced low dose rate sensitivity, interface traps, oxide trapped charge

PACS: 61.80.-x, 85.30.Pq, 87.53.-j, 61.80.Ed

DOI: [10.7498/aps.70.20210351](https://doi.org/10.7498/aps.70.20210351)

* Project supported by the State Key Laboratory of Intense Pulsed Radiation Simulation and Effect, China (Grant No. SKLIPR1802Z).

[†] Corresponding author. E-mail: yaozhibin@nint.ac.cn