物理学报 Acta Physica Sinica

Chinese Physical Society

Institute of Physics, CAS

双极型晶体管总剂量效应的统计特性

李顺　宋宇　周航　代刚　张健

Statistical characteristics of total ionizing dose effects of bipolar transistors

Li Shun　Song Yu　Zhou Hang　Dai Gang　Zhang Jian

引用信息 Citation: Acta Physica Sinica, 70, 136102 (2021)　DOI: 10.7498/aps.70.20201835

在线阅读 View online: https://doi.org/10.7498/aps.70.20201835

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

铁电存储器60Co γ射线及电子总剂量效应研究

Total ionizing dose effect of ferroelectric random access memory under Co-60 gamma rays and electrons

物理学报. 2018, 67(16): 166101　https://doi.org/10.7498/aps.67.20180829

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

预加温处理对双极晶体管过剩基极电流理想因子的影响机制

Effects of pre-irradiated thermal treatment on ideal factor of excess base current in bipolar transistors

物理学报. 2020, 69(1): 018502　https://doi.org/10.7498/aps.69.20191151

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 -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

新型绝缘体上硅静态随机存储器单元总剂量效应

Total ionizing dose effects on innovative silicon-on-insulator static random access memory cell

物理学报. 2019, 68(16): 168501　https://doi.org/10.7498/aps.68.20190405

双极型晶体管总剂量效应的统计特性*

李顺[1)4)] 宋宇[2)†] 周航[1)4)] 代刚[1)4)] 张健[3)‡]

1) (中国工程物理研究院微系统与太赫兹研究中心, 成都 610200)

2) (内江师范学院物理与电子信息工程学院, 内江 641112)

3) (电子科技大学电子科学与工程学院, 成都 611731)

4) (中国工程物理研究院电子工程研究所, 绵阳 621000)

(2020 年 11 月 3 日收到; 2021 年 2 月 8 日收到修改稿)

双极型晶体管的总电离剂量辐照效应主要体现在基极电流 (I_B) 的退化, 其作用机理是电离辐射在 SiO_2 中及 Si/SiO_2 界面作用导致的氧化物陷阱电荷面密度 (N_{ot}) 和界面陷阱电荷面密度 (N_{it}) 的增长. 本文基于定制设计的栅控横向 PNP 晶体管, 开展了大样本、多剂量点的电离总剂量效应实验, 获得了双极型晶体管 I_B, N_{ot}, N_{it} 的分散性及其随总剂量变化的统计特性, 初步建立了晶体管损伤分散性与 N_{ot} 分散性的关联. 该研究成果可以有效支撑双极型电路辐射可靠性的机理研究与定量评估.

关键词: 双极晶体管, 总剂量效应, 统计特性, 关联

PACS: 61.80.Jh, 85.30.Pq, 42.88.+h, 78.40.Fy **DOI:** 10.7498/aps.70.20201835

1 引 言

由于半导体器件制造过程中存在材料的不一致性和工艺的波动性, 即便是同一厂商、同一批次的半导体器件, 其电学参数也具有样本间分散性 (sample-to-sample variability). 这种分散性可以通过统计特性描述. 半导体器件的分散性可分为自身因素导致的本征分散性 (intrinsic variability) 和外部因素导致的外在分散性 (extrinsic variability)[1]. 自身因素是由器件之间原子级差异造成的, 主要来源包括掺杂分布、边缘粗糙度和膜厚变化. 外在因素的主要来源包括工艺波动和不同位置、不同损耗、不同使用条件引起的器件性能波动等[1].

运算放大器等硅基双极型器件是电子产品中常用的关键元器件. 在卫星等空间应用条件下, 由于受到电离辐射, 会产生总电离剂量 (total ionization dose, TID) 效应. 由于上述自身因素和外部因素的影响, 双极器件的总剂量效应也会呈现一定的分散性. 文献 [2—10] 研究了不同制造商、不同批次、不同晶圆、不同芯片、不同晶体管导致的双极器件总剂量效应的分散性. 文献 [3] 对总剂量辐照下电压比较器 LM111、LM211 和 LM311 的输入偏置电流的分散性进行了研究, 发现不同制造厂家的效应差距可达 100 倍之多. 文献 [5] 研究了 108 A 运算放大器及其单管的批次间、晶圆间、芯片间分散性, 发现可以通过测试更低层级器件获得运算放大器的良率. 文献 [6, 7] 对国家半导体 (National Semiconductor) 公司多种型号放大器的总剂量效应分散性进行了研究, 发现器件间分散性、晶圆间分散性显著大于沟道间分散性. 文

* 科学挑战计划项目 (批准号: TZ2016003-1) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: kwungyusung@gmail.com

‡ 通信作者. E-mail: jianzhang@uestc.edu.cn

© 2021 中国物理学会 Chinese Physical Society

献 [8] 研究了多种放大器 (LM111/LM124/OP-27/OP-484/RH1014/RH1056) 批次间分散性受中子辐射的影响. 我们最近的研究表明, NPN 和 PNP 型双极器件的中子-伽马辐照协同效应 (irradiation synergistic effect) 具有显著的样本间分散性, 该分散性支撑实现了协同效应对初始位移损伤依赖性的自洽建模[11,12]. 双极型器件的基本组成单元是双极型晶体管, 其辐射分散性是器件统计特性的基础, 但当前研究尚未深入到晶体管层次, 对晶体管总剂量效应的统计特性及其来源缺乏清晰的认识.

本文基于双极晶体管总剂量效应的微观机理, 设计并制备了用于辐射敏感参数测试的栅控横向 PNP 晶体管 (gated lateral PNP, GLPNP), 开展了大样本晶体管的多剂量点总剂量辐照效应实验和测试, 研究了晶体管基极电流 (base current, $I_{\rm B}$)、氧化物陷阱电荷面密度 ($N_{\rm ot}$)、界面态陷阱电荷面密度 ($N_{\rm it}$) 在总剂量辐射下的分散性及变化. 研究获得了晶体管及材料层级的总剂量效应统计特性, 分析了总剂量效应分散性的晶体管-材料关联, 从电离缺陷的微观角度解释了晶体管总剂量效应分散性的物理起源.

2 实验设计

双极型晶体管总剂量效应主要体现在基极电流 ($I_{\rm B}$) 的退化, 其微观作用机理为电离辐射在 SiO_2 材料中和 Si/SiO_2 界面上作用积累的氧化物陷阱电荷面密度和界面态陷阱电荷面密度的变化[13,14]. 为了研究晶体管 $I_{\rm B}$ 总剂量效应分散性的微观起源, 我们设计并制备了 GLPNP 晶体管结构. GLPNP 的结构和参数如图 1 和表 1 所示. 其主要结构为横向 PNP晶体管, 并在基区上覆盖一个金属电极, 从而可以施加栅极电压. 通过改变栅极电压调节基区表面势, 可以使得表面实现反型、积累、耗尽等状态, 从而实现 P 型金属氧化物半导体场效应晶体管 (PMOSFET) 的栅控特性. 通过该栅控结构的栅扫描 (gate sweep curve, GS) 曲线和亚阈值扫描 (sub-threshold sweep, DS) 曲线的测试可获得与 $I_{\rm B}$ 对应的 $N_{\rm ot}$ 和 $N_{\rm it}$ 的大小[15–17], 从而探索晶体管基极电流分散性和缺陷面密度分散性的关联.

选取同一批次的 GLPNP 共 40 只, 在 0.6 krad (Si), 2.6 krad(Si), 4.0 krad(Si), 7.4 krad(Si), 10.8 krad(Si) 等 5 个总剂量点进行序贯电离辐射实验. 辐射源为北京大学的 ^{60}Co 装置, 中心剂量率大于 300 rad(Si)/s. 为了保证 40 个样本试验剂量率的均匀性, 将每 4 只单管封装在一起 (双排直插), 并将 10 个封装叠成三排嵌入辐照板内, 在离辐射源较远的位置进行辐照, 剂量率为 3.4 rad(Si)/s. 此时, 40 只单管几乎分布在以辐射源为中心的圆弧上, 从而保证剂量率的均匀性. 实验过程中器件所有管脚空载, 辐照到上述剂量点后进行离线测试. 通过测试 Gummel 特性曲线 (即基极、集电极零偏, 发射结施加正偏扫描电压) 获得 GLPNP 基极电流大小随基区-发射极电压 ($V_{\rm BE}$) 的变化规律, 读取 $V_{\rm BE}$ = 0.6 V 时基极电流数值, 记录为 $I_{\rm B}$. 辐射感生缺陷面密度 $N_{\rm ot}$ 与 $N_{\rm it}$ 的提取从 GS 和 DS 曲线上获得. GS 曲线的测试方法为固定发射结电压为 0.5 V, 集电极与基极均零偏, 栅极电压从 5 V 扫描到–40 V. 此时, GS 曲线上峰值电流对应的栅极电压为平带电压, 该电压在辐照前后的变化即为 $N_{\rm ot}$ 导致的栅压变化[17]. 由于在辐照过程中同时释放和湮灭质子, 质子处于准平衡状态, 其浓度在该测试结果中的比重很小, 可以忽略. DS 曲线即

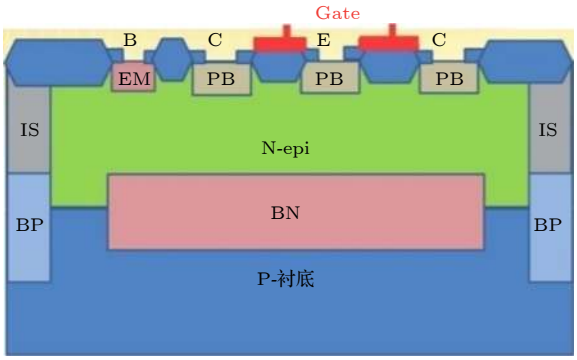

图 1 GLPNP 器件的结构示意图

Fig. 1. Structure of the GLPNP transistor.

表 1 GLPNP 的结构尺寸参数

Table 1. Structure parameters of the GLPNP transistor.

序号	结构	尺寸参数
1	发射极尺寸	直径 = 9 μm
2	基区尺寸	外内半径差12 μm 空心圆环
3	集电极尺寸	面积 = 1449.135 μm^2
4	发射极与集电极距离 (EC间距)	L = 12 μm
5	集电极与基区距离 (CB间距)	L = 14 μm

PMOSFET 对应的转移特性曲线. 固定发射结电压 1 V, 其余电极零偏, 栅压从 5 V 扫描到–40 V, 获得转移特性曲线. 从各个剂量点的转移特性曲线上提取阈值电压的变化值, 该差值即为 N_{ot} 和 N_{it} 共同导致的阈值电压漂移总量[15,16]. 该值减去前面求得的 N_{ot} 导致的平带电压漂移量, 可获得 N_{it} 导致的阈值电压漂移量, 即实现 N_{ot} 与 N_{it} 的分离测试. 辐照、测试的实验温度均为室温. 包含跳线在内, 完成一只器件的以上所有测试大约需要 60 s, 完成所有 40 只器件的所有测试的时间在一个小时以内. 这种测试符合 GJB548B/MIL-STD-883G 关于总剂量辐照实验的要求. 另外, 李兴冀等[18] 的研究结果表明 128 天的室温退火也仅造成很小的 N_{ot} 退火, 且不同于氧化物陷阱电荷, 界面陷阱在室温下不退火[19]. 因此, 不同样本间的不同测试时间间隔不会导致显著的样本间分散性.

3 实验结果与理论分析

3.1 基极电流的统计特性分析

实验获得的不同总剂量条件下 40 只 GLPNP 样本的基极电流的统计分布见图 2. 可以看到, 基极电流的分布是不对称的. 当总剂量较小时, 较多的样本分布在中值的右侧; 总剂量较大时, 较多的样本分布在中值的左侧. 对于 4.0 krad(Si) 的总剂量, 分布基本对称. 研究发现这些分布均满足对数正态分布 (lognormal distribution)[20], 其概率密度函数 (probability distribution function) 为

$$y(x)=\frac{A}{\sqrt{2\pi}\sigma x}\exp\left[-\frac{(\ln x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right], \tag{1}$$

其中, μ为中位数, σ为标准差, A 为归一化常数. 拟合曲线如图 2 中红线所示, 可见拟合度较高. 拟合获得的μ和σ分别画为图 3(a) 和图 3(b) 中的黑点. 我们也分析了辐照前基极电流的统计特性, 其大小满足高斯正态分布.

由图 2 可以看出, 不同总剂量条件下基极电流均满足对数正态分布, 但分布的具体参数随总剂量的增大发生了变化. 其中分布中位数μ随总剂量增大而单调增大, 初始阶段呈现亚线性增长趋势, 分布标准差σ随总剂量增大表现出振荡行为.

3.2 基极电流分散性的起源分析

以往的研究表明, 电离辐射造成的晶体管基极电流有两个分量[21,22], 一个是空间电荷区表面的复合电流, 一个是中性基区表面的复合电流. 前者起源于发射极-基极 (EB) 结空间电荷区表面 N_{it} 对载流子的复合作用, 表达式为[21,23]

$$\Delta I_{\text{R-SCR}}(\psi_s)=\Delta s\frac{qP_EV_T\pi n_i}{2E_m(n_s)}\exp\left(\frac{V_{EB}-I_ER_S}{2V_T}\right), \tag{2}$$

后者起源于中性基区表面的载流子复合作用, 其表达式为[22,23]

$$\Delta I_{\text{R-NBS}}(\psi_s)=\Delta s\frac{qP_EW_Bn_i^2}{2n_s(\psi_s)}\left[\exp\left(\frac{V_{EB}-I_ER_S}{V_T}\right)-1\right], \tag{3}$$

其中, $\Delta s\,(\text{s}^{-1})$ 是 N_{it} (cm^{-2}) 造成的表面复合速率[24,25]; P_E (cm) 是发射极周长; E_m (V/cm) 是 E-B 结空间电荷区的最大电场, 大小由表面电荷浓度 n_s (cm^{-2}) 决定; n_s 的大小由 N_{ot} (cm^{-2}) 唯一决定[22]; W_B (cm) 是发射极到集电极之间的宽度. 电离诱导基极复合电流是表面电势ψ_s的函数[23].

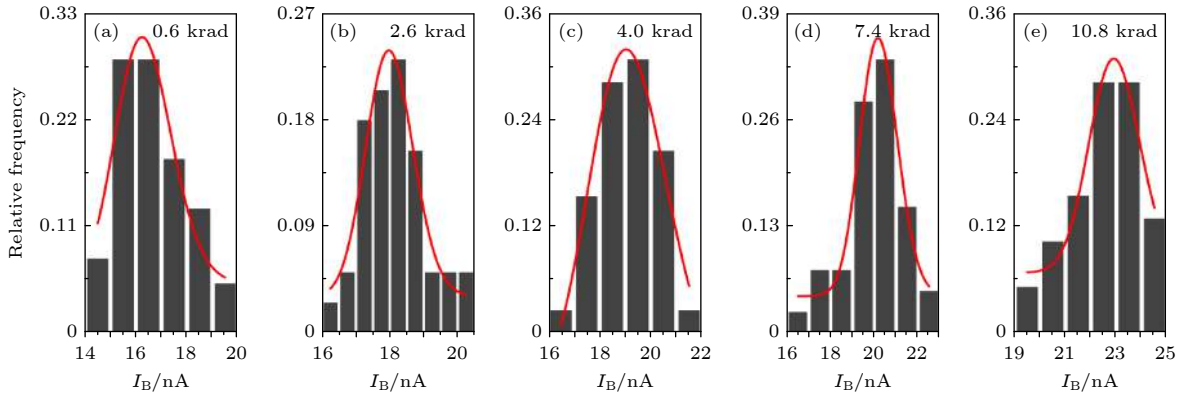

图 2 不同总剂量条件下 GLPNP 基极电流的分布特性

Fig. 2. Statistical characteristics of the base current of GLPNP under different total doses as indicated in each subfigure.

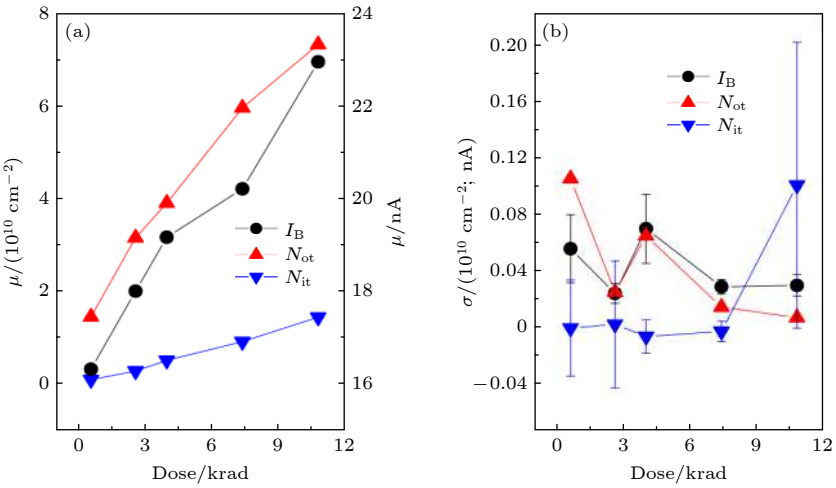

图 3 分布参数 (a) μ 和 (b) σ 随总剂量的变化规律

Fig. 3. Statistical parameters (a) μ and (b) σ as a function of the total dose.

从该模型可以看出, GLPNP 基极电流的总剂量效应分散性可以起源于多种因素. 电离缺陷方面, N_{ot} (决定 n_s 和 E_m) 和 N_{it} (决定 Δs) 可能由于氧化物和界面中缺陷前驱体初始浓度及分布的不同、氢分子浓度的不同[26], 表现出显著的分散性, 从而造成基极电流的统计特性; 器件结构和掺杂方面, 由于制备工艺, 基区掺杂浓度、基区宽度等可能存在样本间分散性, 也造成基极电流的样本间分散性和统计特性. 本工作重点关注电离缺陷的影响, 通过 GLPNP 测试获得 N_{ot} 和 N_{it} 的统计特性, 从而探索它们对 I_B 统计特性的贡献.

3.3 电离缺陷的统计特性及其与基极电流的关联分析

与图 2 中 I_B 对应的 N_{ot}, N_{it} 分布如图 4 和图 5 所示. 图 4 和图 5 中的 (a)—(e) 分别为不同总剂量条件下 40 只晶体管的实验结果, 注意图 5 中 N_{it} 的单位是 10^9 cm^{-2}, 不同于图 4 中 N_{ot} 的单位 (10^{10} cm^{-2}). 研究发现, N_{ot} 和 N_{it} 两类缺陷的面密度也满足对数正态分布, 随总剂量增大, N_{ot}, N_{it} 的对数正态分布形貌未发生变化, 但分布参数发生变化. 为方便对比, 刻画分布的中位数 μ 和标准差 σ 也画在图 3中, 见红点 (N_{ot}) 和蓝点 (N_{it}). 辐照前的 N_{it} 满足高斯正态分布, 由于所用样品电容过小, 无法获得辐照前 N_{ot} 的数值.

从图 3 可以观察到几个重要信息. 第一, N_{ot} 比 N_{it} 大若干倍, 表明该剂量率下 GLPNP 中的电离缺陷以氧化物陷阱电荷为主, 氧化物陷阱电荷向界面陷阱电荷的转化较少. 当剂量率下降时, N_{it} 所占比重会逐渐增大, 甚至超过 N_{ot} 的比重[27]. 第二, 两类缺陷面密度的统计中位数 μ 均随总剂量增大而单调增大. 不同的是, N_{ot} 中位数的增长是亚线

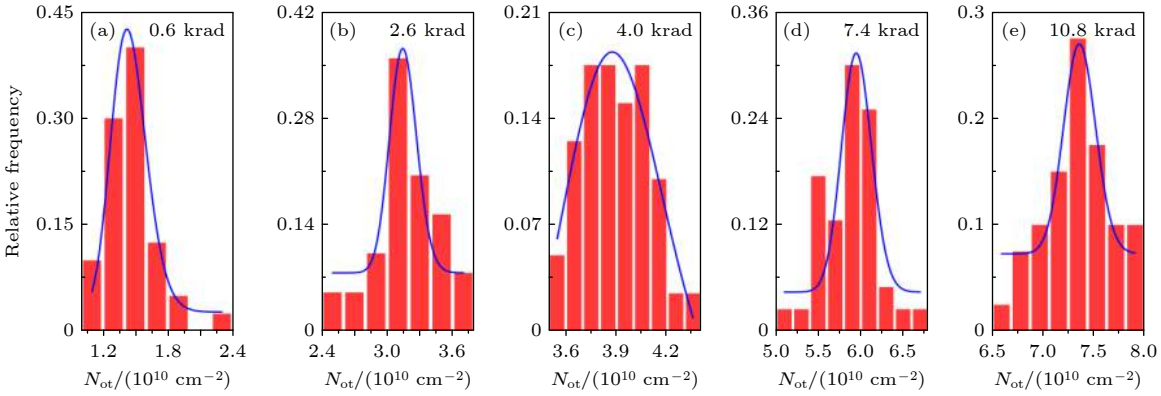

图 4 不同总剂量条件下 N_{ot} 的分布特性

Fig. 4. Statistical characteristics of N_{ot} under different total dose irradiations.

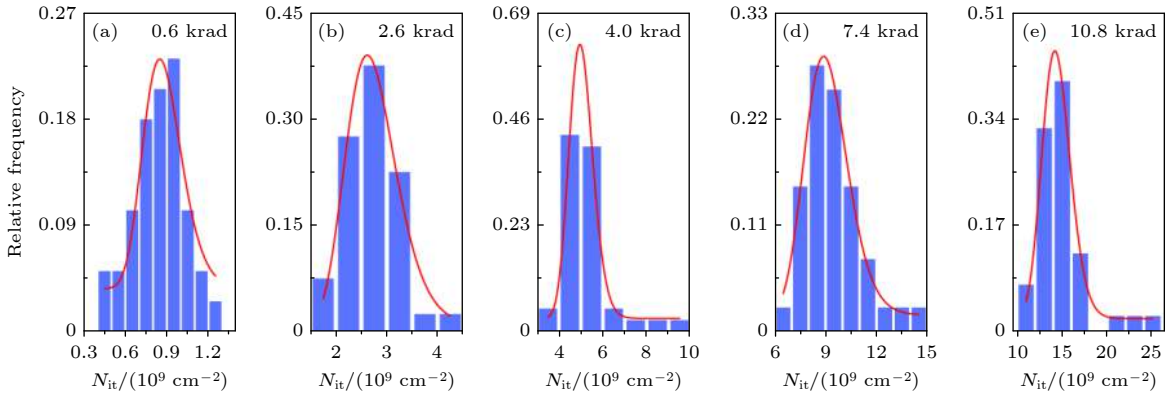

图 5 不同总剂量条件下 N_{it} 分布特性

Fig. 5. Statistical characteristics of N_{it} under different total dose irradiations.

性的, N_{it} 中位数的增长表现出轻微的超线性. 两种不同的非线性起源于非晶二氧化硅中 N_{ot} 产生与 N_{ot}-N_{it} 转化两种机制的相互作用[27]. 该作用造成一个非单调的干涉项. 在 N_{ot} 中该项为正, 导致 N_{ot} 呈现出对总剂量的亚线性依赖; 在 N_{it} 中该项为负, 使得 N_{it} 表现出对总剂量的超线性依赖[27]. 第三, 两类缺陷的统计标准差 σ 随总剂量变化呈现非常不同的特性. N_{ot} 的统计标准差随总剂量增大而振荡, 而 N_{it} 的统计标准差随总剂量增大几乎单调增大.

可以通过对比 I_B, N_{ot}, N_{it} 的统计特性来分析晶体管基极电流分散性与氧化物电离缺陷分散性之间的关联. 在图 3 中可以清楚地看到, 统计中位数方面, I_B 对总剂量的亚线性依赖与 N_{ot} 的依赖性相同, 而与 N_{it} 的超线性依赖不相同. 同时, 统计标准差方面, I_B 随总剂量振荡的行为与 N_{ot} 的行为非常相似, 而非常不同于 N_{it} 的单调增长行为. 这些强烈关联的行为意味着在本文研究的对象和剂量率条件下, I_B 主要起源于 N_{ot} 的贡献, 因而 I_B 的分散性主要由 N_{ot} 的分散性决定. N_{ot} 的大小主要由缺陷前驱体的浓度决定, 因而可以通过控制缺陷前驱体浓度的分散性来保证 I_B 的样本间均一性, 从而生产高质量的双极器件.

4 结 论

本文对双极型晶体管总剂量效应的统计特性进行了研究, 基于同批次、多样本定制栅控晶体管的多总剂量点伽马辐照实验获得了器件基极电流大小、氧化物陷阱电荷面密度、界面陷阱电荷面密度的对数正态分布特性, 以及统计中位数和标准差随总剂量增长的变化规律. 研究发现, 基极电流总剂量效应的统计特性与氧化物陷阱电荷的统计特性存在很强的相似性和关联, 而与界面陷阱电荷的统计特性非常不同, 意味着在本文研究的对象和剂量率条件下, I_B 主要起源于 N_{ot} 的贡献, 因而 I_B 的分散性主要由 N_{ot} 的分散性决定. 该研究成果将微电子器件辐射分散性的研究深入到晶体管和材料层次, 可以有效支撑基于物理模型的辐射可靠性机理研究与定量评估.

参考文献

[1] Bernstein K, Frank D J, Gattiker A R 2006 *IBM J. Res. Dev.* **50** 433

[2] Blair R R 1963 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **10** 35

[3] Krieg J, Tuflinger T, Pease R 2001 *NSREC Vancouver* British Columbia, Canada, July 16–20, 2001 pp167–172

[4] Pease R L, Combs W E, Johnston A, Carriere T, Poivey C, Gach A, Mc- Clure S 1996 *IEEE REDW Indian Wells* California, USA, July 19–23, 1996 pp28–34

[5] Johnston A H, Lancaster C A 1979 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **26** 4769

[6] Kruckmeyer K, McGee L, Brown B, Hughart D 2008 *IEEE REDW Tucson* Arizon, USA, July 14–18, 2008 pp110–116

[7] Kruckmeyer K, McGee L, Brown B, Miller L 2009 *RADECS 2009 Brugge*, Belgium, September 14–18, 2009 pp586–592

[8] Gorelick J L, Ladbury R, Kanchawa L 2004 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **51** 3679

[9] Guillermin J, Sukhaseum N, Varotsou A, Privat A, Garcia P, VailléM, Thomas J C, Chatry N, Poivey C 2016 *RADECS 2016* Bremen, Germany, September 19–23, 2016 pp1–7

[10] Bozovich A N, Irom F 2017 *IEEE REDW* New Orleans, United States, July 17–21, 2017 pp1–8

[11] Song Y, Zhou H, Cai X F 2020 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **12** 29993

[12] Song Y, Wei S H 2020 *ACS Appl. Electron. Mater.* **2** 3783

[13] Dressendorfer P V 1998 *Tech. Rep. (Sandia National Labs., Albuquerque, NM, United States)* pp1–9

[14] McLean F B, Oldham T R 1987 *Tech. Rep.* (DTIC Document) pp1–8

[15] McWhorter P, Winokur P 1986 *Appl. Phys. Lett.* **48** 133
[16] Ortiz-Conde A, Sánchez F G, Liou J J, Cerdeira A, Estrada M, Yue Y 2002 *Microelectron. Reliab.* **42** 583
[17] Ball D R, Schrimpf R D, Barnaby H J 2002 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **49** 3185
[18] Li X J, Yang J, Chen H, Dong S, Lv G 2019 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **66** 1612
[19] Winokur P S, Boesch H E, McGarrity Jr J M, McLean F B 1979 *J. Appl. Phys.* **50** 3492
[20] Gaddum J H 1945 *Nature* **156** 463
[21] Barnaby H, Vermeire B, Campola M 2015 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **62** 1658
[22] Barnaby H, Smith S, Schrimpf R, Fleetwood D, Pease R 2002 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **49** 2643
[23] Tolleson B S, Adell P, Rax B, Barnaby H, Privat A, Han X, Mahmud A, Livingston I 2018 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **65** 1488
[24] Pierret R F, Neudeck G W 1987 *Advanced Semiconductor Fundamentals* (Vol. 6) (Massachusetts: Addison-Wesley Reading) pp123–235
[25] McWhorter P, Winokur P 1986 *Applied Physical Letters* **48** 133
[26] 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
[27] Song Y, Zhang G, Liu Y, Zhou H, Zhong L, Dai G, Zuo X, Wei S H 2020 *arXiv preprint arXiv* **2008** 04486

Statistical characteristics of total ionizing dose effects of bipolar transistors*

Li Shun [1)4)] Song Yu [2)†] Zhou Hang [1)4)] Dai Gang [1)4)] Zhang Jian [3)‡]

1) (*Microsystem and Terahertz Research Center, China Academy of Engineering Physics, Chengdu* 610200, *China*)

2) (*College of Physics and Electronic Information Engineering, Neijiang Normal University, Neijiang* 641112, *China*)

3) (*School of Electronic Science and Engineering, University of Electronic science and Technology of China, Chengdu* 610000, *China*)

4) (*Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang* 621000, *China*)

(Received 3 November 2020; revised manuscript received 8 February 2021)

Abstract

The base current ($I_{\rm B}$) of silicon bipolar transistor degrades when it is subjected to total ionizing dose (TID) irradiation, which is due to the generation of oxide trapped charges ($N_{\rm ot}$) in the oxide layer and interface traps ($N_{\rm it}$) at the silica/silicon interface. In this work, we investigate the statistical characteristic of $I_{\rm B}$ of bipolar transistors and its possible microscopic origin. Especially, we carry out TID irradiation experiments on a large sample size of gated lateral PNP (GLPNP) transistors. Forty GLPNP transistors are sequentially irradiated to the total doses of 0.6 krad (Si), 2.6 krad (Si), 4.0 krad (Si), 7.4 krad (Si), and 10.8 krad (Si). The statistical characteristics of their $I_{\rm B}$, $N_{\rm ot}$, and $N_{\rm it}$ are obtained from the Gummel, gate sweep (GS), and sub-threshold sweep (DS) curves, respectively. It is found that no matter what the dose is, $I_{\rm B}$, $N_{\rm ot}$, and $N_{\rm it}$ all follow a lognormal distribution. However, the distribution parameters change as the irradiation dose increases. Remarkably, the statistical median and standard deviation of $I_{\rm B}$ as a function of dose show a strong correlation with those of $N_{\rm ot}$, but essentially differ from those of $N_{\rm it}$. This fact uncovers that for our research objects and dose rate, the sample-to-sample variability of $I_{\rm B}$ mainly stems from the variation of $N_{\rm ot}$. These interesting results should have potential applications in exploring the mechanism and evaluating the irradiation reliability of bipolar microcircuits.

Keywords: bipolar transistor, total ionization dose effect, statistical characteristics, correlation

PACS: 61.80.Jh, 85.30.Pq, 42.88.+h, 78.40.Fy **DOI:** 10.7498/aps.70.20201835

* Project supported by the Scientific Challenge Project, China (Grant No. TZ2016003-1).

† Corresponding author. E-mail: kwungyusung@gmail.com

‡ Corresponding author. E-mail: jianzhang@uestc.edu.cn