

硅单结晶体管 γ 射线辐照电阻变化规律研究*赵鸿飞¹⁾ 杜磊^{1)†} 何亮¹⁾ 包军林²⁾

1) (西安电子科技大学技术物理学院, 西安 710071)

2) (西安电子科技大学微电子学院, 西安 710071)

(2009 年 11 月 24 日收到; 2010 年 6 月 1 日收到修改稿)

针对硅材料和硅基器件辐照损伤机理之间存在的矛盾, 采用对单结晶体管基区电阻实时监测的方法, 得到单结晶体管基区阻值随 γ 射线辐照剂量的增加先减小后增大的规律. 结合国内外硅材料和器件的辐照理论, 从 γ 射线与物质的微观作用分析, 提出单结晶体管基区主要的 γ 射线辐照机制位移效应较电离效应具有一定滞后性的观点, 解决了原有矛盾, 对器件加固的研究具有重要意义.

关键词: 单结晶体管, γ 射线, 实时监测, 基区电阻

PACS: 85.30.Pq, 78.70.-g

1. 引言

由于硅材料具有价格低、强度佳、工艺成熟等优势, 越来越多的硅基器件应用于航天和核技术等辐射环境中. 其中, 一些辐射易损硅器件 (如 MOS 晶体管、单结晶体管等) 常常成为整个电路可靠性的薄弱环节. 因此, 提高这些器件的抗辐射能力是电子系统辐射加固的关键.

基区阻值是硅单结晶体管辐射响应的重要参数^[1]. 但在硅材料和硅单结晶体管基区的 γ 射线辐照损伤机理研究中却一直存在着矛盾. 文献[1]认为硅单结晶体管经 γ 射线辐照 400 krad(Si) 后基区阻值下降; 而大量实验结果^[2-5]均显示, 硅材料本身在高剂量 γ 射线辐照后阻值仅有微小上升. 吸附现象^[6]的提出, 解释了器件变化较材料本身辐射现象变化平缓的原因, 但仍无法解释这种反向变化现象.

为了解决上述矛盾, 本文采用辐照实时监测方法, 去除剂量点选取的偶然性. 实验发现单结晶体管基区在 γ 射线辐照下的真实变化规律为阻值随辐照剂量的增加先下降后上升. 对这种现象的微观机理进行深入讨论, 提出滞后时间的概念, 将其归结为两种辐照损伤机制共同作用的结果, 并进一步验证, 发现这一现象对于器件加固研究具有重要意义.

2. 实验

2.1. 实验条件

实验器件采用国营昆山晶体管厂生产的 BT32F (BT33C/F) 型硅单结晶体管. 辐照采用西北核技术研究所 1.22 MeV 的 ^{60}Co γ 射线辐照源. 为减少各层间辐照产生的载流子跃迁数量^[7]带来的影响, 独立分析基区特性, 采用大剂量率 (50 rad(Si)/s) 予以辐照.

实验在常温下分两次进行. 第一次对 BT32F 型单结晶体管进行无偏实时监测辐照实验, 累积剂量从 0 到 400 krad(Si). 将器件放入辐照环境, E 端悬空, 用欧姆表监测基区阻值变化. 第二次对 3 种型号单结晶体管进行辐照验证实验. 辐照偏置电压分别为: 0, 12 和 20 V. 辐照累积剂量测量点为: 0, 50, 120, 200 以及 400 krad(Si). 测量方法为移位测量, 测基区电阻在 0—20 V 间的 I - V 曲线, 拟合取平均阻值. 实验中辐照前后各器件两基极间电流-电压均具有良好的线性关系, pn 结耗尽层宽度变化影响可忽略, 验证了第一次实验中用欧姆表直接测量的方法不会影响数据准确性.

* 国家自然科学基金 (批准号: 60376023) 和西安应用材料创新基金 (批准号: XA-AM-200603) 资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: lduxidian@gmail.com

2.2. 实验结果

对单晶体管基区电阻进行辐照实时监测,得到其阻值与辐照剂量的变化情况,如图1.

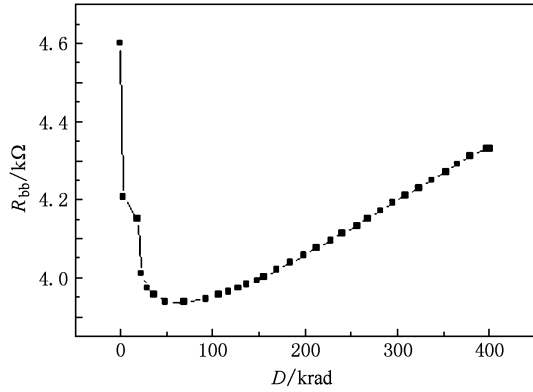


图1 BT32F 型单晶体管基区电阻值随辐照剂量的变化曲线

从图1中可以看出,实时监测消除了升降钴源及退火等外界影响^[6],表现出单晶体管基区阻值在 γ 射线辐照下的真实变化规律:并非一个单向变化过程而是随辐照剂量的增加先下降后上升.转折点在50 krad(Si)附近,过转折点后的变化趋势与硅材料一致.

图2为各型号单晶体管基区电阻在不同偏压下阻值随辐照剂量的变化情况,验证了早期下降区域的存在是一种普遍现象.

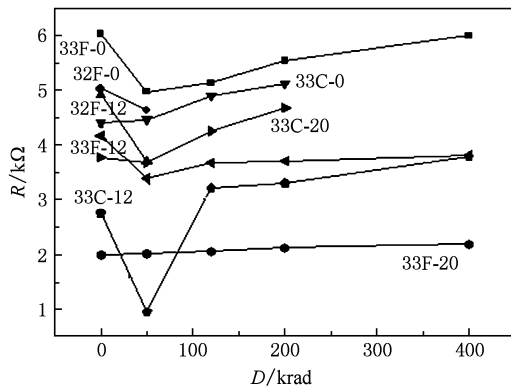


图2 单晶体管基区阻值辐照验证实验结果

3. 分析讨论

3.1. 结果分析

大量研究^[3,8-12]表明,硅材料在1.22 MeV的 γ

射线辐照下的电离效应(如图3)是康普顿效应,产生平均数为 E_{ph}/E_{eh} 的载流子对.在光子能量和剂量率不变的条件下,载流子浓度随辐照剂量的增加线性累积^[3].

$$\Delta N_{\text{电离}} = \alpha \cdot D \propto \frac{E_{ph} D}{E_{eh}}, \quad (1)$$

其中, $\Delta N_{\text{电离}}$ 是电离增加的载流子浓度, α 为电离系数, E_{ph} 为光子能量, E_{eh} 为平均电离能, D 为辐照剂量.

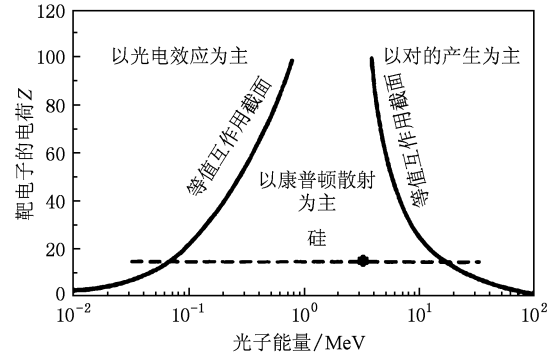


图3 光子同靶材料相互作用示意图^[3]

电离效应产生 $E_{eh} > 170$ keV的背散射康普顿电子与硅材料作用在半导体晶格中形成均匀的位移点缺陷,缺陷浓度 N_T 在很大范围内随辐照剂量线性增加^[3,10]

$$N_T = \pi \left[\frac{zq^2 \gamma_c}{m_e c^2 (\gamma_c^2 - 1)} \right]^2 \left(\frac{E_m}{E_d} - 1 \right) N_{at} D, \quad (2)$$

其中, N_{at} 为靶原子密度, $\gamma_c = \sqrt{1 - v^2/c^2}$, z 为靶原子电荷, m_e 为电子有效质量, q 为电子电量, E_m 是转移 z 核的最大能量, E_d 是位移的阈值能量.

位移损伤缺陷同产生的空位及间隙相互作用引起稳定的点缺陷络合物或“中性的”(间隙的)晶格位置的杂质,形成相应缺陷能级^[3,11].室温下在n型硅中V-P,V-O^[2,13-17],V-V都是稳定的辐射缺陷.其中V-O缺陷密度最大,有时甚至可以达到V-V⁻⁰缺陷密度的100倍以上,形成 $E = E_c - 0.17$ eV的深受主能级;V-V⁻⁰缺陷次之,形成多个能级,包括 $E = E_c - 0.35$ eV和 $E = E_c - 0.46$ eV的深受主能级以及 $E = E_v + 0.25$ eV和 $E = E_v + 0.36$ eV的深施主能级;同时,V-P,CiOi及CiCs等缺陷密度更小,但也会形成各自的能级^[18,19].

这些缺陷中的一部分可以作为散射中心使载流子的迁移率 μ 降低^[3,19,20]

$$\mu = \frac{\mu_0}{1 + \sum \delta_i N_i}, \quad (3)$$

其中, μ_0 为辐射前载流子迁移率, i 表示作为散射中心的缺陷类型, N_i 表示缺陷 i 的数目, δ_i 表示缺陷 i 对载流子的散射因子. 将(2)式代入(3)式中得到迁移率与辐照的关系

$$\mu = \frac{\mu_0}{1 + \sum \delta_i \pi \left[\frac{z_i q^2 \gamma_c}{m_e c^2 (\gamma_c^2 - 1)} \right]^2 \left(\frac{E_{mi}}{E_{di}} - 1 \right) N_{ai} D}. \quad (4)$$

根据(4)式中各项参数理论值可知, 硅材料迁移率要在很高的剂量下才表现出微小变化. 即此实验条件下, μ 可近似为一常数. 因此, 根据电导率

$$\sigma = nq\mu_n \quad (5)$$

可知, 载流子浓度变化为此实验条件下阻值变化的主要来源, 这些缺陷能级的主要作用为俘获自由载流子, 施主-受主补偿^[19]

$$N_{\text{位移}} = N_0 e^{-cD} - \beta D, \quad (6)$$

其中, $N_{\text{位移}}$ 为有效掺杂浓度, N_0 是衬底初始杂质浓度, c 是施主去除常数, β 为受主引入率. 由此, 位移效应影响下的载流子浓度可以表示为

$$n = \frac{N_0 e^{-cD} - \beta D}{1 + \frac{1}{2} \exp\left(\frac{E_D - E_F}{k_B T}\right)}, \quad (7)$$

其中, E_D 为施主能级, E_F 为费米能级, k_B 为玻尔兹曼常数, T 为温度.

考虑到不同点缺陷存在着不同的结合势垒和时间^[21], 将辐照时间划分为小的时间段, 简化时间对缺陷作用的依赖性. 每个时间段, 缺陷可以相互作用, 作用结果依次与前一时间段的复杂缺陷作用于下一时间段, 新的原缺陷形成^[19]. 由此可知, 次级电子的位移效应将滞后于电离效应影响硅材料的电学特性. 假设这个滞后时间为 t_0 , 得到的滞后剂量为 $D_0 = xt_0$ (其中, x 为辐照剂量率).

根据上文分析, 将图 1 的实验结果转化为电导进行拟合分析. 从图 4 可知, 转折点前电导迅速上升, 近似电离效应作用结果. 结合上文理论研究可知:

当 $D < D_0$ 时, 位移效应近似不存在

$$\sigma = \left(\alpha D + \frac{N_0}{1 + \frac{1}{2} \exp\left(\frac{E_D - E_F}{k_B T}\right)} \right) q\mu, \quad (8)$$

即辐照剂量达到 D_0 前, 电导率随辐照剂量的增加急速线性上升. 同时, 从图 4 的拟合结果中发现, 早期的曲线较陡, 但未出现(8)式中的良好线性关系.

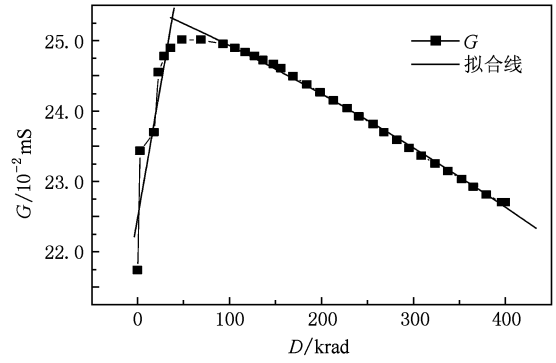


图 4 BT32F 型单晶体管基区电导值随辐照剂量的变化拟合曲线

这主要有 3 点原因: 1) 早期 γ 射线依靠本身穿透能力与原子核产生弹性碰撞, 引起微弱的位移效应^[2], 同时, 康普顿电子的再作用引入更多的电离缺陷^[22]; 2) 氮掺杂^[14]、氧元素^[13, 15-17]、电子-空穴复合及浅能级等的影响, 这些因素主要在辐照早期影响阻值变化, 随辐照剂量的增加逐渐饱和; 3) 在转折点前二次电子的位移效应已经开始作用, 即 D_0 并非转折剂量点值, $D_0 < D_1$ (D_1 为转折剂量点值), D_1 为电离效应与位移效应对材料电阻作用达到平衡的剂量点值.

从图 4 可知, 转折点后的电导随辐照剂量缓慢下降, 与位移效应作用结果一致. 当 $D > D_0$ 时, 加入了位移效应. 早期位移效应很小, 主要体现为抑制电离效应的影响; $D > D_1$ 时, 位移效应超过电离效应的影响, 材料阻值表现出随辐照剂量的增加而增大. 因此

$$\begin{aligned} N_{\text{eff}} &= \Delta N_{\text{电离}} + N_{\text{位移}} \\ &= \alpha D + \frac{N_0 e^{-c(D-D_0)} - \beta(D-D_0)}{1 + \frac{1}{2} \exp\left(\frac{E_D - E_F}{k_B T}\right)}, \end{aligned} \quad (9)$$

其中, N_{eff} 为有效载流子数.

当 $cD < 0.5$ 时, 可做以下 Taylor 展开并取近似, 得

$$e^{-cD} \approx 1 - cD + \frac{(-cD)^2}{2}. \quad (10)$$

将(10)式代入(9)式得到

$$\sigma \approx \left(\alpha D + \frac{N_0 e^{cD_0} \left[1 - cD + \frac{(cD)^2}{2} \right] - \beta(D-D_0)}{1 + \frac{1}{2} \exp\left(\frac{E_D - E_F}{k_B T}\right)} \right) q \times \mu, \quad (11)$$

对电导率进行求导可得:

$$D_1 = \frac{cN_0 e^{cD_0} + (\beta - \alpha) \left[1 + \frac{1}{2} \exp\left(\frac{E_D - E_F}{k_B T}\right) \right]}{c^2 N_0 e^{cD_0}}. \quad (12)$$

从 $D > D_1$ 拟合结果中发现,二次项系数较一次项系数小超过 3 个数量级,验证 c 值极小,电导变化不仅趋于二次,在剂量较小的情况下甚至趋于线性.

然而,这些参数并不是固定的. D_0 值受到剂量率影响,器件工艺可以改变 α, β 以及 c 值,控制器件的原始掺杂浓度 N_0 等,这些都会改变基区阻值的变化幅度和转折剂量,影响到器件的抗辐照特性. 而对于制造纯净,缺陷量少硅材料而言, D_0, D_1 值都非常小,在辐照损伤测试中很难测得转折点前的部分,因此近似认为阻值随辐照剂量单向增长. 而器件制造过程中引入了更多的原始缺陷和杂质,这些原始缺陷对于位移效应存在着吸附效应,有效地抑制位移缺陷的增加^[6,23],延长了 D_1 值,使得电阻下降幅度更大,甚至直至器件损坏都难以恢复到初始值. 这就造成了传统材料与器件辐照理论的矛盾. 引入滞后概念分析硅材料和器件的辐射微观机理很好地解释了实验现象,解决了这一矛盾.

3.2. 实验验证

图 2 从不同器件和辐照偏压角度验证上述现象并不是个例. 将器件按型号区分做图,得到图 5 和图 6. 从图 5 和图 6 中可以看出,由于器件间存在个体差异并且外加电压不同,出现极小值的剂量点和变化幅度也不相同,并在不同剂量点出现了损坏现象. 其中, BT33F 型为金封器件,工艺最为成熟,个别器件出现了与硅材料相同的单向变化,损坏率最低;而 BT32F 的工艺最为粗糙,损坏率最高. 由此可知,工艺越精细的器件其原始缺陷越少, D_0, D_1 以及下降幅度越小,越接近于理想硅材料的变化.

将器件按下降幅度从大到小的顺序排列为: BT32F, BT33C, BT33F. 其顺序与器件损坏率排列顺序有良好的一致性. 由此可见,下降幅度是器件抗辐照性的重要参数. 但下降幅度对于器件性能的描述并不具有统一标准. 图 5 和图 6 中可以发现这种下降现象对器件稳定性具有双重影响:以下降趋势明显的器件为例,一部分在辐照早期就产生了致命损伤;而安全度过阻值下降区的另一部分器件则更有效地抑制了位移效应的影响,反而较下降趋势弱

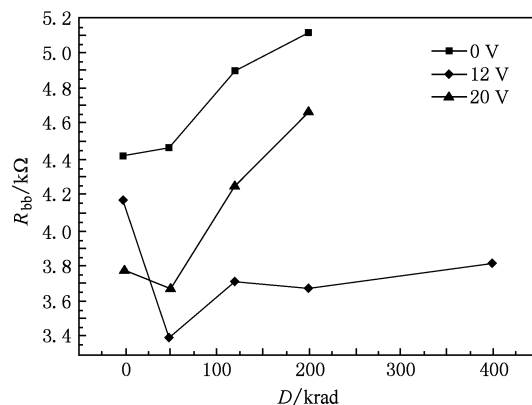


图 5 BT33C 在不同偏置下辐照的衬底阻值变化

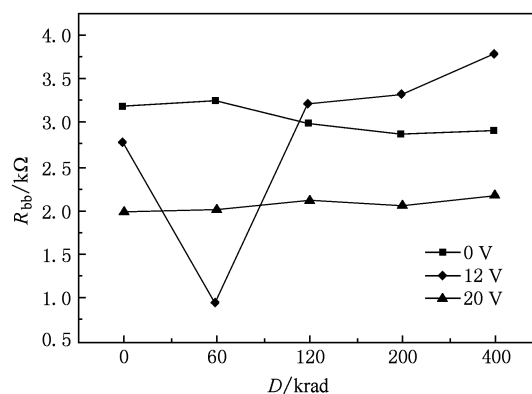


图 6 BT33F 在不同偏置下辐照的衬底阻值变化

的器件失效率降低. 这对于器件加固进一步研究提供了良好的依据.

同时可以看出,各型号器件均在 12 V 辐照偏压时的下降幅度最大,0 和 20 V 时下降幅度相当,即外加电压也是影响器件抗辐照性的重要因素.

因此,合理利用原始缺陷和杂质,适当增大阻值下降区范围,可以使器件在更大剂量下才能恢复初值或超出失效阈值,增加器件的抗辐照能力. 与此同时,也不难看出这种抑制位移缺陷的方法在一定程度上是以减小器件寿命为代价的,因此,在具体操作过程中应以器件寿命、应用环境(偏置条件)等为依据调解原始杂质注量以达到器件加固的目的.

4. 结 论

本文对 γ 射线辐照的单结晶体管进行了实时

监测. 研究表明: 不同类型的辐照偏压的硅单结晶体管基区阻值均出现随 γ 射线辐照剂量的增加先下降后上升的现象. 对这种新现象进行了深入分析, 提出滞后剂量的概念, 将这种现象的本质解释为对阻值影响略大的位移效应较电离效应具有延迟性. 结合这一观点, 器件制造过程引入的原始缺

陷抑制了早期位移缺陷, 增大了阻值下降范围, 使辐照器件的基区阻值难以恢复到初值, 给器件可靠性带来双重影响, 并成为器件与材料辐照理论间矛盾的来源. 因此, 合理利用器件原始杂质和缺陷来调节滞后剂量和阻值变化幅度对辐照加固研究具有重要意义.

- [1] Horn W E (translated by Wei G) 1974 *Radiation Effect on Electronic Device* (Beijing: National Defense Industry Press) pp43—44 (in Chinese) [W. E. 霍恩著 微观译 1974 辐射对电子元件器件的影响 (北京: 国防工业出版社) 第 43—44 页]
- [2] Zhang J R, Shi J X, Tong L Y 2005 *Semicond. Technol.* **30** 67 (in Chinese) [张继荣、史继祥、佟丽英 2005 半导体技术 **30** 67]
- [3] Claeys C, Simoen E (translated by Liu Z L) 2008 *Radiation Effect on Advanced Semiconductor Material and Device* (Beijing: National Defense Industry Press) pp22—82 (in Chinese) [C. Claeys, E. Simoen 著 刘忠立译 2008 先进半导体材料及器件的辐射效应 (北京: 国防工业出版社) 第 22—82 页]
- [4] Liu F, Ji X F, Tong L Y 2001 *Semicond. Info.* **38** 45 (in Chinese) [刘 锋、纪秀峰、佟丽英 2001 半导体情报 **38** 45]
- [5] Wang J R, Gao Z L 1996 *J. Nucl. Agric. Sci.* **17** 75 (in Chinese) [王锦荣、高仲林 1996 核农学通报 **17** 75]
- [6] Zai D Q 1992 *J. Radiat Res. Processing* **10** 126 (in Chinese) [翟冬青 1992 辐射研究和辐射工艺学报 **10** 126]
- [7] Zhang T Q, Liu C Y, Liu J L, Wang J P, Huang Z, Xu N J, He B P, Peng H L, Yao Y J 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 2434 (in Chinese) [张廷庆、刘传洋、刘家璐、王剑屏、黄 智、徐娜军、何宝平、彭宏论、姚育娟 2001 物理学报 **50** 2434]
- [8] Cheng P X 2005 *Radiation Effect on Semiconductor Device and Integrated Circuits* (Beijing: National Defense Industry Press) p25 (in Chinese) [陈盘训 2005 半导体器件和集成电路的辐射效应 (北京: 国防工业出版社) 第 25 页]
- [9] He B P, Chen W, Wang G Z 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 3546 (in Chinese) [何宝平、陈 伟、王桂珍 2006 物理学报 **55** 3546]
- [10] Jing T 2000 *Chin. Nucl. Sci. Technol. Rep.* **01514** 0064 (in Chinese) [景 涛 2000 中国核科技报告 **01514** 0064]
- [11] Matsuura H, Uchida Y, Nagai N, Hisamatsu T, Aburaya T, Matsuda S 2000 *Appl. Phys. Lett.* **76** 2092
- [12] Lai Z W 1998 *Radiation Hardened Electronics—Radiation Effect and Strengthening Principle* (Beijing: National Defense Industry Press) pp10—12 (in Chinese) [赖祖武 1998 抗辐射电子学——辐射效应及加固原理 (北京: 国防工业出版社) 第 10—12 页]
- [13] Dezillie B, Li Z, Eremin V, Chen W, Zhao L J 2000 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **47** 800
- [14] Zhang Y Y, Liu F, Pei Z J, Ji X F 1998 98 *National Semiconductor Silicon Material Academic Conference*, Shanghai, September, 1998 p53 (Shanghai: Shanghai Academy of Nonferrous Metal, Chinese Academy of Nonferrous Metal (in Chinese) [张忆延、刘 锋、裴志军、纪秀峰 98 全国半导体硅材料学术会议论文集, 上海, 1998 年 9 月 第 53 页 (上海: 上海有色金属协会, 中国有色金属协会)]
- [15] Chen G F, Yan W B, Chen H J, Cui H Y, Li Y X 2009 *Chin. Phys. B* **18** 2988
- [16] Chen G F, Yan W B, Chen H J, Li X H, Li Y X 2009 *Chin. Phys. B* **18** 293
- [17] Xu J, Li F L, Yang D R 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 4113 (in Chinese) [徐 进、李福龙、杨德仁 2007 物理学报 **56** 4113]
- [18] Watkins G D 2000 *Mat. Sci. Semicond. Proc.* **3** 227
- [19] Passeri D, Ciampolini P, Bilei G M, Moscatelli F 2001 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **47** 1688
- [20] Srour J R, Marshall C J, Marshall P W 2003 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **50** 653
- [21] Qiao Y H, Wang S Q 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 4827 (in Chinese) [乔永红、王绍青 2005 物理学报 **54** 4827]
- [22] Flescher H L, Szymkowiak E A 1966 *NASA CR-526* 66 31669
- [23] Li Y X, Liu H Y, Niu P J, Liu C C, Xu Y S, Yang D R, Que D L 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 2407 (in Chinese) [李养贤、刘何燕、牛萍娟、刘彩池、徐岳生、杨德仁、阙端麟 2002 物理学报 **51** 2407]

Base resistance in Si unijunction transistor irradiated by ^{60}Co γ -radiation*

Zhao Hong-Fei¹⁾ Du Lei^{1)†} He Liang¹⁾ Bao Jun-Lin²⁾

1) (School of Technology Physics, Xidian University, Xi'an 710071, China)

2) (School of Microelectronic, Xidian University, Xi'an 710071, China)

(Received 24 November 2009; revised manuscript received 1 June 2010)

Abstract

The change of base resistance in Si-UJT under irradiation of ^{60}Co γ -ray is provided. Through multipoint measurement and real-time monitoring, it was shown that the base resistance decreased immediately and then increased slowly. Compared with domestic and foreign related research results, this proves that the displacement effect is the main effect of base resistance in Si-UJT irradiated by ^{60}Co γ -ray, but it lags behind the ionization effect from microanalysis of the interaction between γ -ray and Si material. This is very important for the radiation hardened research.

Keywords: unijunction transistor, ^{60}Co γ -ray, real-time monitoring, base resistance

PACS: 85.30.Pq, 78.70.-g

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60376023) and the Applied Materials Innovation Foundation of Xi'an, China (Grant No. XA-AM-200603).

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