

# 不同发射极面积 npn 晶体管高低剂量率辐射损伤特性\*

郑玉展<sup>1,2)</sup> 陆 妩<sup>1)†</sup> 任迪远<sup>1)</sup> 王义元<sup>1,2)</sup> 郭 旗<sup>1)</sup> 余学锋<sup>1)</sup> 何承发<sup>1)</sup>

1) 中国科学院新疆理化技术研究所, 乌鲁木齐 830011)

2) 中国科学院研究生院, 北京 100049)

(2008 年 11 月 18 日收到, 2009 年 1 月 8 日收到修改稿)

影响 npn 晶体管辐射损伤的因素有很多, 如晶体管工艺、剂量率以及辐照偏置等. 主要研究了三种发射极面积的国产 npn 晶体管在高低剂量率下的辐射损伤特性, 分析了发射极尺寸对辐射损伤的影响. 研究表明, 国产 npn 晶体管具有低剂量率损伤增强效应, 且发现当小电流注入下晶体管的辐射损伤会表现得愈加显著. 比较三种发射极尺寸的晶体管辐照响应发现, 发射极周长面积比  $P/A$  越大时晶体管归一化过剩基极电流  $\Delta I_B/I_{B0}$  也越大. 详细阐述了 npn 晶体管辐射损伤机制, 从发射极尺寸和晶体管工作电压角度对 npn 晶体管的加固保证方法进行了探索.

关键词: 发射极面积, 国产 npn 晶体管, 剂量率, 辐射损伤

PACC: 6180, 6180E, 8750G, 7870

## 1. 引 言

双极结型晶体管(bipolar junction transistors)在电离辐射环境中出现性能退化, 表现为晶体管电流增益下降. 虽然如此, 高剂量率辐照时双极晶体管仍然具有很强的抗辐射能力. 然而, 20 世纪 90 年代初研究发现双极器件和集成电路(包括双极晶体管、运算放大器、比较器等)具有低剂量率损伤增强效应(enhanced low-dose-rate sensitivity, 简记为 ELDERS), 简单而言就是双极工艺器件和集成电路的低剂量率辐照损伤明显高于高剂量率辐照损伤, 且在高剂量率辐照后进行与低剂量率辐照等时的室温退火, 并不能模拟这种损伤差异<sup>[1-4]</sup>. 对于双极晶体管, ELDERS 具体表现为低剂量率辐照下电流增益退化要比高剂量率情况严重得多. 此外, 实际运行于太空辐射环境中的器件测试结果表明: 太空辐射剂量率很低, 在  $10^{-6}$ — $10^{-4}$  Gy/s 剂量率范围内<sup>[5]</sup>. 由于低剂量率损伤增强效应的存在, 卫星等航天飞行器中的电子系统势必会有潜在的可靠性问题, 其使用寿命会大大缩短. 因此, 双极工艺器件和集成电路 ELDERS 的机理和加固保证技术的研究非常有意义同时也很有必要.

自 ELDERS 发现以来, 双极器件和集成电路损伤

增强机制一直是国内外研究的热点. 国内外研究结果表明双极晶体管辐照损伤与基-射结区上隔离氧化物中和 Si-SiO<sub>2</sub> 界面处的辐射感生缺陷有密切关系<sup>[1,3,6-8]</sup>. 这些缺陷包括氧化物陷阱正电荷和 Si-SiO<sub>2</sub> 界面陷阱电荷, 本文详细讨论了这两种陷阱电荷的产生, 同时基于这两种电荷阐述了高低剂量率的损伤机制. 研究发现, 影响辐照感生缺陷有很多因素, 如半导体工艺过程、剂量率和辐照偏置状态等<sup>[9,10]</sup>. 本文以国产 npn 晶体管为研究对象, 从不同发射极面积的角度研究晶体管高低剂量率辐照损伤特性, 探讨了其辐照损伤机制. 与此同时, 通过对归一化过剩基极电流( $\Delta I_B/I_{B0}$ )的拟合得到 Si-SiO<sub>2</sub> 表面复合电流理想度因子、理想度因子和累积剂量的关系也证实了 npn 晶体管的损伤机制. 不仅如此, 实验获得的不同发射极面积和 npn 晶体管高低剂量率辐射损伤的关系也为半导体工艺方面探索双极器件和集成电路的加固保证技术提供了实验依据.

## 2. 实 验

实验样品为国产 npn 晶体管, 其横断面和基-射结平面如图 1 所示. 三种发射极尺寸的 npn 晶体管分别用  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  表示, 具体参数列于表 1.

\* 模拟集成电路国家重点实验室基金(批准号 9140C090403070C09)资助的课题.

† 通讯联系人, E-mail: luwu@ms.xjb.ac.cn

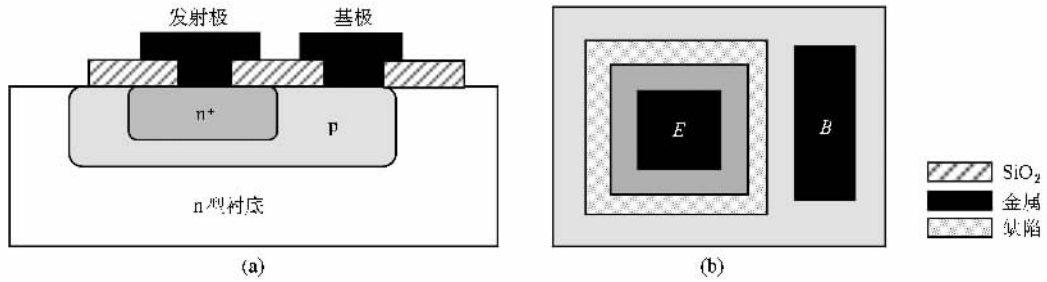


图1 双极晶体管横断面和基-射结平面简图 (a)横断面 (b)基-射结平面

表1 npn 晶体管三种发射极面积及面积周长比

| nnp 晶体管 | 发射极面积/ $\mu\text{m}^2$ | 周长面积比/ $\mu\text{m}^{-1}$ |
|---------|------------------------|---------------------------|
| $T_1$   | $6 \times 6$           | 0.67                      |
| $T_2$   | $6 \times 18$          | 0.44                      |
| $T_3$   | $6 \times 72$          | 0.36                      |

辐照实验是在中国科学院新疆理化技术研究所大、小 $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$ 射线源上进行的.实验所使用的高低剂量率分别是经标定并换算成 Si 吸收的剂量率  $0.5, 1.3 \times 10^{-4} \text{ Gy/s}$ ,从而保证了实验数据的可靠性.此外,实验样品放置于根据美军标准制作的铅铝屏蔽盒内以消除低能散射光子的影响.辐照及退火过程中,晶体管处于最劣的反向偏置,即 npn 晶体管发射极经过一个限流电阻接 +2V 电压,基极和集电极接地.实验数据是由 HP4142 型半导体参数分析仪采用离线采集获得,每次测试均在 10 min 内完成.辐照前后分别测量了 npn 晶体管的基极电流  $I_B$ ,集电极电流  $I_C$  以及直流增益  $\beta, \beta = I_C/I_B$ .

### 3. 结果和讨论

高剂量率辐照时,不同累积剂量下  $I_B, I_C$  和归一化电流增益  $\beta/\beta_{\text{peak}}$  与基-射结电压  $V_{BE}$  的关系如图 2 所示.由图 2 可见,  $I_B$  随累积剂量的增加而逐渐增加,而  $I_C$  则保持不变,因此这预示着电流增益  $\beta$  随剂量累积而持续衰减,如图 2(b)所示.此外,基-射结电压较小时晶体管基极电流增加的幅度较大,相应地电流增益下降越多,即晶体管表现出小注入下的“退化增强”.

基-射结电压为 0.608 V 时三种尺寸晶体管基极电流密度高低剂量率辐照响应和室温退火行为由图 3 给出.基极电流密度由  $J_B = I_B/A_E$  得出,其中  $A_E$  为发射极面积,可近似看作基-射结面积.从辐照

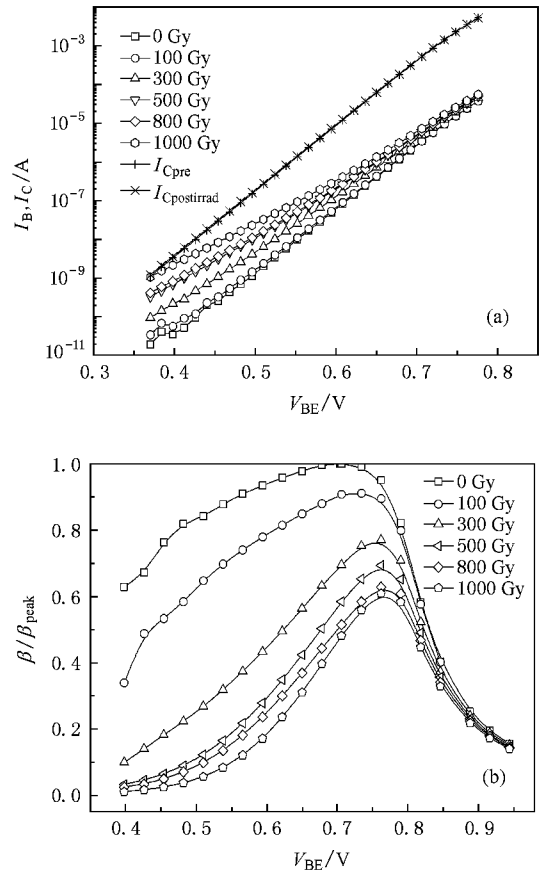


图2 不同总剂量下的基极、集电极电流和归一化增益 (a)基极、集电极电流 (b)归一化增益

响应看,低剂量率辐照下的晶体管基极电流密度明显高于高剂量率辐照下的基极电流密度.在与低剂量率辐照时间等时的室温退火过程中,电流密度都有恢复初值的趋势.这说明三种尺寸晶体管都具有低剂量率损伤增强效应.不同尺寸晶体管归一化过剩基极电流 ( $\Delta I_B/I_{B0} = (I_{B\text{postirrad}} - I_{B0})/I_{B0}$ ) 在高低剂量率下随累积剂量的变化如图 4 所示,其中归一化过剩基极电流也是在基-射结电压为 0.608 V 下获得.由图 3 和图 4 可以发现,发射极尺寸对辐照损伤

有很大影响. 无论高剂量率辐照还是低剂量率辐照,  $T_1$  晶体管的归一化过剩基极电流变化最大,  $T_2$  晶体管次之,  $T_3$  晶体管变化最小. 按照发射极周长面积比(perimeter-to-area ratio)  $P/A$  看,  $T_1, T_2, T_3$  也依次减

小. 因此比较不同尺寸晶体管的辐照损伤可以得出, 发射极周长面积比  $P/A$  越大, 晶体管损伤也越大, 对总剂量辐射就越敏感. 这对高低剂量率辐照情况都适用.

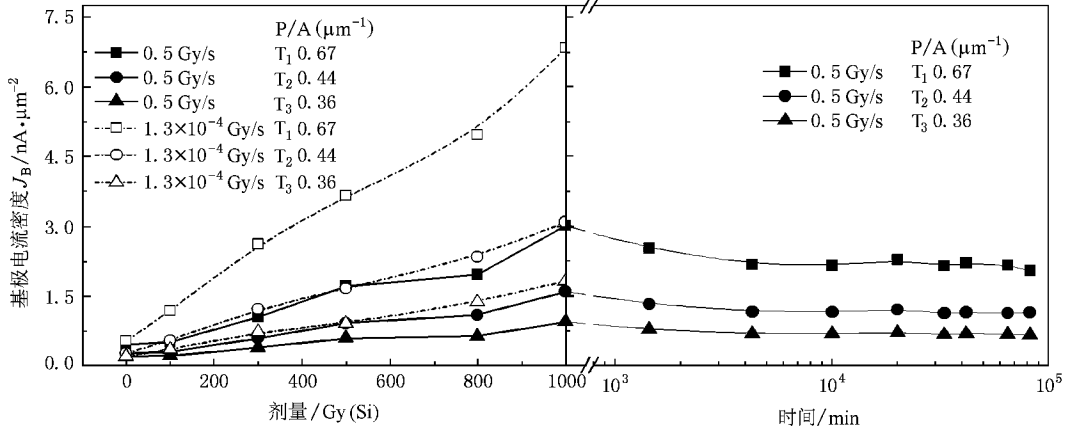


图 3 高低剂量率下三种发射极面积晶体管的辐照响应和室温退火行为

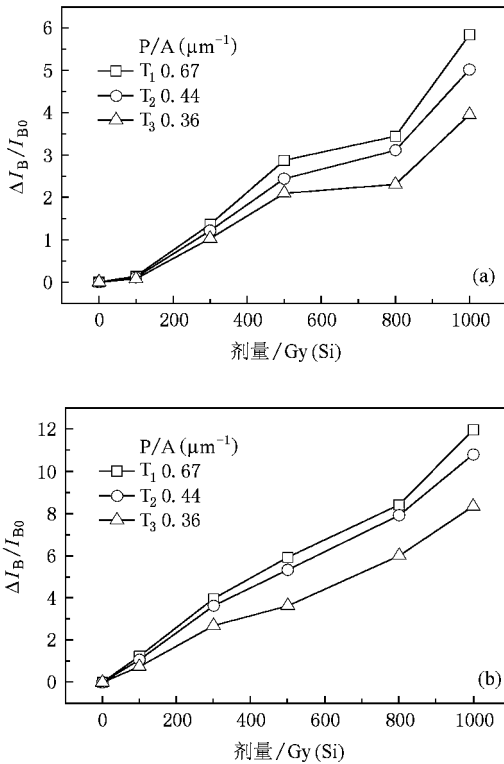


图 4 高低剂量率下, 归一化过剩基极电流随总剂量的变化 (a) 0.5 Gy/s, (b)  $1.3 \times 10^{-4}$  Gy/s

目前的研究普遍认为, 电离辐射引起基极电流增加和射线与晶体管基-射结上的隔离氧化物相互作用过程中感生的缺陷有密切关系<sup>[1,3,6-8]</sup>. 我们知道, 电离辐射在晶体管中会产生大量的电子空穴对,

在没有缺陷俘获的情况下, 这些电子空穴对对经过极短的时间就会产生复合. 半导体器件生产过程中, 氧化物生长工艺中难免出现各种缺陷空位, 同时在 Si-SiO<sub>2</sub> 界面处由于晶格结构失配等原因不可避免地带来一些悬挂键. 这些悬挂键一般通过高温退火过程和 H 或者 OH 结合而被钝化, 这就使半导体器件表现出较好性能. 然而, 在电离辐射环境中, 那些逃脱最初复合的电子空穴对有很大概率被氧化物中以及 Si-SiO<sub>2</sub> 界面处的缺陷所俘获<sup>[6]</sup>. 逃脱最初复合的电子和空穴, 其被俘获概率也不同. 由于电子在氧化物中的迁移率要远高于空穴<sup>[3,4,11]</sup>, 因此这些没有复合的大部分电子在氧化物中电场的作用下漂向电极, 而大部分移动缓慢的空穴则被氧化物陷阱俘获形成正氧化物电荷, 即带正电的  $E'$  中心. 氧化物俘获正电荷分布于 SiO<sub>2</sub> 中靠近 Si-SiO<sub>2</sub> 界面处约若干纳米厚的薄层内<sup>[12-14]</sup>. 界面态的形成则与辐射产生的 H 离子和空穴在氧化物中的输运以及界面陷阱有关<sup>[14,15]</sup>. 这些 H 离子与空穴输运到界面后和此处的钝化键反应生成界面态, 即  $P_b$  中心<sup>[15-17]</sup>.

由以上所述可知, 在 npn 晶体管基-射结上隔离氧化物中引入的缺陷可归结为两种, 分别是氧化物俘获正电荷和 Si-SiO<sub>2</sub> 界面态. 氧化物正电荷严重影响氧化物下的 Si 表面势, 引起轻掺杂的基区表面耗尽<sup>[7,18]</sup>. 这个表面耗尽层的出现为其内载流子提供了更多复合概率, 导致基极电流增加. Si-SiO<sub>2</sub> 界面

态则与表面复合速度成正比<sup>[9]</sup>.这两种辐射感生缺陷均对双极晶体管基极电流增加或者对电流增益下降有贡献.氧化物电荷在室温下就能退火,而界面态一般在较高温度(100℃以上)才发生退火<sup>[19]</sup>.因此,氧化物电荷室温下的部分退火导致高剂量率辐照后基极电流的微小恢复.

由于氧化物正电荷和界面态均可引起 npn 晶体管基极电流增加,因而我们可以把辐照后晶体管基极电流看作辐照前基极电流( $I_{B0}$ )与氧化物电荷和界面态导致的基极电流( $I_{Bot}$ 和 $I_{Bit}$ )之和<sup>[20]</sup>.

$$\begin{aligned} \frac{\Delta I_B}{I_{B0}} &= \frac{I_{B\text{postirad}} - I_{B0}}{I_{B0}} \\ &= \frac{\left\{ \frac{J_s A_E}{\beta_F} \exp\left(\frac{V_{BE}}{V_t}\right) + J_{ss} P_E \exp\left[\frac{V_{BE}}{n_{ss} V_t}\right] \right\} - \frac{J_s A_E}{\beta_F} \exp\left(\frac{V_{BE}}{V_t}\right)}{\frac{J_s A_E}{\beta_F} \exp\left(\frac{V_{BE}}{V_t}\right)} \\ &= \frac{P_E}{A_E} \left( \frac{\beta_F J_{ss}}{J_s} \right) \exp\left[ \frac{V_{BE}}{V_t} \left( \frac{1}{n_{ss}} - 1 \right) \right]. \end{aligned} \quad (2)$$

根据(2)式,归一化过剩基极电流随发射极周长面积比成比例增加.这也表明发射极周长面积比越小的晶体管对辐照越不敏感,从而给微电子器件和集成电路设计者提供了一种抗辐射设计方法.我们对 $T_3$ 晶体管数据进行了拟合,得到了高低剂量率下表面复合电流理想度因子(图5).理想度因子随累积剂量的增加而增大.正是由于随剂量增加,氧化物俘获了更多正电荷,引起氧化物下面基区表面耗尽层在宽度和厚度上进一步扩展<sup>[7,21]</sup>,增大了载流子在其内的复合概率.低剂量率辐照下大量界面态的出现导致了表面复合电流理想度因子大于高剂量率的情况.这也说明低剂量率辐照下会有更多界面态产生.

晶体管表现出的 ELDRS 一般可由目前被普遍接受的空间电场模型加以解释<sup>[1,3,22]</sup>.简言之,空间电场模型就是指高剂量率辐照下大量氧化物俘获正电荷形成的空间电场阻碍辐射感生的空穴和 H 离子输运到 Si-SiO<sub>2</sub> 界面,因而界面态生成较少.然而在低剂量率辐照下,空间电场较小,更多的空穴和 H 离子能够输运到 Si-SiO<sub>2</sub> 界面参与形成界面态.根据此模型可知,低剂量率辐照时界面态较多,而氧化物正电荷相对较少;高剂量率辐照情况则与之相反.因此,低剂量率损伤增强与低剂量率辐照产生更多界

$$\begin{aligned} I_B &= I_{B0} + I_{Bot} + I_{Bit} \\ &= \frac{J_s A_E}{\beta_F} \exp\left(\frac{V_{BE}}{V_t}\right) \\ &\quad + J_{ss} P_E \exp\left(\frac{V_{BE}}{n_{ss} V_t}\right), \end{aligned} \quad (1)$$

式中, $A_E$ 为发射极面积, $J_s$ 为饱和电流密度, $\beta_F$ 为辐照前正向电流增益, $V_t = kT/q \approx 0.026$  V, $J_{ss}$ 为表面饱和电流密度(单位为 $A \cdot \mu m^{-1}$ ), $P_E$ 为发射极周长, $n_{ss}$ 是表面复合电流理想度因子.由(1)式可得,归一化电流增益为

面态数量密切相关,这也与通过表面复合电流理想度因子获得的结论相一致.但由图3的室温退火情况看,辐射过程中产生的氧化物电荷并没有出现很多退火,说明其内部的空间电场和高剂量率情况相差无几.对于导致低剂量率辐照产生更多界面态的原因,还需做进一步的研究.

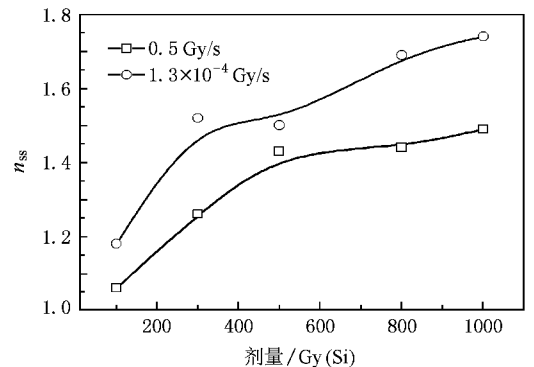


图5 高、低剂量率辐照下, $T_3$ 晶体管表面复合电流理想度因子

晶体管小注入下的“退化增强”与 ELDRS 有明显区别.不管是小注入还是大注入,一定剂量对应的损伤是固定的.只是小注入下这种辐射损伤会更加显著地表现出来,即小注入下的“退化增强”.小注入情况下,基区注入的载流子在低电场下运动缓慢,同时渡越时间也相对延长,在辐射感生缺陷导致的表

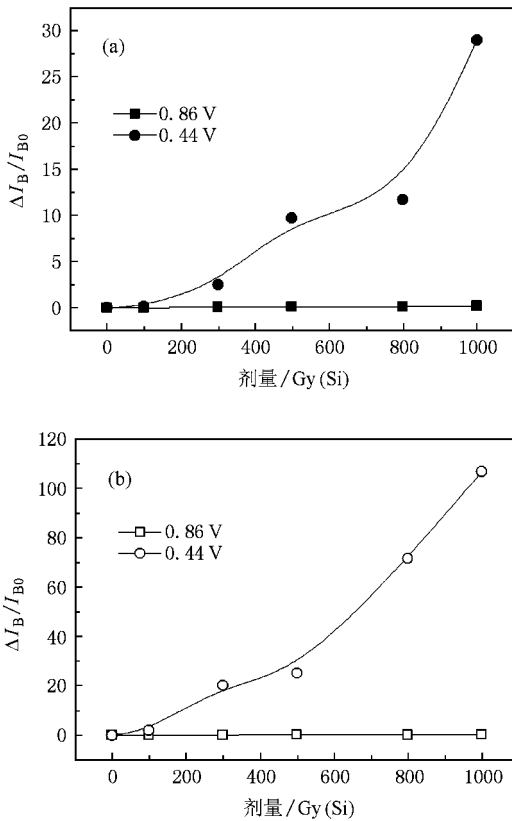


图 6 不同基-射结电压下  $T_3$  晶体管归一化过剩基极电流的辐射响应 (a)  $0.5 \text{ Gy/s}$ , (b)  $1.3 \times 10^{-4} \text{ Gy/s}$

面耗尽层中有更多复合,产生了显著的复合电流.同时,由于基-射结电压很小,基-射结的漂移和扩散电流都非常小,因而辐照感生缺陷产生的复合电流在总基极电流中占很大比重.但随基-射结电压的增加(即注入的增加),漂移和扩散电流显著增加,缺陷复合电流在总基极电流中的比例逐渐下降,从而出现了图 2 中低电压下基极电流增加和增益下降较多的现象. npn 晶体管归一化过剩基极电流的高低剂量

率响应与基-射结电压的关系如图 6 所示.由图 6 可明显看出,晶体管基-射结电压为  $0.86 \text{ V}$  时的归一化过剩基极电流要显著小于基-射结电压为  $0.44 \text{ V}$  时的归一化过剩基极电流.不但如此,这种情况在低剂量率辐照下表现得更为突出.因此根据上述分析以及图 6 可知,在电离辐射环境中工作在较高基-射结电压下的晶体管有较小的归一化过剩基极电流,辐射损伤表现不明显,尤其在低剂量率辐照情况下更是如此.这提示我们在设计具有抗辐射能力的集成电路时,需要考虑电路内部晶体管工作电压.在允许的情况下,增大集成电路内部 npn 晶体管基-射结电压是提高其抗辐射能力的有效途径.

## 4. 结 论

上述研究表明,国产 npn 晶体管在电离辐射环境中出现基极电流增加、增益下降等性能衰降的现象,尤其在低剂量率辐照下表现得更为显著.基于氧化俘获正电荷和界面态电荷两种辐射感生缺陷,深入讨论了 npn 晶体管性能退化机制.这种退化机制进一步通过理论模拟结果得到证实.比较不同发射极面积晶体管高低剂量率辐射损伤情况,获得了损伤与发射极周长面积比的关系,即周长面积比越大的晶体管损伤也越大.此外,研究还发现不同基-射结电压下 npn 晶体管辐射损伤的行为也不一致.在较高的电压下,辐射损伤的表现并不显著.综合考虑发射极尺寸和晶体管基-射结电压两种因素,提出了提高半导体电路加固保证的方法.在集成电路设计中,应尽量采用发射极周长面积比较小的 npn 晶体管,同时在条件允许的情况下应增大集成电路内部 npn 晶体管基-射结电压.

[1] Fleetwood D M, Kosier S L, Nowlin R N, Schrimpf R D, Reber R A, Delaus M, Winokur P S, Wei A, Combs W E, Pease R L 1994 *IEEE Trans Nucl. Sci.* **41** 1871

[2] Johnston A H, Rax B G, Lee C I 1995 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **42** 1650

[3] Rashkeev S N, Cirba C R, Fleetwood D M, Schrimpf R D, Witzczak S C, Michez A, Pantelides S T 2002 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **49** 2650

[4] Boch J, Saigne F, Schrimpf R D, Vaillie J R, Dusseau L, Lorfevre E 2006 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **53** 3655

[5] Titus J L, Combs W E, Turflinger T L, Krieg J F, Tausch H J, Brown D B, Pease R L, Campbell A B 1998 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **45** 2673

[6] Boch J, Saigne F, Touboul A D, Ducret S, Carlotti J F, Bernard M, Schrimpf R D, Wrobel F, Sarraयरouse G 2006 *Appl. Phys. Lett.* **88** 232113

[7] Kosier S L, Schrimpf R D, Nowlin R N, Fleetwood D M, Delaus M, Pease R L, Combs W E, Wei A, Chai F 1993 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **40** 1276

- [ 8 ] Hjalmarson H P , Pease R L , Witzczak S C , Shaneyfelt M R , Schwank J R , Edwards A H , Hembree C E , Mattsson T R 2003 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **50** 1901
- [ 9 ] Pershenkov V S , Maslov V B , Cherepko S V , Shvetzov-Shilovsky I N , Belyakov V V , Sogoyan A V , Rusanovsky V I , Ulimov V N , Emelianov V V , Nasibullin V S 1997 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **44** 1840
- [ 10 ] Wang J P , Xu N J , Zhang T Q , Tang H L , Liu J L , Liu C Y , Yao Y J , Peng H L , He B P , Zhang Z X 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 1331 ( in Chinese ) [ 王剑屏、徐娜军、张廷庆、汤华莲、刘家璐、刘传洋、姚育娟、彭宏论、何宝平、张正选 2000 物理学报 **49** 1331 ]
- [ 11 ] Lelis A J , Oldham T R 1994 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **41** 1835
- [ 12 ] Pantelides S T , Lu Z Y , Nicklaw C , Bakos T , Rashkeev S N , Fleetwood D M , Schrimpf R D 2008 *J. Non-Cryst. Solids* **354** 217
- [ 13 ] Li R M , Du L , Zhuang Y Q , Bao J L 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 3400 ( in Chinese ) [ 李瑞珉、杜磊、庄奕琪、包军林 2007 物理学报 **2007** **56** 3400 ]
- [ 14 ] Rashkeev S N , Fleetwood D M , Schrimpf R D , Pantelides S T 2001 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **48** 2086
- [ 15 ] Vanheusden K , Korambath P P , Kurtz H A , Karna S P , Fleetwood D M , Shedd W M , Pugh R D 1999 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **46** 1562
- [ 16 ] Rashkeev S N , Fleetwood D M , Schrimpf R D , Pantelides S T 2004 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **51** 3158
- [ 17 ] Chen X J , Barnaby H J 2008 *Solid-State Electron.* **52** 683
- [ 18 ] Nowlin R N , Enlow E W , Schrimpf R D , Combs W E 1992 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **39** 2026
- [ 19 ] Chen X J , Barnaby H J , Schrimpf R D , Fleetwood D M , Pease R L , Platteter D G , Dunham G W 2006 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **53** 3649
- [ 20 ] Nowlin R N 1993 *Ph. D. Dissertation* ( Arizona : University of Arizona ) pp42—50
- [ 21 ] Schmidt D M , Wu A , Schrimpf R D , Fleetwood D M , Pease R L 1996 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **43** 3032
- [ 22 ] Graves R J , Cirba C R , Schrimpf R D , Milanowski R J , Michez A , Fleetwood D M , Witzczak S C , Saigne F 1998 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **45** 2352

## Characteristics of high- and low-dose-rate damage for domestic npn transistors of various emitter areas <sup>\*</sup>

Zheng Yu-Zhan<sup>1)†</sup> Lu Wu<sup>1)†</sup> Ren Di-Yuan<sup>1)</sup> Wang Yi-Yuan<sup>1)‡</sup>  
Guo Qi<sup>1)</sup> Yu Xue-Feng<sup>1)</sup> He Cheng-Fa<sup>1)</sup>

1) *Xinjiang Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China*

2) *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

( Received 18 November 2008 ; revised manuscript received 8 January 2009 )

### Abstract

There are many factors such as process technologies , dose rates and biased conditions which can affect radiation damage in npn transistors. High- and low-dose-rate radiation response of domestic npn transistors with three kinds of emitter areas were investigated in this article. The influence of emitter area on radiation damage was analyzed. The results show that the degradation of current gain was more severe at low dose rate , i. e. enhanced low-dose-rate sensitivity. Furthermore , radiation damage was more apparent at low current injection. Through the comparison of radiation damage for different emitter areas , it was found that greater perimeter-to-area ratio (  $P/A$  ) would cause greater normalized excess base current (  $I_B/I_{B0}$  ). The damage mechanism for npn transistors is explained in detail , and the radiation hardness assurance is explored with respect to the emitter area and operating voltage of npn transistors.

**Keywords** : emitter area , domestic npn transistors , dose rate , radiation damage

**PACC** : 6180 , 6180E , 8750G , 7870

<sup>\*</sup> Project supported by the Foundation of State Key Laboratory of Integrated Analog Circuits , China ( Grant No. 9140C090403070C09 ).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail : luwu@ms.xjb.ac.cn