

双极晶体管的低剂量率电离辐射效应

张华林 陆 妩 任迪远 郭 旗 余学锋 何承发 艾尔肯 崔 帅

(中国科学院新疆理化技术研究所, 乌鲁木齐 830011)

摘要: 通过对 npn 管和 pnp 管进行不同剂量率的电离辐射实验, 研究了双极晶体管的低剂量率辐射效应. 结果表明, 双极晶体管在低剂量率辐照下电流增益下降更为显著, 这是由于低剂量率辐照在氧化层中感生了更多的净氧化物正电荷浓度, 致使低剂量率下过量基极电流明显增大. 而辐照后 npn 管比 pnp 管具有更大的有效表面复合面积, 致使前者比后者有更大的表面复合电流, 从而导致了在各种剂量率辐照下, npn 管比 pnp 管对电离辐射都更为敏感.

关键词: 低剂量率; 电离辐射; 双极晶体管; 空间电荷

PACC: 6180E **EEACC:** 2560J

中图分类号: TN324⁺.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4177(2004)12-1675-05

1 引言

自从 1991 年 Enlow 等人发现双极器件具有低剂量率辐射损伤增强效应(enhanced low dose rate sensitivity, ELDRS)以来, 国内外大量研究结果表明, 许多双极器件都具有 ELDRS 效应^[1-10]. 这将导致由于设计时没有考虑双极器件的 ELDRS 效应, 而使应用到空间环境中的电子系统提前失效^[11,12]. 由于这种潜在的损伤增强效应严重影响卫星等飞行器在空间的使用寿命, 因此必须对这些器件采取加固措施. 在加固之前, 首先要搞清楚这些器件低剂量率损伤增强效应的失效机理.

国内外研究表明, 许多双极线性集成电路, 如运算放大器、调压器、比较器等, 在低剂量率辐照下都会提前失效. 有的运算放大器在低剂量率辐照下失效是由于输入偏置电流的增大引起的, 有的是由于低剂量率辐照下输入失调电压增大引起的, 总之这些集成电路的失效都与其使用的晶体管增益下降有关. 为了更好地理解这些线性集成电路的失效机理, 必须搞清楚电路内部晶体管在低剂量率辐照下增益衰减的机理.

国外对双极晶体管的低剂量率损伤增强效应已

做了不少研究, 也提出了几个假定的模型, 但还不能解释所有的实验现象, 并且国内对国产双极晶体管 ELDRS 效应的研究报道还很少. 本文选用国产双极晶体管做了不同剂量率的辐照实验, 结果发现, 国产双极晶体管具有 ELDRS 效应. 本文结合边缘电场模型^[1]和空间电荷模型^[2-4]对国产双极晶体管的低剂量率损伤增强效应的机理进行了讨论.

2 实验

样品采用国产的 3CG120(pnp) 和 3DG120(npn) 晶体管. 辐射实验是在中国科学院新疆理化技术研究所的⁶⁰Co γ 源上进行的. 辐射剂量率分别为 0.01, 1, 50rad(Si)/s, 剂量率用 CaF₂ 热释光剂量片标定. 辐照样片被放置在铅铝屏蔽盒内, 以消除低能散射的影响. 辐照的偏置条件为发射结反向偏置(晶体管各管脚所加电压为, npn 管: 基极、集电极接地, 发射极接一个电阻, 然后加+ 2V 电压; pnp 管: 发射极、集电极接地, 基极接一个电阻, 然后接+ 2V 电压). 数据测试采用 HP4142B 测试仪离线进行, 每次测试都在辐照后 20min 内完成. 测试参数有基极电流(I_b)、集电极电流(I_c)、电流增益($\beta = I_c/I_b$).

张华林 男, 1975 年出生, 硕士研究生, 主要从事电子元器件的低剂量率电离辐射效应的研究工作.

陆 妩 女, 1962 年出生, 副研究员, 主要从事线性电路的可靠性、损伤分析及工艺优化的研究工作.

2003-11-03 收到, 2004-03-16 定稿

3 结果

实验观测了 I_b , I_c 和 β 在不同剂量率下的总剂量辐照特性. 从实验结果看出, 三种剂量率下, 随着辐照总剂量的增加, 敏感参数 I_b 都相应增大, npn 管和 npn 管有类似的实验现象.

双极晶体管在遭受电离辐照后, 其基极电流增大. 通常我们把辐照后的基极电流 (I_b) 减去辐照前的基极电流 (I_{b0}) 称为过量基极电流^[5], 即:

$$\Delta I_b = I_b - I_{b0} \quad (1)$$

图 1(a) 和(b) 分别给出了 npn 管和 pnp 管在辐照总剂量为 100krad(Si) 时不同剂量率的过量基极电流与基-射结电压的关系. 由图可见, 剂量率为 50 和 1rad(Si)/s 的过量基极电流辐照变化基本相同. 但剂量率下降到 0.01rad(Si)/s 时, 过量基极电流明显大于前两种辐照剂量率.

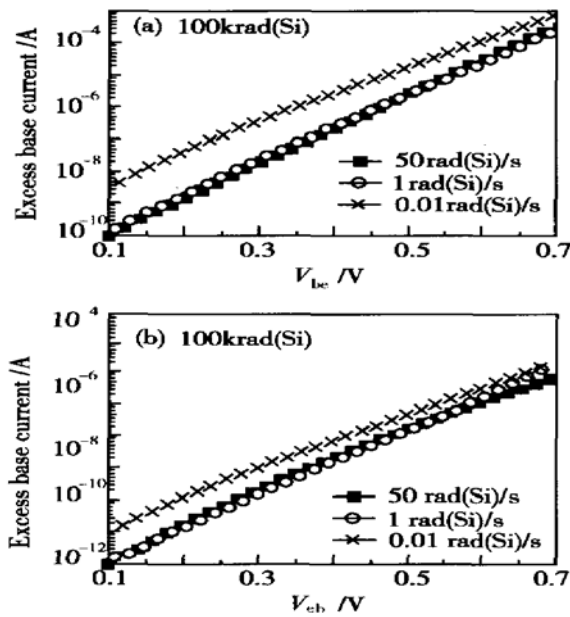


图 1 辐照总剂量为 100krad(Si) 时不同剂量率的过量基极电流与基-射结电压的关系 (a) npn 管; (b) pnp 管

Fig. 1 Excess base current versus base-emitter voltage for npn transistor (a) and pnp transistor (b)

与此相对应, 集电极电流 I_c 的实验结果表明, 在三种剂量率下, 随着辐照累积剂量的增加, I_c 都基本上保持不变.

图 2 是辐照总剂量为 100krad(Si) 时, npn 和 pnp 晶体管在不同剂量率辐照下电流增益与基-射结电压的变化关系. 由图可知, 三种不同剂量率辐照

下, 电流增益在总剂量达到 100krad(Si) 时都发生了明显下降. 同时可以看出, 在低剂量率辐照下, 电流增益退化更为显著.

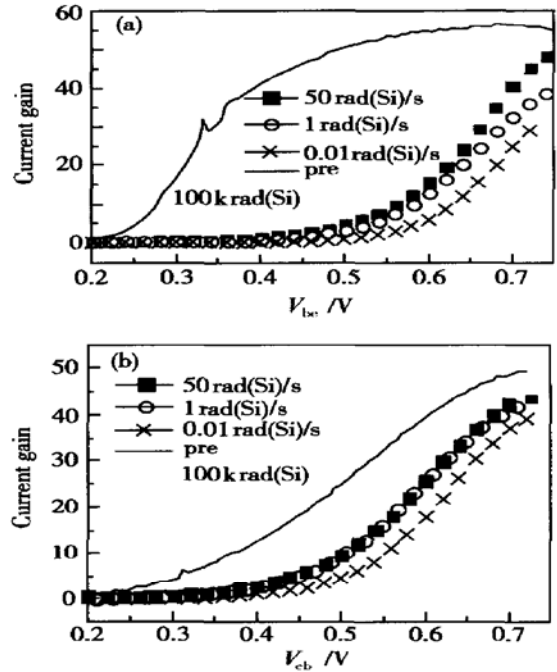


图 2 辐照总剂量为 100krad(Si) 时不同剂量率的电流增益与基-射结电压的变化关系 (a) npn 管; (b) pnp 管

Fig. 2 Current gain versus base-emitter voltage for npn transistor (a) and pnp transistor (b)

npn 管和 pnp 管的归一化电流增益与总剂量的关系如图 3(a) 和(b) 所示. 电流增益的归一化是归一到各自辐照前的电流增益(即 β/β_0). 由图可见, 在三种剂量率辐照下, 不同类型晶体管的电流增益都随着总剂量的增大而明显下降. 当剂量率为 1 和 50rad(Si)/s 时, 随着总剂量的增加, 增益退化的程度很接近; 但是当剂量率下降为 0.01rad(Si)/s 时, 电流增益退化明显增大. 例如, 当辐照总剂量为 100krad(Si) 时, 对于 npn 管剂量率为 50 和 1rad(Si)/s 的电流增益分别下降到初始值的 28.2% 和 30.4%; 与此相对应, pnp 管分别下降到辐照前的 68.2% 和 67.8%. 而当剂量率下降到 0.01rad(Si)/s 时, npn 管和 pnp 管电流增益则分别为辐照前的 15.4% 和 57.0%. pnp 管与 npn 管相比, pnp 管增益下降的幅度 β/β_0 明显比 npn 管的小.

4 讨论

由图 2 可见, 双极晶体管受到电离辐照后, 电流

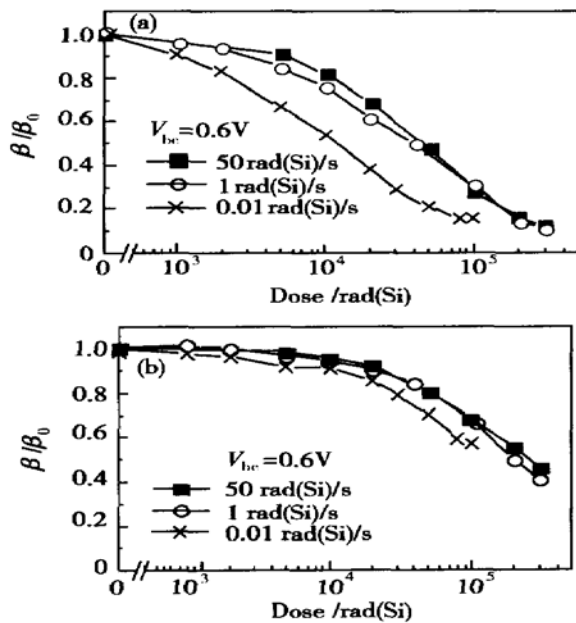


图3 npn管和pnp管在不同剂量率辐照下归一化电流增益与总剂量的关系 (a) npn管; (b) pnp管

Fig. 3 Normalized current gain versus dose for npn transistor (a) and pnp transistor (b)

增益下降;在低剂量率辐照下,电流增益衰降更为显著.这种低剂量率损伤增强效应可以结合边缘电场模型^[1]和空间电荷模型^[2-4]来解释.另外,由前面可知,pnp管和npn管有类似的实验结果,在此以npn管为例进行说明.

众所周知,在p-n结附近存在空间电荷区,空间电荷区内存在从n区指向p区的内建电场.而晶体管就是由两个p-n结组成的,在此主要讨论基-射结.由晶体管的生产工艺可知,在基-射结上覆盖有一层SiO₂氧化层.内建电场和外加的电压都在氧化层中形成边缘电场^[1].当基-射结加反向偏置电压时,外加电压增大边缘电场.

当高剂量率辐照时,在非加固器件的氧化层内产生大量的亚稳俘获空穴及慢运输空穴而积累形成空间电荷,这些空间电荷分布于整个氧化层中^[4].在空间电荷形成之前,辐照产生的电子和空穴将在边缘电场的作用下沿相反的方向运输,空穴沿电场方向缓慢移动或亚稳地俘获在氧化层内,而电子移向发射区表面.空间电荷形成后,由于这些空间电荷的作用,使得部分空穴沿与电场相反的方向运输,因此沿电场方向运输到基区Si/SiO₂界面的空穴数量减少.与此同时,部分电子被拉向空间电荷,使得俘获在氧化层内的电子增加.而这些电子对正电荷效应

具有补偿(在此不是电子-空穴对的复合)作用,这样就限制了净氧化物陷阱电荷在氧化层内的积累.

在低剂量率辐照下,氧化层内更多的正电荷有时间沿电场方向运输到Si/SiO₂界面,形成深陷阱^[4].这些电荷不能明显影响随后辐照产生的电荷的运输,这样在氧化层内俘获的电子将随着剂量率的降低而减少.因此,与高剂量率辐照相比,低剂量率辐照下有更少的正电荷被俘获的电子补偿,使得低剂量率辐照下净氧化物正电荷浓度更大.而过量基极电流对净正电荷浓度 N_{ox} 有很强的依赖关系^[2],即:

$$\Delta I_b \propto \exp(N_{ox})^2 \quad (2)$$

这将导致低剂量率辐照下有更大的过量基极电流,即图1所示的结果.

正是由于低剂量率辐照下有更大的过量基极电流,才使得低剂量率辐照下电流增益衰降更为显著.

图2和图3的实验结果表明,在三种不同剂量率辐照下,pnp管增益衰降的幅度 β/β_0 均比npn管的小,对此可以做如下解释.

我们知道电流增益的退化主要是由导致过量基极电流的表面复合电流增加引起的.基-射结附近的表面复合电流 I_{scb} 可由下式表示^[6]:

$$I_{scb} = qSA_s\Delta n_s \quad (3)$$

式中 S 为基区表面复合速率,它与界面态有关; Δn_s 为表面处非平衡电子浓度,它与注入电流密度及氧化层中正电荷密度有关; A_s 为基区表面复合有效面积; q 为电子的荷电量.

样品在受到电离辐射后,氧化物陷阱电荷和界面态都会明显增加^[2-4],这将导致 S 和 Δn_s 增大,从而使得 I_{scb} 增大.

对npn管,发射结上氧化层中辐射感生的正氧化物陷阱电荷的积累将耗尽轻掺杂的p-型基区,即耗尽层向p-型基区扩展,结果导致总的耗尽表面积增加^[3,5,7].耗尽表面积的增加使得 A_s 增加,这将引起表面复合电流进一步增大.

对pnp管,n-型基区不耗尽,而p-型发射区是重掺杂的^[7],需要很大的正氧化物电荷浓度去耗尽表面.

因此氧化层中的正陷阱电荷对pnp管的影响比对npn管的小,即pnp管的辐射损伤相应的比npn管的小.

5 结论

通过上述研究,可以得到以下结论.

(1) 在实验的剂量率范围内,不论 npn 还是 pnp 晶体管,都对电离辐射很敏感,且随着剂量率的降低,辐照损伤也越大,即 npn 和 pnp 晶体管都有低剂量率辐射损伤增强效应.

(2) 双极晶体管电流增益的下降主要是由基极电流增加引起的.而在低剂量率辐照下,电流增益衰减更为显著则是由于低剂量率辐照在氧化层中感生了更多的净氧化物正电荷浓度,致使过量基极电流明显增大.

(3) 在各种剂量率辐照下, npn 管均比 pnp 管对电离辐射更为敏感.这是由于辐照后前者具有更大的有效表面复合面积,致使 npn 管比 pnp 管有更大的表面复合电流.

(4) 国产双极晶体管具有 ELDRS 效应,因此,在设计低剂量率环境下使用的器件时,必须对双极器件的 ELDRS 效应引起足够的重视.

参考文献

- [1] Pershenkov V S, Maslov V B, Cherepko S V, et al. The effect of emitter junction bias on the low dose rate radiation response of bipolar devices. *IEEE Trans Nucl Sci*, 1997, NS-44(6): 1840
- [2] Fleetwood D M, Kosier S L, Nowlin R N, et al. Physical mechanism contributing to enhanced bipolar gain degradation at low dose rates. *IEEE Trans Nucl Sci*, 1994, NS-41(6): 1871
- [3] Schmidt D M, Fleetwood D M, Schrimpf R D, et al. Comparison of ionizing-radiation-induced gain degradation in lateral, substrate, and vertical PNP BJTs. *IEEE Trans Nucl Sci*, 1995, NS-42(6): 1541
- [4] Fleetwood D M, Riewe L C, Schwank J R. Radiation effects at low electric fields in thermal, SIMOX, and bipolar-base oxides. *IEEE Trans Nucl Sci*, 1996, NS-43(6): 2537
- [5] Kosier S L, Schrimpf R D, Nowlin R N, et al. Charge separation for bipolar transistors. *IEEE Trans Nucl Sci*, 1993, NS-40(6): 1276
- [6] Bi Keyun, Qiao Dengjiang, Wang Changhe, et al. Radiation hardness technology of electronic devices. 2003: 169(in Chinese)[毕克允,乔登江,王长河,等.电子元器件抗辐射加固技术. 2003: 169]
- [7] Nowlin R N, Enlow E W, Schrimpf R D, et al. Trends in the total-dose response of modern bipolar transistors. *IEEE Trans Nucl Sci*, 1992, NS-39(6): 2026
- [8] Enlow E W, Pease R L, Combs W. Response of advanced bipolar processes to ionizing radiation. *IEEE Trans Nucl Sci*, 1991, NS-38(6): 1342
- [9] Rashkeev S N, Cirba C R, Fleetwood D M, et al. Physical model for enhanced interface-trap formation at low dose rates. *IEEE Trans Nucl Sci*, 2002, NS-49(6): 2650
- [10] He Baoping, Yao Yujuan, Peng Honglun, et al. Influence of temperatures and radiation dose rate on CMOS device characteristic parameter. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2001, 22(6): 779(in Chinese)[何宝平,姚育娟,彭宏论,等.环境温度、电离辐射剂量率对 NMOSFET 器件特性参数的影响. *半导体学报*, 2001, 22(6): 779]
- [11] Titus J L, Turflinger T L, Krieg J F, et al. First observations of enhanced low dose rate sensitivity(ELDRS) in space: One part of the MPTB experiment. *IEEE Trans Nucl Sci*, 1998, NS-45(6): 2673
- [12] Titus J L, Emily D, Krieg J F, et al. Enhanced low dose rate sensitivity(ELDRS) of linear circuits in a space environment. *IEEE Trans Nucl Sci*, 1999, NS-46(6): 1608

Low Dose Rate Ionizing Radiation Response of Bipolar Transistors

Zhang Hualin, Lu Wu, Ren Diyuan, Guo Qi, Yu Xuefeng, He Chengfa, Erkin and Cui Shuai

(*Xinjiang Institute of Physics and Chemistry, The Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China*)

Abstract: The effect of low dose rate ionizing radiation is investigated for npn and pnp transistors which are sensitive to the enhanced low dose rate damage. The results show that the current gain degradation of bipolar transistors is larger at low dose-rate than high dose-rate, and npn transistor is more sensitive than pnp transistor. Possible mechanisms for enhanced damage are discussed.

Key words: low dose rate; ionizing radiation; bipolar transistor; space charge

PACC: 6180E **EEACC:** 2560J

Article ID: 0253-4177(2004)12-1675-05

Zhang Hualin male, was born in 1975, MS candidate. He is engaged in the research work on ionizing radiation effect of the semiconductor devices at low dose rates.

Lu Wu female, was born in 1962, associate professor. Her research areas include the reliability and damage analysis as well as the processes optimum of linear circuits.

Received 3 November 2003, revised manuscript received 16 March 2004

©2004 The Chinese Institute of Electronics