

# 集电极偏置电流对硅 npn 晶体管 $\gamma$ 辐照效应的影响\*

程兴华<sup>1</sup> 王健安<sup>3</sup> 龚敏<sup>1,2</sup> 石瑞英<sup>1,2,†</sup> 蒲林<sup>3</sup> 刘伦才<sup>3</sup> 郭丰<sup>1</sup> 杨晨<sup>1</sup>

(1 四川大学物理科学与技术学院 微电子学系, 成都 610064)

(2 微电子技术四川省重点实验室, 成都 610064)

(3 模拟集成电路国家重点实验室, 重庆 400060)

**摘要:** 对硅 npn 双极晶体管(C2060)室温下不同集电极偏置电流条件下  $\gamma$  辐照的总剂量效应进行了研究. 结果表明, npn 晶体管的辐照损伤程度随着辐照总剂量的增加而增加; 尤其是实验中发现: 在相同的辐照总剂量下随着辐照时集电极偏置电流的增加, 晶体管的辐照损伤程度却在减轻. 空间电荷模型的观点并不能很好地解释辐照损伤与辐照集电极偏置电流的关系. 文章对空间电荷模型进行了修正, 认为除氧化物俘获电荷和界面俘获电荷外, 还会在外基区 Si-SiO<sub>2</sub> 界面附近形成电中性的电偶极子. 利用修正后的理论可以很好地解释所有的实验结果.

**关键词:** 集电极偏置电流; 总剂量效应; 电偶极子; 空间电荷模型

**PACC:** 6180E; 8160C **EEACC:** 2560J; 2550R

**中图分类号:** TN325+.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4177(2007)08-1248-04

## 1 引言

自 20 世纪 50 年代以来人们对半导体材料和器件的辐照效应进行了广泛的研究. 由于技术的原因, 最初的研究主要集中在硅器件上. 研究表明, 硅双极型晶体管在  $\gamma$  辐照下基区电流增大和电流增益退化. Hart 等人认为这种现象是由  $\gamma$  辐照在双极型晶体管外基区表面氧化层内诱生的氧化物俘获电荷和界面俘获电荷引起的<sup>[1]</sup>. 后来的研究表明, 影响硅双极型晶体管  $\gamma$  辐照效应的因素有: 辐照时晶体管的偏置电压, 晶体管的极性、发射极工艺、发射极几何尺寸、基区结构和辐照剂量率等<sup>[2,3]</sup>. 近年来, 人们把注意力转移到硅双极型晶体管的低剂量率辐照损伤增强效应的物理机理, 低剂量率辐照的加速模拟实验方法<sup>[4~7]</sup> 及新结构器件, 如异质结双极晶体管(HBT)和高电子迁移率晶体管(HEMT)等的辐照效应研究上<sup>[8~10]</sup>. 尽管如此, 辐照时集电极偏置电流的变化对双极型晶体管  $\gamma$  辐照效应的影响仍未见报道,  $\gamma$  辐照的机理也并不是完全清楚. 而辐照时双极型晶体管集电极偏置电流的大小对工作于空间环境下的电子系统的工作电流的确定是非常重要的, 它可以使工作于  $\gamma$  辐照环境下的电子系统所受  $\gamma$  辐照的影响最小. 同时由于人们对硅器件的研究比较成熟, 相对于新结构器件而言, 选择硅器件更容易研究辐照本身的机理, 为新结构器件辐照机理的

研究打下基础. 针对上述情况, 本文研究了硅 npn 双极型晶体管(C2060)在不同集电极偏置电流条件下进行  $\gamma$  辐照时晶体管特性的变化. 研究表明: 随着  $\gamma$  辐照时所加集电极偏置电流的增加, 基极电流的增量减小, 电流增益、BC 结的反向击穿电压等的退化越轻. 现有的理论并不能很好地解释这种实验现象. 文中对空间电荷模型进行了修正, 我们认为: 在  $\gamma$  辐照时, 除了像空间电荷模型与边缘电场理论描述的那样, 在 npn 晶体管外基区表面氧化层中形成氧化物俘获电荷和在外基区 Si-SiO<sub>2</sub> 界面形成界面俘获电荷外, 还会有一部分输运到 Si-SiO<sub>2</sub> 界面附近的空穴与外基区 Si-SiO<sub>2</sub> 界面附近的非平衡电子结合形成电中性的电偶极子. 修正后的理论可以很好地解释所有的实验结果.

## 2 实验与结果

实验样品选用型号为 C2060 的双极型 npn 晶体管, 辐照实验是在中国科学院新疆理化技术研究所的<sup>60</sup>Co  $\gamma$  源上进行的, 辐照温度为室温. 辐照时所加的偏置条件为: (1) 不加偏置, 即晶体管所有管脚悬空; (2) 加偏置,  $I_c = 20\text{mA}$ ,  $V_{ce} = 1.8\text{V}$ ; (3) 加偏置,  $I_c = 40\text{mA}$ ,  $V_{ce} = 1.8\text{V}$ ; (4) 加偏置,  $I_c = 60\text{mA}$ ,  $V_{ce} = 1.8\text{V}$ . 辐照剂量率为  $283\text{rad}(\text{Si})/\text{s}$ , 辐照总剂量为  $10^6\text{rad}(\text{Si})$ .  $1\text{rad}(\text{Si})$  为每克硅交付  $10^{-5}\text{J}$  的电离辐射能量. 数据测试采用 HP4142B 离线测试, 在

\* 模拟集成电路国家重点实验室基金资助项目(批准号: 51439040105SC02)

† 通信作者. Email: ruiyshi@163.com

2006-12-30 收到, 2007-04-11 定稿

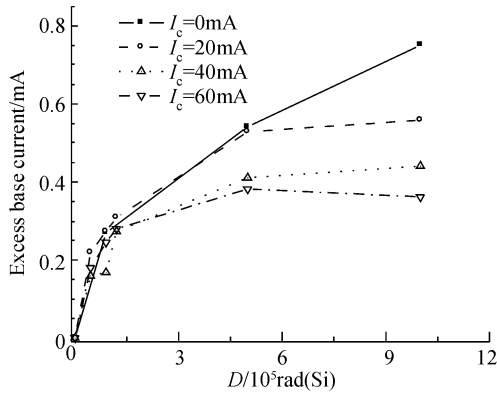


图 1 室温下不同集电极偏置电流条件下进行  $\gamma$  辐照时过量基极电流与辐照总剂量的关系

Fig.1 Excess base current versus total dose at different current biases

辐照前和辐照剂量分别达到  $4.52 \times 10^4$ ,  $9.02 \times 10^4$ ,  $1.2 \times 10^5$ ,  $5 \times 10^5$ ,  $1 \times 10^6$  rad(Si) 各测试一次, 共测试 6 次, 每次测试均在 20min 内完成. 测试的参数有输出特性曲线、正反向 G-P 图、不同辐照集电极偏置电流下电流增益  $h_{FE}(I_c/I_b)$  与辐照总剂量的关系曲线及晶体管 E 极开路时 BC 结反向击穿电压  $BV_{cbo}$ .

图 1 为 npn 晶体管(C2060)在不同集电极偏置电流条件下辐照, 过量基极电流  $\Delta I_b$  ( $\Delta I_b = I_b - I_{b0}$ ) 与辐照总剂量的变化关系.  $I_{b0}$  为辐照前的基极电流;  $I_b$  为辐照后的基极电流. 由图 1 可以看出, 在同样的集电极电流偏置条件下, 辐照诱生的过量基极电流随着  $\gamma$  辐照剂量的增加而增加; 而在相同的辐照总剂量下, 辐照诱生的过量基极电流却随着  $\gamma$  辐照时所加集电极偏置电流的增加而减小.

图 2 为 npn 晶体管(C2060)不同集电极偏置电流条件下进行  $\gamma$  辐照时, 归一化电流增益与辐照总剂量的变化关系.  $h_{FE0}$  为辐照前的 npn 晶体管的电流增益;  $h_{FE}$  为辐照后的 npn 晶体管的电流增益. 由图 2 可知, 在同样的集电极电流偏置条件下, 电流增益的退化程度随着  $\gamma$  辐照剂量的增加而增加; 在相同的辐照总剂量下, 随着辐照时集电极偏置电流的增加, 电流增益的退化程度却在减轻.

由图 1 和图 2 可以观察到过剩基极电流及电流增益随辐照总剂量的增加而趋于饱和. 这是因为在较高的总剂量下, 大量电荷积聚在氧化层中, 在轻掺杂基区产生明显的复合现象. 一旦发生此现象, 基区过剩电流与轻掺杂基区的总面积成正比, 在大总剂量下基区过剩电流的额外增加相对较小. 达到这一临界数量时, 基区过剩电流达到饱和<sup>[11]</sup>.

图 3 为 npn 晶体管(C2060)不同集电极偏置电流条件下辐照时, 归一化的 BC 结反向击穿电压与

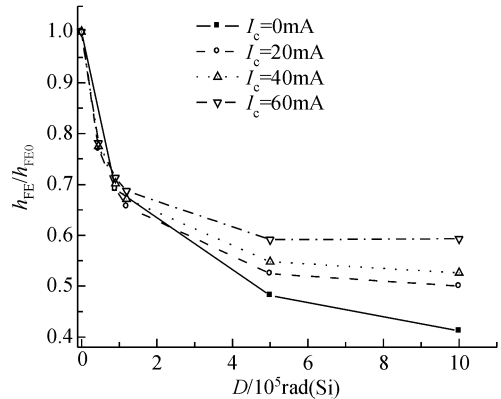


图 2 室温下不同集电极偏置电流条件下进行  $\gamma$  辐照时归一化电流增益与辐照总剂量的关系

Fig.2 Normalized gain versus total dose at different current biases

辐照总剂量的变化关系.  $BV_{cbo0}$  表示辐照前的 npn 晶体管的 BC 结反向击穿电压;  $BV_{cbo}$  为辐照后的 npn 晶体管的 BC 结反向击穿电压. 由图 3 可以看出, 在不同集电极偏置电流条件下进行  $\gamma$  辐照时, BC 结反向击穿电压  $BV_{cbo}$  总是随着辐照总剂量的增加而下降; 但 BC 结反向击穿电压的退化程度却随着辐照时所加集电极偏置的增加而减轻.

结合以上实验现象可知, 在同样的集电极电流偏置条件下, 晶体管特性的退化程度随着  $\gamma$  辐照剂量的增加而增加, 这与文献中发表的结果<sup>[7]</sup>是一致的; 但在相同的辐照总剂量下, 随着辐照时集电极偏置电流的增加, 晶体管的性能退化程度却在降低, 这是以往所发表的文献中没有观察到的实验现象.

### 3 讨论

对于实验中观察到的在同样的集电极电流偏置

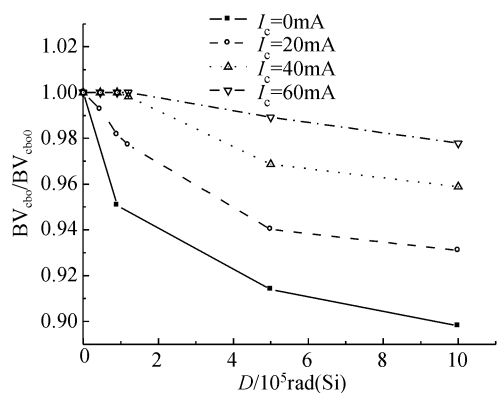


图 3 室温下不同集电极偏置电流辐照时归一化 BC 结反向击穿电压  $BV_{cbo}$  与辐照总剂量的关系

Fig.3 Normalized  $BV_{cbo}$  versus total dose at different current biases

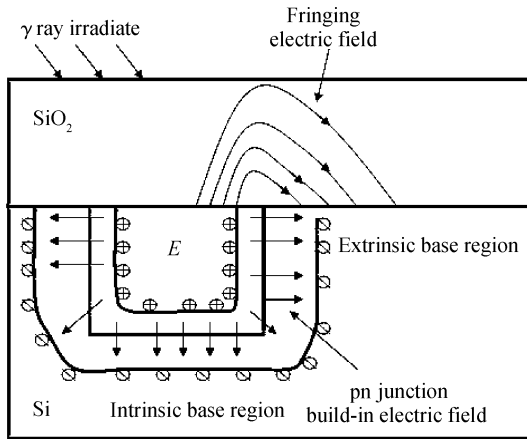
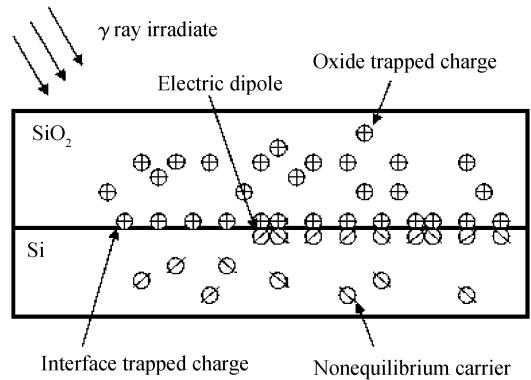


图 4 npn 晶体管剖面图及其边缘电场

Fig. 4 Cross section of npn transistor and its fringing electric field

条件下,晶体管特性的退化程度随着  $\gamma$  辐照剂量的增加而增加这种实验现象,文献中已经有了很好的解释.根据空间电荷模型<sup>[4-6]</sup>, $\gamma$  辐照将在双极型晶体管外基区表面氧化层中诱生出电子-空穴对,电子和空穴将在如图 4 所示的边缘电场<sup>[12]</sup>作用下朝相反的方向运动,空穴将向 Si-SiO<sub>2</sub> 界面缓慢输运,在这个过程中一部分空穴掉入辐照诱生的陷阱( $E_0$  中心,此陷阱可使辐照诱生的空穴保留在氧化物体内几秒或几分钟<sup>[13]</sup>)中形成氧化物俘获电荷,另一部分空穴输运到 Si-SiO<sub>2</sub> 界面,与那里的悬挂键结合形成界面俘获电荷.氧化物俘获电荷导致外基区表面复合有效面积增加,界面俘获电荷导致外基区表面复合速度增加,从而引起基区电流增加;而电流增益的退化主要是由外基区表面复合电流增加引起的;BC 结反向击穿电压的退化主要是由外基区 Si-SiO<sub>2</sub> 界面处的界面俘获电荷引起的.

空间电荷模型可以解释本实验中所观察到的 npn 晶体管的退化程度随辐照总剂量的增加而增加这一实验现象,但不能解释实验中在同一辐照总剂量下 npn 晶体管性能的退化程度随着辐照时集电极偏置电流的增加而减轻这一重要现象.我们认为除了像空间电荷模型与边缘电场理论描述的那样: $\gamma$  辐照会在 npn 晶体管外基区表面氧化层中形成氧化物俘获电荷和在外基区 Si-SiO<sub>2</sub> 界面形成界面俘获电荷外,还会有一部分输运到 Si-SiO<sub>2</sub> 界面附近的空穴与外基区 Si-SiO<sub>2</sub> 界面附近的非平衡电子结合形成电中性的偶极子,如图 5 所示.界面俘获电荷成为外基区表面复合中心,而电偶极子不带电,不能起到复合中心的作用.随着辐照时集电极偏置电流  $I_c$  的增加,基区的注入电流密度增大,基区的非平衡电子的浓度增加.由于外基区 Si-SiO<sub>2</sub> 界面附近

图 5 辐照诱生电荷在 SiO<sub>2</sub>-Si 界面分布示意图Fig. 5 Distribution of the  $\gamma$  induced Si-SiO<sub>2</sub> interfaces and trapped charges in oxide layer

的电子浓度较大,输运到 Si-SiO<sub>2</sub> 界面的那部分空穴的大部分还没来得及与界面处的悬挂键相结合形成界面俘获电荷,就被外基区 Si-SiO<sub>2</sub> 界面附近的非平衡电子补偿,形成电中性的电子-空穴偶极子,而不能形成界面俘获电荷.这导致了辐照诱生的界面俘获电荷浓度降低.虽然这种非平衡电子的补偿作用对界面俘获电荷的形成的影响是非常大的,严重地阻碍了界面俘获电荷的形成,降低了界面俘获电荷的浓度,但对氧化物俘获电荷的形成影响却很小,这一点在图 1 和图 2 的实验现象中体现得很明显.集电极偏置电流越大,基区的非平衡电子浓度就越大,这种补偿效应就越严重,界面俘获电荷浓度的降低就越严重,表面复合中心浓度和表面复合电流的减小就越严重,npn 晶体管的退化程度就越小.

## 4 结论

随着辐照时集电极偏置电流  $I_c$  的增加,硅 npn 双极型晶体管的性能退化程度反而减轻.我们认为其原因在于: $\gamma$  辐照在外基区表面氧化层中诱生的空穴输运到 Si-SiO<sub>2</sub> 界面后,一部分和界面悬挂键结合形成界面俘获电荷,另一部分和外基区中 Si-SiO<sub>2</sub> 界面附近的非平衡电子结合形成电中性的偶极子,而不是像空间电荷模型所描述的输运到界面的空穴都与悬挂键结合形成界面俘获电荷.随着辐照时集电极偏置电流  $I_c$  的增加,基区内非平衡电子浓度增大,它和  $\gamma$  辐照在外基区 Si-SiO<sub>2</sub> 界面附近氧化层中诱生的空穴结合形成电中性的电子-空穴偶极子的机会就越大.这阻碍了外基区 Si-SiO<sub>2</sub> 界面处的界面俘获电荷的形成,使界面俘获电荷浓度随着集电极偏置电流的增加而降低.从而使得晶体管的性能退化程度减轻.

致谢  $\gamma$  辐照实验是在中国科学院新疆理化所完成的,在此表示感谢.

### 参考文献

- [1] Hart A R, Smyth J B. Hardness assurance consideration for long term ionizing radiation effects on bipolar structures. *IEEE Trans Nucl Sci*, 1978, NS-2(6):1502
- [2] Nowlin R N, Enlow E W, Schrimpf R D, et al. Trends in total-dose response of modern bipolar transistors. *IEEE Trans Nucl Sci*, 1994, NS-39(6):2026
- [3] Johnston A H, Swift G M, Rax B G. Total dose effect in conventional bipolar transistor and linear integrated circuits. *IEEE Trans Nucl Sci*, 1994, NS-41(6):2427
- [4] 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
- [5] Hjalmarsen H P, Pease R L, Witzack S C, et al. Mechanisms for radiation dose-rate sensitivity of bipolar transistors. *IEEE Trans Nucl Sci*, 2003, NS-50(6):1901
- [6] Zebrev G I, Pavlov D Y, Pershenkov V S, et al. Radiation response of bipolar transistors at various irradiation temperatures and electric biases; modeling and experiment. *IEEE Trans Nucl Sci*, 2006, NS-53(4):1981
- [7] Zhang Hualin, Lu Wu, Ren Diyan, et al. Low dose rate ionizing radiation response of bipolar transistor. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2004, 25(12):1675 (in Chinese) [张华林, 陆妩, 任迪远, 等. 双极晶体管的低剂量率电离辐射效应. *半导体学报*, 2004, 25(12):1675
- [8] Zhang S, Ni G, Gressler J D, et al. A comparison of the effects of gamma irradiation on SiGe HBT and GaAs HBT technologies. *IEEE Trans Nucl Sci*, 2000, NS-47(6):2521
- [9] Shatalov A, Subramanian S, Dentai A, et al. Neutron irradiation effects in InP/InGaAs single heterojunction bipolar transistors. *IEEE Trans Nucl Sci*, 2000, NS-47(6):2551
- [10] Vitusevich S A, Klein N, Belyaev A E, et al. Effects of  $\gamma$ -irradiation on AlGaIn/GaN-based HEMTs. *Phys Status Solidi A*, 2003, 195(1):101
- [11] Kosier S L, Combs W E, Wei A, et al. Bounding the total-dose response of modern bipolar transistors. *IEEE Trans Nucl Sci*, 1994, NS-41(6):1867
- [12] 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
- [13] Chen Panxun. Radiation effects on semiconductor devices and integrated circuits. Beijing: National Defence Industry Press, 2005:308 (in Chinese) [陈盘训. 半导体器件和集成电路的辐射效应. 北京: 国防工业出版社, 2005:308]

## Effects of Different Collector Current Biases on $\gamma$ Radiation Response of npn-BJT\*

Cheng Xinghua<sup>1</sup>, Wang Jian'an<sup>3</sup>, Gong Min<sup>1,2</sup>, Shi Ruiying<sup>1,2,†</sup>, Pu Lin<sup>3</sup>,  
Liu Luncai<sup>3</sup>, Guo Feng<sup>1</sup>, and Yang Chen<sup>1</sup>

(1 Department of Microelectronics, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

(2 Key Laboratory of Microelectronic Technology of Sichuan Province, Chengdu 610064, China)

(3 National Laboratory of Analog Integrated Circuits, Chongqing 400060, China)

**Abstract:** The total dose effect of  $\gamma$  irradiation at different biased collector currents on Si npn-BJTs was investigated. The experimental results show that the irradiation-induced degradation of an npn-BJT increases with the total dose; however, it decreases with the increase of the collector current at the same total dose. This phenomenon cannot be well explained by the recent space charge model. In this paper, a revised model is presented, in which there are electrically neutral dipoles near the Si-SiO<sub>2</sub> interface of the extrinsic base region. By using the new model, all the experimental results have been well interpreted.

**Key words:** collector current bias; total dose effect; electrically neutral dipoles; space charge model

**PACC:** 6180E; 8160C **EEACC:** 2560J; 2550R

**Article ID:** 0253-4177(2007)08-1248-04

\* Project supported by the Foundation of the National Laboratory of Analog Integrated Circuits of China (No.51439040105SC02)

† Corresponding author. Email: ruiyshi@163.com

Received 30 December 2006, revised manuscript received 11 April 2007

©2007 Chinese Institute of Electronics