

BPSG 膜双极晶体管的抗电离辐照性能研究

吕 曼¹ 张小玲¹ 张彦秀² 谢雪松¹ 孙江超¹ 王鹏鹏¹ 吕长志¹

1 (北京工业大学 北京 100124)

2 (北京燕东微电子有限公司 北京 100015)

摘要 对 $\text{SiO}_2+\text{BPSG}+\text{SiO}_2$ 钝化结构和 SiO_2+SiN 钝化结构的双极晶体管和 JW117 集成稳压器进行了 ^{60}Co 的 γ 辐照和不同温度下退火行为研究。结果表明,覆盖 BPSG 钝化膜的器件抗辐照性能明显强于 SiN 钝化膜的器件。BPSG 对 Na^+ 具有很好的吸收作用, SiO_2 层中的 Na^+ 很大部分被吸收到 BPSG 膜中,降低了双极晶体管基区的表面复合速率,减少过剩基极电流,这可能是 BPSG 钝化膜器件抗辐照性能好的主要原因。通过对器件辐照后不同温度下的退火实验,保证了 BPSG 钝化膜器件辐照后的工作可靠性。

关键词 BPSG, 钝化层, 电离辐照, 退火

中图分类号 TL72

随着空间技术以及核技术的快速发展,双极晶体管电路的抗辐照性能和电子系统的可靠性研究日益受到人们重视。大量研究表明,双极晶体管受电离辐照总剂量效应主要表现为电流增益下降和漏电流的增加,主要原因为氧化层电荷的积累和 Si/SiO_2 界面陷阱电荷的增加。因此,提高器件电路在电离辐照环境下的可靠性研究成为一项重要课题。

硼磷硅玻璃(BPSG: boro-phospho-silicate-glass)钝化凭借其填充能力和回流特性等方面的优点在半导体工艺中得到广泛使用,国内外对器件的钝化工艺进行了研究^[1-4],但是其优良特性在器件抗辐照性能上的表现却几乎未见报道。本文重点研究 BPSG 钝化与 SiN 钝化器件在电离辐照总剂量效应下的不同响应,并分析了 BPSG 钝化器件的抗辐照机理。

1 实验样品及方法

实验样品为国产制作工艺相同、仅钝化膜不同的 JW117 集成稳压器以及集成稳压器内部双极晶体管的陪测样片。钝化层为 SiO_2+SiN , JW117 的编号为 1#、2#,陪测样片的编号为 5#、6#;钝化层为 $\text{SiO}_2+\text{BPSG}+\text{SiO}_2$, JW117 的编号为 11#、12#,陪测样片的编号为 17#、18#,钝化膜均采用低温 PECVD 方法制备。为测试方便,双极晶体管样品均用双列直插式管壳封装。

辐照实验在 ^{60}Co γ 源上进行,辐照剂量率 0.5 Gy/s(Si)。为实现实验数据的准确可靠,实验样品的所有参数测试均在室温条件下辐照后 30 min 内完成。

双极晶体管采用 Keithley4200 测试仪与屏蔽盒组成的测试系统进行测试,测试参数包括基极电流(I_B)、集电极电流(I_C)、电流增益($\beta = \Delta I_C / \Delta I_B$)。

2 实验结果及讨论

2.1 实验结果

图 1 为国产集成稳压器 JW117 样品中辐照最敏感参数基准电压 V_{ref} 随辐照总剂量的变化关系。根据产品使用手册, $V_{\text{ref}} < 1.2 \text{ V}$ 时,器件失效。从图 1(b)中可以看出, SiN 钝化的器件(1#、2#)累积总剂量为 200 Gy 和 230 Gy 时器件失效。而采用 $\text{SiO}_2+\text{BPSG}+\text{SiO}_2$ “三明治”结构钝化的器件(11#、12#)在 1000 Gy 时仍未失效,在 1200 Gy 时 $V_{\text{ref}} < 1.2 \text{ V}$,器件失效(见图 1a)。可见 BPSG 钝化在器件的抗辐照性能上起到重要作用。

为了进一步探究 BPSG 抗辐照性能更强的原因,本文对两种测试样片的双极晶体管进行了测试。图 2 为双极晶体管的归一化电流增益($\beta : \beta_0$)随辐照总剂量增加的变化关系。从图中可以看出,随着辐照总剂量的增加,两种钝化工艺的双极晶体管参数持续退化。无论是 NPN 晶体管或 LPNP 晶体管, SiN 钝化的双极晶体管(5#、6#)比 BPSG 钝化的双极晶体管(17#、18#)电流增益下降更严重。由此可见, BPSG 钝化的双极晶体管抗辐照性能更强。另外,在相同电离辐照总剂量下, LPNP 晶体管比 NPN 晶体管损伤更严重,这是由于 LPNP 电流在基区表面横向运动的结果。

第一作者: 吕曼, 女, 1984 年出生, 2009 年毕业于辽宁工程技术大学, 现为北京工业大学硕士研究生, 从事半导体器件辐照特性研究
收稿日期: 2013-03-05, 修回日期: 2013-03-25

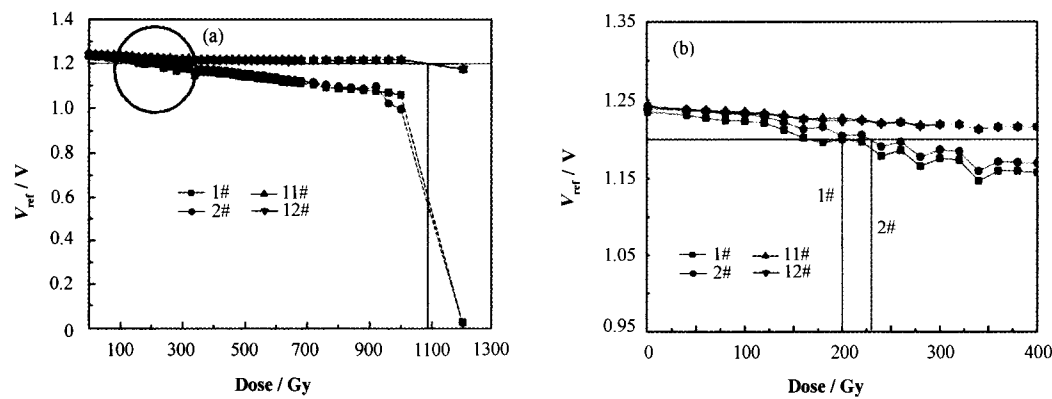


图 1 JW117 的基准电压 V_{ref} 随辐照总剂量(Si)的变化关系

(a) 整体图, (b) 局部放大图

Fig.1 V_{ref} of JW117 vs. total dose.

(a) overall figure, (b) partial enlarged figure

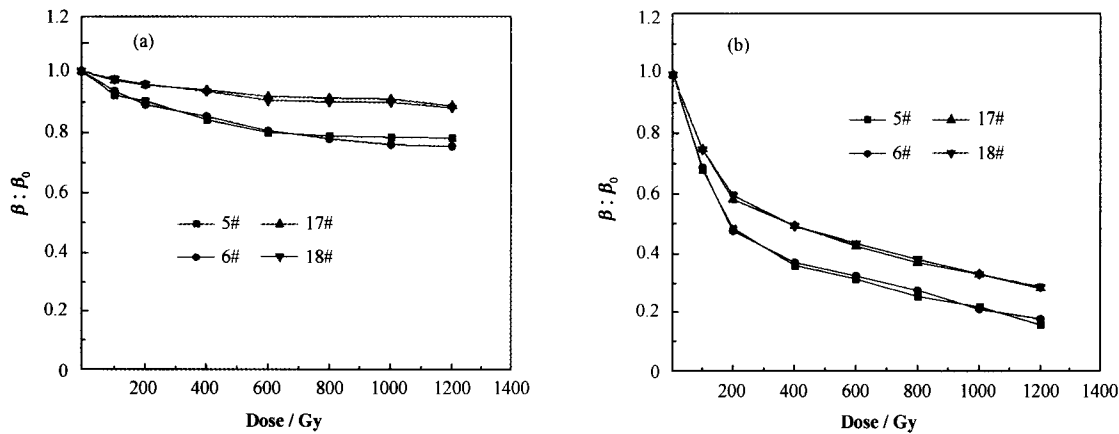


图 2 双极晶体管归一化电流增益随辐照总剂量(Si)积累的变化关系 (a) NPN, (b) LPNP

Fig.2 β/β_0 of BJT vs. total dose. (a) NPN, (b) LPNP

2.2 理论分析

线性集成电路中晶体管电流增益的衰减,主要是出现过剩电流的缘故。NPN 晶体管中过剩基极电流的增加是由于表面复合电流以及耗尽层复合电流增加所致。而 Si/SiO₂ 界面辐照过程中产生的界面态,尤其是禁带中心附近的界面态^[5],作为复合中心起作用。增加表面复合速率,增大表面复合电流,成为 LPNP 晶体管电流增益下降的主要原因。LPNP 晶体管损伤比 NPN 晶体管更严重,是因为 LPNP 晶体管中发射区注入的少子(空穴),从发射区向集电区横向运动,所以基区上方的负荷电流对 LPNP 晶体管影响更大,导致电离辐照对 LPNP 晶体管的损伤更强,含有 LPNP 晶体管的线性电路对电离辐照也特别敏感^[6]。

辐照会导致器件氧化层内产生大量的亚稳俘获空穴和慢输运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。氧化层中的电荷运输到 Si/SiO₂ 界面,形成深陷阱^[7],导致过量的基极电流增加,电流增益下降。氧化层中可动离子电荷(主要是 Na⁺)可以在 Si/SiO₂ 界面的垂直方向和水平方面移动,引起氧化层感应的电荷以及界面陷阱电荷的数量和位置发生变化,增加基区表面复合速率,导致过剩基极电流增加,电流增益下降。因此,减少氧化层中的 Na⁺是提高器件抗辐照性能的主要方法之一。

SiN 钝化膜对外界环境中的 Na⁺具有很强的阻挡作用,而 BPSG 钝化膜却可以吸收器件氧化层中的 Na⁺。Na⁺在 BPSG 中的溶解度比 SiO₂ 高出几个数量级,因此在形成 BPSG 过程中, SiO₂ 中大部分 Na⁺被吸收到 BPSG 层中而远离 Si/SiO₂ 界面,降低了 SiO₂ 中的可动 Na⁺。Na⁺被吸收和固定,使氧化层中的 Na⁺数量大大减少,这是 BPSG 膜抗辐照性能强的主要原因。

BPSG 膜中 P 的作用主要是吸收 Na^+ , 而 B 的作用主要是降低回流温度。BPSG 中的 B、P 以 B_2O_3 、 P_2O_5 形式存在, 这些氧化物在空气中容易吸水, 造成器件吸潮, 可靠性下降。为解决这一问题, 钝化过程中, BPSG 膜上覆盖一层致密的 SiO_2 膜。通过温湿试验(温度 85°C , 湿度 100%)的加速寿命试验, 实验结果已排除器件吸潮问题, 保证了器件工作的

可靠性。

2.3 退火效应

双极晶体管辐照后退火效应的研究也是考察器件可靠性的重要指标^[8], 图 3 为双极晶体管在不同温度下退火时间与归一化电流增益的关系。

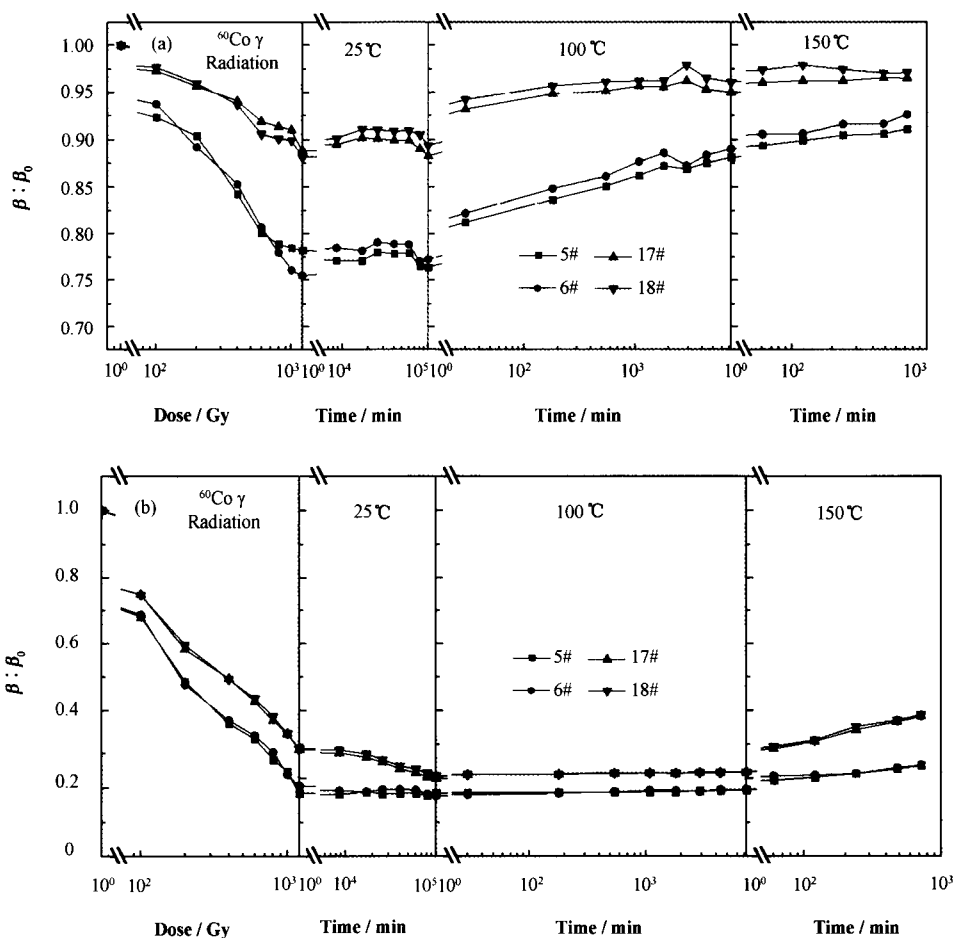


图 3 双极晶体管不同温度下退火时间与归一化电流增益的关系 (a) NPN, (b) LPNP

Fig.3 $\beta : \beta_0$ of BJT vs. annealing at different temperatures. (a) NPN, (b) LPNP

双极晶体管辐照后的退火可以反映出缺陷的行为, 这与器件典型参数的退化直接相关, 尤其是器件在辐照后常温退火过程中出现的界面态后生效应^[9], 这是因为工艺过程中引入了多的界面态所致。同时, 由于界面态对 LPNP 型晶体管电离辐照损伤的影响更大, 所以出现 25°C 下 LPNP 比 NPN 归一化电流增益有更明显的下降。另外, BPSG 钝化的 LPNP 晶体管比 SiN 钝化的 LPNP 晶体管表现明显。这与 BPSG 膜在辐照的高温条件下对 Na^+ 的吸收和固定作用强, 而低温下就会释放 Na^+ 有关。但是, BPSG 钝化的晶体管在退火过程中电流增益一直保持在 SiN 钝化的晶体管之上, 并有饱和趋势。

NPN 和 LPNP 晶体管分别在温度为 100°C 和 150°C 高温退火^[10], 辐照损伤恢复显著。NPN 和 LPNP 晶体管的退火效果不同, 可能与基区表面上的界面陷阱电荷的属性有关。因为双极晶体管中电子和空穴都参与导电, 而界面陷阱电荷的属性可正可负, 这样, 界面陷阱电荷的复合中心作用使器件电流增益下降严重。

3 结语

(1) BPSG 钝化可以提高器件的抗辐照性能, 与 SiN 钝化相比, JW117 电路的抗辐照性能提升显著。

(2) BPSG 吸附氧化层中很大一部分的 Na^+ , 使基区表面复合速率减小, 过剩基极电流减少, 双极晶体管损伤变小, 这是 BPSG 膜抗辐照性能强的最主要原因。

(3) 常温退火时, 器件参数恢复缓慢, 并且由于界面态后生效应, 电流增益出现了小幅下降, 在高温退火时, NPN 和 LPNP 晶体管恢复不同, 是因为氧化层电荷和界面陷阱电荷所需的温度不同。

参考文献

- 1 曾天亮, 江志庚. CVD BPSG 膜的沉积及其回流机理[J]. 半导体学报, 1986, 7(4): 374–380
ZENG Tianliang, JIANG Zhigeng. Deposition of CVD BPSG films and its reflow mechanism[J]. Chinese Journal of Semiconductors, 1986, 7(4): 374–380
- 2 陈思乡, 江征风, 胡业发, 等. 硅基 SiO_2 平面光波导中硼磷硅玻璃覆盖层的制备和研究[J]. 红外与毫米波学报, 2005, 24(5): 390–393
CHEN Sixiang, JIANG Zhengfeng, HU Yefa, *et al.* PECVD deposition of boro-phosphor-silicate-glass used for silica-based planar light wave circuits[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2005, 24(5): 390–393
- 3 Wilson P. The diffusion of boron and phosphorus in the Si-SiO₂ system[J]. Solid State Electron, 1988, 15(9): 961–970
- 4 Fuller R, Evans H, Gamlen C, *et al.* The effect of deposition conditions on the radiation tolerance of BPSG films[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1996, 43(6): 2565–2571
- 5 陆妩, 余学锋, 任迪远, 等. 双极晶体管不同剂量率的辐射效应和退火特性[J]. 核技术, 2005, 28(12): 925–928
LU Wu, YU Xuefeng, REN Diyuan, *et al.* Radiation effects and ageing characteristics of bipolar junction transistors subjected to high and low dose rate total dose irradiations[J]. Nuclear Techniques, 2005, 28(12): 925–928
- 6 高光渤, 李学信. 半导体器件可靠性物理[M]. 北京: 科学出版社, 1987: 248–511
GAO Guangbo, LI Xuexin. Reliability physics of semiconductor devices[M]. Beijing: Science Press, 1987: 248–511
- 7 Fleetwood D M, Riewe L C, Schwank J R. Radiation effects at low electric fields in thermal, SIMOX, and bipolar-base oxides[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1996, 43(6): 2537–2546
- 8 张国强, 陆妩, 范隆, 等. 注 FMOS 器件的可靠性研究[J]. 半导体学报, 1997, 18(4): 297–301
ZHANG Guoqiang, LU Wu, FAN Long, *et al.* Study on reliability of fluorinated MOS devices[J]. Chinese Journal of Semiconductors, 1997, 18(4): 297–301
- 9 陆妩, 郑玉展, 任迪远, 等. 工艺条件对双极晶体管低剂量率辐射损伤增强效应的影响[J]. 原子能科学技术, 2010, 44(1): 114–120
LU Wu, ZHENG Yuzhan, REN Diyuan, *et al.* Impact of process technologies on ELDRS of bipolar transistors[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2010, 44(1): 114–120
- 10 郑玉展, 陆妩, 任迪远, 等. 不同发射极面积 npn 晶体管高低剂量率辐射损伤特性[J]. 物理学报, 2009, 58(8): 5572–5577
ZHENG Yuzhan, LU Wu, REN Diyuan, *et al.* Characteristics of high- and low-dose-rate damage for domestic npn transistors of various emitter areas[J]. Acta Physica Sinica, 2009, 58(8): 5572–5577

Study on ionizing radiation effects of bipolar transistor with BPSG films

LV Man¹ ZHANG Xiaoling¹ ZHANG Yanxiu² XIE Xuesong¹
SUN Jiangchao¹ WANG Pengpeng¹ LV Changzhi¹

¹(Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

²(Beijing Yan Dong Microelectronics Company Limited, Beijing 100015, China)

Abstract Background: Because of the damage induced by ionizing radiation, bipolar transistors in integrated voltage regulator could induce the current gain degradation and increase leakage current. This will bring serious problems to electronic system. **Purpose:** In order to ensure the reliability of the device work in the radiation environments, the device irradiation reinforcement technology is used. **Methods:** The characteristics of ^{60}Co γ

irradiation and annealing at different temperatures in bipolar transistors and voltage regulators (JW117) with different passive films for SiO_2 +BPSG+ SiO_2 and SiO_2 +SiN have been investigated. **Results:** The devices with BPSG film enhanced radiation tolerance significantly. Because BPSG films have better absorption for Na^+ in SiO_2 layer, the surface recombination rate of base region in a bipolar transistor and the excess base current have been reduced. It may be the main reason for BJT with BPSG film having a good radiation hardness. And annealing experiments at different temperatures after irradiation ensure the reliability of the devices with BPSG films. **Conclusions:** A method of improving the ionizing irradiation hardness of bipolar transistors is proposed. As well as the linear integrated circuits which containing bipolar transistors, an experimental basis for the anti-ionizing radiation effects of bipolar transistors is provided.

Key words BPSG, Passivation layer, Ionizing radiation, Annealing

CLC TL72