

## 抗辐射双极 n-p-n 晶体管的研究\*

翟亚红<sup>†</sup> 李平 张国俊 罗玉香 范雪 胡滨 李俊宏 张健 束平

(电子科技大学电子薄膜与集成器件国家重点实验室, 成都 610054)

(2010年6月8日收到; 2011年2月16日收到修改稿)

根据发射极周长与面积比( $P/A$ )最小的原则, 优化设计了双极 n-p-n 晶体管的尺寸参数, 采用 20 V 双极型工艺设计制造了三种抗辐射加固的 n-p-n 晶体管. 测试表明, 在总剂量为 1 kGy 的辐照条件下, 所制备的发射结加固型 n-p-n 晶体管和含有重掺杂基区环的 n-p-n 晶体管, 辐照后的电流增益比常规结构的 n-p-n 晶体管高 10%—15%; 而两种加固措施都有的 n-p-n 晶体管, 辐照后的电流增益比常规结构的 n-p-n 晶体管高 15%—20%.

**关键词:** 双极 n-p-n 晶体管, 辐射效应, 电流增益, 抗辐射

**PACS:** 85.30.Pq, 61.80.-x

## 1. 引言

双极结型晶体管(BJT)由于具有好的电流驱动能力、线性度、低噪声以及优良的匹配特性<sup>[1]</sup>, 因此在航天星载设备以及武器装备等领域具有广泛的应用. 但 BJT 对电离辐射敏感<sup>[2,3]</sup>, 电离辐射对 BJT 的影响主要表现为电流增益下降<sup>[4-6]</sup>.

自从 20 世纪 90 年代 Enlow 等<sup>[7]</sup>报道了关于 BJT 低剂量率辐射损伤增强效应的工作以来, 国内外对于 BJT 辐射损伤的研究, 主要集中于比较不同剂量率辐照下辐射损伤的差别以及损伤机理等方面<sup>[8-12]</sup>, 从理论上提出了一些加固措施<sup>[13,14]</sup>, 但国内对具体器件采取加固措施后的抗辐射效果鲜见报道. 本文根据发射极周长与面积比( $P/A$ )最小的原则<sup>[15,16]</sup>, 优化了 n-p-n 晶体管的尺寸参数, 改进工艺结构, 设计了三种加固型 n-p-n 晶体管. 通过总剂量辐照实验, 验证了抗辐射加固措施的效果.

## 2. 器件设计与实验

## 2.1. 器件加固结构设计

本文设计的第一种加固型 n-p-n 晶体管的结构为发射结加固型结构. 这种结构是在常规的双极型

工艺中增加一层掩模版和一次刻蚀工艺, 减薄发射极-基极结表面二氧化硅的厚度(由 550 nm 减薄到 100 nm), 在薄的氧化层上添加金属场板, 且将金属场板与发射极金属相连. 图 1(a)所示为发射结加固型 n-p-n 晶体管的剖面图, 图 1(b)为常规结构 n-p-n 晶体管的剖面图.

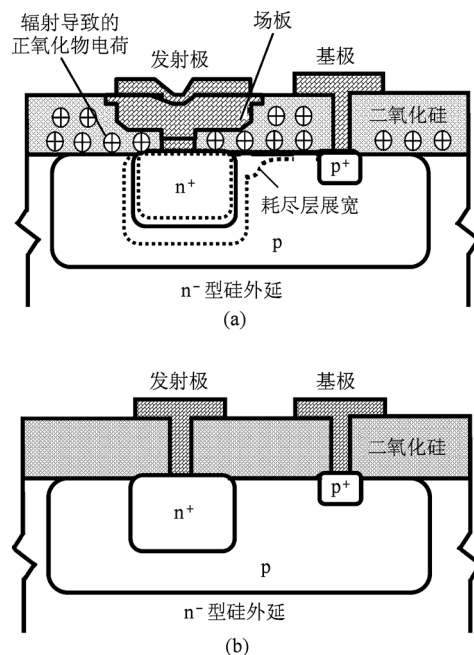


图 1 发射结加固型结构与常规结构的 n-p-n 晶体管剖面图 (a) 发射结加固型结构, (b) 常规结构

\* 电子薄膜与集成器件国家重点实验室创新基金(批准号: CXJJ200905)资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: yzhzhai@uestc.edu.cn

本文设计的第二种结构为含有重掺杂基区环的结构. 这种结构的 n-p-n 晶体管是在不影响其各项参数的前提下, 根据设计规则在基区距离发射极结  $6\ \mu\text{m}$  外的区域进行一次浓硼注入, 提高部分基区表面浓度, 形成浓硼环, 其中浓硼环的表面掺杂浓度为  $3 \times 10^{18}\ \text{cm}^{-3}$ , 基区表面掺杂浓度为  $1.5 \times 10^{18}\ \text{cm}^{-3}$ . 图 2 所示为有重掺杂基区环的 n-p-n 晶体管的剖面图.

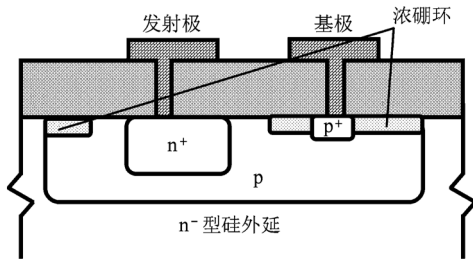


图 2 有重掺杂基区环的 n-p-n 晶体管剖面图

本文设计的第三种结构为同时采用了上述两种加固措施的结构. 该结构的 n-p-n 晶体管既含有重掺杂基区环又进行了发射结加固.



图 3 本文设计的三种加固型结构及常规结构的 n-p-n 晶体管版图 (a) 常规结构的 n-p-n 晶体管版图, (b) 发射结加固型结构的 n-p-n 晶体管版图, (c) 含有浓硼环结构的 n-p-n 晶体管版图, (d) 发射结加固 + 浓硼环结构的 n-p-n 晶体管版图

## 2.2. 发射极尺寸设计

三种加固型结构及常规结构的 n-p-n 晶体管的发射极尺寸均设计为  $24\ \mu\text{m} \times 42\ \mu\text{m}$  的矩形, 其发射极周长  $P$  与面积  $A$  之比  $P/A = 0.13\ \mu\text{m}^{-1}$ , 该参数在设计上主要是利用 BJT 发射极的  $P/A$  值越小其抗辐射能力越强的原则<sup>[15,16]</sup>. 发射极周长  $P$  由最大集电极工作电流  $I_{C,\text{max}}$  和发射极单位周长的电容量  $i_0$  决定<sup>[1]</sup>. 设计任务指标中  $I_{C,\text{max}}$  最大限定电流为  $50\ \text{mA}$ , 且要求 n-p-n 晶体管工作频率从直流到  $120\ \text{MHz}$ , 截止频率  $f_T$  最小为  $300\ \text{MHz}$ . 由于本文设计工作的加工单位为华越微电子科技有限公司, 根据该公司的相关工艺,  $i_0$  的最优值约为  $3.8\ \text{A/cm}$ . 根据公式<sup>[1]</sup>

$$P = \frac{I_{C,\text{max}}}{i_0}, \quad (1)$$

可取最优发射极周长  $P = 132\ \mu\text{m}$ . 发射极周长可表示为

$$P = 2(a + b), \quad (2)$$

周长与面积比可表示为

$$g(a, b) = \frac{P}{A} = \frac{2(a+b)}{ab}, \quad (3)$$

其中  $a, b$  分别表示发射极矩形的两个边长. 由(2), (3)式可得

$$g(a) = \frac{P}{A} = \frac{2(a+b)}{ab} = \frac{132}{a(66-a)}. \quad (4)$$

将(4)式对  $a$  求导, 并令  $g'(a) = 0$ , 可以得出, 当  $a = b = 33 \mu\text{m}$  时,  $P/A$  有最小值  $0.121 \mu\text{m}^{-1}$ . 最后根据版图设计规则以及对称性原则, 将发射极尺寸参数设计为  $24 \mu\text{m} \times 42 \mu\text{m}$ , 该结构  $P/A = 0.13 \mu\text{m}^{-1}$ . 该值非常接近最小值, 有利于提高 n-p-n 晶体管的抗辐射能力.

本文设计的三种结构及常规结构的 n-p-n 晶体管的版图如图 3 所示, 芯片采用华越微电子科技有限公司的 20 V 双极型工艺加工制造.

### 2.3. 总剂量辐照实验

电离辐射实验在西北核技术研究所  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$  射线源上进行, 辐照剂量率为  $0.056 \text{ Gy/s}$ , 总剂量为  $1 \text{ kGy}$ , 根据文献[2, 4]的报道, 本文实验的剂量率不属于低剂量率, 但因 n-p-n 晶体管在不同剂量率下性能退化趋势一致, 所以本文实验能够验证加固措施的效果. 实验数据是由安捷伦 4155B 型半导体参数分析仪采用离线采集获得, 辐照前后分别测量了晶体管的输出特性曲线、共发射极直流电流增益  $\beta$ 、击穿电压、漏电流以及基极-发射极电压降等参数.

### 3. 结果及讨论

实验表明, 辐照前后上述四种结构的 n-p-n 晶体管的击穿电压、关断电流以及基极-发射极电压降等变化很小, 说明总剂量辐照对这些参量的影响较小, 而辐照后电流增益显著降低.

表 1 为  $V_{\text{CE}} = 3 \text{ V}$ ,  $I_{\text{C}} = 1 \text{ mA}$  时上述四种结构的 n-p-n 晶体管辐照前电流增益  $\beta_0$  ( $\beta_0 = I_{\text{C}} / I_{\text{B}0}$ ) 和辐照后电流增益  $\beta$  ( $\beta = I_{\text{C}} / I_{\text{B}}$ ) 的测试结果. 从测试结果可以看出, 在总剂量为  $1 \text{ kGy}$  的辐照条件下, 三种采用了抗辐射加固结构的 n-p-n 晶体管

流增益的降幅较小, 其中采用发射结加固的 n-p-n 晶体管和采用重掺杂基区环的 n-p-n 晶体管, 其辐照后的电流增益比常规结构的晶体管高  $10\% - 15\%$ , 而两种加固措施都有的 n-p-n 晶体管辐照后的电流增益比常规结构的晶体管高  $15\% - 20\%$ , 具有较好的抗辐射效果.

表 1 四种结构的 n-p-n 晶体管辐照前后电流增益的测试结果 (测试条件:  $V_{\text{CE}} = 3 \text{ V}$ ,  $I_{\text{C}} = 1 \text{ mA}$ )

结构类型	未加固	发射结加固	含有浓硼环	发射结加固 + 浓硼环
$\beta_0$	230—260	230—260	230—260	230—260
$\beta$	80—100	110—128	110—130	115—135
$\beta/\beta_0$	35%—40%	45%—50%	45%—50%	50%—55%

双极 n-p-n 晶体管总剂量辐射效应的主要表现为电流增益的减小. 这主要是由以下两个方面原因所造成<sup>[17-20]</sup>: 第一个方面, 电离辐射在器件表面的氧化层中产生大量电子空穴对, 因在氧化物中电子的迁移率远高于空穴, 在电场的作用下电子以很快的速度向电极终端漂移, 而迁移率较低的正电荷被氧化物陷阱所俘获, 形成正氧化物电荷, 它们改变了侧墙氧化物及基极-发射极结表面的表面势  $\psi_s(y)$ <sup>[14, 16]</sup>, 使得半导体表面空间电荷发生变化, 特别是靠近发射极的部分基极表面反型, 这导致发射极-基极结在 Si/SiO<sub>2</sub> 界面延伸, 如图 1(a) 所示. 氧化物正电荷面密度  $N_{\text{ox}}$  导致半导体表面能带的弯曲可用耗尽近似表示为<sup>[14]</sup>

$$\psi_s(N_{\text{ox}}) = \frac{qN_{\text{ox}}^2}{2\epsilon_s N_s}, \quad (5)$$

式中  $N_s$  为本征基极的表面掺杂浓度, 单位为  $\text{cm}^{-3}$ . 由(5)式可知, 提高基极的表面掺杂浓度  $N_s$  可以降低  $\psi_s(y)$  的变化. 第二个方面, 电离辐射导致界面陷阱密度  $D_{\text{it}}$  增加, 从而使表面载流子复合速率  $V_s$  增加.

将电离辐射导致表面势变化和界面陷阱密度增加两方面因素结合起来, 得出纵向 n-p-n 晶体管在  $y$  位置的表面载流子复合速率<sup>[14, 21]</sup>

$$R_s(y) = \frac{n_i V_s \exp\left(\frac{qV_{\text{BE}}}{2kT}\right)}{2 \cosh\left[\frac{q}{kT}\left(\psi_s(y) - \frac{V_{\text{BE}}}{2}\right)\right]}. \quad (6)$$

这里  $n_i$  为本征载流子浓度;  $V_s$  为半导体表面载流子复合速率,  $V_s = \sigma V_{\text{th}} N_t$ , 其中  $\sigma$  为俘获截面,  $V_{\text{th}}$  为热载流子速度,  $N_t$  为载流子俘获密度.

基于 Kosier 等<sup>[21]</sup>提出的解析模型, 可得过剩基

极电流正比于基极表面载流子复合速率  $R_s$ , 即有如下的关系:

$$\Delta I_B \propto R_s \propto \exp\left(\left[\frac{N_{ox}}{\sqrt{2}L_D N_s}\right]^2\right), \quad (7)$$

式中  $L_D$  为本征德拜长度. 通过以上分析可知, 减少氧化物正电荷面密度以及提高基极表面掺杂浓度可降低表面载流子复合速率, 减少过剩基极电流, 提高电流增益.

本文设计的发射结加固型 n-p-n 晶体管, 通过增加一次刻蚀工艺, 减薄发射极-基极结表面二氧化硅的厚度, 从而减少电离辐射时正氧化物电荷的俘获, 减少表面势的变化. 同时, 发射极-基极结的金属场板与发射极接触孔端的金属相连, 工作时发射极电极接低电位, 使正氧化物陷阱电荷产生的电力线更多地终止于发射极金属电极, 基极表面层内感应的负电荷减少, 减小基极表面势的变化, 降低基极表面载流子复合速率, 减少过剩基极电流, 从而提高了器件的抗辐射能力<sup>[18]</sup>.

同样, 采用重掺杂基区环的 n-p-n 晶体管, 通过在基区距离发射极结  $6 \mu\text{m}$  外的区域进行一次浓硼的注入, 提高部分基区表面掺杂浓度, 降低基极表面载流子复合速率, 提高了 n-p-n 晶体管的抗辐射能力.

另一方面, 从实验结果可以看出, 本文设计加工的 n-p-n 晶体管, 即使采用未加固的结构, 因优化了发射极尺寸参数(即  $P/A = 0.13 \mu\text{m}^{-1}$ ), 在剂量率为  $0.056 \text{ Gy/s}$ , 总剂量为  $1 \text{ kGy}$  时电流增益  $\beta$  下降为原来的  $35\%—40\%$ . 而由文献[15]可知, 在剂量率为  $0.5 \text{ Gy/s}$ , 总剂量为  $1 \text{ kGy}$ , n-p-n 晶体管发射

极的  $P/A = 0.36 \mu\text{m}^{-1}$  时, 其电流增益  $\beta$  下降为原来的  $25\%$ , 而  $P/A = 0.67 \mu\text{m}^{-1}$  时  $\beta$  下降为原来的  $17\%$ . 这说明  $P/A$  最小化有利于提高 BJT 的抗辐射能力.

## 4. 结 论

本文设计了三种抗辐射加固结构的 n-p-n 晶体管, 并采用  $20 \text{ V}$  双极型工艺加工制造. 通过辐照实验表明: 与文献[15]中所报道的  $P/A$  值较大的 n-p-n 晶体管相比较, 在同样的辐照条件下本文设计的具有最小化发射极  $P/A$  的 n-p-n 晶体管的电流增益  $\beta$  下降较少. 当然, 这也有可能是由于实验剂量率不同所造成, 可在今后的工作中做进一步研究. 在总剂量为  $1 \text{ kGy}$  的辐照条件下, 发射结加固型 n-p-n 晶体管和含有重掺杂基区环的 n-p-n 晶体管辐照后的电流增益比常规结构的器件高  $10\%—15\%$ . 这说明本文实验的减薄基极-发射结上氧化层厚度, 同时添加金属场板的发射结加固型结构能有效提高 n-p-n 晶体管的抗辐射能力; 而且在不影响 n-p-n 晶体管基本性能的前提下, 提高部分基区表面浓度可提高器件的抗辐射能力. 在总剂量为  $1 \text{ kGy}$  的辐照条件下, 同时采用两种加固措施的器件在辐照后的电流增益比常规结构的 n-p-n 晶体管高  $15\%—20\%$ , 具有更好的抗辐射效果.

感谢成都华微电子科技有限公司李威总裁、张克林、谌谦工程师以及王连友高级工程师在芯片加工及测试工作上的帮助.

- [1] Chen X B, Zhang Q Z 2007 *Theory and Design of Transistor* (Beijing: Publishing House of Electronics Industry) p276 (in Chinese) [陈星弼、张庆忠 2007 晶体管原理与设计(北京:电子工业出版社)第276页]
- [2] Nowlin R N, Enlow E W, Schrimpf R D, Combs W E 1992 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **39** 2029
- [3] Fleetwood D M, Kosier S L, Nowlin R N, Schrimpf R D, Reber R A J, Delaus M, Winokur P S, Wei A, Combs W E, Pease R L 1994 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **41** 1871
- [4] Pease R L, Schrimpf R D, Fleetwood D M 2009 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **56** 1894
- [5] Wei A, Kosier S L, Schrimpf R D, Fleetwood D M, Combs W E 1994 *Appl. Phys. Lett.* **65** 1918
- [6] Chen X J, Barnaby H J, Schrimpf R D, Platteter D G, Dunham G 2006 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **53** 3649
- [7] Enlow E W, Pease R L, Combs W E, Schrimpf R D, Nowlin R N 1991 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **38** 1342
- [8] Li X J, Geng H B, Lan M J, Yang D Z, He S Y, Liu C M 2010 *Chin. Phys. B* **19** 066103
- [9] Rashkeev S N, Cirba C R, Fleetwood D M, Schrimpf R D, Witczak S C, Michez A, Pantelides S T 2002 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **49** 2650
- [10] Zhang H L, Lu W, Ren D Y, Guo Q, Yu X F, He C F, Ai E K, Cui S 2004 *Chin. J. Semicond.* **25** 1675 (in Chinese) [张华林、陆 妩、任迪远、郭 旗、余学峰、何承发、艾尔肯、崔 帅 2004 半导体学报 **25** 1675]

- [11] 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** 2435 (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** 2435]
- [12] Hjalmarson H P, Pease R L, Witezak S C, Shaneyfelt M R, Schwank J R, Edwards A H, Hembree C E, Mattsson T R 2003 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **50** 1901
- [13] Johnston A H, Swift G M, Rax B G 1996 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **43** 3049
- [14] 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. Electron Dev.* **40** 1276
- [15] Zheng Y Z, Lu W, Ren D Y, Wang Y Y, Guo Q, Yu X F, He C F 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 5572 (in Chinese) [郑玉展、陆妮、任迪远、王义元、郭旗、余学锋、何承发 2009 物理学报 **58** 5572]
- [16] Nowlin R N, Fleetwood D M, Schrimpf R D, Pease R L, Combs W E 1993 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **40** 1686
- [17] 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]
- [18] Nicolaas W V, Dustin W 2005 *US Patent* 0287754A1
- [19] Schrimpf R D 1996 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **43** 787
- [20] Zhang Z S, Liu Z L, Zhang G Q, Li N, Fan K, Zhang E X, Yi W B, Chen M, Wang X 2005 *Chin. Phys. B* **14** 569
- [21] Kosier S L, Schrimpf R D, Fleetwood D M, DeLaus M D, Pease R L, Combs W E 1995 *IEEE Trans. Electron Dev.* **42** 436

## Radiation-resistant bipolar n-p-n transistor\*

Zhai Ya-Hong<sup>†</sup> Li Ping Zhang Guo-Jun Luo Yu-Xiang Fan Xue Hu Bin  
Li Jun-Hong Zhang Jian Su Ping

(State Key Laboratory of Electronic Thin Films and Integrated Devices,  
University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

(Received 8 June 2010; revised manuscript received 16 February 2011)

### Abstract

Bipolar n-p-n transistor geometrical parameters are optimized based on the principle of minimizing the perimeter-to-area ratio ( $P/A$ ). Three types of radiation-resistant n-p-n transistors are developed and fabricated in the 20 V bipolar process. The first is emitter-base junction hardened n-p-n transistor. The second has heavily boron doped base ring. And the last uses both radiation-resistant measurements. The experimental results indicate that after irradiated by the radiation of total dose of 1 kGy, in current gain, the common n-p-n (unhardened) transistor reduces about 60%—65%, while the first two hardened n-p-n transistors increases 10%—15%; the last hardened n-p-n transistors are 15%—20% greater than the common n-p-n transistors in current gain.

**Keywords:** bipolar n-p-n transistor, radiation effect, current gain, radiation-resistant

**PACS:** 85.30.Pq, 61.80.-x

\* Project supported by the Innovation Foundation of State Key Laboratory of Electronic Thin Films and Integrated Devices, China (Grant No. CXJJ200905).

<sup>†</sup> E-mail: yzhzhai@uestc.edu.cn