

## 微波脉冲对硅基双极型晶体管的损伤特性\*

张存波, 张建德, 王弘刚, 杜广星

(国防科技大学 光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要:**利用微波脉冲注入实验平台,对硅基双极型晶体管低噪声放大器进行了损伤效应实验。在微波脉冲对硅基双极型晶体管低噪声放大器损伤的失效分析中,当低噪声放大器增益下降大于10dB时,发现硅基双极型晶体管出现了永久损伤。通过对比测量硅基双极型晶体管损伤前后的电特性以及利用扫描电子显微镜观测损伤后晶体管的微观特性发现:硅基双极型晶体管被微波脉冲损伤后,基区的硅材料烧蚀导致发射结和集电结短路,不再具有PN结特性,导致器件失效。

**关键词:**硅基双极型晶体管;微波脉冲;击穿;失效分析

**中图分类号:**TN015 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2015)02-001-04

## Damage characteristic of microwave pulse injected on Si bipolar transistor

ZHANG Cunbo, ZHANG Jiande, WANG Honggang, DU Guangxing

(College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** The experiment of damage effect on Si bipolar transistor-low noise amplifier injected the microwave pulse in experimental platform. In the failure analysis of Si bipolar transistor-low noise amplifier with microwave pulse, the transistor was permanently damaged when the gain of low-noise amplifier decreased more than 10 dB. The electrical characteristic of the Si bipolar transistor was measured before and after its damage and the micro-characteristic of the damaged transistor was observed by scanning electron microscope. Results show that when the Si bipolar transistor is damaged with microwave pulse, the ablative Si material in the base region causes short circuit of emitter junction and collector junction, which have the consequences of losing the PN junction characteristics and leading to failure devices.

**Key words:** Si bipolar transistor; microwave pulse; breakdown; failure analysis

随着电子设备的广泛使用,目前的电磁环境复杂性增强,各种通信和无线电探测系统受到强电磁脉冲的威胁增大,射频前端在强电磁脉冲下失效的可能性增大。文献[1]报道了欧洲电气化铁路交通管理系统在微波信号辐射下的易损性实验研究,结果表明低噪声放大器是系统中的易损器件,研究微波脉冲对低噪声放大器的损伤效应意义重大<sup>[2-3]</sup>。硅基双极型晶体管是低噪声放大器中应用广泛的半导体器件,研究微波脉冲对硅基双极型晶体管的损伤特性具有重要的意义。文献[4-6]利用半导体仿真软件,通过分析硅基双极型晶体管器件内部电场强度、电流密度和温度分布,研究了硅基双极型晶体管器件在微波信号和阶跃脉冲作用下的损伤效应和机理;文献[7-9]研究报道了

硅基双极型晶体管型低噪声放大器微波损伤的实验研究,给出了微波脉冲参数以及不同管脚注入对晶体管损伤特性的实验结果。实验研究更加注重效应数据和规律的获取,对损伤机制的分析较少,而仿真分析结果的实验证据较少。为了进一步研究微波脉冲对硅基双极型晶体管的损伤机理,需要从宏观上分析晶体管损伤后的电特性,同时从微观上观测晶体管的损伤部位,为损伤机理的研究提供有力的实验证据。

本文研究了基极注入微波脉冲对硅基双极型晶体管的损伤特性,测量了硅基双极型晶体管被损伤前后的PN结电性能,并利用光诱导电阻变化技术和扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM)进行失效定位和损伤部位观测,推断出器件的损伤机理。

\* 收稿日期:2014-12-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51377164)

作者简介:张存波(1987—),男,湖南浏阳人,博士研究生,E-mail:zhangcunbo423@163.com;

张建德(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail:jdzhang12@yahoo.com

### 1 损伤效应实验

以 NPN 型硅基双极型晶体管为核心元件制作了低噪声放大器,图 1 为其原理图:器件采用共发射极放大电路结构,硅基双极型晶体管发射极接地,基极接信号输入端,集电极接信号输出端,器件工作电压为 3V,放大器工作中心频率为 1.5GHz,增益 15dB。

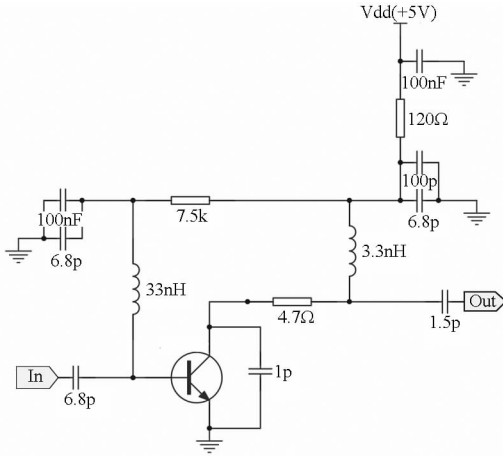


图 1 低噪声放大电路实物图

Fig. 1 Picture of low noise amplifier circuit

图 2 为注入实验装置示意图,将微波脉冲沿低噪声放大器的输入端注入放大器,研究微波脉冲对研制的低噪声放大器损伤过程和损伤结果。注入微波脉冲的频率为 1.5GHz,脉宽为 50ns,每次实验注入一个微波脉冲,每次注入实验后采用微波网络分析仪测量放大电路的增益;放大器增益下降 10dB 以上认为器件损伤。逐步增加微波脉冲的注入功率,直到确认放大器被损伤。通过更换损伤放大器中的硅基双极型晶体管,放大电路增益恢复正常,从而确定,低噪声放大器损伤效应的实质是微波脉冲对低噪声放大器中硅基双极型晶体管造成损伤。

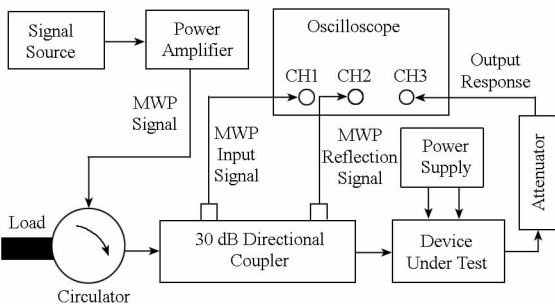


图 2 注入实验装置示意图

Fig. 2 Schema of injecting experiment equipment

### 2 失效分析

为了分析微波脉冲对硅基双极型晶体管的损伤特性,随机抽取了 8 个被微波脉冲损伤的硅基双极型晶体管进行了电特性测试和失效定位分析。对比测量了损伤前后硅基双极型晶体管的电特性。并利用光诱导电阻变化技术和 SEM 对损伤的硅基双极型晶体管进行失效定位和损伤部位观测。

#### 2.1 电特性测试

电特性测试主要通过测试双极型晶体管的共基极集电结雪崩击穿电压  $V_{CBO}$ 、共发射极集电结雪崩击穿电压  $V_{CEO}$  以及发射结击穿电压  $V_{EBO}$  [10] 判断损伤前后 PN 结的性能。

共基极反向截止电流 ( $I_{CBO}$ ) 是指发射极开路 ( $I_E = 0$ )、集电结反偏 ( $V_{CB} > 0$ ) 时的集电极电流。发射极开路时,使  $I_{CBO}$  趋于无穷大的集电结反向电压  $V_{CB}$  称为共基极集电结雪崩击穿电压,记为  $V_{CBO}$ 。图 3 给出了损伤前后双极型晶体管的  $V_{CBO}$  测量结果,图中横坐标为发射极开路时的集电结电压  $V_{CB}$ ,纵坐标为集电极电流。当  $V_{CB} > 0$  时,集电结反偏;当  $V_{CB} < 0$  时,集电结正偏。从图 3 中可知,未损伤芯片的集电结表现出良好的正向导通,反向截止的 PN 结特性,晶体管的  $V_{CBO}$  大于 10V;损伤后晶体管的  $V_{CBO}$  接近于 0V,呈现为短路特性,集电结不再具有 PN 结特性。

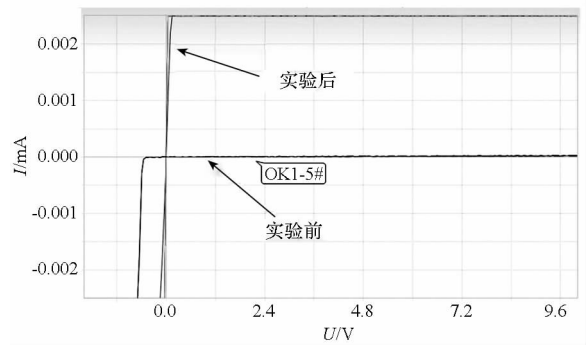


图 3 共基极集电结击穿特性

Fig. 3 Breakdown characteristics of collector junction in common base

共发射极反向截止电流 ( $I_{CEO}$ ) 代表基极开路 ( $I_B = 0$ )、集电结反偏 ( $V_{CB} > 0$ ) 时从发射极穿透到集电极的电流。基极开路时,使  $I_{CEO}$  趋于无穷大的集电极发射极间电压  $V_{CE}$  称为共发射极集电结雪崩击穿电压,记为  $V_{CEO}$ ,  $V_{CEO}$  比  $V_{CBO}$  低得多 [10]。图 4 给出了损伤前后双极型晶体管的  $V_{CEO}$  测量结果,图中横坐标为基极开路时的集电

极发射极间电压  $V_{CE}$ , 纵坐标为集电极电流。当  $V_{CE} > 0$  时, 集电结反偏, 当  $V_{CE} < 0$  时, 集电结正偏。从图4结果进一步验证, 未损伤芯片的集电结表现出良好的正向导通, 反向截止的PN结特性, 晶体管的  $V_{CEO}$  大于 4.5V; 损伤后晶体管的  $V_{CEO}$  接近于 0V, 呈现出短路特性, 进一步显示集电结不再具有PN结特性。

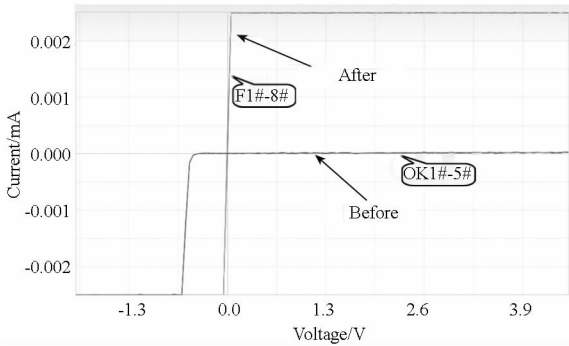


图4 共发射极集电结击穿特性

Fig.4 Breakdown characteristics of collector junction in common emitter

$I_{EBO}$  代表集电极开路 ( $I_C = 0$ )、发射结反偏 ( $V_{EB} > 0$ ) 时的发射极电流。 $I_{EBO}$  趋于无穷大时的发射结反向电压称为发射结击穿电压, 记为  $V_{EBO}$ 。图5给出了损伤前后双极型晶体管的  $V_{EBO}$ 。图中横坐标为集电极开路时的发射结电压  $V_{EB}$ , 纵坐标为发射极电流。 $V_{EB} > 0$  时发射结反偏,  $V_{EB} < 0$  时发射结正偏。从图中可知, 未损坏芯片的发射结表现出良好的正向导通, 反向截止的PN结特性, 晶体管的  $V_{EBO}$  大于 1V; 损伤后的1#~7#晶体管的发射结呈现为短路特性, 8#晶体管的发射结呈现电阻特性, 均不再具有PN结的特性。

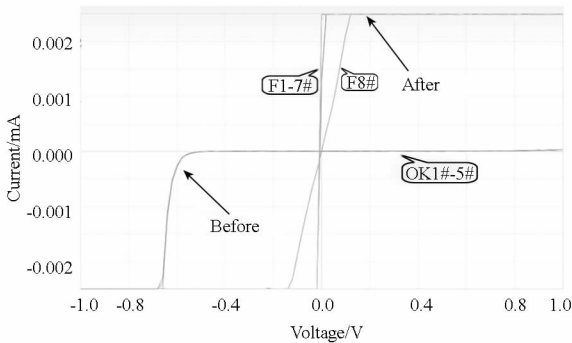


图5 发射结击穿特性

Fig.5 Breakdown characteristics of emitter junction

通过测量硅基双极型晶体管微波脉冲损伤前后的  $V_{CBO}$ 、 $V_{CEO}$  和  $V_{EBO}$ , 发现微波脉冲损伤后硅基双极型晶体管的发射结和集电结表现为短路特性或电阻特性, 都不再具有PN结特性, 导致晶体管出现永久性的功能丧失。

## 2.2 损伤部位观测

为了进一步确定微波脉冲对双极型晶体管芯片的损伤部位以及损伤的物理机制, 在对晶体管芯片去封装后, 利用SEM对芯片表面进行微观观测, 芯片去封装后的显微照片如图6所示。进一步放大数倍对损伤芯片进行观测, 发现芯片表面和芯片金属电极无明显损伤。

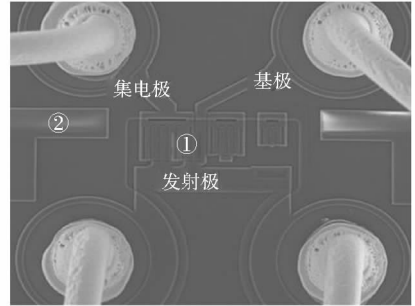


图6 晶体管显微照片

Fig.6 Micrograph of transistor

光诱导电阻变化技术能快速准确地定位集成电路中元件的短路、布线和通孔互联中的空洞、金属中的硅沉积等缺陷, 具有高分辨能力, 其测试精度可达  $nA$  级。利用光诱导电阻变化技术, 分别设置发射极开路时的集电结电压  $V_{CB}$ 、基极开路时的集电极发射极间电压  $V_{CE}$  以及集电极开路时的发射结电压  $V_{EB}$  为 0.01V, 利用激光束对芯片表面进行扫描, 通过感应芯片局部电阻以及电流的微小变化, 对器件损伤位置进行定位。通过观测发现图6中1处为扫描的异常处, 该处金属电极下方的硅材料很有可能出现了烧伤, 其典型扫描照片如图7所示。图7中区域1处表示扫描过程中该处电流密度偏大, 区域2处表示该处电流密度偏小, 说明电极下方存在物理损伤。



图7 失效定位显微照片

Fig.7 Micrograph of fault location

去除芯片表面钝化层以及顶层金属后, 用SEM进行深入观测, 典型显微照片如图8所示。从图中可以发现与图7中区域1处异常对应处存在明显的“月牙形”的熔融, 基区的硅材料出现热

击穿特征,该处烧伤使得晶体管的发射结和集电结出现短路, $V_{CBO}$ 、 $V_{CEO}$ 和 $V_{EBO}$ 都趋于 0,丧失了 PN 结的特性,与前面的测量结果相呼应,晶体管功能丧失。

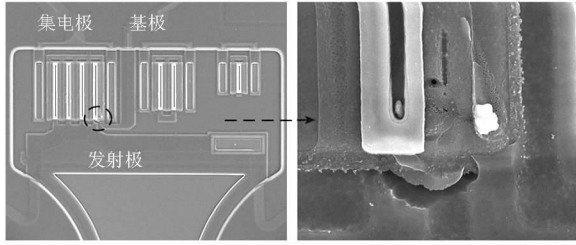


图 8 晶体管损伤显微照片

Fig. 8 Micrograph of damaged transistor

PN 结烧伤机制如下:微波脉冲作用下,当基极外加高的正偏压时,发射结和集电结都处于正偏状态,正偏状态下 PN 结电流随电压的增加呈指数增加;当基极外加高的负偏压时,发射结和集电结都处于反偏状态,当反向偏压增大到某一值时,PN 结出现反向击穿,反向电流会突然迅速增大。晶体管 PN 结的外加电压主要降在 PN 结的势垒区上,外加电压使载流子在势垒区中的电场下加速,通过碰撞把能量交给晶格,使晶格能量增加,从而使 PN 结的温度升高。PN 的正向和反向电流都具有正的温度系数<sup>[10]</sup>,温度升高会使电流增加,在电流和结温之间形成正反馈。结温升高使电流增加,电流增加使功率损耗增加,功率损耗增加使结温上升,从而导致电流的进一步增加。这一过程无限制地进行下去,将导致电流与温度无限增加,最终导致 PN 结器件被烧伤。

### 3 结论

微波脉冲从基极进入硅基双极型晶体管后,当注入微波功率足够大时,导致基区的局部硅材料的熔蚀损伤,该损伤使得发射结和集电结短路,不再具有 PN 结特性,从而导致晶体管功能丧失,是双极型晶体管的损伤机制。研究结果明确给出了硅基双极型晶体管损伤后的电特性、损伤部位和损伤图像,为深入研究微波脉冲对硅基双极型晶体管损伤机理提供了有力的实验证据,同时对硅基双极型晶体管微波脉冲防护加固设计具有重要的参考价值。

### 参考文献 (References)

[1] Mansson D, Thottappillil R, Backstrom M, et al. Vulnerability

of european rail traffic management system to radiated intentional EMI [J]. IEEE Trans. Electromagn. Compat. 2008, 50(1): 101-109.

- [2] 王弘刚,张建德. 高电子迁移率晶体管微波损伤仿真与实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(6): 65-70.  
Wang Honggang, Zhang Jiande. Simulation and experiment research on high electron mobility transistor microwave damage[J]. High Power Laser Part Beam, 2014, 26(6): 65-70. (in Chinese)
- [3] Zhang C, Wang H, Zhang J, et al. Failure analysis on damaged GaAs HEMT MMIC caused by microwave pulse[J]. IEEE Trans. Electromagn. Compat. 2014, DOI: 10.1109.
- [4] 陈曦,杜正伟,龚克. 基极注入强电磁脉冲对双极型晶体管的作用[J]. 强激光与粒子束, 2007, 19(3): 449-452.  
Chen Xi, Du Zhengwei, Gong Ke. Effects of high power electromagnetic pulse injected from base on the bipolar junction transistor[J]. High Power Laser Part. Beam 2007, 19(3): 449-452. (in Chinese)
- [5] 柴常春,席晓文,任兴荣,等. 双极晶体管在强电磁脉冲作用下的损伤效应与机理[J]. 物理学报, 2010, 59(11): 8118-8124.  
Chai Changchun, Xi Xiaowen, Ren Xingrong, et al. The damage effect and mechanism of the bipolar transistor induced by the intense electromagnetic pulse[J]. Acta Physica Sinica, 2010, 59(11): 8118-8124. (in Chinese)
- [6] 马振洋,柴常春,任兴荣,等. 双极型晶体管微波损伤效应与机理[J]. 物理学报, 2012, 61(7): 078501.  
Ma Zhenyang, Chai Changchun, Ren Xingrong, et al. The damage effect and mechanism of the bipolar transistor caused by microwaves. Acta Physica Sinica, 2012, 61(7): 078501. (in Chinese)
- [7] 范菊平,张玲,贾新章. 双极型晶体管高功率微波的损伤机理[J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(6): 1319-1322.  
Fan Juping, Zhang Ling, Jia Xinzhang. HPM damage mechanism on bipolar transistors[J]. High Power Laser Part. Beam, 2010, 22(6): 1319-1322. (in Chinese)
- [8] 柴常春,杨银堂,张冰,等. 硅基双极低噪声放大器的能量注入损伤与机理[J]. 半导体学报, 2008, 29(12): 2403-2407.  
Chai Changchun, Yang Yintang, Zhang Bing, et al. Mechanism of energy-injection damage of silicon bipolar low-noise amplifiers [J]. Journal of Semiconductors, 2008, 29(12): 2403-2407. (in Chinese)
- [9] 柴常春,张冰,任兴荣,等. 集成 Si 基低噪声放大器的注入损伤研究[J]. 西安电子科技大学学报, 2010, 37(5): 898-903.  
Chai Changchun, Zhang Bing, Ren Xingrong, et al. Injection damage of the integrated silicon low-noise amplifier [J]. Journal of Xidian University, 2010, 37(5): 898-903. (in Chinese)
- [10] 陈星弼,张庆中. 晶体管原理与设计[M]. 第 2 版. 北京: 电子工业出版社, 2006.  
Chen Xingbi, Zhang Qingzhong. Principle and design of transistor [M]. 2nd ed, Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006. (in Chinese)