

电子辐射环境中NPN输入双极运算放大器的辐射效应和退火特性

姜柯 陆妩 胡天乐 王信 郭旗 何承发 刘默涵 李小龙

Radiation damage effect and post-annealing treatments of NPN-input bipolar operational amplifier in electron radiation environment

Jiang Ke Lu Wu Hu Tian-Le Wang Xin Guo Qi He Cheng-Fa Liu Mo-Han Li Xiao-Long

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 136103 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.136103

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.136103>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I13>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

国产光纤实现直接抽运全光纤化 3000 W 级激光输出

3000 W direct-pumping all-fiber laser based on domestically produced fiber

物理学报.2015, 64(16): 164204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.164204>

303MHz 高重复频率掺 Er 光纤飞秒激光器

A 303 MHz fundamental repetition rate femtosecond Er: fiber ring laser

物理学报.2015, 64(11): 114210 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.114210>

光子晶体光纤飞秒激光非线性放大系统的耦合动力学过程研究

Coupling dynamics for a photonic crystal fiber femtosecond laser nonlinear amplification system

物理学报.2015, 64(9): 094203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.094203>

覆盖可见光波长的掺 Er 光纤飞秒光学频率梳

Er-fiber femtosecond optical frequency comb covering visible light

物理学报.2015, 64(9): 094204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.094204>

300 W 侧面分布式抽运掺 Yb 全光纤放大器

300 W all-fiber amplifier with distributed side-coupled pump configuration

物理学报.2015, 64(8): 084205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.084205>

# 电子辐射环境中NPN输入双极运算放大器的辐射效应和退火特性

姜柯<sup>1)2)3)</sup> 陆妩<sup>1)2)†</sup> 胡天乐<sup>1)2)3)</sup> 王信<sup>1)2)3)</sup> 郭旗<sup>1)2)</sup> 何承发<sup>1)2)</sup>  
刘默涵<sup>1)2)</sup> 李小龙<sup>1)2)3)</sup>

1)(中国科学院新疆理化技术研究所, 中国科学院特殊环境功能材料与器件重点实验室, 乌鲁木齐 830011)

2)(新疆电子信息材料与器件重点实验室, 乌鲁木齐 830011)

3)(中国科学院大学, 北京 100049)

(2014年11月24日收到; 2015年2月16日收到修改稿)

本文对不同偏置下的NPN输入双极运算放大器LM108分别在1.8 MeV和1 MeV两种电子能量下、不同束流电子辐照环境中的损伤特性及变化规律进行了研究, 分析了不同偏置状态下其辐照敏感参数在辐照后三种温度(室温, 100 °C, 125 °C)下随时间变化的关系, 讨论了引起电参数失效的机理, 并且分析了器件在室温和高温的退火效应以讨论引起器件电参数失效的机理. 结果表明, 1.8 MeV和1 MeV电子对运算放大器LM108主要产生电离损伤, 相同束流下1.8 MeV电子造成的损伤比1 MeV电子更大, 相同能量下0.32 Gy(Si)/s束流电子产生的损伤大于1.53 Gy(Si)/s束流电子. 对于相同能量和束流的电子辐照, 器件零偏时的损伤大于正偏时的损伤. 器件辐照后的退火行为都与温度有较大的依赖关系, 而这种关系与辐照感生的界面态密度增长直接相关.

**关键词:** NPN输入双极运算放大器, 电子辐射, 辐射效应, 退火

**PACS:** 61.80.Lj, 85.40.-e, 29.20.Ej, 87.56.B-

**DOI:** 10.7498/aps.64.136103

## 1 引言

随着航天科学技术的发展, 运算放大器作为一种基本的线性电路在空间系统中得到广泛运用. 众所周知在空间辐射环境中存在着各种不同能量的带电粒子, 主要是质子和电子. 这些粒子与空间系统中的电子元器件作用会产生各种辐射效应而对于绕地运行的航天器, 范·艾伦辐射带是其受到辐射威胁最严重的区域. 研究表明辐射带分为内外两部分, 内层辐射带主要以质子为主, 其能量范围为0.04—500 MeV, 外部为电子辐射带, 能量范围为40 keV—5 MeV. 高能电子对电子元器件辐射效应的大小及损伤类型因入射电子的能量、束流的不同而不同, 因此, 有必要深入了解电子辐射环境中电子器件的变化规律, 使电子系统能在空间辐射环

境中正常工作. 近年来, 国内外针对运算放大器在不同辐射环境下的变化规律与损伤特性已进行了较多研究<sup>[1-4]</sup>, 但很多工作仅局限于器件在某一偏置下对不同剂量率或不同辐照环境中辐照响应规律的探讨. 而在实际卫星系统中电路常处于工作和备用两种状态, 在不同的工作状态下电路的辐照响应的研究却很少, 本实验室在之前已对PNP输入运算放大器在电子辐射环境中的辐射效应进行了研究<sup>[1,2]</sup>, 为比较不同输入级运算放大器的电子辐射损伤效应有何不同, 本工作以商用NPN输入双极运算放大器LM108为对象, 研究了其在正偏和零偏两种偏置状态、不同电子能量和辐照束流下的响应规律, 探讨了其在电子辐照环境中电参数衰变的损伤机理, 并通过研究在室温和高温下退火过程中器件敏感参数随时间的变化, 分析了双极运算放

† 通信作者. E-mail: luwu@ms.xjb.ac.cn

大器的退火特性.

## 2 试验方法

实验样品为相同批次的NPN输入双极运算放大器LM108. 辐照及退火期间, 正偏置状态下放大器正负电源为 $\pm 10$  V, 负输入连接输出形成反馈状态, 零偏置所有管脚接地.

样品的电参数采用美国Tektronix577曲线示踪仪进行测试, 每次辐照前后及退火前后测量的电参数有: 输入失调电压( $V_{OS}$ )、正负输入偏置电流( $\pm I_b$ )、共模抑制比(CMRR)、开环增益(AVO)、电源电压抑制比( $\pm PSRR$ )以及正负电源电流( $\pm I_{SS}$ ). 辐照实验及其电参数的测量都是在室温下进行的, 每次电参数的测试都在辐照或退火后20 min内完成. 辐照结束后, 保持与辐照时相同的偏置状态先进行408 h的室温退火, 然后再进行197 h 100 °C高温退火, 最后再进行430 h的125 °C高温退火. 辐照试验在中国科学院新疆理化技术研究所ELV-8型2 MeV电子加速器上完成, 电子能量为1 MeV和1.8 MeV, 试验过程中, 为与 $^{60}Co\gamma$ 辐照剂量率相对应, 采用胶片剂量计对电子通量进行了测量, 同时, 利用下式把电子注量率 $\Phi_e$ 换算成吸收剂量 $D(Gy(Si)/s)$ 为

$$D = 1.602 \times 10^{-10} \Phi_e \frac{dE}{dx}, \quad (1)$$

式中 $\Phi_e$ 为电子的注量率( $e/cm^2$ ),  $dE/dx$ 为不同能量的电子在Si中的质量阻止本领(单位MeV/( $cm^2/g$ )).

由于电子的穿透力比较弱, 为了减少器件封盖对吸收剂量的影响, 在实验中对电子辐照的器件进行了去除封盖处理.

## 3 试验结果

LM108对电子辐射较为敏感, 器件大部分的参数都会在辐照过程中发生不同程度的变化, 而运放的正负输入偏置电流( $\pm I_b$ )则是所有参数中最为敏感的. 图1给出了在1.8 MeV与1 MeV电子能量、相同束流下, NPN输入双极运算放大器LM108的偏置电流 $\Delta I_b$ 随总剂量及辐照后在不同退火温度下随时间的变化. 从图中可以看出, 对于不同能量电子辐照, 器件的损伤程度有明显差别, 相同偏置下1 MeV能量辐射损伤均小于1.8 MeV能量的辐射损伤. 不论何种能量与束流的电子辐射, 相同能量、相同束流的条件下, 器件零偏时的损伤均大于正偏下的损伤. 在随后的室温退火过程中, 损伤有所恢复, 其中1.8 MeV电子辐照的零偏器件恢复最为明显. 高温退火过程中, 所有器件都出现了快速的退火现象, 并且在最后基本恢复至初始值.

图2给出了正偏和零偏NPN输入双极运算放大器LM108在1.8 MeV相同电子能量下、0.32 Gy(Si)/s和1.53 Gy(Si)/s不同束流电子辐照下, 输入偏置电流 $I_b$ 随总剂量及辐照后退火时间的变化关系. 由图可见, 对于相同能量, 不同束流的电子来说, 0.32 Gy(Si)/s束流的电子产生的损伤明显高

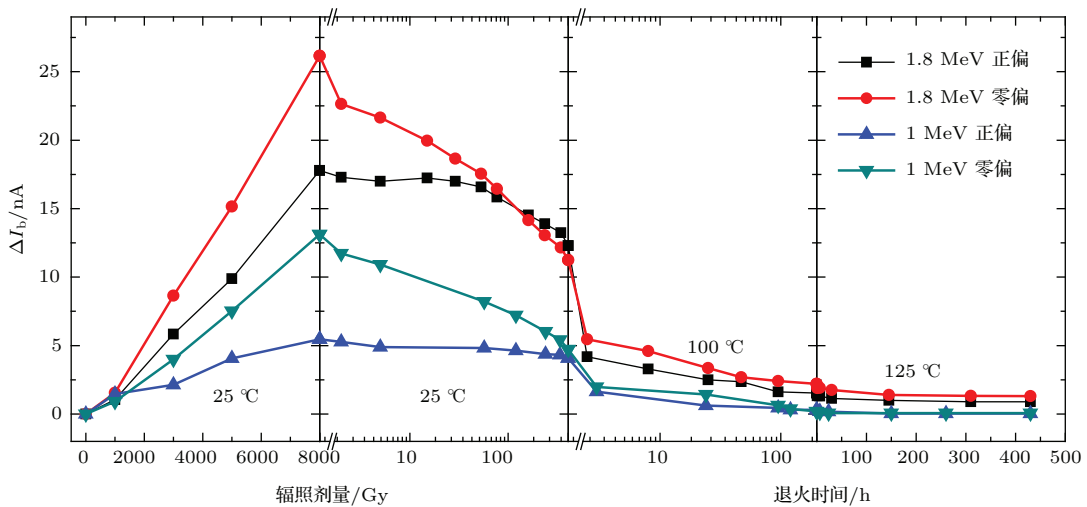


图1 不同能量、相同束流电子辐照 LM108 的  $\Delta I_b$  随总剂量及辐照后随不同退火温度和时间的变化

Fig. 1.  $\Delta I_b$  of LM108 versus total dose and post-irradiation annealing time at various temperatures for 1.8 MeV and 1 MeV electron irradiation at the same beam current.

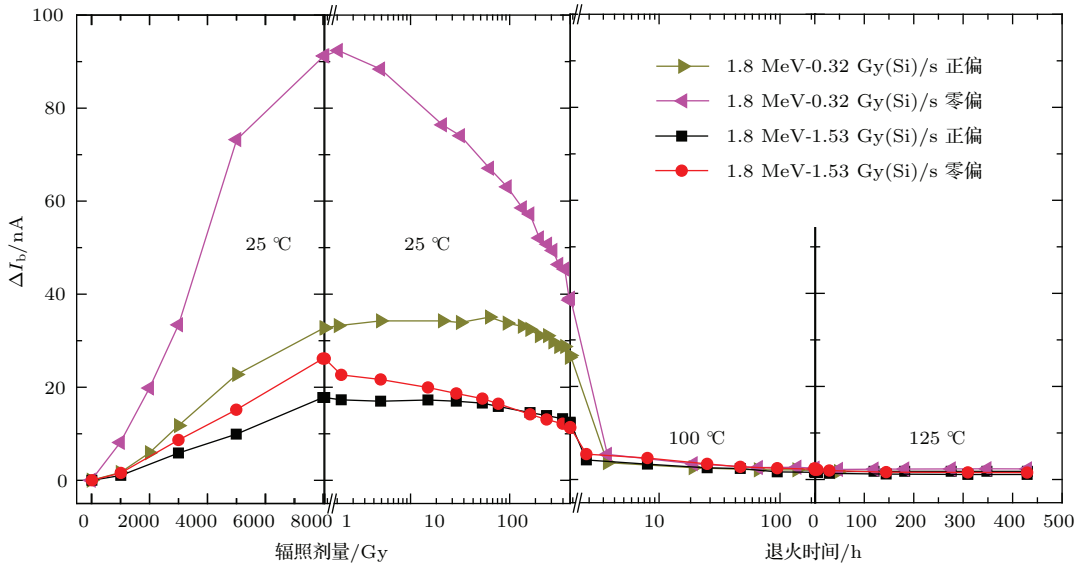


图2 不同束流、相同能量下LM108的 $\Delta I_b$ 随总剂量及辐照后随不同退火温度和时间的变化

Fig. 2.  $\Delta I_b$  of LM108 versus total dose and post-irradiation annealing time at various temperatures for 1.8 MeV electron irradiation at different beam currents.

于1.53 Gy(Si)/s束流的电子,即器件产生了明显的剂量率效应.对于相同束流下电子辐射的器件,偏置对器件损伤的影响具有相同的规律:不论何种束流的电子辐射,相同能量、相同束流的条件下,器件零偏的损伤均大于正偏下的损伤;在随后的室温退火过程中,所有被电子辐射的器件都会产生退火效应,而正向偏置的0.32 Gy(Si)/s束流电子照射器件的退火最为明显.在高温退火阶段,所有器件都产生了明显的退火现象,输入偏置电流 $I_b$ 最终基本恢复为初始值.

#### 4 讨论

双极运算放大器输入偏置电流的变化,主要是由于输入级晶体管出现过剩基极电流导致,且输入级过剩基极电流越大, $I_b$ 的变化越大.大量研究表明<sup>[5-7]</sup>,NPN双极晶体管过剩基极电流的出现缘于表面复合电流和耗尽层复合电流的增加.基区上方氧化层中的辐射感生净正电荷的积累使p型基区表面耗尽,并与pn结空间电荷层连接起来,增加了耗尽层的总体积,从而使耗尽层复合电流增加.Si-SiO<sub>2</sub>界面处辐射感生界面态(特别是位于禁带中心附近的界面态)作为额外的复合中心,增加了表面复合速率,增大了表面复合电流.因此,对于NPN双极晶体管,辐照感生净正氧化物电荷和界面缺陷越多,过剩基极电流越大,运算放大器的输入偏置电流也就越大.

电子辐照器件时,电子会与硅材料相互作用不仅可以产生电离损伤,还可造成因晶体原子移动而导致的位移损伤<sup>[8,9]</sup>.位移损伤形成的体缺陷会成为载流子的复合中心,使少子寿命减少,从而导致晶体管基极电流的增加.根据SRH(Shockley-Read-Hall)复合统计理论, $\tau \sim 1/N_t$ ,其中 $\tau$ 为少子寿命, $N_t$ 为起主要复合作用的复合能级密度.对于电子辐照引入的复合中心,有: $\Delta/N_t \propto \Phi_e$ ,因此,

$$(1/\tau)(1/\tau_0) = K\Phi_e, \quad (2)$$

式中 $\tau_0$ 和 $\tau$ 分别为辐照前后的少子寿命,系数 $K$ 成为损伤系数,所以,对于体损伤,基极电流可以用下式表示<sup>[9]</sup>:

$$I_b = K\Phi_e \exp(qV_{BE}/nk_bT), \quad (3)$$

式中, $V_{BE}$ 为基-发射极电压;在室温下 $q/k_bT = 39 \text{ V}^{-1}$ ;  $n$  ( $1 < n < 2$ )为 $V_{BE}$ 在某一确定范围内的一个常数,表示少数载流子的重组位置(即能级缺陷位置).从文献<sup>[10]</sup>中可以得出,电子能量在大于2 MeV时, $K$ 随能量的变化不大,而在2 MeV以下, $K$ 强烈的依赖能级变化,能量越大, $K$ 越大,不同电子能量的 $K$ 相差甚至达两个数量级,这是由于电子的非电离能损(NIEL)随着电子能量的增加而增大<sup>[11]</sup>,NIEL的增加说明电子产生了更多的体缺陷,因而导致了少子寿命的减少.所以,在本研究的电子能量下, $K$ 随着电子能量的增大而增大,器件少子寿命减少,从而导致基极电流的增大.这也



解释了在图 1 中 1.8 MeV 电子辐照下器件的损伤大于 1 MeV 辐照下损伤的原因.

在高温退火阶段, 由图 1、图 2 不同能量、束流电子辐照的退火结果可以看出, 在 100 °C 时器件出现明显的退火现象, 并且 125 °C 退火仍然继续直到最后的饱和. 由此我们可以得出, 在本文不同能量、束流电子辐照源中影响器件退化的主要因素还是由于电离在 Si-SiO<sub>2</sub> 界面感生的界面态和氧化物陷阱电荷引起的, 电子辐射对运算放大器 LM108 产生的损伤主要还是电离损伤. 因为根据以往对氧化物电荷和界面态退火特性的研究结果显示, 氧化物电荷在室温下退火较迅速, 而界面态室温下一般不退火, 只有在温度 > 100 °C 时才会出现退火现

象, 而体缺陷在 200 °C 以上才会退火 [12].

从图 2 可以发现, 较低束流电子辐射产生的损伤大于较高电子束流, 通过之前的分析我们知道, 实验中电子辐照对运放 LM108 产生的损伤主要为电离损伤, 因此我们可以认为低束流下电子辐射的器件产生了与电离辐射类似的低剂量率增强效应 (ELDRS). 器件的低剂量率增强效应与其制造工艺有关, 图 3 是 LM108 在 <sup>60</sup>Co $\gamma$  辐射环境中不同剂量率下  $\Delta I_b$  随总剂量的变化, 图中 0.001 Gy(Si)/s 剂量率辐照的器件产生的损伤明显大于 0.5 Gy(Si)/s 剂量率辐照的器件, 证明该器件的确存在低剂量率增强效应.

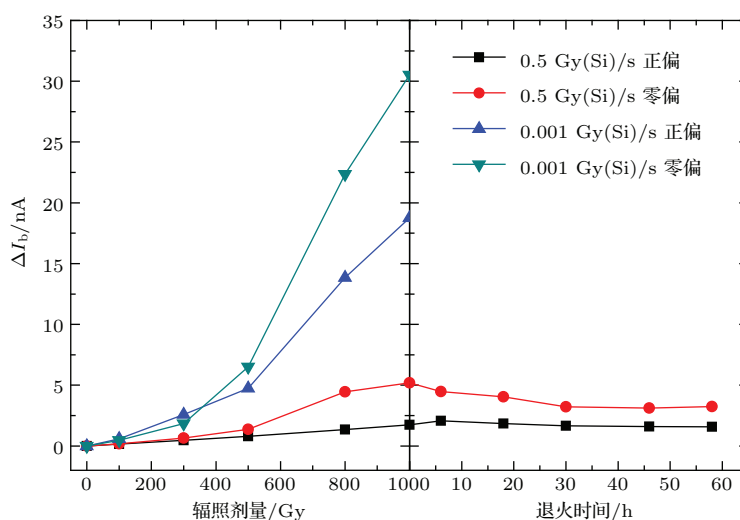


图 3 <sup>60</sup>Co $\gamma$  辐射环境中不同偏置、剂量率下 LM108 的  $\Delta I_b$  随总剂量及辐照后随退火时间的变化

Fig. 3.  $\Delta I_b$  of LM108 versus total dose and post-irradiation annealing time for <sup>60</sup>Co  $\gamma$  irradiation.

而图 1—图 3 中不同偏置条件下晶体管的基极电流变化的差别, 则是由于不同偏置条件下氧化层内的电场不同, 影响了氧化物电荷的积累和界面态的产生所致 [13]. 对于 NPN 型双极晶体管来说, 基-射结上方覆盖的氧化层中的边缘电场来源于基-射结的内建空间电场, 方向由 n 区指向 p 区. 基-射结正向偏置将降低氧化层中的边缘电场. 边缘电场模型认为, 基-射结上方的 SiO<sub>2</sub> 层内的电场是由边缘电场决定的. 边缘电场的示意图如图 4 所示, 电离辐射会在晶体管的氧化层内产生大量的电子-空穴对, 其中一部分会在极短的时间内原对复合留在产生地, 而另一部分将在边缘电场的作用下分离, 并向相反的方向移动. 由于室温下, 电子在 SiO<sub>2</sub> 内的迁移率是空穴迁移率的百万倍, 因此电子向发射区表面移动并很快漂移出氧化层; 而空穴则缓慢地

向基区表面方向移动, 最后被空穴陷阱俘获, 其中一部分被靠近界面的深陷阱俘获, 成为净正氧化物电荷. 另外, 空穴在运输的过程中释放出氢离子 (H<sup>+</sup>), 氢离子通过漂移扩散输运到 Si-SiO<sub>2</sub> 界面并在界面处与硅-氢钝化键发生反应生成界面态.

与基-射结零偏置相比, 基-射结正向偏置时, 边缘电场将被减弱. 边缘电场的减小将会降低空穴的逃逸额和氢离子浓度. 因此, 空穴逃逸额降低, 沿电场输运到 Si-SiO<sub>2</sub> 界面的正电荷将减少, 其体内的净正氧化物电荷和界面缺陷均减少.

外加电场的示意图如图 5 所示, 正偏时, 外加电场指向基区表面, 有利于正电荷向界面的运输, 因此在外加电场的作用下, 正偏时基区表面氧化层内净正氧化电荷浓度和界面缺陷浓度均要大于零偏. 同一偏置下, 外加电场与由外加电压所改变

的边缘电场属竞争关系. 实验结果表明, 不同的偏置条件对NPN双极晶体管的电离辐射效应的影响, 边缘电场占主要作用, 外加电场由于双极晶体管的氧化层厚度较大, 其影响比较小, 因此, 可以得出以下结论: 主要由于边缘电场的作用, 使NPN输入运算放大器LM108过剩基极电流增加幅度为零偏大于正偏.

将本次实验所得到的结果与之前PNP输入级运算放大器的电子辐射效应的实验结果 [1,2] 进行对比, 我们可以发现, 不论是NPN输入级还是PNP输入级的运算放大器, 1.8 MeV 电子产生的损伤都

要大于1 MeV电子, 并且其损伤的主要原因都是辐射感生的界面态和氧化物陷阱电荷导致的基极电流的增大. 但不同偏置会对NPN输入级和PNP输入级的运算放大器产生不同的影响, 这是因为对于PNP型晶体管来说, 在高剂量率下, 很短的时间内产生了较多的电子-空穴对, 边缘电场对PNP晶体管基极电流的影响, 相对于基区表面氧化层净正氧化物陷阱电荷和界面陷阱电荷对其的影响来说很小, 所以主要考虑外加电场对PNP晶体管基极电流的影响.

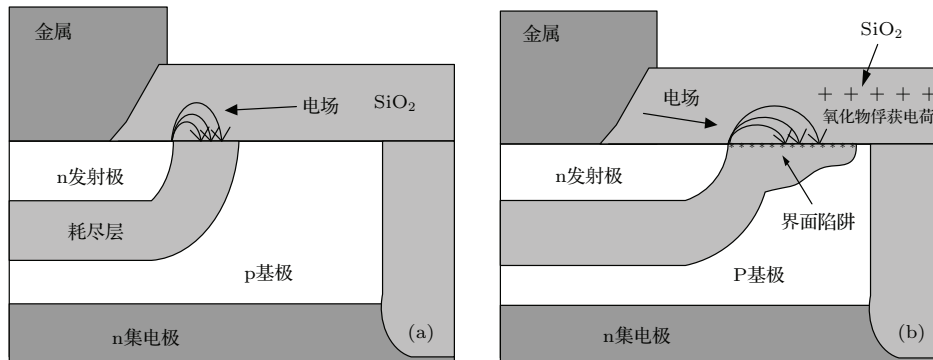


图4 电离辐射效应对 NPN 晶体管发射结的影响 (a) 未辐照; (b) 辐照后

Fig. 4. Irradiation effect for NPN transistor's emitter(a) pre-irradiation; (b) post-irradiation.

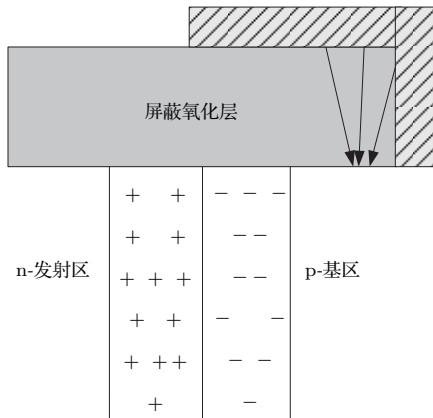


图5 正向偏置外加电场示意图

Fig. 5. electric field of forward biased NPN transistor.

另外, PNP输入运放LM837在电子辐照后的常温退火阶段产生了后损伤效应, 而本实验中NPN输入运放LM108并没有产生这一现象, 这是因为对于PNP晶体管来说, 辐射产生的氧化物陷阱电荷会抑制界面陷阱电荷的产生, 而常温退火时氧化物陷阱电荷较易退火, 从而使更多的载流子移动到界面处导致表面复合的增加, 从而形成后损伤效应, 而且后损伤效应与慢界面态有关, 这是不同

生产工艺导致的差别.

## 5 结 论

1) 不同能量电子对运算放大器的辐射损伤程度不同, 1 MeV电子辐射损伤小于1.8 MeV电子, 其原因是1.8 MeV的电子辐照产比1 MeV电子产生了更多的体缺陷.

2) 运算放大器受电子辐照后, 其损伤程度与器件所处的偏置状态有关, NPN型输入级运算放大器零偏置状态下器件的损伤大于正偏置时器件的损伤, 其原因是正偏状态下, 晶体管内部边缘电场会减弱, 减少界面陷阱电荷和氧化物陷阱电荷的产生, 虽然正偏时外加电场有利于界面态和氧化物电荷的形成, 但是由于晶体管氧化物厚度较大, 使外加电场作用减弱, 令边缘电场的影响成为其主要影响.

3) NPN输入双极运算放大器LM108在高能电子辐照下, 器件出现了低剂量率损伤增强效应, 即在不同束流(剂量率)下, 低束流引起的辐射损伤大于高束流引起的损伤, 其原因可以用空间电荷模

型来解释, 即高剂量率辐照时会产生更多的氧化物电荷, 氧化物电荷会形成空间电场, 阻碍界面态的形成, 从而使高剂量率辐照下的器件的损伤小于低剂量率下的损伤.

4) 在高温退火阶段, 100 °C 时器件出现明显的退火现象, 并且在 125 °C 退火时仍然继续, 直到最后的饱和, 根据以往对氧化物电荷和界面态退火特性的研究结果, 氧化物电荷在室温下退火较迅速, 而界面态室温下一般不退火, 只有在温度 > 100 °C 时才会出现退火现象. 因此, 根据文中的实验结果, 可以认为, 双极型运算放大器在本试验的电子能量辐照源环境下的电参数退化主要是由辐射感生的界面态和氧化物陷阱电荷引起的.

### 参考文献

- [1] Hu T L, Lu W, Xi S B 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 076105 (in Chinese) [胡天乐, 陆妩, 席善斌 2013 物理学报 **62** 076105]
- [2] Hu T L, Lu W, He C F 2013 *Atomic Energy Science and Technology* **4** 657 (in Chinese) [胡天乐, 陆妩, 何承发 2013 原子能科学技术 **4** 657]
- [3] L w, Ren D Y, Guo Q 1998 *J. Semicond* **1** 35 (in Chinese) [陆妩, 任迪远, 郭旗 1998 半导体学报 **1** 35]
- [4] Wang Y Y, Lu W, Ren D Y 2001 *Atomic Energy Science and Technology* **9** 1147 (in Chinese) [王义元, 陆妩, 任迪远 2001 原子能科学技术 **9** 1147]
- [5] Graves R. J, Cirba C. R 1998 *IEEE Transactions on Nuclear Science* **45** 2352
- [6] Witczak S C, Lacoce R C 1998 *IEEE Transactions on Nuclear Science* **45** 2339
- [7] Fleetwood D. M, Kosier, S. L 1994 *IEEE Transactions on Nuclear Science* **41** 1817
- [8] Nichols D K, Price W E, Gauthier M K 1982 *IEEE Transactions on Nuclear Science* **29** 2081
- [9] Brucker G J, Dennehy W J, Holmes-Siedle A G 1966 *IEEE Transactions on Nuclear Science* **13** 188
- [10] Qian S M, Wang B L, Wang P D 1984 *Journal of Beijing Normal University Natural Science* **3** 31 (in Chinese) [钱思敏, 王炳林, 王培德 1984 北京师范大学学报 (自然科学版) **3** 31]
- [11] Dale C J, Marshall P W, Burke E A 1988 *IEEE Transactions on Nuclear Science* **35** 1280
- [12] MA T P, Dressendorfer P V 1989 *New York John Wiley & Sons Inc.* 1989
- [13] Pershenkov V S, Belyakov V V, Shalnov A V 1994 *IEEE Transactions on Nuclear Science* **41** 2593

# Radiation damage effect and post-annealing treatments of NPN-input bipolar operational amplifier in electron radiation environment

Jiang Ke<sup>1)2)3)</sup> Lu Wu<sup>1)2)†</sup> Hu Tian-Le<sup>1)2)3)</sup> Wang Xin<sup>1)2)3)</sup> Guo Qi<sup>1)2)</sup> He Cheng-Fa<sup>1)2)</sup>  
Liu Mo-Han<sup>1)2)</sup> Li Xiao-Long<sup>1)2)3)</sup>

1) (Key Laboratory of Functional Materials and Devices for Special Environments, Xinjiang Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China)

2) (Xinjiang Key Laboratory of Electronic Information Material and Device, Urumqi 830011, China)

3) (University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

( Received 24 November 2014; revised manuscript received 16 February 2015 )

## Abstract

With the rapid development of the space technology, operational amplifier is widely used as the basic liner circuit in a satellite system. There are many charged particles trapped in the earth's magnetosphere, most of the particles are protons and electrons. In BJTs, the damage caused by electrons causes both bulk recombination and surface recombination to increase and subsequently current gain to decrease. Transistor gain degradation is the primary cause of parametric shifts and functional failures in linear bipolar circuits. The severity of electron radiation response correlates with electron's energy and flux, therefore it is important to understand the electron radiation response in different conditions. In this paper, the tested devices used in this study are NPN-input bipolar operational amplifiers commercial-off-the-shelf (COTS) manufactured by Texas Instruments (TI). NPN-input bipolar operational amplifiers LM108 are irradiated with different energy and different beam current electrons respectively under different bias conditions to study the electron radiation damage effect. Experiment using  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ -ray radiation is conducted to compare the different radiation damages between  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ -ray and electron radiation. The total radiation experiments are carried out with the  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ -ray source (Xinjiang Technical Institute of physics and chemistry). The radiation dose rates for the test samples are 1 Gy (Si)/s, and the total accumulated dose is 1000 Gy (Si). Subsequently, room temperature and high temperature annealings are conducted to analyze the parametric failure mechanism of LM108 caused by a total dose radiation for different biases. Result shows that 0.32 Gy(Si)/s beam current electrons can induce more damage than that caused by 1.53 Gy(Si)/s electrons with the same energy; 1.8 MeV electrons can induce more damages than 1 MeV electrons with the same electron beam current because the former produces more displacement damage than the latter. Comparison between zero and forward biased devices shows that different biased devices have different radiation sensibility, and radiation produces more damages in zero biased devices than in forward biased devices with the same electron energy and beam current. This is because forward biased BJT will suppress the edge electric field, thus leading to the decrease of oxide-trapped charge and interface-trapped charge. During high-temperature annealing, degradation of the devices obviously can be recovered and almost return to the initial value finally. This result indicates that the 1.8 MeV and 1 MeV electron radiation mainly induces ionization damage in bipolar operational amplifier LM108.

**Keywords:** NPN-input bipolar operational amplifier, electron radiation, radiation effect, annealing

**PACS:** 61.80.Lj, 85.40.-e, 29.20.Ej, 87.56.B-

**DOI:** 10.7498/aps.64.136103

† Corresponding author. E-mail: [luwu@ms.xjb.ac.cn](mailto:luwu@ms.xjb.ac.cn)