

# 硅基双极低噪声放大器的能量注入损伤与机理<sup>\*</sup>

柴常春<sup>†</sup> 杨银堂 张 冰 冷 鹏 杨 杨 饶 伟

(西安电子科技大学微电子学院 教育部宽禁带半导体材料与器件重点实验室, 西安 710071)

**摘要:** 针对 Si 基双极型低噪声放大器(LNA), 用脉冲调制 150MHz 射频信号在其输入端进行了能量注入实验, 研究结果表明 Si 基 LNA 的噪声系数和增益特性都是注入能量的敏感参数. 样品解剖和电路仿真显示能量作用使 LNA 内部晶体管出现基极/发射极金属化损伤, 基极金-半接触电阻增大导致了 LNA 噪声系数增大, 而 Si 基双极器件  $h_{FE}$  随时间正向漂移损伤模式使 LNA 增益随注入能量的增加而增大. 研究表明, 由于能量作用下损伤效应的复杂性, 以往可靠性研究中单纯采用增益的变化来衡量器件与电路的损伤效应的方法是不全面的.

**关键词:** 能量注入; 低噪声放大器; 噪声; 增益; 损伤机理

**EEACC:** 0170N; 1220; 2570B

**中图分类号:** TN406

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0253-4177(2008)12-2403-05

## 1 引言

半导体器件和集成电路的可靠性与其自身内部存在的固有的易损薄弱环节密切相关. 如何把半导体器件和集成电路的内部结构特点、工作原理与偏置状态等与外部所施加的损伤作用信号相结合, 研究其在外界应力(主要为电应力)作用下的易损环节、损伤效应和损伤机理, 进而克服制约器件和电路可靠性提高的“瓶颈”, 就显示出与传统单纯依靠电平功率作用开展器件可靠性研究的本质区别, 也有助于获得具有很强针对性的、能够提高器件与电路可靠性的加固措施和抗损伤防护对策, 因而对可靠性研究有积极意义.

在外部电应力作用下器件与电路的损伤及功能失常研究方面有一些初步的研究报道, 例如针对不同工艺的集成运算放大器, Masetti 等人<sup>[1]</sup>研究了电磁干扰(EMI)所引起的失效问题, 讨论了大信号运放特性和 EMI 敏感性之间的关系; 而针对 CMOS 芯片中的 n 沟增强型 MOSFET, Kim 等人<sup>[2]</sup>研究了在注入的微波功率和频率变化条件下的器件微波干扰效应, 对微波作用前后的器件特性变化及可能的机理进行了探讨; Wang 等人<sup>[3]</sup>进行了  $0.5\mu\text{m}$  工艺 8 位网络时钟计数器电路的射频干扰(RFI)易感性实验, 并通过 SPICE 仿真表明由于计数器的基本单元——触发器对 RFI 敏感而导致了计数器的易感和功能失常; Dobykin 等人<sup>[4,5]</sup>开展了 pn 结在大功率电磁脉冲作用下的热损伤建模与分析. 这些研究工作结合了器件的固有特性、结构特点、寄生效应与应用背景, 得到了一些与射频、微波或电磁脉冲信号等应力有关的、针对特定器件与电路的干扰效应和失效

机理.

本文通过采用在 Si 基双极型低噪声放大器(LNA)输入端注入脉冲调制射频信号的方法, 研究了能量注入对 Si 基 LNA 性能的影响, 通过样品解剖和电路仿真, 讨论了 LNA 性能变化的可能机理, 指出由于能量作用下损伤效应的复杂性, 以往仅以增益的退化来衡量其损伤效应的方法是不全面的.

## 2 实验

Si 基 LNA 的内部电路、屏蔽盒内的外围测试电路和注入脉冲调制射频矩形信号如图 1 所示, 其中测试外围电路是按 Si 基 LNA 的典型应用而设计的. 通过函数/任意波发生器产生所需调制脉冲, 再对射频信号源进行调制从而获得脉冲调制射频信号. 为消除驻波影响, 信号经功放 10 倍放大再经过 10dB 衰减器后直接注入到正常偏置状态下的 LNA 的输入端, 并利用噪声系数分析仪进行能量注入前后 LNA 的性能测试. 主要实验仪器包括信号源、函数/任意波发生器、示波器、功率放大器、功率计、噪声源、噪声系数分析仪等.

根据信号功率和能量定义, 推导得到注入信号在  $0\sim T$  内的功率和能量如 (1) 和 (2) 式所示, 其中  $T$  和  $A$  分别是调制矩形波的周期和振幅. 单脉冲注入时 (1) 式中  $\tau/T=1$ , 由于已知注入信号功率  $P$ , 由 (2) 式可以得到注入能量  $E$ .

$$P = \frac{E}{T} = \frac{\tau}{T} \times \frac{A^2}{2} \quad (1)$$

$$E = \int_{-\tau/2}^{\tau/2} [A \cos(\omega_0 t)]^2 dt = \tau \frac{A^2}{2} \quad (2)$$

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金资助项目(批准号:60776034)

<sup>†</sup> 通信作者. Email: ccchai@mail.xidian.edu.cn

2008-04-29 收到, 2008-06-12 定稿

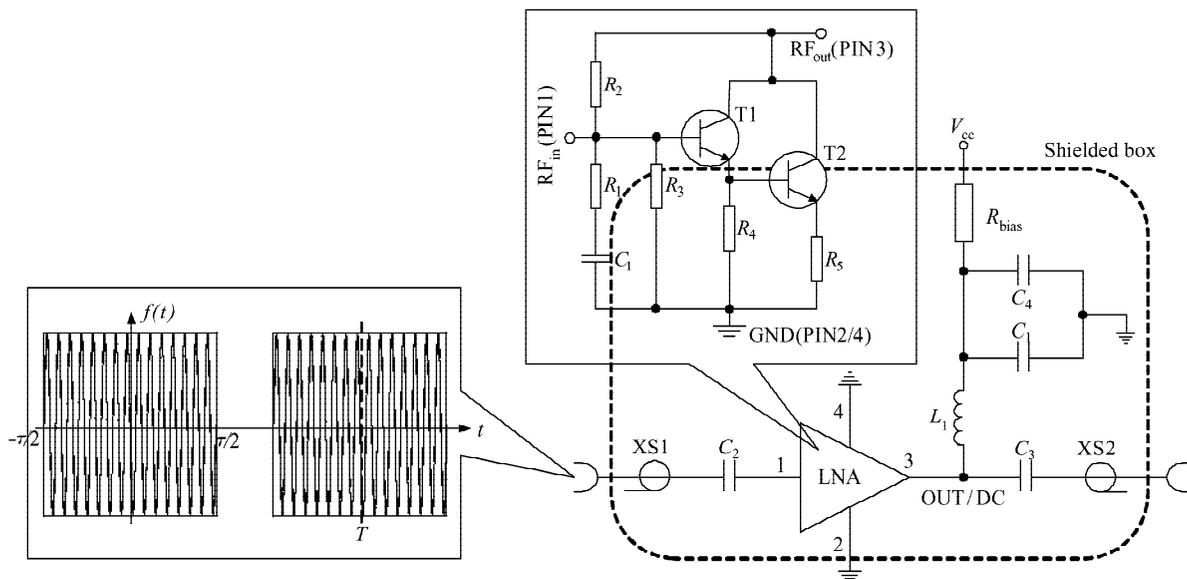


图 1 实验效应物电路、注入的调制矩形波和 Si 基 LNA 内部电路

Fig.1 Experimental effector's circuit,pulse-modulated RF signals for injection and the Si LNA circuit

### 3 结果与讨论

对编号为 #A-0、#A-1、#A-2 的三只 Si 基 LNA，在其输入端用载频为 150MHz 的单脉冲分别注入了 8、15 和 24 $\mu$ J 的能量，能量注入前后三只样品在不同测试频率条件下的注入能量与噪声系数以及注入能量与增益的实验关系如图 2 所示，其中注入能量为零时的噪声系数与增益的测试结果即为能量注入前 LNA 样品的噪声与增益的正常值。从图 2(a) 可以明显看出，当注入能量较低时(8 $\mu$ J)，#A-0 样品的噪声系数比能量注入前明显增大；而当注入能量进一步分别提高到 15 和 24 $\mu$ J 时，#A-1 和 #A-2 两个样品的噪声系数反而比经过较小的 8 $\mu$ J 能量注入后的 #A-0 样品的噪声系数有所降低。图 2(b) 则表明，当所有的 #A-0、#A-1、#A-2 三只 LNA 样品，分别经过了 8、15 和 24 $\mu$ J 不等的能量注入后，其增益呈现出随着注入能量的增加而单调增大的现象。由此可见，能量注入对 Si 基 LNA 性能的影响同时反映在噪声系数和增益特性两个方面，即较小的能量作用就可以导致 Si 基 LNA 噪声系数显著增大，而当继续增大注入能量时，在注入能量对 LNA 噪声系数影响程度下降的同时，增大的注入能量的作用则在 LNA 增益的单调上升中得到了体现。

对经过 15 $\mu$ J 能量注入后的 #A-1 样品进行了开帽解剖，图 3 是解剖后 LNA 内部所呈现的 T2 管的异常形貌照片，它表明经过 15 $\mu$ J 能量注入后 T2 管的基极/发射极间有多处损伤。图 3 也同时显示了在 Si 基 LNA 版图中，其 T1 管芯的面积远大于 T2 管的面积，采用这种设计的出发点是为了实现 LNA 在阻抗匹配基础上获得尽可能低的噪声系数。而在图 1 所示的 LNA 内部电路中，T1 管的基极偏置点通常较低，约 1.3~1.5V，增益也较小，加之 T1 管工作点由多只电阻稳定，这些偏置

电阻也同时能够分流部分输入信号，因此 T1 管可以承受较大的注入能量而不易被损伤。相比之下 T2 管作为 LNA 的主增益级，注入信号经 T1 管驱动后对 T2 管影响很大，因此导致了图 3 中 T2 管的损伤。

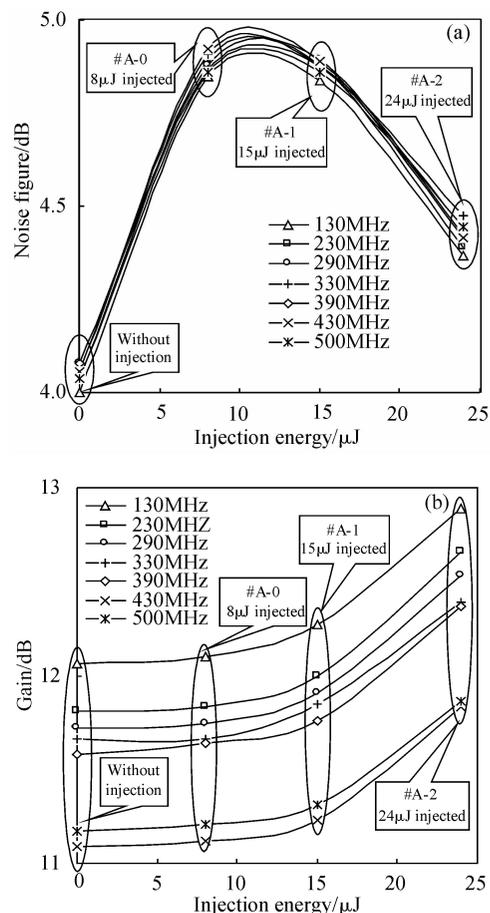


图 2 不同频率下样品注入能量与噪声(a)和增益(b)的实验关系曲线  
Fig.2 Experimental curves of noise (a) and gain (b) with injection energy at various frequencies

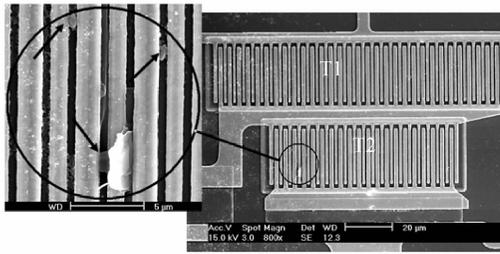


图 3 # A-1 样品注入后内部 T2 管异常显微形貌

Fig.3 Surface microscopy of abnormality inside the T2 transistor of sample # A-1 after injection

图 4 是 # A-1 样品在  $15\mu\text{J}$  能量注入前后的噪声特性对比实验曲线. 为确定图 3 中所示的 T2 管基极/发射极间异常形貌对 LNA 的噪声系数影响, 用 ADS2004A 软件对 LNA 进行了能量注入前后噪声特性的仿真. 图 4 中右上方插图是将图 3 中 T2 管基极金属化损伤等效为在其基极引入了附加电阻  $R_s$  后的仿真结果, 能量注入前对应于  $R_s = 0$  的情形, 能量注入后分别设  $R_s$  为 6, 12 和  $18\Omega$  三种情况, 由此仿真得到了 LNA 的噪声系数随频率及  $R_s$  的变化趋势, 与实验结果吻合, 从而表明能量注入造成的 T2 管基极金属化损伤导致了其接触电阻增大, 进而引起 # A-1 样品的噪声增大.

各种器件与 IC 物理结构中存在的电阻都会产生热噪声, 双极器件基极电阻  $r_{bb'}$  (包括本征基区电阻、非本征基区电阻和有关的金属化互连电阻等) 较大并且位于输入回路当中, 是热噪声的主要来源. 对于由载流子的无规则热运动所引起的热噪声, 在绝对温度为  $T$ 、电阻为  $R$  时热噪声电压均方值  $(\bar{e}_{th})^2$  为

$$(\bar{e}_{th})^2 = 4k_0 TR\Delta f \quad (3)$$

式中  $k_0$  为 Boltzmann 常数;  $\Delta f$  为测量系统的带宽, 由 (3) 式得到热噪声频谱密度  $(\bar{e}_{th})^2/\Delta f = 4k_0 TR$ , 即频谱密度与频率无关, 是一种白噪声. 散粒噪声则是由电流流过半导体中各种势垒时的波动所引起的, 散粒噪声电流的均方值为

$$(\bar{i}_{sh})^2 = 2qI\Delta f \quad (4)$$

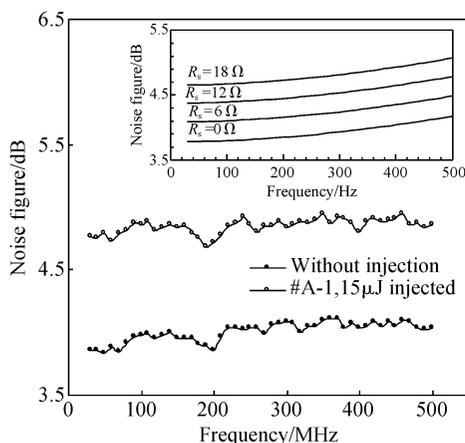


图 4 # A-1 样品注入前后噪声特性对比实验曲线

Fig.4 Experimental curves of noise figures of sample # A-1 with and without injection

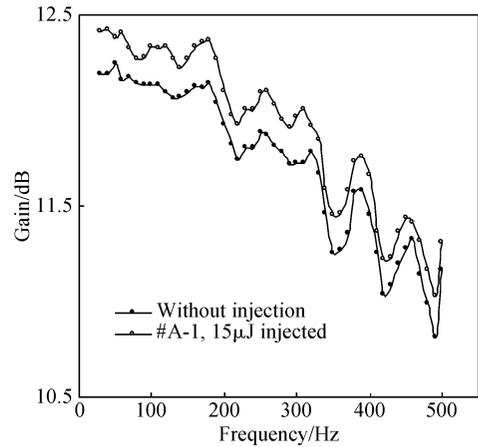


图 5 # A-1 能量注入前后增益特性对比实验曲线

Fig.5 Experimental curves of gain characteristics of sample # A-1 with and without injection

其中  $q$  为电子电荷;  $I$  为流过势垒的电流;  $\Delta f$  为测量系统带宽, 散粒噪声的频谱密度  $(\bar{i}_{sh})^2/\Delta f = 2qI$ , 也是一种白噪声. 在晶体管和 IC 中, pn 结、金-半接触等都存在势垒, 越过这些势垒的载流子数量起伏引起的电流波动都会产生散粒噪声. LNA 在设计中为实现低噪声化, 对电路内部匹配情况要求较高, 欧姆接触退化导致接触电阻变大也会直接引起电路匹配变差, 从而对其噪声特性产生影响. 本文的实验结果表明能量注入前后 LNA 噪声增加与频率无关.

分立器件参数漂移与噪声之间的关系已有研究, 根据不同的形成机理, 双极晶体管  $h_{FE}$  漂移与噪声的相关性体现在: (1) 当晶体管受到某种应力作用 (如热载流子注入、能量注入等) 使其界面陷阱密度增加时,  $h_{FE}$  的退化和噪声的增加将同时发生; (2) 晶体管表面氧化层中或氧化层上的可动离子分布在高温或强场下发生变化时,  $h_{FE}$  和噪声也会发生相应的变化; (3) 氧化层陷阱对 Si 体内多数载流子的慢俘获, 将通过调制 Si 表面势使  $h_{FE}$  随时间持续而缓慢地增加, 且噪声与  $h_{FE}$  漂移的相关性最为明显, 也为实验所证明<sup>[6-11]</sup>. 而 Si 基双极 LNA 增益的正向漂移与噪声的相关性还有待于进一步深入研究.

图 5 是 # A-1 样品在  $15\mu\text{J}$  能量注入前后的增益特性变化对比实验曲线, 它表明能量注入使 LNA 的增益比注入前有了明显的增加. 而图 2(b) 中 # A-0 和 # A-2 二个样品在分别经过 8 和  $24\mu\text{J}$  的能量注入后, 其增益也比注入前提高, 并且所有样品增益的提高都是随着注入能量的增加而单调增加的. 能量注入使 LNA 增益变大的现象可以结合文献报道的分立 Si-npn 晶体管应力实验结果<sup>[6,12]</sup> 以及本文所进行的 LNA 电路仿真结果得到解释.

半导体器件和 IC 的损伤分为致命损伤和参数漂移损伤两大类, 文献[6]报道了对分立 Si-npn 管的加速寿命实验结果, 表明其主要损伤模式是电流增益  $h_{FE}$  随应力作用时间的正向漂移. 图 6 中左下角插图是文献[6]报道的对近百只分立 Si-npn 管在恒应力作用下实验得

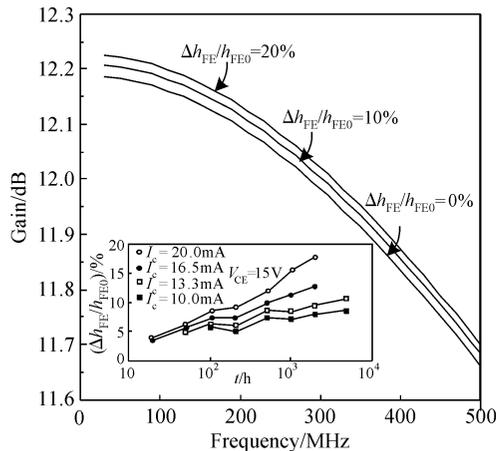


图 6 双极器件  $h_{FE}$  随时间正向漂移及由此所引起的 LNA 增益变化仿真结果

Fig.6 Positive drift of BJT's  $h_{FE}$  and simulation results of LNA gain variation caused by  $h_{FE}$  drift

到的  $h_{FE}$  典型漂移曲线,图中  $h_{FE0}$  是应力作用前的初始值,而  $\Delta h_{FE}/h_{FE0}$  是相同应力作用下各样品的平均值.文献[6]同时指出,在阶跃应力作用下分立 Si-npn 管的  $h_{FE}$  变化与恒应力作用下的变化完全一致,换言之,外加电应力的作用直接导致了 Si-npn 管电流增益  $h_{FE}$  的单调上升.

本文采用单脉冲调制射频信号注入 Si 基 LNA,其注入能量正比于单脉冲宽度(也就是应力作用时间),也即 Si 基 LNA 注入损伤实验与文献[6,12]的加速寿命实验的作用方式有相似之处,只是本文实验中的应力形式有所不同,应力的强度大为提高而作用时间大大缩短.因此文献[6,12]得到的 Si-npn 管电流增益  $h_{FE}$  随应力作用时间的正向漂移实验结果可以作为依据,应用于能量注入后 Si 基 LNA 增益变化的 ADS2004A 仿真之中.结合 Si 基 LNA 内部电路结构、版图和图 3 所示的 T2 管异常形貌,在能量注入后的电路增益变化仿真中,将 Si 基 LNA 能量注入后 T2 管的  $h_{FE}$  漂移,即 T2 管  $\Delta h_{FE}/h_{FE0}$  漂移分别设为 10% 和 20%,仿真得到的能量注入后 LNA 增益随频率变化的结果示于图 6,其中  $\Delta h_{FE}/h_{FE0} = 0$  对应于能量注入前的情形.对比图 5 和图 6 中的实验与仿真结果,两者的变化趋势一致且吻合较好,说明 Si 基 LNA 在能量注入后其增益上升是由于内部 T2 管的损伤模式是  $h_{FE}$  的正向漂移.由于注入能量增大导致  $\Delta h_{FE}/h_{FE0}$  单调增大,而图 6 中 T2 管在不同  $\Delta h_{FE}/h_{FE0}$  漂移量条件下仿真得到的曲线相对位置关系也同时表明了 LNA 的增益是随着注入能量的增加而单调上升的.

## 4 结论

半导体器件和 IC 内部噪声大小不仅限制了其检测和放大微弱信号的能力,同时也反映了其可靠性和稳定

性优劣.Si 基双极 LNA 的噪声系数是能量注入前后的变化敏感参数之一,实验表明随着注入能量增加,LNA 噪声由正常值先升高再降低,样品解剖显示金-半接触是 Si 基 LNA 易损部位,在外界能量作用下较为薄弱和敏感,仿真表明金-半接触损伤引起的接触电阻增大以及随之产生的内部失配导致了 LNA 噪声性能变差.增益也是 Si 基 LNA 能量注入前后的变化敏感参数之一,受双极器件电流增益  $h_{FE}$  随作用时间正向漂移的损伤模式影响,经过能量注入后 LNA 的增益比注入前反而有所增大,并且增益的增大与注入能量成正比,因此单纯采用能量注入前后增益变化来衡量 LNA 的损伤效应的方法是不全面的.

本文中低能注入使 LNA 噪声性能下降及增益提高属于损伤效应,并非功能损伤,能量注入下的 LNA 损伤效应非常复杂,目前正在进行多次能量注入下的累积损伤效应及器件和 IC 的永久性损伤(功能损伤)研究.

## 参考文献

- [1] Masetti G, Graffi S, Golzio D, et al. Failures induced on analog integrated circuits by conveyed electromagnetic interferences: a review. *Microelectronics Reliability*, 1996, 36(7/8): 955
- [2] Kim Kye-chong, Iliadis A A, Granatstein V L. Effects of microwave interference on the operational parameters of n-channel enhancement mode MOSFET devices in CMOS integrated circuits. *Solid-State Electronics*, 2004, 48(10/11): 1795
- [3] Wang H X, Rodriguez S, Dirik C, et al. Electromagnetic interference and digital circuits: an initial study of clock networks. *Electromagnetics*, 2006, 26(1): 73
- [4] Dobykin V D. Analysis of thermal damage to semiconductor devices from high-power electromagnetic pulses. *Journal of Communications Technology and Electronics (Russia)*, 2004, 49(3): 338
- [5] Dobykin V D, Kharchenko V V. Electromagnetic-pulse functional damage of semiconductor devices modeled using temperature gradients as boundary conditions. *Journal of Communications Technology and Electronics (Russia)*, 2006, 51(2): 231
- [6] Zhuang Yiqi, Sun Qing. Correlation between  $1/f$  noise and  $h_{FE}$  long term instability in silicon device. *IEEE Trans Electron Devices*, 1991, ED-38(11): 2540
- [7] Tolpadi A, Srivastava R S. Generation of interface states and oxide charges in n-MOS structures due to high electric field. *Solid State Electron*, 1987, 30(10): 919
- [8] Dimitrijević S, Stojadinović N. Analysis of CMOS transistors instability. *Solid-State Electron*, 1987, 30(10): 991
- [9] Liu Xingbin. Correlation between parameter's instability and low frequency noise in MOSFET. Thesis for Master's Degree, Xi'an: Xidian University, 1989 (in Chinese) [刘兴斌. MOSFET 参数不稳定性与低频噪声的关系. 西安电子科技大学硕士论文, 1989]
- [10] Zhuang Yiqi, Sun Qing.  $1/f$  noise as a reliability prediction for subsurface Zener diodes. *The Proceedings of the 3rd International Conference on Solid-State and IC Technology*, Beijing, 1992
- [11] Fleetwood D M, Scafield J H. Evidence that similar point defects cause  $1/f$  noise and radiation-induced-hole trapping in metal-oxide-semiconductor transistors. *Phys Rev Lett*, 1990, 64(5): 579
- [12] Zhuang Yiqi, Sun Qing. Noise and low-noise technique of semiconductor device. Beijing: National Defence Industry Press, 1993: 207 (in Chinese) [庄奕琪, 孙青. 半导体器件中的噪声及其低噪声化技术. 北京: 国防工业出版社, 1993: 207]

## Mechanism of Energy-Injection Damage of Silicon Bipolar Low-Noise Amplifiers\*

Chai Changchun<sup>†</sup>, Yang Yintang, Zhang Bing, Leng Peng, Yang Yang, and Rao Wei

(Key Laboratory of the Ministry of Education for Wide Band-Gap Semiconductor Materials and Devices,  
School of Microelectronics, Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract:** Experiments of the energy injection into silicon bipolar low-noise amplifiers (LNA) are conducted by introducing pulse-modulated 150MHz radio frequency (RF) signal at LNAs inputs. The results show that the noise figure and the gain characteristic of silicon LNAs are sensitive to the injection energy. The metallization damage between the base and the emitter is correlated with the energy injection from the sample dissection analysis. The noise figure increases due to increased metal-semiconductor contact resistance of the base. The gain of the LNAs also increases with injection energy following the positive drift damage model of  $h_{FE}$  for the silicon bipolar devices. Therefore, the traditional way to evaluate the damage effect of devices and circuits simply by the change of the gain is not comprehensive due to the complexity of the energy injection induced damage.

**Key words:** energy injection; low-noise amplifier; noise figure; gain; damage mechanism

**EEACC:** 0170N; 1220; 2570B

**Article ID:** 0253-4177(2008)12-2403-05

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (No.60776034)

<sup>†</sup> Corresponding author. Email: ccchai@mail.xidian.edu.cn

Received 29 April 2008, revised manuscript received 12 June 2008