

基于 $1/f$ 噪声的 NPN 晶体管辐照感生电荷的定量分离

赵启凤 庄奕琪 包军林 胡为

Quantitative separation of radiation induced charges for NPN bipolar junction transistors based on $1/f$ noise model

Zhao Qi-Feng Zhuang Yi-Qi Bao Jun-Lin Hu Wei

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 136104 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.136104

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.136104>

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

栅控横向 PNP 双极晶体管基极电流峰值展宽效应及电荷分离研究

The base current broadening effect and charge separation method of gate-controlled lateral PNP bipolar transistors

物理学报.2014, 63(11): 116101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.116101>

氦离子低温预辐照对不锈钢中氦泡生长抑制作用的 Monte Carlo 模拟研究

Inhibition effect of low-temperature pre-irradiation of helium ions on the growth of helium bubble in stainless steel: a Monte Carlo simulation

物理学报.2014, 63(10): 106102 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.106102>

300 eV--1 GeV 质子在硅中非电离能损的计算

Numerical investigation of non-ionizing energy loss of proton at an energy range of 300 eV to 1 GeV in silicon

物理学报.2014, 63(6): 066102 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.066102>

双极电压比较器电离辐射损伤及剂量率效应分析

Analyses of ionization radiation damage and dose rate effect of bipolar voltage comparator

物理学报.2014, 63(2): 026101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.026101>

强流脉冲电子束辐照诱发纯钼表面的损伤效应及结构缺陷

Damage and structural defects in the surface layer of pure molybdenum induced by high-current pulsed electron beam

物理学报.2013, 62(23): 236103 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.236103>

基于 $1/f$ 噪声的NPN晶体管辐照感生电荷的定量分离*

赵启凤^{1)†} 庄奕琪¹⁾ 包军林¹⁾ 胡为²⁾

1)(西安电子科技大学微电子学院, 西安 710071)

2)(西安电子科技大学机电工程学院, 西安 710071)

(2014年12月14日收到; 2015年3月27日收到修改稿)

本文针对NPN双极性晶体管, 在研究辐照感生的氧化层电荷及界面态对晶体管基极电流和 $1/f$ 噪声的影响的基础上, 建立辐照感生氧化层电荷及界面态与基极电流和 $1/f$ 噪声的定量物理模型. 根据所建立的模型, 提出一种新的分离方法, 利用 $1/f$ 噪声和表面电流求出氧化层电荷密度, 利用所求得氧化层电荷密度和表面电流求出界面态密度. 利用本方法初步实现了辐照感生氧化层电荷及界面态的定量计算.

关键词: 电离辐照, $1/f$ 噪声, 氧化层电荷, 界面态

PACS: 61.80.-x, 61.80.Ed, 85.40.Qx

DOI: 10.7498/aps.64.136104

1 引言

空间辐射环境是诱发航天用电子器件异常或故障的主要原因之一. 双极性晶体管具有良好的电流驱动能力、线性度、低噪声以及优良的匹配特性, 被广泛用在航天星载设备以及武器装备等领域. 大量研究表明, 双极性晶体管对空间电离辐照十分敏感, 长时间的电离辐照诱发氧化层电荷和界面态的增加是导致双极性晶体管电流放大倍数下降和基极电流增加的主要原因, 对器件造成显著的累积损伤^[1-3].

为了更好地理解这两种退化机理, 必须分别测出每种机理的效果. 为了达到这个目的, 国内外开展了大量工作, 提出几种对辐照感生的氧化层电荷和界面态定量分离的方法. 1993年Koiser等^[4]根据NPN双极性晶体管的基极电流随基射结电压的变化曲线, 通过作图法来获得的过渡电压(transition voltage), 进而定量获得氧化层电荷变化; 利用栅控二极管结构或晶体管的截止电流

(intercept current)获得表面复合速率变化, 进而定量获得界面态变化. 1995年Belyakov等提出利用MOS(金属-氧化物-半导体)结构研究双极性晶体管中低剂量率辐射损伤增强效应的方法, 文中给出了一种栅控晶体管结构, 虽然对电荷分离进行了一定的探索, 但是没有给出具体的分离结果^[5]. 1999年, Barnaby等通过改变外加栅极电压使得栅控横向PNP双极晶体管工作在积累(accumulation)、平带(flatband)和耗尽(depletion)状态下, 获得了辐照感生的氧化层电荷和界面态^[6]. 2002年Ball等借助栅偏置技术(gate-biasing technique)研究并分离了X射线和质子辐照下栅控横向PNP双极晶体管中的感生的氧化层电荷和界面态^[7]. 之后陆续有人用栅控横向PNP双极晶体管分离出氧化层电荷和界面态^[8-12]. 国内方面, 中科院新疆理化技术研究所对此也进行了相关研究, 于2012年利用栅控横向PNP双极晶体管定量分离出了氧化层电荷及界面态^[13-15]. 虽然对定量分离辐照感生电荷开展了大量研究, 但是这些研究工作都是基于器件的电参量而进行的, 利用 $1/f$ 噪声分离NPN双极性晶

* 国家自然科学基金(批准号: 61076101, 61204092)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: z_qifeng@163.com

极管辐照感生电荷的方法至今无报道。

起源于器件中缺陷对载流子俘获与发射的低频噪声则是微观缺陷变化的直接反映, 携带更为丰富的缺陷信息, 低频噪声(尤其是 $1/f$ 噪声)也逐渐成为电子器件可靠性表征敏感参量^[16,17]. 氧化层电荷是 $1/f$ 噪声的一个主要来源, 故 $1/f$ 噪声测量是对氧化层电荷进行定量分析的有效手段. 对MOS型器件结构, 利用 $1/f$ 噪声特性确定氧化层电荷的能量或空间分布已有许多报道^[18,19], 对于栅控NPN晶体管也有相关报道^[20]. 但是栅控双极性晶体管同一般的双极性晶体管还是有所区别, 这种分离方法并不能直接应用于一般的双极性晶体管. 本文针对NPN双极晶体管, 在研究电离辐照下感生氧化层电荷及界面态对晶体管基极电流和 $1/f$ 噪声的影响的基础上, 建立辐照感生氧化层电荷及界面态与基极电流和 $1/f$ 噪声的定量物理模型. 基于所建立的模型, 本文提出一种新的分离方法, 利用 $1/f$ 噪声和表面电流求出氧化层电荷密度和界面态的密度.

2 模型

2.1 电流退化模型

双极晶体管的基极电流 I_B 包含两部分^[21]: 体内电流 I_V 和表面复合电流 I_S , $I_B = I_V + I_S$, 在小注入下 I_S 可表示为^[22]

$$I_S = A_S q n_i s q n_i (v_{th} \sigma_s N_{it}) \left[\exp\left(\frac{qV_{BE}}{kT}\right) - 1 \right] \times \left\{ 2 + \exp\left(\frac{q}{kT}(V_s + V_{BE} - V_F)\right) + \exp\left(\frac{q}{kT}(V_F - V_s)\right) \right\}^{-1}, \quad (1)$$

式中 q 为电子电量, k 为波尔兹曼常数, T 为温度, V_{BE} 为基射结电压, V_s 为基区表面势, $V_F = kT/q \ln(N_A/n_i)$ 为费米势, n_i 为本征载流子浓度; A_S 为表面复合面积, v_{th} 为载流子运动速度, N_{it} 为界面态密度, σ_s 为界面态有效俘获截面, 其中 $s = v_{th} \sigma_s N_{it}$ 为表面复合速率.

当基区表面耗尽时, 基区表面势可表示为^[4]

$$V_s = \frac{qN_{ot}^2}{2\varepsilon_{si}N_A}, \quad (2)$$

N_{ot} 为氧化层电荷面密度, ε_{si} 为硅的绝对介电常数, N_A 为基区掺杂密度.

当器件处于放大区时, 基射结正偏, 此时 $V_{BE} > 4kT/q$, 在低剂量下(100 krad(Si)) $V_s < V_F - V_{BE}/2$, 因而(1)式可写为

$$I_S = A_S q n_i (v_{th} \sigma_s N_{it}) \exp\left(\frac{qV_{BE}}{kT}\right) \times \exp\left[\frac{q}{kT}\left(\frac{qN_{ot}^2}{2\varepsilon_{si}N_A} - V_F\right)\right], \quad (3)$$

由上式可知, 随着辐照剂量的增加, 辐照感生的界面态和氧化层电荷使基极表面电流增加.

2.2 $1/f$ 噪声表征模型

随着辐照剂量的增加, 辐照感生的氧化层电荷使得晶体管基区表面处于耗尽状态, 器件的低频噪声主要表现为表面 $1/f$ 噪声^[22], 其物理机理为: 氧化层电荷俘获和发射载流子引起氧化层电荷量的涨落 δQ_{ot} , 进而调制了表面势 δV_s , 产生了基区表面和发射结空间电荷区表面复合电流的涨落 δI_S , 最终表现为基极电流噪声^[21,22]. 根据Si/SiO₂界面电中性要求, $\delta V_s = \delta Q_{ot}/(A_S C_S)$, C_S 为表面电容, 基极电流涨落及其功率谱密度可分别表示为^[21]

$$\delta I_S = \frac{\partial I_S}{\partial V_s} \delta V_s = \frac{\partial I_S}{\partial V_s} \frac{1}{A_S C_S} \delta Q_{ot}, \quad (4)$$

$$S_I = \left(\frac{\partial I_S}{\partial V_s}\right)^2 \left(\frac{1}{A_S C_S}\right)^2 A_S S_{Q_{ot}}, \quad (5)$$

$S_{Q_{ot}}$ 为单位面积氧化层电荷涨落的功率谱密度($S_{Q_{ot}} = q^2 kT N_t(E) \lambda / f$)^[20], $N_t(E)$ 为单位能量间隔单位体积内的氧化层电荷密度, λ 是隧穿衰减距离, f 为频率. $N_{ot}(E) = \lambda N_t(E)$ 为等效氧化层电荷单位能量间隔面密度^[20], 通常 $N_t(E)$ 在禁带中连续分布, 对整个氧化层电荷的能量范围积分, 可以得到

$$N_{ot} = \int_{E_V}^{E_C} N_{ot}(E) dE = \int_{E_V}^{E_C} \lambda N_t(E) dE, \quad (6)$$

式中 E_C 是导带底, E_V 是价带顶. 由于频谱特性对氧化层电荷分布形式并不敏感^[22], 所以可以假设 $N_t(E)$ 是均匀分布, 可得

$$N_t(E) = \frac{N_{ot}}{\lambda(E_C - E_V)}. \quad (7)$$

基区表面耗尽时, 表面电容 C_S 可表示为^[22]

$$C_S = \sqrt{\frac{\varepsilon_{Si} q N_A}{2V_s}}. \quad (8)$$

联立 (5), (6), (7) 和 (8) 式可得

$$S_{I_{BS}} = I_S^2 \frac{q^4 N_{ot}^3}{kT A_S \epsilon_{Si}^2 N_A^2 f(E_C - E_V)}. \quad (9)$$

把 (3) 式代入 (8) 式可得

$$S_{I_{BS}} = \left[A_S q v_{th} \sigma_s kT N_{it} n_i \exp\left(\frac{qV_{BE}}{kT}\right) \times \exp\left(\frac{q}{kT} \left(\frac{qN_{ot}^2}{2\epsilon_{Si} N_A} - V_F\right)\right) \right]^2 \times \frac{q^4 N_{ot}^3}{kT A_S \epsilon_{Si}^2 N_A^2 f(E_C - E_V)}. \quad (10)$$

由上式可知, 辐照感生界面态和氧化层电荷是导致器件基极电流噪声增加的物理起源.

3 实验结果和计算

3.1 实验

实验样品采用 2N2484 型 NPN 双极晶体管, 室温条件下在西北核技术研究所 Co⁶⁰ 源上进行了 γ 射线辐照试验. 辐射剂量率为 0.1 Gy(Si)/s, 辐照剂量测试点选取为 100 Gy(Si), 300 Gy(Si), 500 Gy(Si) 和 700 Gy(Si), 特征电学参量 (基极电流 I_B 、集电极电流 I_C) 基于 HP4156 半导体参数测试仪完成, 低频噪声参量 (噪声功率谱密度) 基于虚拟仪器的电子器件低频噪声测试仪器系统 XD3020 [23] 完成.

为了甄别其基极低频电流噪声, 通常选择较大的基极电阻 R_B , 噪声测试偏置电路如图 1 所示, 这时基极电流 $1/f$ 噪声功率谱密度 S_{I_B} 是主导 $1/f$ 噪声源, 在集电极电阻 R_C 端的测得电压 $1/f$ 噪声功率谱密度 S_{V_C} 可以表示为 [24]

$$\frac{S_{V_C}}{\beta^2 R_C^2} = S_{I_B}. \quad (11)$$

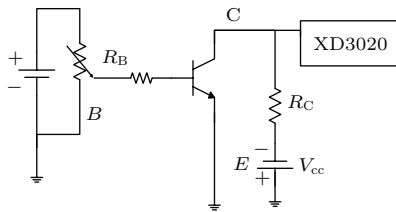


图 1 晶体管低频噪声测试电路图

Fig. 1. Circuit used to bias the transistors for noise measurements.

3.2 实验结果

图 2 为双极晶体管基极电流随辐照累积总剂量的变化. 图 3 所示为双极晶体管过剩基极电流

ΔI_B 随辐照随总剂量的变化, 过剩基极电流定义为辐照后基极电流与辐照前基极电流的变化量. 随着辐照总剂量的增加, 过剩基极电流的变化量明显增加. 这是由于辐照在 NPN 双极晶体管发射极-基极 SiO₂ 钝化层内感生氧化层电荷 N_{ot} 及界面态 N_{it} [1-3] 引起的. 界面态 N_{it} 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; 辐射感生的氧化层电荷 N_{ot} (为正电荷) 的积累耗尽 p 型基区, 同时改变表面势, 引起表面复合的增加, 致使基极电流进一步增大. 这两者共同导致基射结表面空间电荷区的表面复合电流增大.

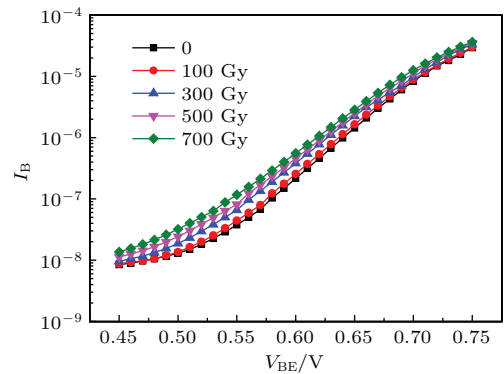


图 2 (网刊彩色) 不同总剂量下基极电流与基射结电压变化的关系

Fig. 2. (color online) Base current I_B as a function of base-emitter voltage V_{BE} for varying total dose.

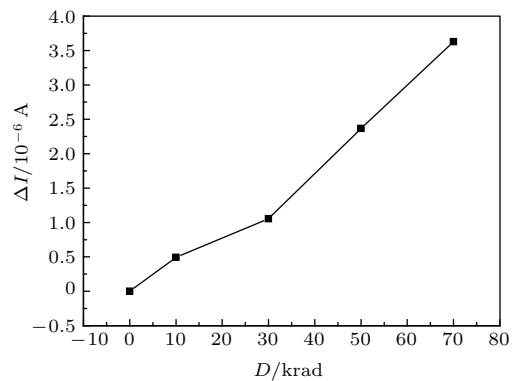


图 3 过剩基极电流随总剂量的变化 ($V_{BE} = 0.69$ V)

Fig. 3. Excess base current versus total doses ($V_{BE} = 0.69$ V).

图 4 给出了 NPN 双极晶体管的基极电流功率谱密度在不同剂量的测量值. 由图 4 可知随着辐照剂量的增加, $1/f$ 电流噪声相应增大.

通常噪声可以用以下公式表示:

$$S_I = A + B/f, \quad (12)$$

A 为白噪声幅度, B 为 $1/f$ 噪声的幅度. 在 10—100 Hz 范围内, 由图 4 可以看到都是 $1/f$ 噪声, A 可以

忽略. 将实测数据经过拟合, 可以提取出 B 值.

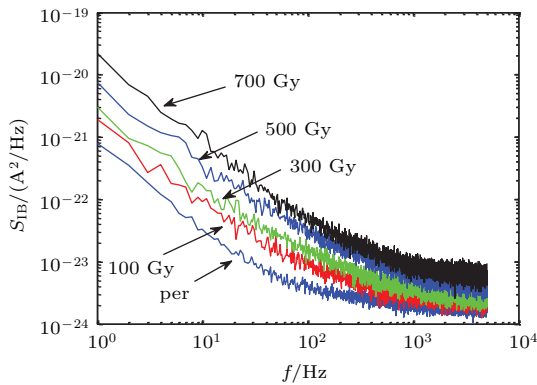


图4 (网刊彩色) 基极电流噪声功率谱密度 S_{IB} 随辐照剂量的变化
Fig. 4. (color online) Base current noise spectra density S_{IB} during Irradiation for various total doses.

图5给出10—100 Hz范围内基极 $1/f$ 电流噪声的幅度 B 的变化量, 由图可知随着辐照总剂量的增加电流噪声功率谱密度变化量 ΔB 增加, 与理论模型结论是一致. 这是由于晶体管的基极电流 $1/f$ 噪声主要来自于基射结空间电荷区及基区表面附近的氧化层电荷对载流子的俘获和发射^[21,22]. 辐射感生氧化层电荷使其密度变大, 这样就有更多的俘获-发射中心, 导致更多的载流子参与俘获-发射过程, 使得噪声增加; 同时感生的氧化层电荷和界面态使得表面电流增加, 由(9)式可知也会导致基极电流低频噪声增加.

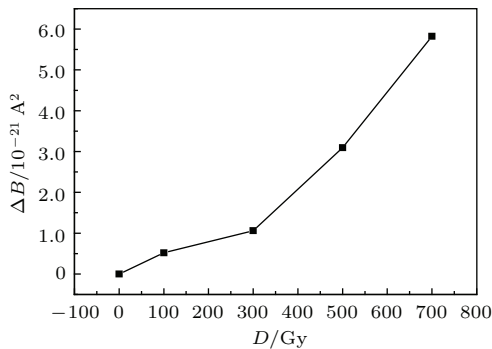


图5 $1/f$ 噪声的幅度变化量 ΔB 随总剂量的变化
Fig. 5. change of amplitude of $1/f$ noise ΔB as a function of various total doses.

3.3 分离方法

由(9)式和(12)式可得

$$B = I_S^2 \frac{q^4 N_{ot}^3}{kT A_S \epsilon_{Si}^2 N_A^2 (E_C - E_V)}. \quad (13)$$

由(13)式, 可以得出氧化层电荷的表达式

$$N_{ot} = \sqrt[3]{\frac{BkTA_S\epsilon_{Si}^2 N_A^2 (E_C - E_V)}{I_S^2 q^4}}. \quad (14)$$

由此式可知, 只要测得基极电流噪声功率谱密度和表面电流就可以求出 N_{ot} .

基极电流也可以表示为

$$I_B = I_{B0} \exp((qV_{BE})/(mkT)), \quad (15)$$

m 为非理想因子, 对体分量, $m = 1$, 对于表面分量, $m \approx 2$. 利用 $I-V_{BE}$ 图可以提取出非理想因子. 在较小电压下, 表面分量是主导成分, 当电压较大时体分量占主要成分. 噪声测试条件为 $V_{BE} = 0.69$ V, 所以可以提取 0.69 V 的非理想因子, 然后求出表面分量. 文献^[25]利用这个性质从基极电流 I_B 中分离出表面复合 I_S , 本文也用这种方法分离出表面复合电流 I_S , 图6给出一个具体的分离表面复合电流的例子.

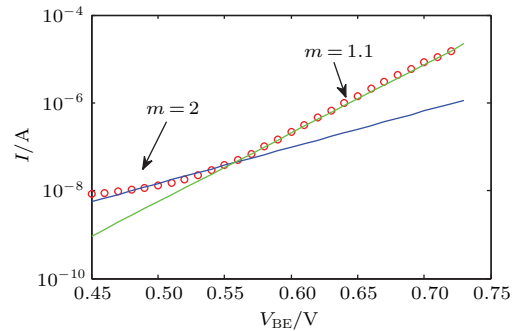


图6 (网刊彩色) 基极表面复合电流的提取的方法
Fig. 6. (color online) Method for extracting base surface current.

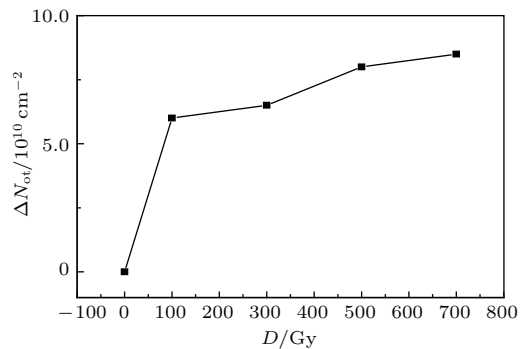


图7 氧化物电荷密度增量与总剂量的关系
Fig. 7. Variations of oxide-trapped charge density ΔN_{ot} versus total doses.

利用每个剂量下基极 $1/f$ 电流噪声的幅度的 B 值和表面电流, 能求出氧化层电荷密度增量, 结果如图7. 计算所用各参数值如下: 复合面积 $A_S =$

$2.5 \times 10^{-4} \text{ cm}^{-2}$, 基区掺杂浓度 $N_A = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, 硅的禁带宽度 $E_C - E_V = 1.12 \text{ eV}$, $T = 300 \text{ K}$, $q = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$, $\epsilon_{\text{Si}} = 8.85 \times 11.9 \times 10^{-14} \text{ F/cm}$, $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$.

由 (3) 式可得

$$N_{\text{it}} = I_S \left[Aq n_i v_{\text{th}} \sigma_s \exp\left(\frac{qV_{\text{BE}}}{kT}\right) \times \exp\left(\frac{q}{kT} \left(\frac{qN_{\text{ot}}^2}{2\epsilon_{\text{Si}}N_A} - V_F\right)\right) \right]. \quad (16)$$

利用表面电流和求出的 N_{ot} 就可以求出界面态增量, 结果如图 8. 计算所用各参数值如下: 载流子运动速度 $v_{\text{th}} = 10^7 \text{ cm/s}$, 界面态有效俘获截面 $\sigma_s = 10^{-16} \text{ cm}^2$ [8].

由于计算方法的不同以及器件的不同结构和不同工艺, 各种方法算出来的数据不尽相同, 量级

也有很大差别; 同时由于剂量率的不同, 辐照感生的氧化层电荷和界面态也是不同的, 所以比较起来比较困难. 表 1 列举几个文献和本文的具体结果.

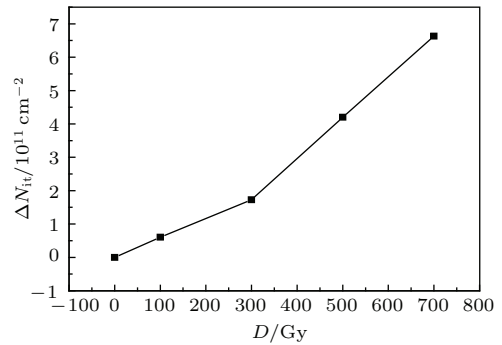


图 8 界面态密度增量与总剂量的关系

Fig. 8. Variations of interface state density ΔN_{it} versus total doses.

表 1 计算结果对比

Table 1. Comparison of results.

	剂量率/Gy(Si)/s	总剂量/Gy(Si)	界面态增量/cm ²	氧化物电荷增量/cm ²
文献 [8]	0.17	300	6.3×10^{10}	1.4×10^{11}
文献 [9]	1	1000	5×10^{10}	3×10^{11}
文献 [10]	0.1	300	8×10^{10}	2×10^{11}
本文	0.1	700	6.6×10^{11}	8.5×10^{10}

4 结 论

经过理论分析和近似计算, 定量分离出 NPN 双极性晶体管的辐照感生氧化层电荷和界面态. 目前模型还比较简单, 求出的数据精度还有待进一步研究. 但是利用本方法初步实现了辐照感生电荷的定量分离, 为研究 NPN 双极性晶体管辐照损伤失效机理提供了一种探索手段. 由于非表面耗尽区的 $1/f$ 噪声模型尚欠成熟, 这一方法目前可分析的范围仍然较窄, 进一步的改进有赖于 $1/f$ 噪声建模和鉴别方法研究的进展.

参考文献

[1] Fleetwood D M, Riewe L C, Schwank J R, Witczak, Schrimpf R D 1996 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **43** 2537
 [2] Petrov A S, Ulimov V N 2012 *Miroelectron. Reliab.* **52** 2435
 [3] Zhang T, Liu Y, Li B 2013 *IEEE International Conference of Electron Devices and Solid-State Circuits* Hong Kong, China, June 3-5, 2013 p1

[4] Kosier S L, Schrimpf R D, Nowlin R N, Fleetwood D M 1993 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **40** 1276
 [5] Belyakov V V, Pershenkov V S, Shalnov A V, Shvetzov-Shilovsky I N 1995 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **46** 1660
 [6] Barnaby H J, Cirba C, Schrimpf R D, Kosier S, Fouillat P, Montangner X 1999 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **46** 1652
 [7] Ball D R, Schrimpf R D, Barnaby H J 2002 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **49** 3185
 [8] Minson E, Sanchez I, Barnaby H J, Pease R L, Platteter D G, Dunham G 2004 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **51** 3723
 [9] Nowlin R N, Pease R L, Platteter D G, Dunham G W, Seiler J E 2005 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **52** 2609
 [10] Hughart D R, Schrimpf R D, Fleetwood D M, Chen X J, Barnaby H J, Holbert K E, Pease R L, Platteter D G 2009 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **56** 3361
 [11] Gonzalez-Velo Y, Boch J, Saigné, Roche N, Pérez S 2011 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **58** 2953
 [12] Adell P C, Esqueda I S, Barnaby H J, Rax B, Johnston A H 2012 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **59** 3081
 [13] Xi S B, Lu W, Ren D Y, Zhou D, Wen L, Sun J, Wu X 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 236103 (in Chinese) [席善斌, 陆婉, 任迪远, 周东, 文林, 孙静, 吴雪 2012 物理学报 **61** 236103]
 [14] Xi S B, Lu W, Wang Z K, Ren D Y, Zhou D, Wen L, Sun J, Wu X 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 076101 (in Chinese)

- [席善斌, 陆妩, 王志宽, 任迪远, 周东, 文林, 孙静 2012 物理学报 **61** 076101]
- [15] Ma W Y, Wang Z K, Lu W, Xi S B, Guo Q, He C F, Wang X, Liu M H, Jiang K 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 116101 (in Chinese) [马武英, 王志宽, 陆妩, 席善斌, 郭旗, 何承发, 王信, 刘默寒, 姜柯 2014 物理学报 **63** 116101]
- [16] Sun P, Du L, Chen W H, He L 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 067801 (in Chinese) [孙鹏, 杜磊, 陈文豪, 何亮 2012 物理学报 **61** 067801]
- [17] Liu Y A, Zhuang Y Q, Ma X H, Du M, Bao J L, Li C 2014 *Chin. Phys. B* **23** 020701
- [18] Jayaraman R, Sodini C G 1989 *IEEE Trans Electron Dev.* **36** 1773
- [19] Wong H, Cheng Y C 1990 *IEEE Trans Electron Dev.* **37** 1743
- [20] Zhuang Y Q, Sun Q, Hou X 1996 *Journal of Semiconductors* **17** 446 (in Chinese) [庄奕琪, 孙青, 侯洵 1996 半导体学报 **17** 446]
- [21] Mounib A, Ghibaudo G, Balestra F, Pogany D, Chantre A, Chroboczek 1996 *J. Appl. Phys.* **79** 3330
- [22] Zhuang Y Q, Sun Q 1993 *Noise and its Minimizing Technology in Semiconductor Devices* (Beijing: National Defense Industry Press) p99 (in Chinese) [庄奕琪, 孙青 1993 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) 第99页]
- [23] Bao J L, Zhuang Y Q, Du L, Li W H 2004 *Chinese Journal of Scientific Instrument* **25** 351 (in Chinese) [包军林, 庄奕琪, 杜磊, 李伟华 2004 仪器仪表学报 **25** 351]
- [24] Deen M J, Rumyantsev S L, Schroter M 1999 *J. Appl. Phys.* **85** 1192
- [25] Green C T, Jones B K 1985 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **18** 77

Quantitative separation of radiation induced charges for NPN bipolar junction transistors based on $1/f$ noise model*

Zhao Qi-Feng¹⁾ Zhuang Yi-Qi¹⁾ Bao Jun-Lin¹⁾ Hu Wei²⁾

1) (School of Microelectronics, Xidian University, Xi'an 710071, China)

2) (School of Electro-mechanical Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

(Received 14 December 2014; revised manuscript received 27 March 2015)

Abstract

Ionizing-radiation-induced oxide-trapped charges and interface states cause the current and $1/f$ noise degradation in bipolar junction transistors. In order to better understand these two degradation mechanisms and develop hardening approaches for a specific process technology, it is necessary to measure the effect of each mechanism separately. In recent years, several techniques have been developed, but no charge-separation approach based on $1/f$ noise for NPN bipolar junction transistors is available. In this paper, the effects of ionizing-radiation-induced oxide trapped charges and interface states on base current and $1/f$ noise in NPN bipolar junction transistors are studied in detail. Firstly, a new model of base surface current of NPN bipolar junction transistors is presented with some approximations, based on an available model for the base surface current under certain conditions; this model can identify the physical mechanism responsible for the current degradation. Secondly, combining the theory of carrier number fluctuation and the new model of base surface current another model is developed which can well explain the $1/f$ noise degradation. This model suggests that the induced oxide-trapped charges would make more carriers, involving the dynamic trapping-detrapping, which leads to the $1/f$ noise to increase; and the induced oxide-trapped charges and interface states can also bring about an increase in base surface current which can also cause the $1/f$ noise increase. These two models suggest that the current and $1/f$ noise degradations can be attributed to the same physical origin, and these two kinds of degradations are the result of accumulation of oxide-trapped charges and interface states. According to these two models, simple approaches for quantifying the effects of oxide-trapped charges and interface states are proposed. The base surface current can be extracted from the base current using the available method. The oxide-trapped charge density is estimated using the amplitude of $1/f$ noise (10—100 Hz) and the base surface current. Given the estimated oxide-trapped charge density, the interface state density can be estimated using the base surface current. These methods are simple to implement and can provide insight into the mechanisms and magnitudes of the radiation-induced damage in NPN bipolar junction transistors.

Keywords: radiation, $1/f$ noise, oxide-trapped charge, interface state

PACS: 61.80.-x, 61.80.Ed, 85.40.Qx

DOI: 10.7498/aps.64.136104

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61076101, 61204092).

† Corresponding author. E-mail: z_qifeng@163.com