

# 基于辐照前 $1/f$ 噪声的金属-氧化物-半导体 场效应晶体管辐照退化模型<sup>\*</sup>

彭绍泉<sup>1)</sup> 杜 磊<sup>1)</sup> 庄奕琪<sup>2)</sup> 包军林<sup>2)</sup> 何 亮<sup>1)</sup> 陈伟华<sup>1)</sup>

1) 西安电子科技大学技术物理学院, 西安 710071)

2) 西安电子科技大学微电子学院, 西安 710071)

(2007 年 9 月 28 日收到, 2008 年 4 月 10 日收到修改稿)

基于金属-氧化物-半导体场效应晶体管(MOSFET)噪声的载流子数涨落和迁移率涨落理论,建立了 MOSFET 辐照前  $1/f$  噪声参量与辐照后分别由氧化层陷阱和界面陷阱诱使阈值电压漂移之间的定量数学模型,并通过实验予以验证. 研究表明,辐照诱生的氧化层陷阱通过俘获和发射过程与沟道交换载流子,在引起载流子数涨落的同时也通过库仑散射导致沟道迁移率的涨落,因此辐照前的  $1/f$  噪声幅值正比于辐照诱生的氧化层陷阱数. 利用该模型对 MOSFET 辐照前  $1/f$  噪声与辐照退化的相关性从理论上进行了解释,同时也为 MOSFET 抗辐照能力预测提供理论依据.

关键词:  $1/f$  噪声, 辐照, 金属-氧化物-半导体场效应晶体管, 陷阱

PACC: 7270, 6180E, 7340Q

## 1. 引 言

电离辐照是辐射粒子进入物质与物质内的电子相互作用,并把自身的能量传给电子. 在电离辐照过程中金属-氧化物-半导体(MOS)器件栅氧化层缺陷能够俘获电离电荷,导致器件的电性能在较短时间内发生明显变化. 辐射损伤严重时,还会导致电路失效. 参与电荷俘获的缺陷主要是氧化层中的氧空位缺陷<sup>[1]</sup>和 Si/SiO<sub>2</sub> 界面处的三价硅悬挂键<sup>[2-4]</sup>,这两种缺陷与金属-氧化物-半导体场效应晶体管(MOSFET)的电离辐照响应密切相关<sup>[5]</sup>. 同时,电离辐射过程中 Si/SiO<sub>2</sub> 界面电荷俘获动力学和界面态理论是近年来辐射加固电子学研究的热门课题之一<sup>[2,6]</sup>. 因此,对于 MOSFET 辐照退化机理的研究具有实际意义.

国外针对 MOSFET 辐照效应及  $1/f$  噪声特性的研究表明,辐照前的  $1/f$  噪声功率谱幅值与辐照后由氧化层空穴俘获导致的阈值电压负漂移之间存在正比例关系<sup>[7,8]</sup>,主要是由于产生  $1/f$  噪声的陷阱和电离辐照过程中俘获空穴的陷阱是同一种陷阱<sup>[5]</sup>. 这不仅从微观上揭示了 MOS 器件辐照损伤的内

原因,还提示人们可以通过辐照前  $1/f$  噪声表征 MOSFET 的抗辐照能力. 用  $1/f$  噪声表征 MOSFET 辐照损伤的前提<sup>[9]</sup>是建立一个能够用该器件的  $1/f$  噪声定量刻画该器件内部缺陷特征的理论模型,但现有模型采用简单的假设<sup>[10,11]</sup>,均不能确立 MOSFET 辐照前  $1/f$  噪声与辐照退化的精确定量关系.

本文在 MOSFET 辐照损伤微观机理的基础上,根据载流子数涨落和迁移率涨落理论,同时考虑氧化层陷阱的分布特征及其与沟道交换载流子的隧穿和热激活两种方式,建立了 MOSFET 辐照损伤的  $1/f$  噪声模型,以及辐照前  $1/f$  噪声参量与辐照后分别由氧化层陷阱电荷和界面陷阱电荷诱使阈值电压漂移的相关性模型. 从而建立起 MOSFET 电离辐照退化噪声表征的定量数学模型,并通过实验予以验证. 利用该数学模型有望通过 MOSFET 辐照前的  $1/f$  噪声预测器件的抗辐照能力.

## 2. 理论模型

### 2.1. MOSFET 辐照退化的微观机理

SiO<sub>2</sub> 介质层是 MOSFET 对电离辐照损伤最敏感

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(批准号 60276028)资助的课题.

的部位.在辐照环境中,材料吸收辐照能量就有可能产生原子电离,从而产生电子-空穴对. $\text{SiO}_2$  介质层具有绝缘特性,电子-空穴对不会立即复合,在电场的作用下,由于电子的迁移率远远大于空穴的迁移率,电子将离开氧化层,而空穴集中在氧化层中.氧化层中的氧空位缺陷俘获空穴,形成带正电的缺陷(中心)<sup>[3,12]</sup>.这里,带正电的电荷称为氧化层陷阱电荷.

电离辐照过程中产生的氢离子( $\text{H}^+$ )可以激活被氢钝化的三价硅悬挂键  $P_b\text{H}$ ,形成界面陷阱(中心)<sup>[2,13]</sup>.对于 nMOSFET,界面陷阱带负电荷;对于 pMOSFET,界面陷阱带正电荷.它们统称为界面陷阱电荷<sup>[13]</sup>.

研究表明<sup>[14]</sup>,MOS 器件中的  $1/f$  噪声与氧空位缺陷强烈相关,在宏观参量上表现为辐照前的  $1/f$  噪声功率谱幅值和辐照后与氧空位缺陷相关的氧化层陷阱电荷诱使阈值电压负漂移之间的正比例关系<sup>[7,8]</sup>.而界面陷阱与硅导带或价带交换载流子的时间常数很小<sup>[15]</sup>,已经超出了低频噪声能检测到的频率范围.因此,不能直接确定  $1/f$  噪声与由界面陷阱电荷诱使阈值电压漂移之间的关系.

## 2.2. $1/f$ 噪声模型

文献[9]为了建立 n/p 沟道 MOSFET  $1/f$  噪声的统一模型,作了如下假设:

(1)MOSFET 的  $1/f$  噪声是由载流子数涨落和迁移率涨落<sup>[16]</sup>共同作用的结果,且两者是相关的.换言之,氧化层内陷阱对沟道载流子的俘获和发射引起载流子数涨落,同时该涨落通过库仑散射引起沟道迁移率的涨落,从而导致沟道电流的涨落.

(2)氧化层陷阱的分布应反映其在能量上的分布和几何空间分布,而不是单一的只考虑其中一种分布或者简单地假设为均匀分布.氧化层陷阱的分布可表示为<sup>[9]</sup>

$$N(E, x, y, z) = N(E, z) = N_0 \exp[\xi(E - E_i) + \eta z], \quad (1)$$

式中  $N_0$  为单位体积单位能量间隔的陷阱数,  $z$  为陷阱距界面的距离,  $\xi$  为陷阱在能量上分布的指数因子,  $\eta$  为氧化层陷阱在几何空间分布的指数因子.

(3)氧化层陷阱对沟道载流子的俘获和发射,既可以通过隧穿也可以通过热激活的方式完成,则其时间常数  $\tau$  可表示为<sup>[9]</sup>

$$\tau(E, x, y, z) = \tau(\Delta E, z) = \tau_0 \exp\left(\frac{\Delta E}{k_B T} + \theta z\right), \quad (2)$$

式中  $\tau_0$  为在 Si/SiO<sub>2</sub> 界面处的时间常数,  $\Delta E$  为陷阱的激活能,  $k_B$  为玻尔兹曼常数,  $T$  为绝对温度,  $\theta$  为隧穿系数(经验值为  $10^8 \text{ cm}^{-1}$ )<sup>[9,15,17]</sup>.

本文考虑相同的假设,建立 MOSFET 辐照损伤的  $1/f$  噪声模型.根据以上三点假设,对于 nMOSFET,其沟道漏电流可以表示为

$$I_d = W\mu q N E_x, \quad (3)$$

式中  $W$  为沟道宽度,  $\mu$  为沟道载流子迁移率,  $q$  为电子电量,  $N$  为单位面积的沟道载流子数,  $E_x$  为沟道横向电场.

$$E_x = dV(x)/dx,$$

其中  $V(x)$  为沟道电势.根据噪声功率谱的表示方法<sup>[9,15,17]</sup>,该沟道漏电流涨落的功率谱密度可表示为

$$S_{\Delta I_d}(x, f) = \left(\frac{I_d}{W\Delta x}\right)^2 \times \left(\frac{R}{N} \pm \alpha\mu\right)^2 S_{\Delta N_1}(x, f). \quad (4)$$

这里  $\alpha$  为陷阱电荷的散射系数,  $R$  为载流子数涨落与被占据的陷阱数涨落的比例常数.

$$R = \frac{N}{N + N^*},$$

其中  $N^* = (k_B T/q^2) \chi (C_{ox} + C_d + C_{it})$ , 典型值为  $1 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ ,  $C_{ox}$ ,  $C_d$  和  $C_{it}$  分别为氧化层、耗尽层和界面陷阱的单位面积电容.在中等至强反型条件下,  $N \gg N^*$ ,  $R = 1$ ; 在弱反型条件下,  $R < 1$ .  $S_{\Delta N_1}$  可由下式给出<sup>[17]</sup>:

$$S_{\Delta N_1}(x, f) = \int_{E_v}^{E_c} \int_0^W \int_0^{t_{ox}} 4N_1(E, x, y, z) \Delta x f_i(1 - f_i) \times \frac{\tau(E, x, y, z)}{1 + \omega^2 \tau^2(E, x, y, z)} dz dy dE, \quad (5)$$

式中  $f_i$  为陷阱占据函数,  $\omega$  为角频率,  $t_{ox}$  为氧化层厚度,  $E_c - E_v$  为氧化层禁带宽度.

$$f_i = \{1 + \exp[(E - E_{Fn})(k_B T)]\}^{-1},$$

$$\omega = 2\pi f,$$

其中  $E_{Fn}$  为电子准费米能级,  $f$  为频率.假设  $\Delta E$  与  $E$  无关<sup>[9]</sup>, 结合(2)式得

$$\frac{\tau(E, x, y, z)}{1 + \omega^2 \tau^2(E, x, y, z)} = \int_0^\infty \frac{\tau(\Delta E, z)g(\tau)}{1 + \omega^2 \tau^2(\Delta E, z)} d\tau, \quad (6)$$

式中  $g(\tau)d\tau$  表示时间常数落在  $\tau - \tau + d\tau$  内的概率, 它满足下列归一化条件:

$$\int_0^\infty g(\tau) d\tau = 1. \quad (7)$$

根据 (7) 式, 时间常数的分布可取如下形式<sup>[15]</sup>:

$$g(\tau)d\tau = \begin{cases} \frac{d\tau/\tau}{\ln(\tau_2/\tau_1)} & (\tau_1 \leq \tau \leq \tau_2), \\ 0 & (\text{其他}), \end{cases} \quad (8)$$

式中  $\tau_1$  和  $\tau_2$  分别为最小的时间常数和最大的时间常数.

$$\begin{aligned} \tau_1 &= \tau(0, z) \\ &= \tau_0 \exp(\theta z), \\ \tau_2 &= \tau(\Delta E_{\max}, z) \\ &= \tau_0 \exp\left(\frac{\Delta E_{\max}}{k_B T} + \theta z\right), \end{aligned}$$

其中  $\Delta E_{\max}$  为最大激活能. 将 (1)(6) 和 (8) 式代入 (5) 式后积分, 并对计算结果化简后可得

$$\begin{aligned} S_{\Delta N_i}(x, f) &= \frac{2\pi k_B^2 T^2 \Delta x W N_0}{\eta \tau_0^{\frac{\gamma}{\theta}} \omega^{\frac{\gamma}{\theta}+1} \Delta E_{\max} \cos\left(\frac{\pi\eta}{2\theta}\right)} \\ &\times \exp[\xi(E_F - E_i)] \\ &\times \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\Delta E_{\max}}{k_B T} \frac{\eta}{\theta}\right) \right], \quad (9) \end{aligned}$$

式中  $E_F$  为费米能级,  $E_i$  为禁带中部能级.

对 (4) 式积分后, 将 (3)(9) 式代入并化简后可得

$$\begin{aligned} S_d(x, f) &= \frac{1}{L^2} \int_0^L S_{\Delta d}(x, f) \Delta x dx \\ &= \frac{2\pi q k_B^2 T^2 I_d \mu}{\tau_0^{\frac{\gamma}{\theta}} \omega^{\frac{\gamma}{\theta}+1} L^2 \Delta E_{\max} \eta \cos\left(\frac{\pi\eta}{2\theta}\right)} \\ &\times \int_0^{V_d} N_i(E_{Fn}) [1 \pm \alpha \mu N R^{-1}]^2 \\ &\times \frac{R^2}{N} dV, \quad (10) \end{aligned}$$

式中

$$\begin{aligned} N_i(E_{Fn}) &= N_0 \exp[\xi(E_F - E_i)] \\ &\times \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\Delta E_{\max}}{k_B T} \frac{\eta}{\theta}\right) \right]. \quad (11) \end{aligned}$$

(10) 式除以线性区沟道电导  $G$  的平方, 可得到线性区的漏源电压噪声功率谱密度

$$\begin{aligned} S_{V_d}(f) &= \frac{2\pi q k_B^2 T^2 V_d}{C_{ox} W L \tau_0^{\frac{\gamma}{\theta}} \omega^{\frac{\gamma}{\theta}+1} \Delta E_{\max} \eta \cos\left(\frac{\pi\eta}{2\theta}\right) (V_g - V_T)} \\ &\times \int_0^{V_d} N_i(E_{Fn}) [1 \pm \alpha \mu N R^{-1}]^2 \frac{R^2}{N} dV. \quad (12) \end{aligned}$$

对照  $1/f$  噪声功率谱的一般形式

$$S_V(f) = \frac{B}{f^\gamma},$$

可知噪声幅值  $B$  和频率指数  $\gamma$  分别为

$$\begin{aligned} B &= \frac{q k_B^2 T^2 V_d}{C_{ox} W L (2\pi\tau_0)^{\gamma/\theta} \Delta E_{\max} \eta \cos\left(\frac{\pi\eta}{2\theta}\right) (V_g - V_T)} \\ &\times \int_0^{V_d} N_i(E_{Fn}) [1 \pm \alpha \mu N R^{-1}]^2 \frac{R^2}{N} dV, \quad (13) \end{aligned}$$

$$\gamma = \frac{\eta}{\theta} + 1. \quad (14)$$

由于  $N_i(E_{Fn})$ ,  $\alpha$  和  $\mu$  等参数的真实值与具体的制作工艺密切相关, 为了便于  $1/f$  噪声幅值  $B$  的计算, 这里首先假设一个有效陷阱密度<sup>[15,17]</sup>

$$N_i^*(E_{Fn}) = N_i(E_{Fn}) [1 \pm \alpha \mu N R^{-1}]^2. \quad (15)$$

可以看到, 该有效陷阱密度考虑了载流子数和迁移率的涨落<sup>[15,17,18]</sup>. (15) 式可展开为<sup>[15,17]</sup>

$$N_i^*(E_{Fn}) = A + BN + CN^2, \quad (16)$$

式中

$$\begin{aligned} A &= N_i(E_{Fn}), \\ B &= \pm 2\alpha \mu R^{-1} N_i(E_{Fn}), \\ C &= \alpha^2 \mu^2 R^{-2} N_i(E_{Fn}). \end{aligned}$$

在线性区,

$$qN(x) = C_{ox} [V_g - V_T - aV(x)],$$

所以 (13) 式可改写成下列形式:

$$\begin{aligned} B &= \frac{q^2 k_B^2 T^2 V_d}{a C_{ox}^2 W L (2\pi\tau_0)^{\gamma/\theta} \Delta E_{\max} \eta \cos\left(\frac{\pi\eta}{2\theta}\right) (V_g - V_T)} \\ &\times \int_{N_L}^{N_0} N_i^*(E_{Fn}) \frac{R^2}{N} dN, \quad (17) \end{aligned}$$

式中常数  $a$  的确定可参见文献 [15,19],

$$\begin{aligned} qN_0 &= qN(0) \\ &= C_{ox} (V_g - V_T), \\ qN_L &= qN(L) \\ &= C_{ox} (V_g - V_T - aV_d). \end{aligned}$$

对 (17) 式求积分后化简可得

$$\begin{aligned} B &= \frac{q^2 k_B^2 T^2 V_d}{a C_{ox}^2 W L (2\pi\tau_0)^{\gamma/\theta} \Delta E_{\max} (V_g - V_T)} \frac{N_i(E_{Fn})}{\eta \cos\left(\frac{\pi\eta}{2\theta}\right)} \\ &\times \left[ \ln \frac{N_0 + N^*}{N_L + N^*} \pm 2\alpha \mu R^{-1} (N_0 - N_L) \right. \\ &\left. + \frac{1}{2} \alpha^2 \mu^2 R^{-2} (N_0^2 - N_L^2) \right]. \quad (18) \end{aligned}$$

在 MOSFET 的噪声测量中, 由于漏源偏置的典型值<sup>[20]</sup> 选择为 100 和 200 mV, 所以这里只考虑 MOSFET 在强反型、低漏压区的噪声特性. 以上已经提到, 在中等至强反型条件下,  $N \gg N^*$ ,  $R = 1$ , 所以

$$\ln \frac{N_0 + N^*}{N_L + N^*} \approx \ln \frac{N_0}{N_L}.$$

因而该工作区下的噪声幅值  $B$  可简化为

$$B = \frac{q^2 k_B^2 T^2 V_d}{a C_{ox} W L (2\pi\tau_0)^{\gamma/\theta} \Delta E_{max} (V_g - V_T)} \frac{N_i(E_{Fn})}{\eta \cos\left(\frac{\pi\eta}{2\theta}\right)} \times \left[ \ln \frac{N_0}{N_L} \pm 2\alpha_f \kappa (N_0 - N_L) + \frac{1}{2} \alpha^2 \mu^2 (N_0^2 - N_L^2) \right]. \quad (19)$$

### 2.3. 辐照前 $1/f$ 噪声幅值与阈值电压漂移的相关性

辐射诱发氧化层陷阱电荷引起的阈值电压漂移可表示为<sup>[7,8]</sup>

$$\Delta V_{ot} = - \frac{qt_{ox}^2}{\epsilon_{ox}} k_g f_y f_{ot} D, \quad (20)$$

式中  $k_g$  为单位辐照剂量在单位体积氧化层中产生的电子-空穴对数目,  $f_y$  为电子-空穴对逃脱再复合的概率,  $\epsilon_{ox}$  为  $\text{SiO}_2$  介电常数,  $t_{ox}$  为氧化层厚度,  $D$  为辐照剂量,  $f_{ot}$  为氧化层陷阱的俘获效率.

MOSFET 中俘获辐照诱生空穴的缺陷就是产生  $1/f$  噪声的氧化层陷阱<sup>[15]</sup>, 这两个过程具有相同的平均俘获截面  $\sigma_{ot}$ , 且氧化层陷阱的俘获效率  $f_{ot}$  与辐照前氧化层陷阱的面密度  $N_{ot}$  有如下关系<sup>[7,15]</sup>:

$$\begin{aligned} f_{ot} &= \sigma_{ot} N_{ot} \\ &= \frac{\sigma_{ot} N_t}{WL} \\ &= \frac{\sigma_{ot}}{WL} \int_{E_c}^{E_v} \int_0^W \int_0^L \int_0^{t_{ox}} N_i(E, x, y, z) dz dx dy dE. \quad (21) \end{aligned}$$

将(1)式代入(21)式积分后, 并将(11)式代入可得

$$f_{ot} = \frac{\sigma_{ot} N_i(E_{Fn}) \int \exp(\eta t_{ox}) - 1 \int \exp(\xi E_g) - 1}{\eta \xi \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\Delta E_{max}}{k_B} \frac{\eta}{\theta}\right) \right] \exp\left(\frac{\xi E_g}{2}\right)}, \quad (22)$$

式中  $E_g = E_c - E_v$  为氧化层禁带宽度.

将(14)、(20)和(22)式代入(19)式, 消去  $N_i(E_{Fn})$  可得

$$\Delta V_{ot} = - f(B, \gamma) D, \quad (23)$$

式中

$$\begin{aligned} f(B, \gamma) &= \frac{Ba\epsilon_{ox} W L (2\pi\tau_0)^{\gamma-1} \Delta E_{max} \cos\left[\frac{\pi}{2}(\gamma-1)\right] \sigma_{ot} k_g f_y (V_g - V_T) \int \exp(\xi E_g) - 1}{q k_B^2 T^2 \xi V_d \exp\left(\frac{\xi E_g}{2}\right) \left\{ 1 - \exp\left[-\frac{\Delta E_{max}}{k_B T}(\gamma-1)\right] \right\}} \\ &\times \left\{ \exp[(\gamma-1)\theta t_{ox}] - 1 \right\} \left[ \ln \frac{N_0}{N_L} \pm 2\alpha_f \kappa (N_0 - N_L) + \frac{1}{2} \alpha^2 \mu^2 (N_0^2 - N_L^2) \right]^{-1}. \quad (24) \end{aligned}$$

辐照后, 导致 MOSFET 阈值电压漂移是  $\text{SiO}_2$  介质层中的氧化层陷阱电荷和  $\text{Si}/\text{SiO}_2$  界面附近的界面陷阱电荷共同作用的结果<sup>[2]</sup>.

$$\begin{aligned} \Delta V_T &= \Delta V_{ot} + \Delta V_{it} \\ &= - \frac{q}{C_{ox}} \Delta N_{ot} \pm \frac{q}{C_{ox}} \Delta N_{it}, \quad (25) \end{aligned}$$

式中的“ $\pm$ ”号, 对于 nMOSFET, 取正号; 对于 pMOSFET, 取负号.

根据 MOSFET 的  $1/f$  噪声理论<sup>[15]</sup>, 由于界面陷阱距离沟道很近, 其与沟道交换载流子的速度过快以至于对电噪声的影响主要体现在高频段 ( $f > 10$  kHz). 该频段已经超过了低频  $1/f$  噪声到白噪声的转折频率, 所以在低频部分 ( $f < 1$  kHz) 提取的  $1/f$  噪声频谱参量并不携带界面陷阱的信息<sup>[2]</sup>. 本文为了

较全面地研究 MOSFET 的辐照退化, 通过间接手段建立起辐照前  $1/f$  噪声幅值与辐照后由界面陷阱电荷诱使阈值电压漂移  $\Delta V_{it}$  之间的关系.

文献<sup>[2]</sup>基于界面陷阱形成的氢离子运动两步模型和反应过程的热力学平衡假设, 推导出了 MOSFET 经历电离辐照后氧化层空穴俘获与界面陷阱形成之间的关系.

$$\Delta P_b = \left[ K (P_b H_i) E'_i \left( 1 + \frac{\Delta E'_i}{E'_i} \right) \right]^{1/2}, \quad (26)$$

式中  $E'_i$  和  $P_b H_i$  分别为辐照前  $E'$  心和  $P_b H$  的密度,  $\Delta E'_i$  和  $\Delta P_b$  分别表示辐照后氧化层陷阱的增量,  $\Delta N_{ot}$  和界面陷阱的增量  $\Delta N_{it}$ ,  $K$  为反应过程的热力学平衡常数.

将 (23) 和 (26) 式代入 (25) 式, 消去  $\Delta V_{ot}$  可得到  $\Delta V_{it}$  的表达式, 即

$$\Delta V_{it} = \pm \frac{q}{C_{ox}} \left[ K(P_b H_i) E'_i \times \left( 1 + \frac{C_{ox}(K B \gamma) D}{q E'_i} \right)^{1/2} \right] \quad (27)$$

至此, 本文已经建立起基于辐照前 1/f 噪声的 MOSFET 辐照退化模型.

### 3. 实验结果及讨论

实验样品为  $1 \mu\text{m}$  标准 CMOS 工艺制备的增强型 n/pMOSFET 栅氧化层厚度为  $20 \pm 1.5 \text{ nm}$ , 沟道宽长比为 4:1 和 50:1, p 型衬底的掺杂浓度约为  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$ , n 阱的掺杂浓度约为  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$ . 辐照实验在西北核技术研究所  $\text{Co}^{60}$   $\gamma$  射线源上进行, 剂量率为  $0.1 \text{ Gy/s}$  ( $\text{SiO}_2$ ), 累计总剂量分别为  $0.3 \text{ kGy}$  ( $\text{SiO}_2$ ),  $0.6 \text{ kGy}$  ( $\text{SiO}_2$ ),  $1 \text{ kGy}$  ( $\text{SiO}_2$ ),  $2 \text{ kGy}$  ( $\text{SiO}_2$ ). 辐照过程中所加偏置电压  $V_g = 4 \text{ V}$  ( $E_{ox} = 2 \text{ MV/cm}$ ). 实验过程中的阈值电压和低频噪声, 分别采用由西安电子科技大学噪声及无损检测实验室和微电子研究所共同研制的基于虚拟仪器电子器件电参量自动测试分析系统和通用低频噪声测试系统进行测量. 为了表示辐照退化分别对  $\Delta V_{ot}$  和  $\Delta V_{it}$  的影响, 本实验采用带隙中部亚阈值方法<sup>[21]</sup>对  $\Delta V_{ot}$  和  $\Delta V_{it}$  进行分离.

不同辐照剂量下, 沟道宽长比为 4:1 的 nMOSFET 阈值电压漂移的实测结果与模拟结果如图 1 和图 2 所示. 图 1、图 2 中的小圆点为实测结果, 虚线为模拟结果, 其中模拟结果是通过器件的工艺参数、辐照前的 1/f 噪声参数及其他参量的典型值计算得到. 图 1 采用直角坐标系表示  $\Delta V_{ot}$  随辐照剂量  $D$  变化的趋势. 图 1 中的实测结果与模拟结果符合良好,  $\Delta V_{ot}$  与  $D$  之间存在正比例关系, 与 (20) 和 (23) 式都相符. 图 2 采用双对数坐标系表示  $\Delta V_{it}$  随辐照剂量  $D$  变化的趋势. 为了模拟的方便, 图 2 对  $\Delta V_{it}$  的模拟结果是在假设  $E'_i \ll \Delta E'$  的前提下得到的. 对于栅氧化层厚度较小的 MOSFET, 上述假设是合理的.

根据 (25) 式,  $\Delta E'$  可表示为

$$\Delta E' = \Delta N_{ot} = - \frac{\epsilon_{ox}}{q t_{ox}} \Delta V_{ot} \quad (28)$$

随着栅氧厚度的减小,  $\Delta E'$  的数量增加. 同时随着工

艺技术的提高, 氧化层缺陷减少, 即导致辐照前  $E'_i$  的数量减少. 所以, 这里可认为  $E'_i \ll \Delta E'$ . (27) 式可简化为

$$\Delta V_{it} = \pm \frac{q}{C_{ox}} \left( K(P_b H_i) \frac{C_{ox}(K B \gamma) D}{q} \right)^{1/2} \quad (29)$$

由 (29) 式可明显看出,  $\Delta V_{it}$  与  $D$  之间存在 1/2 次方的关系. 这一结论已经被大量实验<sup>[2, 22]</sup>所证实. 对于本文的实验样品, 由于不严格存在  $E'_i \ll \Delta E'$  的关系, 故图 2 中的模拟结果与实测结果存在一些偏差, 但总体变化趋势基本上一致.

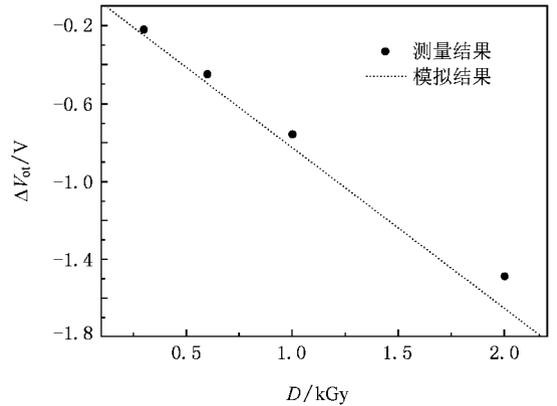


图 1  $\Delta V_{ot}$  随辐照剂量  $D$  变化的实测结果和模拟结果

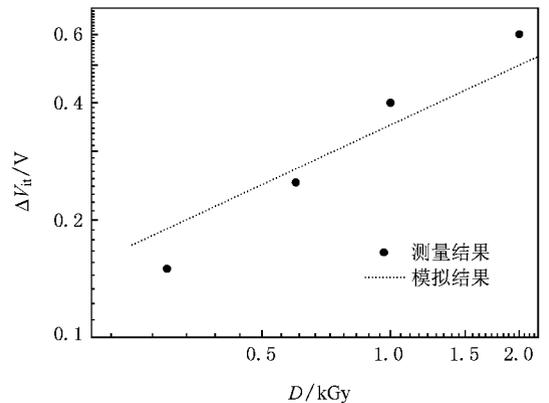


图 2  $\Delta V_{it}$  随辐照剂量  $D$  变化的实测结果和模拟结果

对于各个器件经历  $1 \text{ kGy}$  ( $\text{SiO}_2$ ) 辐照后,  $\Delta V_{ot}$ ,  $\Delta V_{it}$  的实测结果与模拟结果的比较如表 1 所列. 由表 1 可知, 对于器件类型或沟道尺寸不同的 4 种 MOSFET, 模拟结果与实测结果之间的绝对误差不超过  $0.1 \text{ V}$ . 这说明模拟结果具有较高的数值精度, 同时也证明了本文所建模型的正确性.

文献 [2, 7, 8] 采用下列数学表达式表示 1/f 噪

声幅值  $B$  与  $\Delta V_{ot}$  之间的关系并用实验证明了  $B$  与  $\Delta V_{ot}$  之间存在正比例关系:

$$B = - \frac{k_B T}{k_g f_y D \sigma E_g \epsilon_{ox} L W (V_g - V_T)} \frac{V_d^2}{V_g - V_T} \Delta V_{ot}. \quad (30)$$

表 1 1 kGy( $\text{SiO}_2$ ) 辐照后  $\Delta V_{ot}$ 、 $\Delta V_{it}$  的实测结果与模拟结果的比较

器件( W/L )	实测结果		模拟结果		绝对误差	
	$\Delta V_{ot}/V$	$\Delta V_{it}/V$	$\Delta V_{ot}/V$	$\Delta V_{it}/V$	$\Delta V_{ot}/V$	$\Delta V_{it}/V$
nMOSFEI( 4/1 )	-0.76	0.40	-0.83	0.35	0.07	0.05
nMOSFEI( 50/1 )	-0.62	0.32	-0.66	0.31	0.04	0.01
pMOSFEI( 4/1 )	-0.20	-0.08	-0.23	-0.10	0.03	0.02
pMOSFEI( 50/1 )	-0.18	-0.07	-0.21	-0.08	0.03	0.01

据所建的定量数学模型,认为  $\Delta V_{ot}$  和  $\Delta V_{it}$  同时与  $B$  和  $\gamma$  有关,所以文献 [2, 7, 8] 中的个别实验数据会出现偏离.由(24)式可知,当  $1/f$  噪声频率指数  $\gamma$  非常接近于 1 时,相对于噪声幅值  $B$ ,  $\gamma$  对  $\Delta V_{ot}$  和  $\Delta V_{it}$  的影响可以忽略.因此,本文所建模型与文献 [2, 7, 8] 的研究结果相符,并可用文献 [2, 7, 8] 的实验数据予以验证.

## 4. 结 论

本文在 MOSFET 辐照损伤微观机理的基础上,基于载流子数涨落和迁移率涨落理论,同时考虑氧化层陷阱在几何空间和能量上的分布特征及其与沟

道交换载流子的隧穿和热激活两种方式,建立起 MOSFET 电离辐照退化噪声表征的定量数学模型.该模型表明,辐照诱生的氧化层陷阱通过俘获和发射过程与沟道交换载流子,在引起载流子数涨落的同时也通过库仑散射导致沟道迁移率的涨落,因此辐照前的  $1/f$  噪声幅值正比于辐照诱生的氧化层陷阱数.同时,氧化层陷阱可与界面陷阱形成过程中产生的氢分子作用,从而氧化层陷阱参与与界面陷阱的形成过程中,所以辐照诱生界面陷阱的增量近似正比于氧化层空穴俘获增量的  $1/2$  次方.通过实验验证,表明所建模型的正确性.利用本文建立的模型,有望通过 MOSFET 辐照前的  $1/f$  噪声预测 MOSFET 的抗辐照能力.

- [ 1 ] Johnson M J, Fleetwood D M 1997 *Appl. Phys. Lett.* **70** 1158
- [ 2 ] Li R M, Du L, Zhuang Y Q, Bao J L 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 3400 (in Chinese) [ 李瑞珉、杜 磊、庄奕琪、包军林 2007 物理学报 **56** 3400 ]
- [ 3 ] Shaposhnikov A V, Gritsenko V A, Zhidomirov G M, Roger M 2002 *Phys. Sol. State* **44** 1028
- [ 4 ] Oldham T R, McLean F B 2003 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **50** 483
- [ 5 ] Fleetwood D M, Scofield J H 1990 *Phys. Rev. Lett.* **64** 579
- [ 6 ] Chen P X 2005 *Radiation Effects on Semiconductor Devices and Integrated Circuits* ( Beijing : National Defense Industry Press ) p4 [ 陈盘训 2005 半导体器件和集成电路的辐射效应 ( 北京 : 国防工业出版社 ) 第 4 页 ]
- [ 7 ] Fleetwood D M, Meisenheimer T L, Scofield J H 1994 *IEEE Trans. Electron Dev.* **41** 1953
- [ 8 ] Scofield J H, Doerr T P, Fleetwood D M 1989 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **36** 1946
- [ 9 ] Bao J L, Zhuang Y Q, Du L, Li W H, Wan C X, Zhang P 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 2118 ( in Chinese ) [ 包军林、庄奕琪、杜 磊、李伟华、万长兴、张 萍 2005 物理学报 **54** 2118 ]
- [ 10 ] Jindal R P 2006 *IEEE Trans. Electron Dev.* **53** 2051
- [ 11 ] Mete E, Tian X, Clark W F 2007 *IEEE Electron Dev. Lett.* **28** 812
- [ 12 ] Fleetwood D M, Winokur P S, Reber R A, Meisenheimer T L, Schwank J R, Shaneyfelt M R, Riewe L C 1993 *Appl. Phys. Lett.* **73** 5058
- [ 13 ] Rashkeev S N, Fleetwood D M, Schrimpf R D, Pantelides S T 2004 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **51** 3158
- [ 14 ] Fleetwood D M, Johnson M J, Meisenheimer T L, Winokur P S, Warren W L, Witczak S C 1997 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **44** 1810
- [ 15 ] Zhuang Y Q, Sun Q 1993 *Noise and Its Minimizing Technology in Semiconductor Devices* ( Beijing : National Defense Industry Press ) pp181—217 [ 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 181—217 页 ]
- [ 16 ] Xu J S, Deen M J 2002 *Electron. Lett.* **38** 429
- [ 17 ] Hung K K, Ko P K, Hu C M, Cheng Y C 1990 *IEEE Trans.*

- Electron Dev.* **37** 1323
- [ 18 ] Butler Z C 2002 *IEE Proc-Circuits Syst.* **149** 23
- [ 19 ] Hung K K , Ko P K , Hu C M , Cheng Y C 1990 *IEEE Trans. Electron Dev.* **37** 654
- [ 20 ] Meisenheimer T L , Fleetwood D M 1990 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **37** 1696
- [ 21 ] McWhorter P J , Winokur P S 1986 *Appl. Phys. Lett.* **48** 133
- [ 22 ] Hjalmarson H P , Pease R L , Witzak S C , Shaneyfelt M R , Schwank J R , Edwards A H , Hembree C E , Mattsson T R 2003 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **50** 1901

## Radiation degradation model of metal-oxide-semiconductor field effect transistor based on pre-irradiation $1/f$ noise \*

Peng Shao-Quan<sup>1)</sup> Du Lei<sup>1)</sup> Zhuang Yi-Qi<sup>2)</sup> Bao Jun-Lin<sup>2)</sup> He Liang<sup>1)</sup> Chen Wei-Hua<sup>1)</sup>

1  $\checkmark$  School of Technical Physics , Xidian University , Xi'an 710071 , China )

2  $\checkmark$  School of Microelectronic , Xidian University , Xi'an 710071 , China )

( Received 28 September 2007 ; revised manuscript received 10 April 2008 )

### Abstract

Based on metal-oxide-semiconductor field effect transistor ( MOSFET ) noise theory of carrier number fluctuation and mobility fluctuation , a quantitative mathematic model between pre-irradiation  $1/f$  noise parameters and post-irradiation threshold voltage drift due to oxide traps and interface traps is established. It agrees well with the experimental results. This model shows that  $1/f$  noise in MOSFET is originates from the random trapping/detrapping processes between oxide traps and the channel , which causes fluctuations in both the number and the mobility of channel carriers. So pre-irradiation  $1/f$  noise magnitude is directly proportional to post-irradiation oxide-trap charge. The results not only explain the correlation between MOSFET pre-irradiation  $1/f$  noise power spectral density and radiation degradation in theory , but also provide the theory for forecasting MOSFET radiation-resistant capability.

**Keywords :**  $1/f$  noise , radiation , metal-oxide-semiconductor field effect transistor , traps

**PACC :** 7270 , 6180E , 7340Q