

# MOSFET 抗辐照能力预测方法\*

彭绍泉<sup>1,†</sup> 杜磊<sup>1</sup> 庄奕琪<sup>2</sup> 包军林<sup>2</sup> 刘江<sup>1</sup> 苏亚慧<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)

**摘要:** 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, 建立起 MOSFET 抗辐照能力预测模型. 利用该模型, 可较好地通过辐照前的  $1/f$  噪声参量, 预测辐照后分别由氧化层陷阱和界面陷阱诱使阈值电压漂移的情况. 模型模拟结果与实际测量结果符合良好, 验证了预测模型的正确性, 并为工程应用提供 MOSFET 抗辐照能力预测方法.

**关键词:**  $1/f$  噪声; MOSFET; 辐照; 预测

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

**中图分类号:** TN4

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0253-4177(2008)07-1360-05

## 1 引言

随着大量高性能的金属-氧化物-半导体场效应晶体管(MOSFET)及 MOS 集成电路被用于宇航、核能和军事等高科技领域, 需要保证 MOS 器件在核辐射环境下使用的可靠性. 大量研究表明, 核辐射, 特别是电离辐射会使 MOS 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. 器件的变化包括阈值电压漂移, 跨导和迁移率降低, 亚阈值特性退化, 沟道和栅泄漏电流增加等<sup>[1]</sup>. 因此, 对 MOSFET 抗辐照能力的预测将有利于保证其在核辐射环境下使用的可靠性.

国外有关 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内空穴俘获导致的阈值电压负漂移之间存在正比例关系<sup>[2,3]</sup>, 这主要是由于产生  $1/f$  噪声的陷阱和辐照过程中俘获空穴的陷阱是同一种陷阱. 这不仅从微观上揭示了 MOS 器件辐照损伤的内在原因, 还提示人们可以通过辐照前  $1/f$  噪声的大小预测其抗辐照能力的强弱.

本文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 MOSFET 抗辐照能力预测表征的定量数学模型. 本文结论表明, 可通过辐照前的  $1/f$  噪声参量, 预测 MOSFET 辐照后分别由氧化层陷阱电荷和界面陷阱电荷导致的阈值电压漂移的程度, 表征 MOSFET 在辐照环境下应用的抗辐照性能, 同时提出了 MOSFET 抗辐照能力的预测方法.

## 2 模型

### 2.1 预测模型

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.

$$\Delta V_T = \Delta V_{ot} + \Delta V_{it} = -\frac{q}{C_{ox}} \Delta N_{ot} \pm \frac{q}{C_{ox}} \Delta N_{it} \quad (1)$$

式中 对于 nMOS 取正号; 对于 pMOS 取负号.  $q$  为电子电量;  $C_{ox} = \epsilon_{ox}/t_{ox}$  为氧化层单位面积电容;  $\epsilon_{ox}$  为氧化层介电常数;  $t_{ox}$  为氧化层厚度.

辐射诱发氧化层陷阱电荷引起的阈值电压漂移可用(2)式表示<sup>[2,3]</sup>:

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

其中  $k_g$  为单位辐照剂量在单位体积氧化层产生的电子-空穴对数目 ( $k_g \approx 8 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3} \text{ rad}^{-1} (\text{SiO}_2)$ )<sup>[2]</sup>;  $f_y$  为电子-空穴对逃脱复合的几率 ( $f_y = 0.9 \pm 0.05$ )<sup>[4]</sup>;  $\epsilon_{ox}$  为  $\text{SiO}_2$  介电常数;  $t_{ox}$  为氧化层厚度;  $D$  是辐照剂量;  $f_{ot}$  为氧化层陷阱的俘获效率.

根据 MOSFET 的  $1/f$  噪声理论, 由于界面陷阱与硅导带或价带交换载流子的时间常数很小<sup>[4]</sup>, 已经超出了低频噪声能检测到的频率范围, 所以在低频部分提取的  $1/f$  噪声频谱参量并不携带界面陷阱的信息. 因此, 只能通过间接手段预测辐照后由界面陷阱电荷诱使阈值电压漂移  $\Delta V_{it}$ .

文献[1]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.  $E'$  心为氧化层中的氧空位缺陷俘获空穴, 形成带正电的缺陷.  $P_b H$  是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, 形成界面陷阱 (即  $P_b$  心).

$$\Delta P_b = \left[ K (P_b H_i) E'_i \left( 1 + \frac{\Delta E'}{E'_i} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

其中  $E'_i$  和  $P_b H_i$  分别为辐照前  $E'$  心和  $P_b H$  的密度;

\* 国家自然科学基金资助项目(批准号:60276028)

† 通信作者. Email: xiaoquankk@126.com

2007-11-14 收到, 2007-12-08 定稿

$\Delta E'$  和  $\Delta P_b$  分别为辐照后  $E'$  心和  $P_b$  心的增量, 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  $\Delta N_{it}$ ;  $K(P_b H_i)$  为反应过程的热力学平衡常数.

文献[5]为了建立 n/p 沟道 MOSFET 1/f 噪声的统一模型, 做了如下假设:

(1) MOSFET 的 1/f 噪声是由载流子数涨落和迁移率涨落共同作用的结果, 且二者是相关的. 即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. 则氧化层陷阱的分布可用(4)式表示<sup>[5]</sup>:

$$N_t(E, x, y, z) = N_t(E, z) = N_0 \exp[\xi(E - E_i) + \eta z] \quad (4)$$

(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  $\tau$  可用(5)式表示<sup>[5]</sup>:

$$\tau(E, x, y, z) = \tau(\Delta E, z) = \tau_0 \exp\left(\frac{\Delta E}{kT} + \theta z\right) \quad (5)$$

其中  $N_0$  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;  $\Delta E$  为陷阱的激活能;  $\xi$  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;  $\theta$  为隧穿系数(经验值为  $10^8 \text{ cm}^{-1}$ )<sup>[4~6]</sup>;  $\xi$ ,  $\eta$  和  $\theta$  均为常数.

本文考虑相同的假设, 建立 MOSFET 辐照损伤的 1/f 噪声预测模型. 根据上面的几点假设, 同时假设  $\Delta E$  与  $E$  无关<sup>[5]</sup>, 求得的电流涨落的功率谱密度除以线性区沟道电导  $g_m$  的平方, 即可得到在线性区的漏源电压噪声功率谱密度如(6)式所示:

$$S_{v_d}(f) = \frac{2\pi q k^2 T^2 V_d}{C_{ox} WL \tau_0^{\frac{\gamma}{\theta}} \omega^{\frac{\gamma}{\theta}+1} \Delta E_{max} \eta \cos\left(\frac{\pi\eta}{2\theta}\right) (V_g - V_T)} \times \int_0^{V_d} N_t(E_{fn}) (1 \pm \alpha\mu NR^{-1})^2 \frac{R^2}{N} dV \quad (6)$$

式中

$$N_t(E_{fn}) = N_0 \exp[\xi(E_F - E_i)] \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\Delta E_{max}}{kT} \times \frac{\eta}{\theta}\right) \right] \quad (7)$$

其中  $k$  为玻尔兹曼常数;  $T$  为绝对温度;  $W$  和  $L$  分别为沟道宽度和长度;  $\omega = 2\pi f$  为角频率;  $\Delta E_{max}$  为最大激活能(典型的测量值为  $1.0 \text{ eV}$ )<sup>[5]</sup>;  $E_{fn}$  是电子准费米能级;  $V_d$ ,  $V_g$  和  $V_T$  分别为漏压、栅压和阈值电压;  $\alpha$  为陷阱电荷的散射系数(一般为  $10^{-15} \text{ V} \cdot \text{s}$  量级)<sup>[4]</sup>;  $\mu$  为沟道载流子迁移率;  $N$  为单位面积的沟道载流子数;  $R =$

$\frac{N}{N + N^*}$  为载流子数涨落与被占据的陷阱数涨落的比例常数.  $N^* = (kT/q^2)(C_{ox} + C_d + C_{it})$ , 其典型值为  $1 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ ,  $C_d$  和  $C_{it}$  分别是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,  $R < 1$ .

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:

$$B = \frac{q k^2 T^2 V_d}{C_{ox} WL (2\pi\tau_0)^{\frac{\gamma}{\theta}} \Delta E_{max} \eta \cos\left(\frac{\pi\eta}{2\theta}\right) (V_g - V_T)} \times \int_0^{V_d} N_t(E_{fn}) (1 \pm \alpha\mu NR^{-1})^2 \frac{R^2}{N} dV \quad (8)$$

$$\gamma = \frac{\eta}{\theta} + 1 \quad (9)$$

由于  $N_t(E_{fn})$ ,  $\alpha$ ,  $\mu_{eff}$  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  $B$  和频率指数  $\gamma$  的计算, 这里首先假设一个有效陷阱密度<sup>[4,6]</sup>:

$$N_t^*(E_{fn}) = N_t(E_{fn}) (1 \pm \alpha\mu_{eff} NR^{-1})^2 \quad (10)$$

在 MOSFET 的噪声测量中, 由于漏源偏置的典型值<sup>[7]</sup>选择为 100 和 200 mV, 所以这里只考虑在强反型、低漏压的线性区噪声特性. 该工作区下的  $B$  值可简化为(11)式所示:

$$B = \frac{q^2 k^2 T^2 V_d}{a C_{ox}^2 WL (2\pi\tau_0)^{\frac{\gamma}{\theta}} \Delta E_{max} (V_g - V_T)} \times \frac{N_t(E_{fn})}{\eta \cos\left(\frac{\eta\pi}{2\theta}\right)} \times \left[ \ln \frac{N_0}{N_L} \pm 2\alpha\mu_{eff} (N_0 - N_L) + \frac{1}{2} \alpha^2 \mu_{eff}^2 (N_0^2 - N_L^2) \right] \quad (11)$$

式中  $qN_0 = qN(0) = C_{ox} (V_g - V_T)$ ,  $qN_L = qN(L) = C_{ox} (V_g - V_T - aV_d)$ , 常数  $a$  的确定将在 2.2 节讨论.

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, 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:

$$f_{ot} = \sigma_{ot} N_{ot} = \frac{\sigma_{ot} N_t}{WL} = \frac{\sigma_{ot}}{WL} \int_{E_v}^{E_c} \int_0^W \int_0^L \int_0^{t_{ox}} N_t(E, x, y, z) dz dx dy dE \quad (12)$$

将(4)式代入(12)式积分, 并与(7)式对比, 可得

$$f_{ot} = \frac{\sigma_{ot} N_t(E_{fn}) [\exp(\eta t_{ox}) - 1] [\exp(\xi E_g) - 1]}{\eta \xi \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\Delta E_{max}}{kT} \times \frac{\eta}{\theta}\right) \right] \exp\left(\frac{\xi E_g}{2}\right)} \quad (13)$$

式中  $E_g = E_c - E_v$  为氧化层禁带宽度.

将(2), (9)和(13)式代入(11)式, 消去  $N_t(E_{fn})$  可得

$$\Delta V_{ot} = -f(B, \gamma) D \quad (14)$$

其中

$$f(B, \gamma) = \frac{Ba\epsilon_{ox} WL (2\pi\tau_0)^{\gamma-1} \Delta E_{max} \cos\left[\frac{\pi}{2}(\gamma-1)\right] \sigma_{ot} k_g f_y (V_g - V_T) [\exp(\xi E_g) - 1]}{q k^2 T^2 \xi V_d \exp\left(\frac{\xi E_g}{2}\right) \left\{ 1 - \exp\left[-\frac{\Delta E_{max}}{kT}(\gamma-1)\right] \right\}} \times \left\{ \exp[(\gamma-1)\theta t_{ox}] - 1 \right\} \left[ \ln \frac{N_0}{N_L} \pm 2\alpha\mu_{eff} (N_0 - N_L) + \frac{1}{2} \alpha^2 \mu_{eff}^2 (N_0^2 - N_L^2) \right]^{-1} \quad (15)$$

将(3)和(14)式代入(1)式,消去  $\Delta V_{ot}$ 可得到  $\Delta V_{it}$ 的表达式:

$$\Delta V_{it} = \pm \frac{q}{C_{ox}} \left[ K(P_b H_i) E'_i \left( 1 + \frac{C_{ox} f(B, \gamma) D}{q E'_i} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (16)$$

其中,  $E'_i$  可由(17)式给出

$$E'_i = \int_{E_v}^{E_c} \int_0^L \int_0^W \int_0^{t_{ox}} \{ N_0 \exp[\xi(E - E_i) + \eta z] \} dz dy dx dE \quad (17)$$

至此,本文已经建立起 MOSFET 抗辐照能力预测模型,可由辐照前的  $1/f$  噪声幅值  $B$  和频率指数  $\gamma$ , 预测辐照后  $\Delta V_{ot}$  和  $\Delta V_{it}$  的变化.

## 2.2 部分参量的提取方法

### 2.2.1 参数 $a$ 的确定

参数  $a$  可由(18)式确定<sup>[4,8]</sup>

$$a = 1 + \frac{1}{2} g K_s (\Psi_s - V_b)^{-1/2} \quad (18)$$

其中  $g = 1 - \frac{1}{1.744 + 0.8364(\Psi_s - V_b)}$ ;  $K_s = \frac{1}{C_{ox}} \times \sqrt{2\epsilon_{Si} q N_{sub}}$ ;  $\Psi_s = \frac{2kT}{q} \ln \frac{N_{sub}}{n_i}$  为表面反型势;  $V_b$  是衬底偏压;  $N_{sub}$  为衬底掺杂浓度.

### 2.2.2 参数 $\eta$ 的确定

通过(6)式,由  $\gamma$ - $V_g$  特性曲线,可得到  $\eta$  与  $V_g$  的关系.

### 2.2.3 参数 $\xi$ 的确定

参数  $\xi$  可以通过各种陷阱密度萃取技术得到<sup>[9]</sup>, 本文通过曲线拟合的方法<sup>[10]</sup>获得. 根据(4)和(9)式,由  $B$ - $V_g$  和  $\gamma$ - $V_g$  特性曲线得到  $N_t(E_{fn})$  随栅压的变化关系, 通过曲线拟合求出  $\xi$ .

## 3 实验及预测方法

实验样品为  $1\mu\text{m}$  标准 CMOS 工艺制备的增强型 n/p MOSFET, 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, 辐照剂量率采用热释光法标定. 辐照剂量率为  $0.1\text{Gy}(\text{SiO}_2)/\text{s}$ , 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  $V_g = 4\text{V}(E_{ox} = 2\text{MV}/\text{cm})$ . 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. 为了验证辐照前的  $B$  值与辐照后  $\Delta V_{ot}$  和  $\Delta V_{it}$  的关系, 本实验中采用带隙中部亚阈值方法<sup>[11]</sup>对  $\Delta V_{ot}$  和  $\Delta V_{it}$  进行分离.

在强反型( $V_g - V_T = 0.5, 1, 2, 3\text{V}$ ), 低漏压( $V_d = 0.1\text{V}$ )的线性区, 测量各个器件辐照前的噪声功率谱密

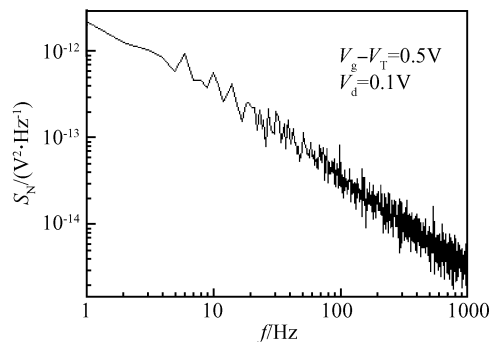


图1 宽长比为 4 : 1 的 nMOS 噪声功率谱密度

Fig.1 Noise power spectral density of nMOS with the ratio of the channel width and length of 4 : 1

表1 拟合和提取的参数值

Table 1 Value of the fitted parameters

$B/\text{V}^2$	$\gamma$	$a$	$\eta/\text{cm}^{-1}$	$\xi/\text{eV}^{-1}$
$2.9303 \times 10^{-12}$	1.0107	1.11	$1.07 \times 10^6$	1.35

度, 拟合的频率指数  $\gamma$  都非常接近于 1. 可认为, 对于该批器件, 在接近界面处的氧化层陷阱在空间上几乎是均匀分布的.

现在以沟道宽长比为 4 : 1 的 nMOSFET 为例, 比较  $\Delta V_{ot}$  和  $\Delta V_{it}$  随辐照剂量变化的实验结果和预测模型的模拟结果. 图 1 为辐照前在  $V_g - V_T = 0.5\text{V}$  和  $V_d = 0.1\text{V}$  偏置条件下测量的器件功率谱密度, 使用最小二乘法拟合提取, 可得到  $1/f$  噪声幅值  $B$  和频率指数  $\gamma$ .  $1/f$  噪声参量  $B$  值、 $\gamma$  值及使用 2.2 节方法提取的参数  $a$ ,  $\eta$  和  $\xi$  如表 1 所示.

选取  $E_g = 8\text{eV}$ ,  $\mu_{\text{eff}} = 1350\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $\sigma_{\text{ot}} = 4.0 \times 10^{-13}\text{cm}^2$ <sup>[4,12]</sup>,  $\tau_o = 10^{-10}\text{s}$ <sup>[6,8]</sup>, 其他参量取文中提到的典型值, 利用辐照前的噪声参量模拟辐照后阈值电压漂移的大小. 使用预测模型模拟辐照后  $\Delta V_{ot}$  的变化与实测结果的比较如图 2 所示. 图中, 小圆点为实际测量结果, 虚线为模拟结果. 可见, 结果非常接近.

为了模型模拟的方便, 图 3 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(1)式,  $\Delta E'$  可用(19)式来表示:

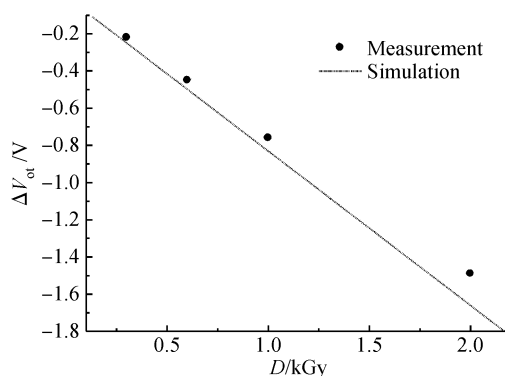
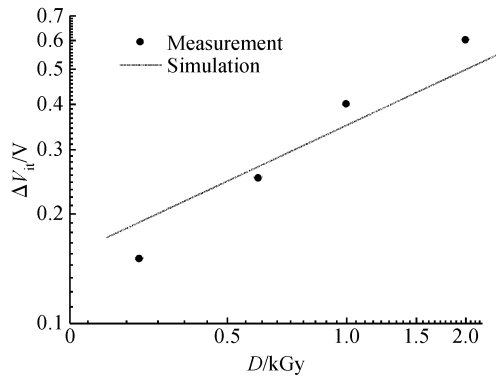


图2  $\Delta V_{ot}$  随辐照剂量  $D$  变化的实验值与模拟值

Fig.2 Measurement and simulation of  $\Delta V_{ot}$  changed with total radiation dose

图3  $\Delta V_{it}$ 随辐照剂量  $D$  变化的实验值与模拟值Fig.3 Measurement and simulation of  $\Delta V_{it}$  changed with total radiation dose

$$\Delta E' = \Delta N_{ot} = -\frac{\epsilon_{ox}}{qt_{ox}} \Delta V_{ot} \quad (19)$$

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  $E'$  心的数量减少. 所以, 这里可认为  $E'_i \ll \Delta E'$ . (16)式可简化成

$$\Delta V_{it} = \pm \frac{q}{C_{ox}} \left( K(P_b H_i) \frac{C_{ox} f(B, \gamma) D}{q} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (20)$$

由(20)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>[1,13]</sup> 所证实. 取  $K(P_b H_i) = 1.64 \times 10^{11}$  时, 模拟的辐照后  $\Delta V_{it}$  的变化与实际测量结果符合较好, 如图3所示. 根据化学手册中一般物质热力学常数的数量级可知,  $K(P_b H_i)$  的取值是合理的.

由图2和图3可知, 选取适当的参量, 可使用预测模型较好地预测器件经历一定剂量辐照后, 分别由氧化层陷阱和界面陷阱诱使阈值电压漂移的情况. 分析其他器件的实验数据与模拟结果, 同样有类似的关系, 在此不再赘述.

同时发现, 辐照前器件的噪声幅值  $B$  越大, 辐照后  $\Delta V_{ot}$  负向漂移越严重. 对于 nMOS,  $\Delta V_{it}$  正向漂移增大; 对于 pMOS,  $\Delta V_{it}$  负向漂移增大. 因此, 利用(14)和(16)式, 可以通过辐照前 MOSFET  $1/f$  噪声参量定量地预测辐照后分别由两种陷阱电荷致使阈值电压漂移量. 但由于模型中的部分参量与具体的工艺制作技术密切相关, 其相对于经验值, 可能存在着一定的偏差, 会对预测结果产生一定的影响. 所以, 在工程运用上, 对于同一批 MOSFET, 可对少量样品进行低剂量的辐照实验, 结合辐照前后的实验数据, 使用预测模型进行反推, 可求得部分与工艺条件相关的参量. 这样, 就可以对同批次的大量 MOSFET 抗辐照能力进行无损预测表征. 例如, 对于参数  $K(P_b H_i)$  的确定, 由辐照前的噪声数据提取出参数  $\xi$  和  $\eta$ , 通过(17)式可求得  $E'_i$ ; 由辐照后的阈值电压测量并进行电荷分离, 可求得  $\Delta V_{ot}$  和  $\Delta V_{it}$ ; 将  $E'_i$ ,  $\Delta V_{ot}$  和  $\Delta V_{it}$  的值代入(14)和(16)式, 即可求得参数  $K(P_b H_i)$ .

另外, 将由数据拟合求得的参量  $\eta$  和  $\xi$  代入(4)式

并积分, 可得到氧化层陷阱分别在几何空间和能量空间的分布, 这也为一些与工艺条件相关参量的确定提供了一条解决的思路.

## 4 结论

本文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 MOSFET 抗辐照能力预测表征的定量数学模型, 并为工程应用提供预测的方法. 本文结论表明, 可通过辐照前的  $1/f$  噪声参量, 预测 MOSFET 辐照后分别由氧化层陷阱电荷和界面陷阱电荷导致的阈值电压漂移的程度, 表征 MOSFET 在辐照环境下应用的抗辐照性能, 同时可为 MOS 器件及其电路抗辐照加固的研究提供理论依据.

## 参考文献

- [1] Li Ruimin, Du Lei, Zhuang Yiqi, et al. A  $1/f$  noise based research of radiation induced interface trap buildup process. Acta Physics Sinica, 2007, 56(6): 3400 (in Chinese) [李瑞珉, 杜磊, 庄奕琪, 等. MOSFET 辐照诱生界面陷阱形成过程的  $1/f$  噪声研究. 物理学报, 2007, 56(6): 3400]
- [2] Fleetwood D M, Meisenheimer T L, Scofield J H.  $1/f$  noise and radiation effects in MOS devices. IEEE Trans Nucl Sci, 1994, 41(11): 1953
- [3] Scofield J H, Doerr T P, Fleetwood D M. Correlation between preirradiation  $1/f$  noise and postirradiation oxide-trapped charge in MOS transistors. IEEE Trans Nucl Sci, 1989, 36(6): 1946
- [4] Zhuang Yiqi, Sun Qing. Noise and its minimizing technology in semiconductor devices. Beijing: National Defense Industry Press, 1993 (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]
- [5] Bao Junlin, Zhuang Yiqi, Du Lei, et al. A unified model for  $1/f$  noise in n-channel and p-channel MOSFETs. Acta Physics Sinica, 2005, 54(5): 2118 (in Chinese) [包军林, 庄奕琪, 杜磊, 等. n/p 沟道 MOSFET  $1/f$  噪声的统一模型. 物理学报, 2005, 54(5): 2118]
- [6] Hung K K, Ko P K, Hu Chenming, et al. A physics-based MOSFET noise model for circuit simulators. IEEE Trans Electron Devices, 1990, 37(5): 1323
- [7] Meisenheimer T L, Fleetwood D M. Effect of radiation-induced charge on  $1/f$  noise in MOS devices. IEEE Trans Nuclear Science, 1990, 37(6): 1696
- [8] Hung K K, Ko P K, Hu Chenming, et al. A unified model for the flicker noise in metal-oxide-semiconductor field-effect transistors. IEEE Trans Electron Devices, 1990, 37(3): 654
- [9] Hou F C, Bosman G, Law M E. Simulation of oxide trapping noise in submicron n-channel MOSFETs. IEEE Trans Electron Devices, 2003, 50(3): 846
- [10] Butler Z C, Hsiang T Y. Spectral dependence of  $1/f^{\gamma}$  noise on gate bias in n-MOSFETs. Solid-State Electron, 1987, 30(4): 419
- [11] McWhorter P J, Winokur P S. Simple technique for separating the effects of interface traps and trapped-oxide charge in metal-oxide-semiconductor transistor. Appl Phys Lett, 1986, 48(2): 133
- [12] Fleetwood D M, Xiong H D, Lu Z Y, et al. Unified model of hole trapping,  $1/f$  noise, and thermally stimulated current in MOS devices. IEEE Trans Nucl Sci, 2002, 49(6): 2674
- [13] Hjalmarson H P, Pease R L, Witczak S C, et al. Mechanisms for radiation dose-rate sensitivity of bipolar transistors. IEEE Trans Nucl Sci, 2003, 50(6): 1901

## A Forecast Technique for Radiation-Resistant Capability on MOSFETs\*

Peng Shaoquan<sup>1,†</sup>, Du Lei<sup>1</sup>, Zhuang Yiqi<sup>2</sup>, Bao Junlin<sup>2</sup>, Liu Jiang<sup>1</sup>, and Su Yahui<sup>1</sup>

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

(2 School of Microelectronic, Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract:** Based on metal-oxide-semiconductor field effect transistor (MOSFET) noise theory of carrier number fluctuation and mobility fluctuation, a forecast model of radiation-resistant capability is established. This model can preferably forecast post-irradiation threshold voltage drift due to oxide traps and interface traps through the pre-irradiation  $1/f$  noise parameter. The simulation results of the model agree well with the measurement results. The forecast model is validated. The model provides a forecast technique for radiation-resistant capability on MOSFETs for engineering applications.

**Key words:**  $1/f$  noise; MOSFET; radiation; forecast

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

**Article ID:** 0253-4177(2008)07-1360-05

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 60276028)

† Corresponding author. Email: xiaoquankk@126.com

Received 14 November 2007, revised manuscript received 8 December 2007