

MOSFET 辐照诱生界面陷阱形成过程的 $1/f$ 噪声研究*

李瑞珉 杜 磊 庄奕琪 包军林

(西安电子科技大学技术物理学院, 西安 710071)

(2005 年 9 月 4 日收到, 2006 年 9 月 22 日收到修改稿)

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, 推导了金属-氧化物-半导体-场效应晶体管(MOSFET)经历电离辐照后氧化层空穴俘获与界面陷阱形成间关系的表达式. 利用初始 $1/f$ 噪声功率谱幅值与氧化层空穴俘获之间的联系, 建立了辐照前的 $1/f$ 噪声幅值与辐照诱生界面陷阱数量之间的半经验公式, 并通过实验予以验证. 研究结果表明, 由于辐照诱生的氧化层内陷阱通过与分子氢作用而直接参与到界面陷阱的建立过程中, 从而使界面陷阱生成数量正比于这种陷阱增加的数量, 因此辐照前的 $1/f$ 噪声功率谱幅值正比于辐照诱生的界面陷阱数量. 研究结果为 $1/f$ 噪声用作 MOSFET 辐照损伤机理研究的新工具, 对其抗辐照性能进行无损评估提供了理论依据与数学模型.

关键词: 辐照效应, 界面陷阱, $1/f$ 噪声, 氧化层空穴俘获

PACC: 6180E, 7340Q, 4350

1. 引 言

随着大量高性能金属-氧化物-半导体-场效应晶体管(MOSFET)及金属-氧化物-半导体(MOS)集成电路被用于宇航、核能和军事等涉及核辐射的环境, 对 MOS 器件抗辐射性能的研究显得越来越重要. 试验表明, 核辐射, 尤其是电离辐射会使 MOS 器件的电性能在较短时间内发生明显变化, 包括阈值电压漂移、迁移率和跨导降低、亚阈值特性退化、沟道和栅泄漏电流增加等^[1]. 辐射损伤严重时, 还会导致电路失效. 对 MOSFET 辐照损伤机理的研究将有助于提高电子系统抗辐照加固及其在核辐射环境下使用的可靠性.

在 MOSFET 辐照损伤机理的研究中, 栅氧化层-沟道结构中电荷俘获陷阱形成的动力学过程一直是研究的重点^[2,3]. 实验研究表明, 在中等剂量率辐照条件下, 界面陷阱产生数量依赖于氧化层内俘获空穴陷阱的生成数量, 对此仍然缺乏足够的理论解释^[4,5]. 国外针对 MOSFET 辐照效应及 $1/f$ 噪声特性

的研究显示, 辐照前的 $1/f$ 噪声电压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^[6,7]. 出现这种相关性的原因在于产生 $1/f$ 噪声的陷阱与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 器件辐照损伤的原因, 还提示人们 $1/f$ 噪声可作为 MOSFET 抗辐照性能研究的新工具.

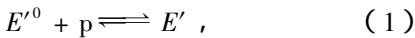
本文从辐照条件下 MOSFET 界面陷阱形成过程的微观动力学出发, 推导了界面陷阱生成数量与氧化层空穴俘获数量之间关系的表达式. 再根据 $1/f$ 噪声理论, 建立了初始 $1/f$ 噪声电压功率谱幅值与界面陷阱生成数量之间的关系式, 并通过实验予以验证. 本文结论表明, 氢离子可以激活被氢钝化的三价硅悬挂键, 形成界面陷阱, 而氧化物陷阱可以同分子氢作用, 使其分解并参与到界面陷阱的形成过程中. 考虑反应过程的热力学平衡, 则辐照诱生的界面陷阱数量正比于边缘陷阱增加的数量. 反映在宏观参数上, 就是辐照前的 $1/f$ 噪声功率谱幅值正比于辐照之后由界面陷阱数量增加导致的阈值电压漂移量及亚阈值斜率变化量.

* 国家自然科学基金项目(批准号: 60276028)和国家博士后科学基金(批准号: 51411040601DZ0148)资助的课题.

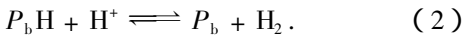
2. 理论模型

2.1. 辐照诱生陷阱产生的微观动力学

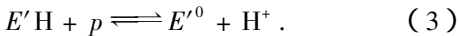
MOS 器件的辐射损伤主要表现为电离辐照条件下栅氧化层缺陷对电荷的俘获导致器件电参数发生变化. 参与电荷俘获的缺陷主要有两种, 氧化层中的氧空位缺陷和 Si/SiO₂ 界面上的三价硅悬挂键^[1]. 电离辐照激发出的空穴会被栅氧化层中的氧空位缺陷俘获从而形成带电的缺陷(E'心), 具体过程为



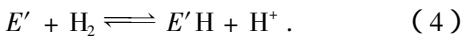
其中 p 表示空穴. 界面陷阱的形成过程相对比较复杂, 目前被普遍接受的模型是氢离子运动两步模型^[3,8]. 该理论认为, 电离辐照过程中产生的氢离子(H⁺)可以激活被氢钝化的三价硅悬挂键 P_bH, 从而形成界面陷阱(P_b心), 具体过程如下式所示:



P_b心最终的荷电状态取决于其相对费米能级的位置. 对于 n 型金属-氧化物-半导体(n-MOS), 界面陷阱带负电荷, 对于 p 型金属-氧化物-半导体(p-MOS), 界面陷阱带正电荷. 氢的来源主要是工艺过程中进入 SiO₂ 层中的氢分子和因化学剂量比失配而形成的氢桥结构 Si—H—Si(E'H). 电离辐照产生的空穴会刺激氢硅键 E'H 断裂并释放出离子氢. 具体过程如下式所示:

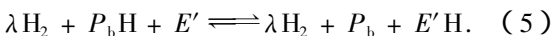


由于 E'H 的数量远远低于辐照之后 P_b心生成的数量, 因此界面陷阱形成过程中还应包括氢分子的分解过程. 试验证明^[9], E'心在室温下即可与氢分子作用生成 E'H 和 H⁺, 过程为



该反应的生成物继续参与到界面陷阱的形成过程中, 因而少量氢原子就可以生成大量的界面陷阱.

上述反应过程可以统一表示为^[10]



考虑反应过程的热力学平衡, (5)式必须满足

$$\frac{[P_b][E'H]}{[P_bH][E']} = \exp\left(\frac{-\Delta G}{kT}\right) = K \quad (6)$$

其中 ΔG 是反应前后吉布斯自由能之差, K 是比例

常数, 括号[]表示取反应物和生成物的浓度.

假设在辐照结束后, 所有未俘获的空穴均立刻被电场扫出栅氧化层, 即 E'心不再增加. 用 P_{bi}, P_bH_i 和 E'_i 分别表示辐照前的 P_b, P_bH 和 E'心密度. 根据(5)式, ΔP_b的数量将等于 ΔE'H的数量, 那么(6)式可以写成

$$\frac{[P_{bi} + \Delta P_b][E'_i H_i + \Delta P_b]}{[P_{b_i} H_i - \Delta P_b][E'_i + \Delta E']} = K \quad (7)$$

因为工艺上的处理使得辐照之前 P_b心的数量非常少, 通常要小于 ΔP_b一到两个数量级, 当电离辐照剂量还不足以使栅氧化层中的氧空位缺陷完全激活时(对于本批样品约为 2.5 kGy), 可以认为 ΔP_b ≪ P_bH_i, 则有

$$\frac{[\Delta P_b][\Delta P_b]}{[P_{b_i} H_i][E'_i + \Delta E']} = K \quad (8)$$

界面陷阱的增加量 ΔP_b 最终可以表示为

$$\Delta P_b = \left[K(P_{b_i} H_i) E'_i \left(1 + \frac{\Delta E'}{E'_i} \right) \right]^{1/2} \quad (9)$$

(9)式描述了界面陷阱生成数量与 E'心数目增加量之间的关系. 在不考虑退火的情况下, E'心的产生数量将近似正比于辐照总剂量, 因此从(9)式可以看出界面陷阱生成数量与总剂量的 1/2 次方成正比, 这一结论已经被大量实验所证实^[3,12].

2.2. 初始 1/f 噪声与氧化层空穴俘获的关系

MOSFET 噪声理论认为, 位于栅氧化层内距离界面 3—5 nm 的范围之内的缺陷(常被称为边缘陷阱)可通过俘获与发射过程与沟道交换载流子. 这一效应在引起沟道载流子数涨落的同时也通过库伦散射作用引起沟道迁移率的涨落, MOSFET 的 1/f 噪声正是这两种涨落的反映^[13,14]. 边缘陷阱的主要成分是 E'心及其先兆物(氧空位), 它们与沟道交换载流子的时间常数与观测到的 1/f 噪声频率倒数具有相同的数值范围. 对 MOSFET 辐照效应的研究表明^[15], 辐照生成的空穴在整个栅氧化层中都可能被缺陷所俘获, 但最主要的俘获区域集中于靠近界面几个纳米的范围之内, 因为界面附近因化学剂量比失配而聚集有大量氧空位缺陷, 这个区域也正是上述边缘陷阱分布的范围^[6]. 已有研究证实引起 1/f 噪声的缺陷与辐照诱生的俘获空穴陷阱相同^[16], 这预示着 1/f 噪声可以作为 MOSFET 辐照机理研究的新工具.

研究表明^[6,7], 辐照之前的 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漂移 $|\Delta V_{ot}|$ 之间存在正比例关系, 这种关系可以简单表示为

$$B = \frac{kT}{\kappa_g f_y D \sigma_{ot} E_g \epsilon_{ox} L W (V_G - V_T)} |\Delta V_{ot}| \quad (10)$$

其中, B 是 $1/f$ 噪声功率谱幅值参数, W 和 L 分别是沟道的长和宽, k 为波尔兹曼常数, T 为绝对温度, κ_g 是单位辐射剂量在 SiO_2 中产生的电子-空穴对数目, f_y 是电子-空穴对逃脱再次复合的概率, D 为辐照总剂量, σ_{ot} 为 E' 心的空穴平均俘获截面, ϵ_{ox} 为栅氧化层的介电常数, E_g 为 SiO_2 的禁带宽度, V_D , V_G 和 V_T 分别是漏压、栅压和阈值电压. 根据 MOSFET 的 $1/f$ 噪声理论, SiO_2 层中的缺陷同沟道交换载流子的过程包括一个中性的缺陷俘获一个空穴形成陷阱电荷, 这个陷阱电荷从沟道获得一个电子形成中性缺陷, 这个中性缺陷再次俘获一个空穴三个步骤, 因此对相同器件而言, $1/f$ 噪声的大小反映了其 SiO_2 层中可俘获空穴缺陷数量的多少, 这些缺陷可以在电离辐照过程中俘获空穴形成陷阱电荷, 这些新引入的电荷改变了平带电压, 从而使辐照前的 $1/f$ 噪声功率谱幅值与辐照后的 ΔV_{ot} 变化表现出相关性.

2.3. 初始 $1/f$ 噪声幅值与辐照诱生界面陷阱数量之间的关系

氧化层内空穴俘获导致的阈值电压漂移量 ΔV_{ot} 与俘获空穴而形成的陷阱电荷增加量成正比, 它们之间的关系可以表示为

$$\Delta V_{ot} = \frac{q}{C_{ox}} \Delta n_{ht} \quad (11)$$

其中, $C_{ox} = \epsilon_{ox}/t_{ox}$, 为栅氧化层电容, t_{ox} 为栅氧化层厚度, Δn_{ht} 为辐照过程中因俘获空穴而形成的陷阱电荷数目增加量, 即(9)式中的 $\Delta E'$. 把(10)和(11)式代入(9)式中, 可得

$$\Delta P_b = \left[K (P_b H_i) E'_i \times \left(1 + \frac{\kappa_g f_y D \sigma_{ot} E_g \epsilon_{ox}^2 L W (V_G - V_T)}{k T q t_{ox} V_D E'_i} B \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

(12) 式即为辐照前的 $1/f$ 噪声功率谱幅值与辐照过程中界面陷阱数目增加量之间的关系式. 可以看出, 对于工艺参数和电参数相同的 MOS 器件, 在辐照总剂量给定的情况下, B 值将近似正比于 ΔP_b 值的平方.

3. 实验验证

3.1. 实验方案

实验所用样品为信息产业部电子 58 所 $1.0 \mu\text{m}$ CMOS 工艺制备的增强型 n-MOSFET 和 p-MOSFET, 栅氧化层厚度为 $20 \pm 1.5 \text{ nm}$, 沟道宽长比 W/L 分别为 $50 \mu\text{m}/1.0 \mu\text{m}$, $50 \mu\text{m}/1.2 \mu\text{m}$ 和 $4.0 \mu\text{m}/1.0 \mu\text{m}$, 沟道掺杂浓度为 10^{17} cm^{-3} . 辐照实验在西北核技术研究所的 Co^{60} 钴源上进行, 实验中使用的 γ 射线剂量率为 $1.222 \times 10^{-2} \text{ Gy}(\text{SiO}_2)_s$, 为了模拟最坏情况, 辐照过程中 MOSFET 所加偏置电压均为 $V_G = +4\text{V}$ ($E_{ox} = 2 \text{ MV/cm}$), 辐照总剂量分别为 $5 \times 10^{-2} \text{ Gy}(\text{SiO}_2)$, $1.5 \text{ kGy}(\text{SiO}_2)$ 和 $3 \text{ kGy}(\text{SiO}_2)$. 辐照前后 MOSFET 的阈值电压和其他主要电参数由惠普 HP4156B 精密半导体参数分析仪测得. 噪声测试由以 EG&G PARC113 低噪声前置放大器和 LABVIEW 虚拟频谱分析仪为核心的噪声测试系统完成, 测试条件为 $V_{DS} = 0.1 \text{ V}$, $V_{GS} - V_T = \mp 0.2 \text{ V}$ (MOSFET 处于亚阈值, 线性区), 噪声测试范围为 $0.5 \text{ Hz} - 10 \text{ kHz}$, 其中偏置电路和整个测试系统均进行了屏蔽以隔绝外界干扰. 测试所得的噪声功率谱根据 $1/f$ 噪声的一般形式进行最小二乘法拟合, 并提取 $1/f$ 噪声幅值参数 B [17], 拟合式为

$$S_v(f) = \frac{B}{f^\gamma} \quad (13)$$

其中, f 为噪声频率, γ 是 $1/f$ 噪声的频率指数.

为了验证(12)式中 B 值与 ΔP_b 值的关系, 必须寻找一个能直接表征界面陷阱数增加的宏观量. 根据界面态陷阱电荷导致阈值电压漂移 ΔV_{it} 量的定义式:

$$\Delta V_{it} = \frac{q}{C_{ox}} \Delta n_{it} \quad (14)$$

可知, ΔV_{it} 能够直接反映辐照过程中界面陷阱数目的增加量. 因此, 可以利用 B 值与 ΔV_{it} 的关系来验证 B 值与 ΔP_b 的关系. 本实验中采用了文献 [18] 中的亚阈值中带电压法对 ΔV_{ot} 和 ΔV_{it} 进行了分离, 该方法通过辐照前后 MOSFET 转移特性曲线 $I_D - V_G$ 在亚阈值区的变化, 把 I_D 线性外推至费米能级位于能带中部时所对应的电流值(约 $10^{-13} - 10^{-14} \text{ A}$), 此时可以认为界面陷阱尚未带电, 因此可以认为 V_T 的变化是由氧化层俘获的空穴引起的, 进而提取出

ΔV_{ot} 和 ΔV_{it} 值. 由于这种方法的准确性受到主观因素影响, 在本实验中利用亚阈值斜率 S 的变化量 ΔS 与 ΔV_{it} 的关系对 ΔV_{it} 的准确性进行验证, 验证的依据为^[19]

$$\Delta V_{it} = (\Delta S / \ln 10) \ln(N_{A,D} / n_i), \quad (15)$$

其中 N_A, N_D 分别为受主和施主的掺杂浓度. S 值的获得采用在半对数坐标中对亚阈值电流进行直线拟合提取斜率的方法^[20]. 根据 ΔS 与 ΔV_{it} 的关系曲线, 可以对实验数据的准确性进行评估.

3.2. 实验结果与讨论

在经过总剂量 1.5 kGy (SiO_2) 的辐照之后, 辐照前 1/f 噪声功率谱幅值 B 与辐照后由氧化层内空穴俘获导致阈值电压漂移 $|\Delta V_{ot}|$ 的关系如图 1 所示. 为了更好的反映不同尺寸器件的 B 值与 $|\Delta V_{ot}|$ 值之间的关系, 根据(10)式把 B 值乘以了沟道面积 LW . 从图 1 中可以看出, 对于 n-MOS 和 p-MOS, 在对数坐标下 B 值均正比于 $|\Delta V_{ot}|$ 值, 产生这种相关性的原因已在 2.2 节中讨论过. p-MOS 的噪声幅值通常要比 n-MOS 小一到两个数量级, 所以其 $|\Delta V_{ot}|$ 也相应较小. 对于不同尺寸的 MOSFET, 由于其生产工艺近似相同, 因此 B 值与 $|\Delta V_{ot}|$ 值关系的斜率也近似相同, 表明这些器件的栅氧化层俘获空穴能力近似相同.

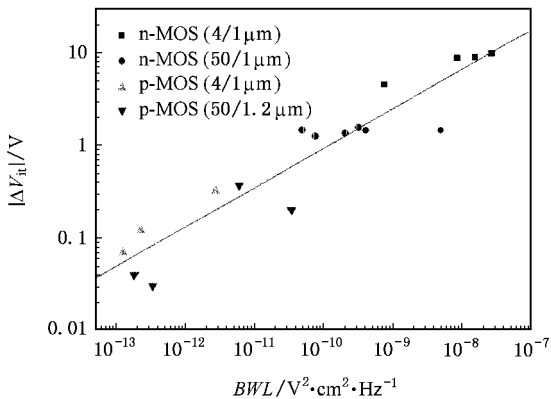


图 1 辐照前的 1/f 噪声幅值 B 与辐照后 $|\Delta V_{ot}|$ 的关系 辐照总剂量为 1.5 kGy, $T = 25^\circ\text{C}$

图 2 反映了 $|\Delta S|$ 与 $|\Delta V_{it}|$ 之间的联系, 在对数坐标下拟合直线提取的斜率约为 6.82. 根据(15)式可以计算出沟道掺杂浓度约为 10^{17}cm^{-3} , 这 and 实际值相符, 充分说明了在该实验中对 ΔV_{it} 和 ΔV_{ot} 的分离是比较准确的, 同时也表明 ΔS 的变化可以用于

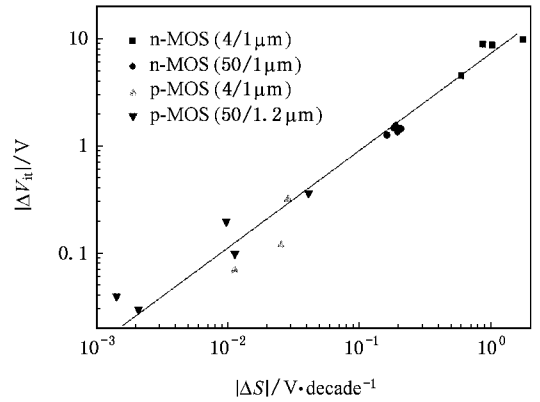


图 2 辐照之后 $|\Delta S|$ 与 $|\Delta V_{it}|$ 之间的关系 辐照总剂量为 1.5 kGy, $T = 25^\circ\text{C}$

反映 ΔP_b 的变化. B 值与 $|\Delta V_{it}|$ 及 $|\Delta S|$ 的关系如图 3 和 4 所示, 可见在对数坐标下辐照前的 B 值与 $|\Delta V_{it}|$ 及 $|\Delta S|$ 之间均表现出类似与 $|\Delta V_{ot}|$ 的正比例关系. 这种关系实际上反映了 B 值与 ΔP_b 之间存在的近似的正比例关系. 根据传统的 MOSFET 的 1/f 噪声理论, 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 ($> 10 \text{kHz}$). 该频段已经超过从 1/f 噪声到白噪声的转折频率, 所以在低频部分 ($< 1 \text{kHz}$) 提取的 1/f 噪声频谱参数并不携带界面陷阱的信息, 辐照前的 1/f 噪声幅值也不能反映界面陷阱的电荷俘获效率. 但是, 按照第 2 节的理论, 辐照诱生的界面陷阱与辐照过程中边缘陷阱 (即 E' 心) 的增加量之间存在正比例关系, 从而导致 B 值与 ΔP_b 之间存在这种近似正比例的关系.

根据第 2 节中推导的(12)式, B 值与 ΔP_b 之间的关系可以表示为以下形式:

$$\Delta P_b \propto (1 + \alpha B)^2, \quad (16)$$

其中 α 为(9)式中 B 前的系数, 把(16)式的右项在对数坐标下展开成幂级数, 可得

$$\Delta P_b \propto \frac{1}{2} \left(x - \frac{x^2}{2} + \frac{x^3}{3} - \frac{x^4}{4} + \dots \right), \quad (17)$$

其中 $x = \alpha B$. 可见 B 值与 ΔP_b 之间在双对数坐标下应该是非线性关系, 在图 3 和 4 中, 图中的点并不严格位于一条直线上, 而是呈现出一定的非线性, 且不同尺寸的器件表现出不同的差异, 这是由于器件参数不同, 从而使(16)式中 α 的取值不同所致. 为了简单起见, 令 $\ln(1+x) \approx x$ ($\Delta E'/E'_i < 1$), 那么 B 值与 ΔP_b 之间可以近似看成存在 1/2 次方的关系. 图 3

和 4 中在双对数坐标下利用线性拟合提取的直线斜率分别为 0.44 和 0.48, $1/2.27$ 及 $1/2.08$ 的实验值接近 $1/2$ 的近似值. 同时需要指出的是, 图 3 和 4 中的数据呈现一定的离散性, 这主要是由于为了给出一个较为普遍的结论, 把不同类型, 不同尺寸器件的实验数据放在同一图中进行叙述所造成的, 对于参数相同器件, 试验结果的一致性是比较好的, 图 5 和 6 分别给出了实验编号为 N3 (n-MOSFET, 栅氧化层厚度为 $20 \pm 1.5 \text{ nm}$, 沟道掺杂浓度为 10^{17} cm^{-3} , 沟道宽长比 $W/L = 4.0 \mu\text{m} / 1.0 \mu\text{m}$) 和 P7 (p-MOSFET, 栅氧化层厚度为 $20 \pm 1.5 \text{ nm}$, 沟道掺杂浓度为 10^{17} cm^{-3} , 沟道宽长比 $W/L = 4.0 \mu\text{m} / 1.0 \mu\text{m}$) 的两组样品的试验结果, 其中图 5 提取的直线斜率为 0.45, 图 6 提取的直线斜率为 0.51, 均与上述讨论结果相吻合. 这一实验结果验证了本文所提出模型的正确性, 同时也为工程应用中 B 值与 ΔP_b 变化的近似估计提供了很好的半定量数学模型.

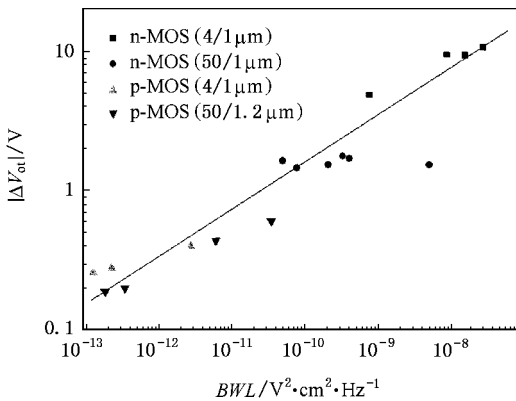


图 3 辐照前的 $1/f$ 噪声幅值 B 与辐照后 ΔV_{ti} 的关系 辐照总剂量为 1.5 kGy , $T = 25^\circ\text{C}$

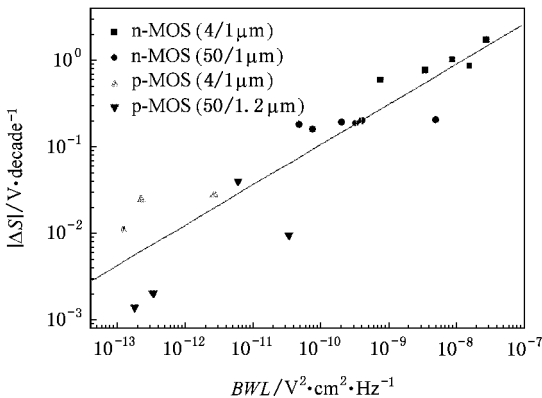


图 4 辐照前的 $1/f$ 噪声幅值 B 与辐照后 ΔS 的关系 辐照总剂量为 1.5 kGy , $T = 25^\circ\text{C}$

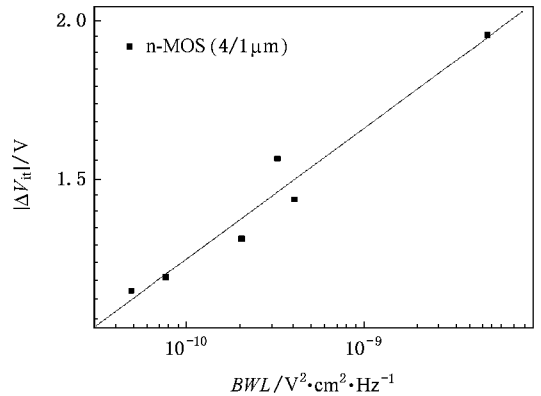


图 5 N3 组试验样品的 B 值与 ΔV_{ti} 的关系 (辐照总剂量为 1.5 kGy , $T = 25^\circ\text{C}$)

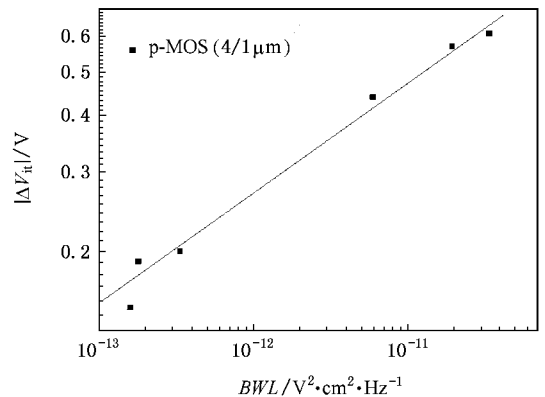


图 6 P7 组试验样品的 B 值与 ΔV_{ti} 的关系 辐照总剂量为 1.5 kGy , $T = 25^\circ\text{C}$

分析其他辐照总剂量下所得实验数据, 在经历 $5 \times 10^2 \text{ Gy}$ 剂量的辐照之后, 各参数的变化还不是很明显, 而经过 3 kGy 的辐照之后, 部分器件的电参数漂移已经非常严重, 部分甚至完全丧失功能, 但上面讨论的关系仍然存在, 在此不再赘述.

辐照前的 $1/f$ 噪声频率谱幅值 B 与辐照后 ΔV_{ot} , ΔV_{ti} 及 ΔS 之间存在的相关性不仅揭示了辐照过程中陷阱形成的微观动力学, 还可作为 MOSFET 抗辐照性能无损表征技术的数学模型. 利用 (10) 和 (12) 式, 可以利用 MOSFET 辐照前的 $1/f$ 噪声频率谱幅值对经历辐照之后电参数的漂移进行半定量估计. 简单来说, 对同一批 n-MOS 器件, 辐照前 $1/f$ 噪声较大的, 经历辐照之后 ΔV_{ot} , ΔV_{ti} 及 ΔS 变化也较大. 由于阈值电压的漂移量 ΔV_T 是 ΔV_{ot} 与 ΔV_{ti} 的叠加, 在 n-MOS 中, ΔV_{ot} 为负值而 ΔV_{ti} 为正值, 最终 ΔV_T 的大小取决于二者代数和的大小. 栅氧化层中

电荷的堆积还会使栅泄漏电流增加,因此对于某些 1/f 噪声较大的器件,尽管 ΔV_T 的变化可能不太明显,但是发生栅漏电的可能性大大增加,本实验的数据也证明了这一点.对于 p-MOS,其噪声通常比相同的 n-MOS 低一到两个数量级以上,相应其 ΔV_{ot} 、 ΔV_{it} 及 ΔS 变化也较小,但由于 p-MOS 的 ΔV_{ot} 和 ΔV_{it} 变化均为负, ΔV_T 是二者的叠加,因此最终阈值电压的漂移量 ΔV_T 较大.

4. 结 论

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,推导了 MOSFET 在经历电离辐照之后,氧化层空穴俘获与界面陷阱形成关

系的表达式.结果显示,栅氧化层系统中的各种缺陷浓度满足一定的热力学平衡,辐照诱生的氧化层空穴俘获过程增加了氢分子的分解,使更多离子氢参与到界面陷阱形成过程中,加速了界面陷阱形成,从而使辐照诱生界面陷阱数量正比于氧化层空穴俘获增加的数量的 1/2 次方.由于参与到界面陷阱形成过程中得这部分氧化层内缺陷同时也是 1/f 噪声产生的主要因素,因此辐照前的 1/f 噪声功率谱幅值将与辐照诱生的界面陷阱数量之间表现出相关性.本文从理论上推导了二者之间关系的表达式,并通过实验验证了这种正比例关系.本文结果为 1/f 噪声用作 MOSFET 辐照损伤机理研究的新工具、对其抗辐照性能进行无损评估提供了理论依据与初步的数学模型.

- [1] Ma T P , Dressendorfer P V 1989 *Ionizing Radiation Effects in MOS Device and Circuits* (A Wiley-Interscience Publication John Wiley & Sons)
- [2] Nicklaw C J , Lu Z Y , Fleetwood D M 2002 *IEEE Trans . Nucl . Sci .* **49** 2667
- [3] Rashkeev S N , Cirba C R , Fleetwood D M 2002 *IEEE Trans . Nucl . Sci .* **49** 2650
- [4] Winokur P S , McGarrity J M , Boesch H E 1976 *IEEE Trans . Nucl . Sci .* **23** 1580
- [5] Zhang T Q , Yang C Y , Liu J L , et al 2001 *Acta Phys . Sin .* **50** 2434 (in Chinese) [张廷庆、刘传洋、刘家璐等 2001 物理学报 **50** 2434]
- [6] Fleetwood D M , Meisenheimer T L , Scofield J H 1994 *IEEE Trans . Electron . Dev .* **41** 1953
- [7] Scofield J H , Fleetwood D M 1991 *IEEE Trans . Nucl . Sci .* **38** 1567
- [8] Winokur P S , Boesch H E , McGarrity J M 1979 *J . Appl . Phys .* **50** 3492
- [9] Conley J F , Lenahan P M 1993 *IEEE Trans . Nucl . Sci .* **40** 1335
- [10] Lenahan P M , Conley J F 1998 *IEEE Trans . Nucl . Sci .* **45** 2413
- [11] Fleetwood D M , Winokur P S , Reber R 1993 *J . Appl . Phys .* **73** 5058
- [12] Hjalmanson H P , Pease R L , Witczak S C 2003 *IEEE Trans . Nucl . Sci .* **50** 1901
- [13] Hung K K , Ping K K , Hu C 1990 *IEEE Trans . Electron . Dev .* **37** 654
- [14] Bao J L , Zhuang Y Q , Du L , et al 2005 *Acta Phys . Sin .* **54** 2118 (in Chinese) [包军林、庄奕琪、杜 磊等 2005 物理学报 **54** 2118]
- [15] Oldham T R , McLean F B 2003 *IEEE Trans . Nucl . Sci .* **50** 483
- [16] Fleetwood D M , Scofield J H 1990 *Phys . Rev . Lett .* **64** 579
- [17] Zhuang Y Q , Sun Q , Hou X 1996 *Acta Metrologica . Sin .* **17** 136 (in Chinese) [庄奕琪、孙 青、候 询 1996 计量学报 **17** 136]
- [18] McWhorter P J , Winokur P S 1986 *Appl . Phys . Lett .* **48** 133
- [19] Schwank J R , Winokur P S , McWhorter P J 1984 *IEEE Trans . Nucl . Sci .* **31** 1434
- [20] Muller R S , Kamins T I , Chan M 2004 *Device Electronics for Integrated Circuit* (Publishing House of Electronics Industry) p387 (in Chinese) [Muller R S , Kamins T I , Chan M 2004 集成电路器件电子学 (电子工业出版社) 第 387 页]

A 1/f noise based research of radiation induced interface trap buildup process^{*}

Li Rui-Min Du Lei Zhuang Yi-Qi Bao Jun-Lin

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

(Received 4 September 2005 ; revised manuscript received 22 September 2006)

Abstract

Based on the two-step interface trap buildup model and the statistical thermodynamics mechanism of point defects in solids , a relation between the radiation induced increase of oxide hole-traps and the buildup of interface traps in MOSFET is proposed. Then , based on the correlation between pre-irradiation 1/f noise power spectral density and post-irradiation oxide-trap charge , a sim-empirical expression of pre-irradiation 1/f noise and post-irradiation interface traps buildup is established which agrees well with the experimental results. This model shows that the process of interface trap buildup was influenced by the increasing of oxide hole-traps that could dissociated hydrogen into proton under irradiation. So , the magnitude of pre-irradiation 1/f noise is directly proportional to post-irradiation interface-trap charge and sub-threshold slope. Our results not only proves that the 1/f noise can play a important role in MOSFET irradiation effects , but also proves a new nondestructive method to estimate MOSFET radiation response.

Keywords : radiation effects , interface traps , 1/f noise , oxide hole-traps

PACC : 6180E , 7340Q , 4350

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60276028) and the National Science Foundation for Post-doctoral Scientists of China (Grant No. 51411040601DZ0148).