

基于辐照前 $1/f$ 噪声的金属 - 氧化物 - 半导体场效应晶体管潜在缺陷退化模型*

孙鹏[†] 杜磊 陈文豪 何亮

(西安电子科技大学技术物理学院, 西安 710071)

(2011 年 4 月 26 日收到; 2011 年 8 月 3 日收到修改稿)

基于金属 - 氧化物 - 半导体 - 场效应管 (MOSFET) 辐射损伤的微观机理, 推导出了 MOSFET 经历辐照之后氧化层空穴俘获与阈值电压漂移之间关系的表达式. 又根据 MOSFET 中 $1/f$ 噪声产生的微观机理, 建立了辐照之前 MOSFET 的 $1/f$ 噪声功率谱幅值与阈值电压漂移量之间的定量关系, 并通过实验予以验证. 结果表明, 辐照之前的 $1/f$ 噪声功率谱幅值与辐照之后的阈值电压漂移量存在正比例关系, 阈值电压漂移量可以反映出 MOSFET 内部的潜在缺陷的退化程度, 因此, 该模型有助于利用 $1/f$ 噪声参量来表征 MOSFET 内部潜在缺陷的数量和严重程度.

关键词: $1/f$ 噪声, 潜在缺陷, 界面陷阱, 氧化层陷阱

PACS: 78.70.-g, 85.30.Tv, 85.40.Qx

1 引言

随着 MOS 器件被越来越多的应用于航天环境, 又由于航天环境使得器件暴漏在辐射作用之下, 因此, MOS 器件在辐射作用下的退化情况引起了越来越多的关注. 有研究表明, MOS 器件在受到辐射应力的作用后, 其电性能会发生不同程度的退化, 这些退化包括阈值电压漂移, 栅漏电流增加等多种电参量的退化^[1]. 当辐射的剂量过大时, 甚至会使整个电路失效. 因此, 对辐射应力对 MOS 器件所引起的损伤机理的研究对于提高 MOS 器件以及整体电路的可靠性而言有着重要的作用.

国外针对 (metal-oxide-semiconductor field transistor, MOSFET) $1/f$ 噪声特性以及辐照退化特性的相关实验研究表明, 辐照之前 MOSFET 的 $1/f$ 噪声功率谱幅值与辐照后 MOSFET 氧化层陷阱退化所导致的阈值电压负漂移之间存在线性关系^[2,3], 造成这一结果的原因是产生 $1/f$ 噪声的陷阱与辐照过程中产生的氧化层空穴陷阱是同一种陷阱^[4]. 这一结果使得人们可以利用辐照前 MOSFET 的 $1/f$ 噪声来表征辐照之后 MOSFET 潜在缺

陷的退化情况. 用辐照前的 $1/f$ 噪声表征 MOSFET 在辐照应力作用下内部潜在缺陷退化的前提是建立起一个可以用 $1/f$ 噪声参量对器件内部缺陷定量刻画的理论模型, 但现有模型的假设较为简单, 无法达到定量的要求^[5,6], 因此无法建立辐照前 $1/f$ 噪声与辐照后 MOSFET 内部潜在缺陷退化之间的精确定量关系.

本文从 MOSFET 受辐照应力影响的微观机理出发, 根据辐照后 MOSFET 由于氧化层陷阱电荷和界面陷阱电荷诱使阈值电压漂移的理论模型, 再结合 $1/f$ 噪声产生的载流子数涨落模型和迁移率涨落模型, 最终建立起辐照前 $1/f$ 噪声参量与辐照之后 MOSFET 内部缺陷退化之间的定量模型, 并通过实验予以验证. 该定量模型有助于利用 $1/f$ 噪声来监测 MOSFET 内部潜在缺陷的退化情况.

2 理论模型

2.1 MOSFET 辐照损伤的微观机理

MOSFET 中的 SiO_2 层在辐照作用下会吸收辐射能量, 发生原子电离, 从而产生电子 - 空穴对. 其

* 国家自然科学基金 (批准号: 60276028) 资助的课题.

[†] E-mail: stevesun517@gmail.com

中有些电子空穴对可以立即复合,不会对 MOSFET 产生影响,但还有相当数量的电子-空穴对并不会立即复合,因为 SiO₂ 介质层具有绝缘特性,这种绝缘特性会阻止电子-空穴对的复合.在电场力的作用下电子的迁移率远远大于空穴的迁移率,因此电子将会离开氧化层,而空穴则继续留在氧化层中,并慢慢集中起来.氧化层中的缺陷,比如氧空位缺陷,会俘获空穴,形成带正电的缺陷(E'心)^[7,8].这些带正电的缺陷称为氧化层陷阱电荷.

MOS 器件受到电离辐照作用所产生的氢离子(H⁺)可以激活被氢钝化的三价硅悬挂键 P_bH,进一步形成界面陷阱(P_b心)^[9,10].对于 nMOSFET 而言,界面陷阱带负电荷;而对于 pMOSFET 而言,界面陷阱则带正电荷.它们统称为界面陷阱电荷^[10].氧化层陷阱电荷与界面陷阱电荷的形成将引起 MOSFET 性能的退化.

2.2 1/f 噪声模型

根据载流子数涨落理论和迁移率涨落理论^[11],氧化层内部距离 Si-SiO₂ 界面几纳米附近的陷阱会对沟道载流子进行俘获和发射,从而引起载流子数涨落,同时通过库仑散射引起沟道迁移率的涨落,载流子数和迁移率的涨落共同导致沟道电流的涨落^[12].

nMOSFET 的沟道电流可以表示为^[12]

$$I_d = Wq\mu N E_x, \quad (1)$$

其中 W 为沟道宽度, q 为电子电量, μ 为沟道载流子迁移率, N 为单位面积的沟道载流子数, E_x 为沟道横向电场,则单位面积的氧化层陷阱引起沟道电流的涨落可表示为

$$\begin{aligned} \delta I_d &= \frac{\partial I_d}{\partial N_t} \delta N_t \\ &= E_x \left(qN \frac{\partial \mu}{\partial N_t} + \mu q \frac{\partial N}{\partial N_t} \right) \delta N_t, \end{aligned} \quad (2)$$

其中 N_t 为单位面积氧化层中的陷阱密度.

对 (2) 式求导并将结果代入 (2) 式可得

$$\delta I_d = -\frac{I_d}{WL} \left(a\mu + \frac{R}{N} \right) \delta N_t, \quad (3)$$

其中 L 为沟道长度, a 为陷阱电荷的散射系数, R 为单位陷阱引起沟道载流子数的变化,

$$R = -\frac{C_i}{C_i + C_d + C_{it} + C_{ox}}, \quad (4)$$

其中 C_i, C_d, C_{it}, C_{ox} 分别为反型层,耗尽层,界面陷阱和栅氧化层电容.

电流噪声的功率谱密度由电流涨落来决定^[11],因此,该电流涨落的功率谱密度为

$$S_{\delta I_d} = \left(\frac{I_d}{WL} \right)^2 \left(a\mu + \frac{R}{N} \right)^2 S_{\delta N_t}, \quad (5)$$

根据载流子数涨落理论^[11,13],同时假设, ΔE 与 E 无关,则

$$\begin{aligned} S_{\delta N_t} &= \int_0^{\Delta E_{\max}} \int_{E_V}^{E_C} \int_0^{t_{ox}} 4N_t(E, x, y, z) \\ &\quad \times \Delta x f_t(1 - f_t) \\ &\quad \times \frac{\tau(E, x, y, z)}{1 + \omega^2 \tau^2(E, x, y, z)} dz dE d\Delta E, \end{aligned} \quad (6)$$

其中, t_{ox} 为氧化层厚度, $E_C - E_V$ 为硅的禁带宽度, $N_t(E, x, y, z)$ 为氧化层内陷阱的能量空间和几何空间分布, $f_t = [1 + \exp(E - E_{fn})/kT]^{-1}$ 为陷阱占据函数, $\omega = 2\pi f$ 为角频率, $\tau(E, x, y, z)$ 为载流子俘获和发射的特征时间, z 为陷阱距界面的距离, ΔE 为陷阱的激活能.

为了将 (6) 式化简,提出如下假设^[12]:

1) 氧化层陷阱的分布不应该只考虑能量分布或者几何空间分布,也不能简单假设为均匀分布,应该同时考虑两种分布.基于这种考虑,氧化层陷阱的分布可以表示为

$$\begin{aligned} N_t(E, x, y, z) &= N_t(E, z) \\ &= N_0 \exp[\xi(E - E_i) + \eta z], \end{aligned} \quad (7)$$

其中 N_0 为单位体积单位能量间隔的陷阱数, ξ 为陷阱在能量上分布的几何因子, η 为氧化层陷阱在几何空间分布的几何因子.

2) 氧化层陷阱对沟道载流子的俘获和发射是隧穿和热激活的共同结果,其时间常数可以表示为

$$\begin{aligned} \tau(E, x, y, z) &= \tau(\Delta E, z) \\ &= \tau_0 \exp\left(\theta z + \frac{\Delta E}{kT}\right), \end{aligned} \quad (8)$$

其中 τ_0 为 Si-SiO₂ 界面处的时间常数, k 为玻尔兹曼常数, T 为绝对温度, θ 为隧穿系数(经验值为 $10^{-8}/\text{cm}$).

基于上述假设,并将 (7), (8) 式代入 (6) 中,化简得

$$S_{\delta N_t} = \frac{4\pi k^2 T^2 W N_0 \exp[E_F - E_i]}{2\eta \cos\left(\frac{\eta L}{2\theta}\right)}$$

$$\times \frac{\left[1 - \exp\left(-\frac{\Delta E_{\max} \eta}{kT}\right)\right]}{\tau_0^{\frac{\eta}{\theta}} \omega^{\frac{\eta}{\theta}+1}}, \quad (9)$$

其中, ΔE_{\max} 为最大激活能.

对 (5) 式积分, 并将 (9) 式代入, 化简得

$$S_{I_d}(x, f) = \frac{4qk^2 T^2 I_d \mu}{a\tau_0^{\frac{\eta}{\theta}} \omega^{\frac{\eta}{\theta}+1} L^2} \frac{\pi}{2\eta \cos\left(\frac{\pi\eta}{2\theta}\right)} \times \int_0^{V_d} N_t(E_{fn}) \left(1 + \frac{a\mu N}{R}\right)^2 \frac{R^2}{N} dV, \quad (10)$$

其中,

$$N_t(E_{fn}) = N_0 \exp\left(\xi(E_F - E_i)\right) \times \left[1 - \exp\left(-\frac{\Delta E_{\max} \eta}{kT}\right)\right]. \quad (11)$$

根据 S_{I_d} 与 S_{V_d} 的关系, 将 (10) 式除以电导 g_m 的平方, 可以得到线性区漏源电压 V_d 的噪声功率谱密度 $S_{V_d}(f)$

$$S_{V_d}(f) = \frac{S_{I_d}(x, f)}{g_m^2} = \frac{4qk^2 T^2 \mu I_d}{a g_m^2 \tau_0^{\frac{\eta}{\theta}} \omega^{\frac{\eta}{\theta}+1} L^2} \frac{\pi}{2\eta \cos\left(\frac{\pi\eta}{2\theta}\right)} \times \int_0^{V_d} \frac{R^2 N_t(E_{fn}) \left(1 + \frac{a\mu N}{R}\right)^2}{N} dV, \quad (12)$$

参照 $1/f$ 噪声功率谱密度的一般形式^[11]

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

可以得到噪声幅值 B 为

$$B = \frac{qk^2 T^2 V_d}{C_{ox} W L (2\pi\tau_0)^{\eta/\theta} \Delta E_{\max} \eta (V_g - V_T) \cos\left(\frac{\pi\eta}{2\theta}\right)} \times \int_0^{V_d} N_t(E_{fn}) \left(1 \pm \frac{a\mu N}{R}\right)^2 \frac{R^2}{N} dV. \quad (14)$$

2.3 初始 $1/f$ 噪声幅值与辐照诱导氧化层陷阱退化之间的关系

MOSFET 噪声理论认为, 氧化层内部距离 Si-SiO₂ 界面几纳米附近的陷阱会对沟道载流子进行俘获和发射, 从而引起载流子数涨落, 同时通过库仑散射引起沟道迁移率的涨落, 载流子数和迁移率的涨落共同导致沟道电流的涨落, MOSFET 的 $1/f$ 噪声正是这两种涨落共同作用所致^[13,14].

边缘陷阱主要是由 E' 心及氧空位所组成的, 它们与沟道交换载流子所需的时间常数与实验观测到的 $1/f$ 噪声的频率倒数具有基本相同的数值范围. 对 MOSFET 辐照应力作用的研究表明^[15], 辐照所产生的空穴在整个栅氧化层范围中都有可能被缺陷俘获, 但最为主要的俘获区域则集中于靠近界面几纳米的范围附近, 靠近界面附近由于化学剂量比的失配而有大量的氧空位缺陷聚集, 此区域也正是上述边缘陷阱分布的主要范围^[2]. 已有研究和实验证实引起 $1/f$ 噪声的潜在缺陷与辐照应力所产生的俘获空穴陷阱是同一类缺陷^[4], 这预示着 $1/f$ 噪声参量可以用作 MOSFET 辐照机理研究的新工具.

有研究表明, 辐照之前 $1/f$ 噪声的功率谱幅值与辐照之后氧化层内由于空穴俘获所导致的阈值电压漂移量 $|\Delta V_{ot}|$ 之间存在正比例关系, 具体关系如下式所示^[16]

$$B = \frac{kT}{K_g f_y D \sigma_{ot} E_g \varepsilon_{ox} W L} \frac{V_d}{V_g - V_T} |\Delta V_{ot}|, \quad (15)$$

其中, K_g 是单位辐射剂量在 SiO₂ 中产生的电子-空穴对数目, f_y 是电子-空穴对逃脱立即复合的概率, 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 SiO₂ 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 $1/f$ 噪声形成理论, SiO₂ 层中的氧空位缺陷同沟道交换载流子的过程包括三个步骤: 一个不带电的、中性的缺陷俘获一个带正电的空穴形成陷阱电荷, 这个陷阱电荷再从沟道中获得一个带负电的电子形成中性缺陷, 这个中性缺陷再次俘获一个带正电的空穴. 因此对相同工艺的器件而言, $1/f$ 噪声功率谱幅值的大小反映了其 SiO₂ 层中可俘获空穴的缺陷数量的多少, 这些缺陷能够在电离辐射应力的作用下俘获空穴形成陷阱电荷, 这些新引入的正电荷使平带电压发生了改变, 从而使辐照前的 $1/f$ 噪声功率谱幅值 B 与辐照后氧化层陷阱电荷引起的阈值电压漂移量 ΔV_{ot} 表现出相关性.

辐照诱导氧化层陷阱电荷引起的阈值电压漂移可以表示为^[2]

$$\Delta V_{ot} = -\frac{q t_{ox}^2}{\varepsilon_{ox}} K_g f_y f_{ot} D. \quad (16)$$

MOSFET 的氧化层俘获效率 f_{ot} 与辐照前氧化层陷阱的面密度 N_{ot} 有如下关系 [2]

$$\begin{aligned} f_{ot} &= \sigma_{ot} N_{ot} = \frac{\sigma_{ot} N_t}{WL} \\ &= \frac{\sigma_{ot}}{WL} \int_{E_V}^{E_C} \int_0^W \int_0^L \int_0^{t_{ox}} N_t(E, x, y, z) \\ &\quad \times dz dx dy dE, \end{aligned} \quad (17)$$

将 (7) 式代入 (17) 式, 积分可得

$$f_{ot} = \frac{\sigma_{ot} N_t(E_{in}) [\exp(\eta t_{ox}) - 1] [\exp(\xi E_g) - 1]}{\eta \xi \left[1 - \exp\left(-\frac{\Delta E_{max} \eta}{k \theta}\right) \right] \exp\left(\frac{\xi E_g}{2}\right)}, \quad (18)$$

将 (18) 和 (11) 式代入 (16) 式, 得到

$$\begin{aligned} \Delta V_{ot} &= -\frac{q t_{ox}^2 k_g f_y D}{\varepsilon_{ox}} \\ &\quad \times \frac{\sigma_{ot} [\exp(\eta t_{ox}) - 1] [\exp(\xi E_g - 1)]}{\eta \xi \left[1 - \exp\left(\frac{\Delta E_{max} \eta}{k \theta}\right) \right] \exp\left(\frac{\xi E_g}{2}\right)} \\ &\quad \times N_0 \exp \xi (E_F - E_i) \\ &\quad \times \left[1 - \exp\left(-\frac{\Delta E_{max} \eta}{k T \theta}\right) \right], \end{aligned} \quad (19)$$

再将 (19) 式代入 (15) 式, 化简得到

$$\begin{aligned} B &= \frac{q k T}{E_g W L} \frac{V_d}{V_g - V_T} \frac{t_{ox}^2}{\varepsilon_{ox}^2} \\ &\quad \times \frac{[\exp(\eta t_{ox}) - 1] [\exp(\xi E_g - 1)]}{\eta \xi \left[1 - \exp\left(\frac{\Delta E_{max} \eta}{k \theta}\right) \right] \exp\left(\frac{\xi E_g}{2}\right)} \\ &\quad \times N_0 \exp \xi (E_F - E_i) \\ &\quad \times \left[1 - \exp\left(-\frac{\Delta E_{max} \eta}{k T \theta}\right) \right]. \end{aligned} \quad (20)$$

根据 MOSFET 的 $1/f$ 噪声产生理论, 由于界面陷阱与沟道距离很近, 其与沟道交换载流子的速度过快, 因此对电噪声产生的影响主要体现在高频段部分 ($f > 10$ kHz). 由于该频段超过了低频 $1/f$ 噪声与白噪声的转折频率, 因此在低频部分采集的电噪声无法携带界面陷阱的信息 [11]. 为了确保模型的完整性, 本文通过公式推导建立辐照前 $1/f$ 噪声幅值与辐照后界面陷阱电荷诱使阈值电压漂移 ΔV_{it} 之间的关系.

文献 [17] 基于界面陷阱形成的氢离子运动模型以及反应过程中的热力学平衡假设, 推导出了 MOSFET 经历电离辐射应力作用之后氧化层空

穴俘获与界面陷阱形成之间的关系

$$\Delta P_b = \left[K (P_b H_i) E_i' \left(1 + \frac{\Delta E'}{E_i'} \right) \right]^{1/2}, \quad (21)$$

其中 E_i' 和 $P_b H_i$ 分别为辐射应力作用前 E' 心和 $P_b H$ 的密度, $\Delta E'$ 和 ΔP_b 分别表示辐照后氧化层陷阱的增量 ΔN_{ot} 和界面陷阱增量 ΔN_{it} , K 为反应过程的热力学平衡常数.

辐射应力作用之后, MOSFET 阈值电压的漂移是由于 SiO_2 介质层中的氧化层陷阱电荷和 Si-SiO_2 界面处的界面陷阱电荷共同作用所导致的. 因此, 有

$$\begin{aligned} \Delta V_T &= \Delta V_{ot} + \Delta V_{it} \\ &= \frac{q}{C_{ox}} (-\Delta N_{ot} \pm \Delta N_{it}), \end{aligned} \quad (22)$$

式中的“ \pm ”号, 对于 nMOSFET, 取正号; 对于 pMOSFET, 取负号. 将 (19), (21) 式代入 (22) 式中, 消去 ΔV_{ot} , 可得

$$\begin{aligned} B &= \frac{k T}{k_g f_y D \sigma_{ot} E_g \varepsilon_{ox} W L} \frac{V_d}{V_g - V_T} \frac{q}{C_{ox}} \\ &\quad \times \left[\frac{\Delta N_{it}^2}{K (P_b H_i)} - 1 \right] E_i, \end{aligned} \quad (23)$$

根据 (22) 式, 可将 (23) 式变形为

$$\begin{aligned} B &= \frac{k T}{k_g f_y D \sigma_{ot} E_g \varepsilon_{ox} W L} \frac{V_d}{V_g - V_T} \frac{q}{C_{ox}} \\ &\quad \times \left[\frac{\Delta V_{it}^2 C_{ox}^2}{q^2 K (P_b H_i)} - 1 \right] E_i. \end{aligned} \quad (24)$$

根据 (24) 和 (15) 式, 本文已建立起辐射应力作用前 $1/f$ 噪声幅值 B 值与辐射应力之后阈值电压漂移量的定量相关模型.

3 实验结果及讨论

实验所用样品为 $1.0 \mu\text{m}$ 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 $50 \mu\text{m}/1.0 \mu\text{m}$ 和 $50 \mu\text{m}/1.2 \mu\text{m}$, 沟道掺杂浓度为 $10^{17}/\text{cm}^3$. 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 $1.2 \text{ krad}(\text{SiO}_2)/\text{s}$, 为了模拟最恶劣的使用环境, 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 $50 \text{ krad}(\text{SiO}_2)$, $150 \text{ krad}(\text{SiO}_2)$ 和 $300 \text{ krad}(\text{SiO}_2)$.

图 1 为经过总剂量 $150 \text{ krad}(\text{SiO}_2)$ 辐照之后, 辐照前的 $1/f$ 噪声功率谱幅值 B 与辐照之后由

氧化层内空穴导致的阈值电压漂移 $|\Delta V_{ot}|$ 之间的关系. 由 (15) 式可以看出 MOSFET 的 $|\Delta V_{ot}|$ 不止与 B 值单独相关, 还和器件尺寸 W, L 相关, 因此, 为了突出和 $|\Delta V_{ot}|$ 的相关性, 将 B 值和 W, L 相乘. 由图中可以看出, 对于不同尺寸的 MOSFET, 在对数坐标下, 其 $1/f$ 噪声功率谱幅值 B 的总体趋势正比于 $|\Delta V_{ot}|$, 这种比例关系产生的原因 2.3 节中有所讨论.

图 2 为经过总剂量 150 krad (SiO_2) 辐照之后, 辐照前的 $1/f$ 噪声功率谱幅值 B 与辐照之后界面陷阱电荷导致的阈值电压漂移 $|\Delta V_{it}|$ 之间的关系. 根据 $1/f$ 噪声产生的微观机理, 由于界面陷阱与沟道的距离非常近, 因此其与沟道交换载流子的速度非常快, 以至于其对电噪声参量的影响主要体现在高频部分, 所以在低频段提取的 $1/f$ 噪声频谱参数并不携带界面陷阱的信息, 因此辐照之前的 $1/f$ 噪声功率谱幅值 B 也无法反映 Si-SiO₂ 界面陷阱的空穴俘获效率. 但是, 有研究和实验表明, 辐射应力所产生的界面陷阱与辐射应力作用过程中边缘陷阱的增加量存在着正比例关系 [17], 从而导致 B 值与 ΔP_b 之间也存在着类似正比例的关系, 本次实验的结果也表明这一正比例关系的存在. 由 (24) 式可知, 辐照前的 $1/f$ 噪声功率谱幅值 B 应与 $|\Delta V_{it}|$ 的平方成正比, 图 2 中在双对数坐标下利用线性拟合所提取的直线斜率为 1.97, 与理论值 2 有着较好的一致性.

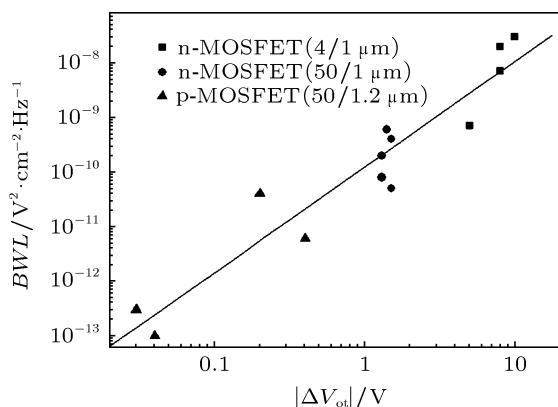


图 1 辐照前 $1/f$ 噪声功率谱幅值 B 与辐照后 $|\Delta V_{ot}|$ 的关系
辐照总剂量为 150 krad (SiO_2), $T = 25^\circ\text{C}$

由图 1, 图 2 中可以看出, 虽然整体上 B 值与 $|\Delta V_{ot}|$ 以及 $|\Delta V_{it}|$ 在对数坐标上成正比例关系, 但是对于单个器件而言, 线性关系并不明显, 这是由于不同尺寸的器件参数不同所致. 将 (15) 和 (22)

式代入 (21) 式中, 并化简, 可得

$$\Delta P_b \propto (1 + aB)^{1/2}, \quad (25)$$

其中

$$a = \frac{k_g f_y D E_g \sigma_{ot} \varepsilon_{ox}^2 L W (V_g - V_T)}{k T q t_{ox} V_D E_i'}$$

不同尺寸的器件导致 a 值各不相同. 为简单起见, 令 $\ln(1+x) \simeq x (\Delta E'/\Delta E_i' < 1)$, 则 B 值与 ΔP_b 之间可以看作存在 2 次方的关系, 再次与实验值保持一致.

对其他辐照剂量作用下的 MOSFET 电参量和噪声参量进行分析, 结果如下: 在总剂量为 50 krad 的情况下, 大多数器件电学参量变化并不明显, 噪声参量的变化已经较为明显; 300 krad 的辐照总剂量情况下, 器件的电学参量大幅漂移, 大多数器件已经丧失了正常功能, 此时噪声参量的变化也非常明显, 同时, 器件电学参量和噪声参量的相关性与之前的讨论相一致, 故在此不再赘述.

由实验结果可知, 辐照之前, MOSFET 器件内部的潜在缺陷, 比如 SiO_2 层中可俘获空穴陷阱数量的多少, 可以通过 $1/f$ 噪声功率谱幅值反映出来. 在经过辐照之后, MOSFET 氧化层中的潜在缺陷可以通过 $|\Delta V_{ot}|$ 反映出来, 而界面潜在缺陷则可以通过 $|\Delta V_{it}|$ 反映出来, 并且, $|\Delta V_{ot}|$ 与 $|\Delta V_{it}|$ 共同作用导致了 MOSFET 阈值电压的漂移. 因此, 建立辐照前 $1/f$ 噪声功率谱幅值 B 和辐照后 $|\Delta V_{ot}|$ 与 $|\Delta V_{it}|$ 之间的定量关系有助于分析辐照对 MOSFET 内部潜在缺陷的退化情况.

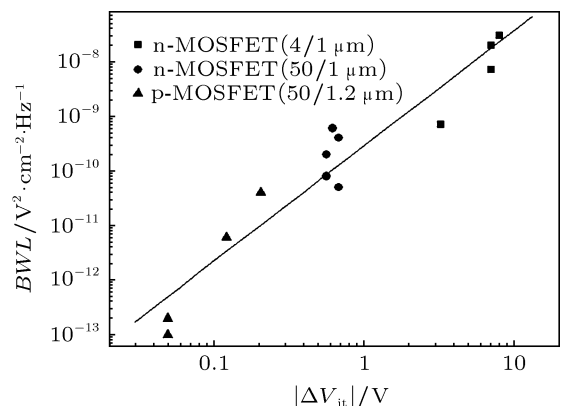


图 2 辐照前 $1/f$ 噪声功率谱幅值 B 与辐照后 $|\Delta V_{it}|$ 的关系
辐照总剂量为 150 krad (SiO_2), $T = 25^\circ\text{C}$

4 结论

本文从 MOSFET 辐照损伤的微观机理出发, 根据辐照后 MOSFET 由于氧化层陷阱电荷和界

面陷阱电荷诱使阈值电压漂移的理论模型,再结合 $1/f$ 噪声产生的载流子数涨落模型和迁移率涨落模型,最终建立起辐照前 $1/f$ 噪声参量与辐照之后 MOSFET 内部潜在缺陷退化之间的定量模型.该模型表明,由于辐射应力所产生的氧化层陷阱电荷能够在与沟道交换载流子、引起载流子数涨落的同时通过库仑散射引起沟道迁移率的涨落,而这两种涨落机理的共同作用导致了沟道电流的涨

落,因此辐照之前的 $1/f$ 噪声幅值正比于辐照所导致的氧化层陷阱电荷的数量.又有研究表明, B 值与 ΔP_0 之间也存在着类似正比例的关系^[9,17].因此,辐照之前的 $1/f$ 噪声参量也应该正比于阈值电压的漂移量.综上所述,利用本文建立的模型,有助于利用 $1/f$ 噪声参量来表征 MOSFET 内部潜在缺陷的数量和严重程度.

-
- [1] Ma T P, Dressendorfer P V 1989 *Ionizing Radiation Effects in MOS Device and Circuits* (New York: A Wiley-Interscience Publication John Wiley & Sons)
- [2] Fleetwood D M, Meisenheimer T L, Scofield J H 1994 *IEEE Trans. Electron. Dev.* **41** 1953
- [3] Scofield J H, Fleetwood D M 1991 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **38** 1567
- [4] Fleetwood D M, Scofield J H 1990 *Phys. Rev. Lett.* **64** 579
- [5] Jindal R P 2006 *IEEE Trans. Electron Dev.* **53** 2051
- [6] Mete E, Tian X, Clark W F 2007 *IEEE Electron Dev. Lett.* **28** 812
- [7] Shaposhnikov A V, Gritsenko V A, Zhidomirov G M, Roger M 2002 *Phys. Sol. State* **44** 1028
- [8] 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
- [9] 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]
- [10] Rashkeev S N, Fleetwood D M, Schrimpf R D, Pantelides S T 2004 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **51** 3158
- [11] Zhung Y Q and Sun Q 1993 *Noise and its Minimizing Technology in Semiconductor Devices* (Beijing: National Defence Industry Press) pp172–221 (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 172–221 页]
- [12] Bao J L, Zhuang Y Q, Du L 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 2118 (in Chinese) [包军林, 庄奕琪, 杜磊 2005 物理学报 **54** 2118]
- [13] Zhuang Y Q and Sun Q 1991 *IEEE Trans. on Electron Dev.* **38** 2540
- [14] Hung K K, Ping K K, Hu C 1990 *IEEE Trans. Electron. Dev.* **37** 654
- [15] Oldham T R, McLean F B 2003 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **50** 483
- [16] Scofield J H, Doerr T P, Fleetwood D M 1989 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **36** 1946
- [17] Zhang T Q, Liu C Y, Liu J L 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 2434 (in Chinese) [张廷庆, 刘传洋, 刘家璐 2001 物理学报 **50** 2434]

A latent defect degradation model of metal-oxide-semiconductor field effect transistor based on pre-irradiation $1/f$ noise

Sun Peng[†] Du Lei Chen Wen-Hao He Liang

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

(Received 26 April 2011; revised manuscript received 3 August 2011)

Abstract

Based on metal-oxide-semiconductor field effect transistor (MOSFET) microscopic mechanism of radiation damage, a relation between radiation induced increase in number of oxide hole-traps and post-irradiation threshold voltage drift is proposed. Then, Based on MOSFET microscopic mechanism of $1/f$ noise generation, a quantitative relationship between pre-irradiation $1/f$ noise power spectral amplitude and post-irradiation threshold voltage drift is founded, which accords well with the experimental results. This relationship shows that pre-irradiation $1/f$ noise power spectral amplitude is proportional to post-irradiation threshold voltage drift, which can reflect the degradation of latent defect in MOSFET. So, this modal is helpful to characterize the quantity and severity of latent defect in MOSFET by using $1/f$ noise parameters.

Keywords: $1/f$ noise, latent defect, interface trap, oxide trap

PACS: 78.70.-g, 85.30.Tv, 85.40.Qx

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

[†] E-mail: stevesun517@gmail.com