

MOSFET 电离辐射感生跨导退化的简单模型

任迪远 余学锋 陆 妩 王国彬 张国强 范 隆 严荣良

(中国科学院新疆物理研究所 乌鲁木齐 830011)

摘要 本文提出了一个能有效反映辐射感生氧化物电荷积累和 Si/SiO₂ 界面态密度增加分别对 MOSFET 跨导退化影响的简单模型. 通过模型与实验结果比较, 讨论了不同沟道类型 MOSFET (NMOSFET 和 PMOSFET) 跨导退化的机制.

PACC: 7220, 7340Q, 6180E

1 引言

众所周知, MOSFET 的跨导是表征 MOS 电路线性区特性的一个重要参数, 它的性能直接反映了 Si/SiO₂ 界面或附近缺陷的散射作用对沟道载流子有效迁移率的影响. 大量的研究表明^[1-5], 当 MOSFET 栅极电压超过阈值电压时, 至少有三种散射机制对跨导的性能产生影响, 它们是: (1) 由于晶格不规则振动产生的声子散射 (phonon scattering); (2) 非理想平面造成的表面散射 (surface-roughness scattering); 以及 (3) 带电中心, 包括固定氧化物电荷、界面态电荷和电离杂质电荷等产生的库仑散射 (Coulomb scattering). 在这三种散射机制中, 声子散射强烈地依赖于温度, 即它是温度的敏感函数. 表面散射则主要由器件的初始制备工艺以及栅电场条件等决定, 例如, 在强反型条件下, 这种散射是非常重要的^[6]. 在电离辐射环境中, 如果保持试验样品在辐照前后处于基本相同的温度和工作条件, 显然辐照感生的界面陷阱电荷的库仑散射将对 MOSFET 的跨导退化起支配作用. 近年来, 许多研究者对辐照引起的 MOSFET 的跨导退化进行了研究, 并给出各种假定的模型来描述退化的机制, 但这些研究主要集中在 NMOSFET, 很少有报道关于 MOSFET 辐照感生跨导退化的研究结果.

为了较全面地描述电离辐射造成 MOSFET (NMOSFET 或 PMOSFET) 跨导退化的机制, 本文提出了一个跨导退化的简单模型, 这个模型可有效地反映辐射感生的不同界面陷阱

任迪远 男, 1950 年生, 副研究员, 现主要从事抗辐射电子学与 MOS 器件测试分析技术方面的研究工作
余学锋 男, 1964 年生, 助理研究员, 现主要从事电子元器件总剂量辐射效应和损伤机理分析研究工作
严荣良 男, 1935 年生, 研究员, 现主要从事 MOS 器件电离辐射效应和抗辐射加固研究工作
1993 年 10 月 26 日收到初稿, 1994 年 2 月 22 日收到修改稿

电荷(氧化物正电荷积累和 Si/SiO₂ 界面态密度增加)对跨导性能的影响,从而能通过辐射感生氧化物电荷和界面态电荷增加的程度来正确预测或模拟跨导的变化.此外,模型也分别与 NMOSFET 和 PMOSFET 的辐照实验结果进行了比较,并对两种沟道类型 MOSFET 的跨导退化机制分别进行了分析讨论.

2 模型的建立

跨导退化是由于电离辐射在 MOSFET 的 Si/SiO₂ 界面或附近感生某些陷阱电荷,这些位于或临近界面的带电中心的库仑散射导致沟道载流子迁移率 μ 的变化而引起的.辐射感生的界面电荷主要是氧化物正电荷和施主或受主型的正或负的界面态电荷.

在反型区内,Sun 和 Plummer 给出了沟道载流子迁移率 μ 与界面固定陷阱电荷 Q_f 之间的经验关系式^[7]

$$\mu = \frac{\mu_0(N_A)}{1 + \alpha(N_A)Q_f} \quad (1)$$

这里, Q_f 是制备工艺引入的固定陷阱电荷,它没有考虑辐射感生的电荷建立, α 是与工艺变量有关的常数,单位是 cm². 在电离辐射条件下,用辐射感生的界面陷阱电荷的变化来代替上式中的固定陷阱电荷 Q_f ,则可将(1)式写为

$$\mu = \frac{\mu_0}{1 + \alpha(\Delta N_{it} + \Delta N_{ot})} \quad (2)$$

从理论上讲,上式能较好地描述辐射感生界面陷阱电荷对沟道载流子迁移率 μ 影响的总体效应,但它无法给出辐射感生界面态电荷增加 ΔN_{it} 和氧化物电荷积累 ΔN_{ot} 分别对迁移率的影响.为此,将(2)式改写为

$$\mu = \frac{\mu_0}{1 + \alpha_{it}\Delta N_{it} + \alpha_{ot}\Delta N_{ot}} \quad (3)$$

上式中, μ_0 和 μ 分别表示辐照前后的沟道载流子迁移率, ΔN_{it} 和 ΔN_{ot} 则分别代表辐照感生的界面态密度增加和氧化物电荷积累.常数 α_{it} 和 α_{ot} 有两个意义,其一是由工艺变量参数决定的匹配系数,这与(1)式中常数 α 的意义相同;其二,它们分别描述了辐照感生界面态电荷和氧化物电荷对迁移率的影响程度.

根据 MOS 晶体管理论,以 NMOSFET 为例,假定辐照感生的氧化物电荷密度 ΔN_{ot} 和界面态密度 ΔN_{it} 对沟道电荷的影响可以表示为

$$Q(y) = -C_{ox}[V_G - V_{th} - V(y)] - q\Delta N_{ot} + q\Delta N_{it}$$

这里, $Q(y)$ 表示反型沟道中总电荷, V_G 是栅电压, V_{th} 是器件阈值电压, $V(y)$ 是沟道电势, C_{ox} 为单位面积的氧化物电容, q 为单位电子的电量.采用逐次沟道近似(gradual channel approximation),则沿沟道的电势提升为^[8]

$$dV_c = \frac{-I_d dy}{W\mu Q(y)} \quad (5)$$

将(3)、(4)式代入上式,并在方程两边同乘以 $\frac{\mu_0}{L}$,整理后沿沟道积分,则可得到辐照后 NMOSFET 的沟道电流方程

$$I_D = \frac{1}{1 + \alpha_{it}\Delta N_{it} + \alpha_{ot}\Delta N_{ot}} \left[\frac{W}{L} \mu_0 C_{ox} (V_G - V_{th} - \frac{V_d}{2}) V_d + \frac{W}{L} \mu_0 q (\Delta N_{ot} - \Delta N_{it}) V_d \right] \quad (6)$$

实际上,方程右边括号内第一项为辐照前器件的 $I-V$ 特性,而第二项为辐照感生的界面陷阱电荷对沟道电流的影响.根据跨导定义

$$g_m = \frac{\partial I_D}{\partial V_G} \Big|_{V_d} = \text{常数} \quad (7)$$

对方程(6)式两边求导,并且假定

$$\Delta N_{it} = \frac{1}{L} \int_0^L \Delta D_{it} dy \quad (8)$$

为沟道平均界面态密度,可得到辐照后 MOSFET 的线性区跨导为

$$g_m = \frac{1}{1 + \alpha_{it}\Delta N_{it} + \alpha_{ot}\Delta N_{ot}} \left(\frac{W}{L} \mu_0 C_{ox} V_d \Big|_{V_d \leq V_{d\text{饱和}}} \right) \quad (9)$$

上式右边括号内为辐照前器件线性区跨导 g_{m0} ,即

$$g_{m0} = \frac{W}{L} \mu_0 C_{ox} V_d \Big|_{V_d \leq V_{d\text{饱和}}} \quad (10)$$

将(10)式代入(9)式,并保持漏极电压 V_d 不变,则可给出电离辐射造成 MOSFET 线性区跨导退化的简单模型

$$\Delta g_m = \left(\frac{\alpha_{it}\Delta N_{it} + \alpha_{ot}\Delta N_{ot}}{1 + \alpha_{it}\Delta N_{it} + \alpha_{ot}\Delta N_{ot}} \right) g_{m0} \quad (11)$$

为了方便与实验比较,引入跨导损伤因子 K ,其定义为 $K = \Delta g_m / g_{m0}$,有

$$K = \frac{\alpha_{it}\Delta N_{it} + \alpha_{ot}\Delta N_{ot}}{1 + \alpha_{it}\Delta N_{it} + \alpha_{ot}\Delta N_{ot}} \quad (12)$$

3 系数 α_{it} 和 α_{ot} 的确定

系数 α_{it} 和 α_{ot} 不仅与器件初始工艺条件(如衬底掺杂浓度等)有关,而且也描述了辐照感生界面陷阱电荷对跨导退化的影响程度.因此,系数 α_{it} 和 α_{ot} 的确定是非常重要的.由于模型中存在两个待定常数,故必须给出两个独立的界面陷阱电荷依赖于跨导退化的函数关系.这里,采用不同辐照栅偏压下 NMOSFET 或 PMOSFET 在某一辐照剂量时的 ΔN_{it} 和 ΔN_{ot} 的值以及对应的损伤因子 K ,代入(12)式来分别计算求得 α_{it} 和 α_{ot} .以 NMOSFET 为例,将辐照栅偏压 0V 和 +10V 器件的跨导损伤因子分别用 $K_{n(0)}$ 和 $K_{n(10)}$ 表示,此时对应的氧化物电荷积累和界面态密度增加分别表示为 $\Delta N_{ot(0)}$ 、 $\Delta N_{it(0)}$ 和 $\Delta N_{ot(10)}$ 、和 $\Delta N_{it(10)}$,则有

$$\begin{cases} K_{n(0)} = \frac{\alpha_{it}\Delta N_{it(0)} + \alpha_{ot}\Delta N_{ot(0)}}{1 + \alpha_{it}\Delta N_{it(0)} + \alpha_{ot}\Delta N_{ot(0)}} \\ K_{n(10)} = \frac{\alpha_{it}\Delta N_{it(10)} + \alpha_{ot}\Delta N_{ot(10)}}{1 + \alpha_{it}\Delta N_{it(10)} + \alpha_{ot}\Delta N_{ot(10)}} \end{cases} \quad (13)$$

求解上述方程组,即可求得 NMOSFET 的系数 α_{it} 和 α_{ot} ,用类似方法也可确定 PMOSFET 的相应系数值.这里给出 3 组器件的计算结果,如表 1 所示.

表 1 系数 α_{it} 和 α_{or} 的计算结果(辐照剂量为 $10^3\text{Gy}(\text{Si})$)

编号	NMOSFET						PMOSFET					
	辐照偏压 (V)	ΔN_{it} ($10^{11}/\text{cm}^2$)	ΔN_{or}	$\Delta g_m/g_{m0}$ K_n	α_{it} (10^{-13}cm^2)	α_{or}	辐照偏压 (V)	ΔN_{it} ($10^{11}/\text{cm}^2$)	ΔN_{or}	$\Delta g_m/g_{m0}$ K_p	α_{it} (10^{-13}cm^2)	α_{or}
1#	0	4.74	2.46	0.173	4.30	0.232	0	1.64	2.95	0.116	4.22	2.10
	10	2.72	5.15	0.114			-10	2.50	1.11	0.114		
2#	0	5.96	2.48	0.194	3.87	0.410	0	2.92	3.89	0.184	5.92	1.34
	10	3.47	6.03	0.137			-10	2.92	2.34	0.164		
3#	0	2.57	1.41	0.109	4.50	0.353	0	0.51	0.86	0.033	4.63	1.21
	10	0.32	0.97	0.017			-10	0.48	1.63	0.040		
平均值	0	4.42	2.12	0.159	4.22 ± 0.5	0.332 ± 0.1	0	1.69	2.57	0.111	4.92 ± 1.0	1.55 ± 0.6
	10	2.17	4.05	0.089			-10	1.92	1.69	0.106		

通过比较 NMOSFET 和 PMOSFET 的系数 α_{it} 和 α_{or} 发现,对于数 α_{it} (表示界面态电荷散射作用)来说,PMOSFET 的系数略大于 NMOSFET,但它们有相近的值,约为 $4.5 \pm 0.5 \times 10^{-13}\text{cm}^2$,这说明界面态电荷的库仑散射作用与沟道类型有弱的依赖关系(对空穴的散射略大于电子);而系数 α_{or} (表示氧化物电荷散射作用)在不同沟道类型时相差近半个量级,这可能意味着氧化物电荷对不同沟道载流子(电子或空穴)的散射作用存在明显差异,即氧化物电荷对空穴的库仑散射要明显大于对电子的作用。

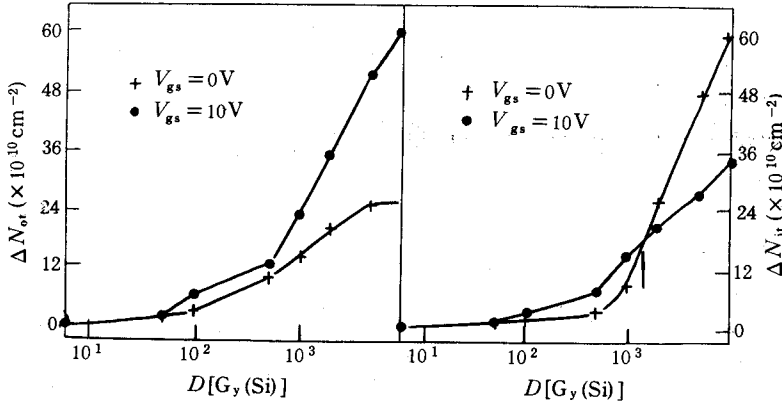
4 模型与试验的比较

4.1 辐照试验

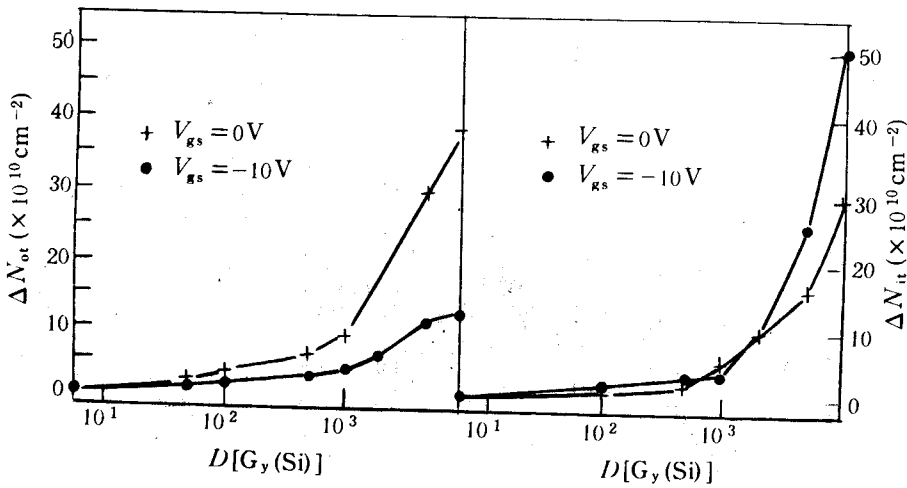
用于辐照试验的样品是在 n 型 Si 衬底上采用常规工艺制备的铝栅 NMOSFET 和 PMOSFET,它们的沟道宽长比均为 $80/10\mu\text{m}$,氧化层厚度都为 84nm. 辐照时器件加有不同的栅偏置电压,以获得不同的氧化物电荷积累 ΔN_{or} 和界面态密度增加 ΔN_{it} .

辐照试验采用 $^{60}\text{Co}\gamma$ 源,辐照剂量率为 $50\text{Gy}(\text{Si})/\text{min}$. 跨导是通过辐照前后的亚阈值 $I-V$ 特性曲线 ($V_d=0.1\text{V}$) 根据其定义计算求得(这里取最大跨导值,即 g_m-V_G 曲线峰值),并同时利用亚阈值测量技术得到辐射感生氧化物电荷积累和界面态密度增加. 图 1 和图 2 给出不同辐照栅偏条件下的辐射感生界面陷阱电荷增加和最大跨导退化分别与累积总剂量的关系.

从图 1 和图 2 的试验结果可以看出,对 NMOSFET,尽管辐照正偏器件的氧化物电荷积累 ΔN_{or} 与辐照零偏器件的界面态密度增加 ΔN_{it} 有非常相近的变化速率,但其跨导的退化却小于零偏器件. 并且也注意到,在总剂量约为 $10^3\text{Gy}(\text{Si})$ 时,不同栅偏置器件的界面态密度增加的程度发生变化,此时,其跨导退化速率也发生了类似的变化(图中箭头处). 由此可见,NMOSFET 的跨导退化主要受辐照感生 Si/SiO₂ 界面态密度增加所支配,氧化物电荷对其影响很小. 对于 PMOSFET 来说,它的跨导退化较快,尽管与相应偏置条件的 NMOSFET 比较其界面态电荷增长要小,但跨导退化程度却接近甚至大于 NMOSFET. 也就是说,这里

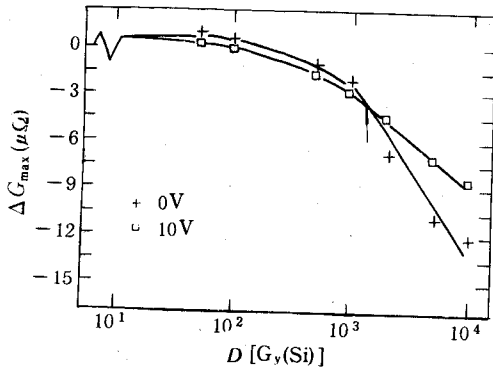


(a) NMOSFET

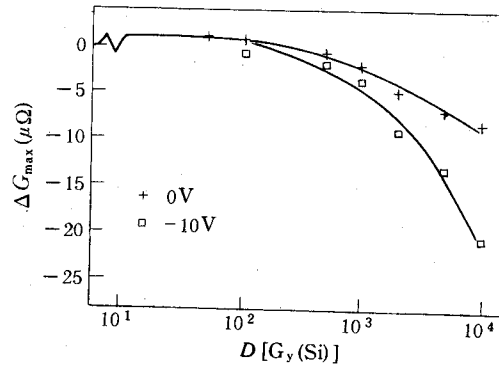


(b) PMOSFET

图1 MOSFET 辐照感生氧化物电荷积累 ΔN_{ot} 和界面态密度增加 ΔN_{it} 与累积剂量 D 之间的关系



(a) NMOSFET



(b) PMOSFET

图2 MOSFET 辐照感生最大跨导退化与累积剂量的关系

仅考虑界面态密度增加是不够的. 因此, PMOSFET 的跨导退化不仅与辐照感生界面态增加有关, 而且也必须考虑氧化物电荷散射的影响.

4.2 模型与试验结果比较

为了检验模型的正确性, 这里也同时给出早期由 Galloway 等人提出的跨导退化仅依赖于界面态电荷的模型^[9], 即

$$K = \frac{\alpha_{it}\Delta N_{it}}{1 + \alpha_{it}\Delta N_{it}} \quad (14)$$

以及假定仅依赖于氧化物电荷, 即

$$K = \frac{\alpha_{ot}\Delta N_{ot}}{1 + \alpha_{ot}\Delta N_{ot}} \quad (15)$$

两种情况下的比较结果. 图 3(a)和(b)分别表明 NMOSFET 和 PMOSFET 的跨导退化的试验结果与各种假定模型比较情况.

可以看出, 无论是 NMOSFET 还是 PMOSFET, 其跨导退化都与仅依赖于氧化物电荷积累的模型(图中曲线 2)相差甚大. 对于 NMOSFET 图 3(a), 试验结果与(12)式或(14)式

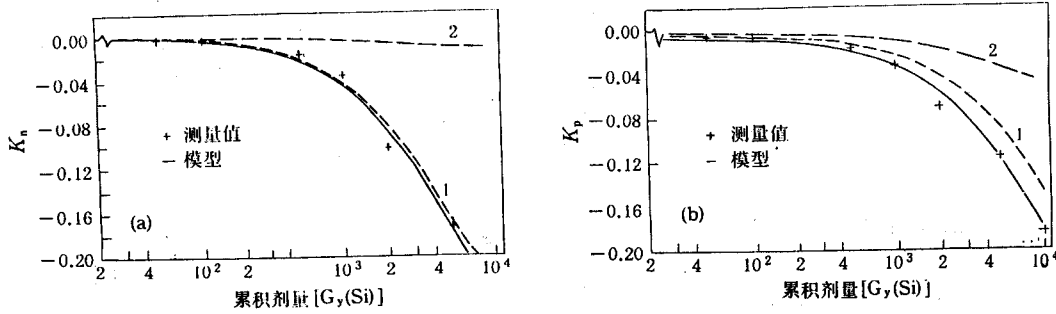


图 3 MOSFET 辐照感生跨导退化模型与试验数据比较, 其中

$$\text{曲线 1: } K = \frac{\alpha_{it}\Delta N_{it}}{1 + \alpha_{it}\Delta N_{it}}; \text{曲线 2: } K = \frac{\alpha_{ot}\Delta N_{ot}}{1 + \alpha_{ot}\Delta N_{ot}}$$

给出的模型(图 3(a)中曲线 1)都符合的很好, 这说明模型(12)式中 $\alpha_{ot}\Delta N_{ot}$ 一项可以忽略, 换句话说, 辐射感生氧化物电荷积累对 NMOSFET 的跨导退化影响很小. 由此可见, Galloway^[9]和 Sexton 等^[10]给出的模型(14)式是模型(12)式中忽略氧化物电荷影响后的一种近似, 由于 $\alpha_{ot} \ll \alpha_{it}$, 故这种近似仍能较好的描述辐射引起 NMOSFET 跨导退化的机制, 4.1 节辐照试验结果也证明了这一点. 但对 PMOSFET 来说, 试验数据仅符合(12)式的模型(图 3(b)中实线), 而与其它两种假定模型(曲线 1 和曲线 2)都相差较大. 这就是说, 仅在同时考虑辐射感生界面态电荷和氧化物电荷两者时, 能够很好地描述辐照引起 PMOSFET 的跨导退化特性, 而其它两种模型都将会引入较大误差.

为了更进一步说明两种界面陷阱电荷对于 MOSFET 跨导退化所起的作用, 利用系数 α_{ot} 和 α_{it} 的比值求得氧化物电荷积累对不同沟道载流子的散射作用, 对 NMOSFET 有

$$\frac{\alpha_{ot}}{\alpha_{it} + \alpha_{ot}} = \frac{0.332 \times 10^{-13}}{(4.22 + 0.332) \times 10^{-13}} \approx 0.07$$

而对于 PMOSFET, 有

$$\frac{\alpha_{ot}}{\alpha_{ot} + \alpha_{it}} = \frac{1.55 \times 10^{-13}}{(4.92 + 1.55) \times 10^{-13}} \approx 0.24$$

结果表明, 对于 NMOSFET, 辐射感生氧化物电荷积累对跨导退化的影响小于总界面陷阱电荷散射作用的约 10%, 而对 PMOSFET 来说, 这种影响将增加到约占总散射作用的 20%—25%. 因此, 综上所述也可将(12)式给出的模型表示为

$$\begin{cases} K_n = \frac{\alpha_{it}\Delta N_{it}}{1 + \alpha_{it}\Delta N_{it}} & \text{(对于 NMOSFET)} \\ K_p = \frac{\alpha_{it}\Delta N_{it} + \alpha_{ot}\Delta N_{ot}}{1 + \alpha_{it}\Delta N_{it} + \alpha_{ot}\Delta N_{ot}} & \text{(对于 PMOSFET)} \end{cases} \quad (16)$$

这里, K_n 和 K_p 分别表示 NMOSFET 和 PMOSFET 的跨导损伤因子.

4.3 讨论

辐射感生的界面陷阱电荷的库仑散射作用导致了 MOSFET 跨导退化已得到模型和试验结果的证实. 由于 Si/SiO₂ 界面态电荷直接位于 Si/SiO₂ 界面, 能最有效地散射, 因此它是电离辐射导致 MOSFET 跨导性能退化的主要原因, 特别是对 NMOSFET 尤其突出, 这与早期 Galloway 和 Dexton 等人的研究结果是一致的. 然而, 我们的试验结果也表明, 要使试验数据更好地适合理论模型, 则必须考虑辐射感生的氧化物电荷的散射作用. 一般来说, 由于氧化物电荷离开 Si/SiO₂ 界面一定的距离(约 1nm—10nm), 使得它对沟道载流子的散射作用大大低于界面态电荷. 但是, 对于 PMOSFET, 由于其沟道载流子(空穴)迁移率较低, 增加了氧化物电荷的散射几率(这从比较系数 α_{it} 和 α_{ot} 可以看出, 在界面陷阱电荷数量相近时, PMOSFET 的散岩作用系数均大于 NMOSFET, 也说明界面陷阱电荷对空穴的散射要大于对电子的散射). 另外, 当氧化物电荷积累较大, 例如对非加固工艺制备的 MOSFET, 或者存在较大的氧化物电荷横向非均匀分布时^[11], 它对跨导性能的影响是不容忽视的.

5 结束语

本文提出的跨导退化模型比早期的模型^[9]能更有效地反映辐射感生氧化物电荷积累和 Si/SiO₂ 界面态密度增加分别对 NMOSFET 和 PMOSFET 跨导性能的影响. 同时, 通过模型与辐照试验结果的比较得到, 界面陷阱电荷对空穴的散射作用要大于对电子的散射. 因此, 对 PMOSFET 来说, 必须同时考虑辐射感生氧化物电荷积累和界面态电荷增长两者对沟道载流子的散射影响. 此外, 用这个模型可以方便地预测 MOSFET 器件线性区特性的变化(如果借助某种测量技术得到辐照感生氧化物电荷积累 ΔN_{ot} 和 Si/SiO₂ 界面态密度增加 ΔN_{it} 的话), 这也为计算机模拟电路的辐照响应提供了一个新的途径.

致谢 感谢本所钴源组在辐照试验中给予的帮助.

参 考 文 献

- [1] Y. C. Cheng and E. A. Sullivan, *J. Appl. Phys.*, 1974, **45**:187.
- [2] R. W. Coen and R. S. Muller, *Solid—State Electron*, 1980, **23**(1):35.
- [3] C. G. Sodini, *Solid—State Electron*, 1982, **25**(9):833.
- [4] G. Baccarini and M. R. Wordeman, *IEEE Trans. Electron Devices*, 1983, **ED—30**(10):1295.
- [5] K. Yamaguchi, *IEEE Trans. Electron Devices*, 1983, **ED—30**(6):658.
- [6] A. Hartstein, *Surface Sci.*, 1976, **58**:178.
- [7] S. C. Sun and J. D. Plummer, *IEEE Trans. Electron Devices*, 1980, **ED—27**(8):1497.
- [8] F. C. Hsu and S. Tam, *IEEE Trans. Electron Devices Letter*, 1984, **EDL—5**:50.
- [9] K. F. Galloway, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1984, **NS—31**(6):1497.
- [10] F. W. Sexton and J. R. Schwank, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1985, **NS—32**(6):3975.
- [11] N. S. Saks and M. G. Ancona, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1987, **NS—34**(6):1348.

Simple Model for Transconductance Degradation by Ionizing Radiation in MOSFETs

Ren Diyuan, Yu Xuefen, Lu Wu, Wang Guobin, Zhang Guoqiong,
Fan Long and Yan Rongliang

(*Xinjiang Institute of Physics, The Chinese Academy of Sciences, Urumqi, 830011*)

Received 26 October 1993, Revised manuscript received 22 February 1994

Abstract A simple model to describe effects of radiation—induced oxide trapped charge and Si/SiO₂ interface state density on the transconductance degradation in MOSFET is presented. The model is compared with measured values, and the mechanism of degradation in different channel types (NMOSFET and PMOSFET) of MOSFET is discussed.

PACC: 7220F, 7340Q, 6180E