

$\gamma$  射线总剂量辐照效应对应变 Si p 型金属氧化物半导体场效应晶体管阈值电压与跨导的影响研究

胡辉勇 刘翔宇 连永昌 张鹤鸣 宋建军 宣荣喜 舒斌

**Study on the influence of  $\gamma$ -ray total dose radiation effect on the threshold voltage and transconductance of the strained Si p-channel metal-oxide-semiconductor field-effect transistor**

Hu Hui-Yong Liu Xiang-Yu Lian Yong-Chang Zhang He-Ming Song Jian-Jun Xuan Rong-Xi Shu Bin

引用信息 Citation: Acta Physica Sinica 63, 236102 (2014) DOI: 10.7498/aps.63.236102

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.236102>

当期内容 View Table of Contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/volumn/home.shtml>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

具有  $\text{polySi}_{1-x}\text{Ge}_x$  栅的应变 SiGe<sub>p</sub> 型金属氧化物半导体场效应晶体管阈值电压漂移模型研究

刘翔宇, 胡辉勇, 张鹤鸣, 宣荣喜, 宋建军, 舒斌, 王斌, 王萌

2014, 63(23): 237302. 全文: [PDF](#) (6644KB)

高 k 栅介质 GeOI 金属氧化物半导体场效应管阈值电压和亚阈斜率模型及其器件结构设计

范敏敏, 徐静平, 刘璐, 白玉蓉, 黄勇

2014, 63(8): 087301. 全文: [PDF](#) (385KB)

总剂量辐照下沟道长度对部分耗尽绝缘体上硅 p 型场效应晶体管电特性的影响

刘红侠, 王志, 卓青青, 王倩琼

2014, 63(1): 016102. 全文: [PDF](#) (406KB)

考虑量子效应的高 k 栅介质 SOI MOSFET 特性研究

曹磊, 刘红侠

2012, 61(24): 247303. 全文: [PDF](#) (384KB)

量子阱 Si/SiGe/Sip 型场效应管阈值电压和沟道空穴面密度模型

李立, 刘红侠, 杨兆年

2012, 61(16): 166101. 全文: [PDF](#) (540KB)

# $\gamma$ 射线总剂量辐照效应对应变Si p型金属氧化物半导体场效应晶体管阈值电压与跨导的影响研究\*

胡辉勇 刘翔宇<sup>†</sup> 连永昌 张鹤鸣 宋建军 宣荣喜 舒斌

(西安电子科技大学微电子学院, 宽禁带半导体材料与器件重点实验室, 西安 710071)

(2014年3月27日收到; 2014年7月3日收到修改稿)

分析了双轴应变Si p型金属氧化物半导体场效应晶体管 (PMOSFET) 在 $\gamma$ 射线辐照下载流子的微观输运过程, 揭示了 $\gamma$ 射线的作用机理及器件电学特性随辐照总剂量的演化规律, 建立了总剂量辐照条件下的双轴应变Si PMOSFET 阈值电压与跨导等电学特性模型, 并对其进行了模拟仿真. 由仿真结果可知, 阈值电压的绝对值会随着辐照总剂量的积累而增加, 辐照总剂量较低时阈值电压的变化与总剂量基本呈线性关系, 高剂量时趋于饱和; 辐照产生的陷阱电荷增加了沟道区载流子之间的碰撞概率, 导致了沟道载流子迁移率的退化以及跨导的降低. 在此基础上, 进行实验验证, 测试结果表明实验数据与仿真结果基本相符, 为双轴应变Si PMOSFET 辐照可靠性的研究和应变集成电路的应用与推广提供了理论依据和实践基础.

**关键词:** 应变Si p型金属氧化物半导体场效应晶体管, 总剂量辐照, 阈值电压, 跨导

**PACS:** 61.80.Ed, 73.50.Dn, 85.30.TV

**DOI:** 10.7498/aps.63.236102

## 1 引言

随着微电子技术的发展, 以互补型金属氧化物半导体技术为主导的集成电路技术已经进入了纳米尺度, 使基于“等比例缩小”原则且一直遵循着“摩尔定理”发展的集成电路技术受到了极大的挑战, 成为制约集成电路发展的瓶颈问题. 而应变Si材料具有载流子迁移率高, 带隙可调, 与传统的Si工艺兼容等优点, 成为延续集成电路按“摩尔定律”发展的有效途径和研究热点. 随着应变技术的快速发展, 应变集成器件及电路在极端条件尤其是辐照条件下的应用将会越来越多, 因此辐照特性及加固技术是其应用研究的一个重点<sup>[1]</sup>. 本文重点开展不同总剂量 $\gamma$ 射线辐照对双轴应变Si p型金属氧化物半导体场效应晶体管 (PMOSFET) 电学特性影响的研究<sup>[2]</sup>, 建立其电学特性模型, 并通过实验进行验证. 为研究双轴应变Si PMOSFET 辐照可靠性提供理论和实践基础<sup>[3]</sup>.

## 2 模型的建立

本文采用西安电子科技大学与中电24所联合设计并制备的双轴应变Si PMOSFET 作为研究对象, 并采用西北核物理研究院的钴源对应变PMOSFET 器件进行了总剂量辐照实验, 重点研究 $\gamma$ 射线辐照效应对其电学特性的影响. 器件结构如图1所示, 其中, 栅氧化层厚度 $T_{ox} = 12$  nm, 沟道长度 $L = 2$   $\mu$ m, 沟道宽度 $W = 0.5$   $\mu$ m. 图1中, 器件从下往上各层结构分别为: Si衬底上生长的组分渐变SiGe层, Ge的组分为0—0.25, 厚度为2  $\mu$ m, 掺杂浓度 $N_b = 1.5 \times 10^{16}$   $\text{cm}^{-3}$ ; 固定组分弛豫SiGe层, Ge组分为0.25, 厚度为300 nm, 掺杂浓度 $N_b = 1.5 \times 10^{16}$   $\text{cm}^{-3}$ ; 应变Si层, 厚度为10 nm, 掺杂浓度 $N_{ch} = 1 \times 10^{16}$   $\text{cm}^{-3}$ . 器件中采用 $N_{ch} < N_b$ 的倒掺杂, 以减少沟道离化杂质散射, 另外虚拟衬底的掺杂浓度较高, 耗尽层只延伸到弛豫SiGe层. 图2为PMOSFET的显微照片, 该器件

\* 教育部博士点基金 (批准号: JY0300122503) 和中央高等学校基本科研基金 (批准号: K5051225014, K5051225004) 资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯作者. E-mail: 18537831656@163.com

采用DIP16封装形式,其中金属引线1,2,3和4分别连接PMOSFET的源极、漏极、栅极和衬底.

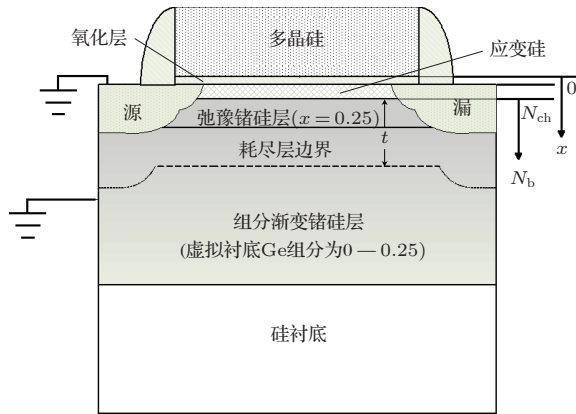


图1 双轴应变Si PMOSFET器件结构示意图

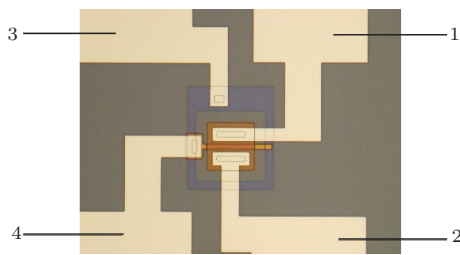


图2 双轴应变Si PMOSFET芯片显微照片

### 2.1 模型参数定义

$p$ 为氧化层中的空穴浓度;  $t$ 为辐照时间;  $\kappa_g$ 为单位体积氧化层在单位计量辐照条件下产生的电子空穴对;  $D'$ 为辐照剂量率;  $f_y$ 为与氧化层电场相关的辐照产生的电子空穴对逃脱初次复合的概率;  $E$ 为电场强度;  $f_p$ 为氧化层中空穴通量;  $x$ 为栅氧界面到衬底的距离,其方向为栅氧界面指向衬底;  $p_t$ 为氧化层空穴陷阱俘获的空穴浓度;  $N_t$ 为氧化层空穴陷阱浓度;  $\sigma_{pt}$ 氧化层陷阱的空穴俘获截面;  $\tau_t$ 为陷阱空穴的退火时间;  $H^+$ 为氧化层释放的质子浓度;  $N_{DH}$ 为氧化层中含氢陷阱浓度;  $\sigma_{DH}$ 为氧化层中含氢陷阱对空穴的俘获截面;  $f_{H^+}$ 为氧化层中的质子通量;  $N_{Si-H}$ 为Si/SiO<sub>2</sub>界面处被氢钝化的Si悬挂键密度;  $N_{it}$ 为Si/SiO<sub>2</sub>界面处辐照引起的界面态密度;  $\sigma_{it}$ 为Si/SiO<sub>2</sub>界面处被氢钝化的Si悬挂键的质子俘获截面;  $\tau_{it}$ 为Si/SiO<sub>2</sub>界面陷阱电荷的退火时间<sup>[4,5]</sup>;  $\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3$ 分别为栅氧化层、应变Si层和SiGe耗尽层中的电势;  $q$ 为电子电量;  $N_b$ 和  $N_{ch}$ 分别为SiGe层和应变

Si层的掺杂浓度;  $t_{ox}, t_{SSi}$ 和  $t_d$ 分别为SiO<sub>2</sub>栅氧化层、应变Si层和耗尽层厚度;  $\epsilon_{SiGe}$ 和  $\epsilon_{SSi}$ 分别为弛豫SiGe和应变Si的相对介电常数;  $\epsilon_0$ 为真空介电常数;  $\chi_{SSi}$ 为应变Si的亲合势;  $N_v$ 为应变Si的价带有效状态密度;  $E_{gSSi}$ 为应变Si的禁带宽度;  $Q_{ox}$ 为栅氧化层中的初始电荷面密度;  $C_{ox}$ 为单位面积栅氧化层电容.

### 2.2 模型的建立

基于图1所示结构,当MOSFET在 $\gamma$ 射线辐照条件下, $\gamma$ 射线会在氧化层中激发产生电子空穴对<sup>[3]</sup>.由于在氧化层中电子迁移率远大于空穴迁移率<sup>[4]</sup>,故辐照产生的空穴逃脱初始复合后在氧化层中移动缓慢,会被氧化层中的空穴陷阱俘获形成氧化层固定电荷.而辐照产生的电子逃脱初始复合后在氧化层中移动较快,可以很快迁移出氧化层.除此之外,空穴也会在氧化层中激发产生质子,质子会向Si/SiO<sub>2</sub>界面处移动.由于在氧化生长栅氧化层的过程中会有少量杂质水蒸气,在界面处会形成Si悬挂键,所以激发产生的质子会与界面处的Si悬挂键结合形成界面陷阱,从而影响界面电荷.辐照过程中电子和空穴的输运如图3所示<sup>[5]</sup>.

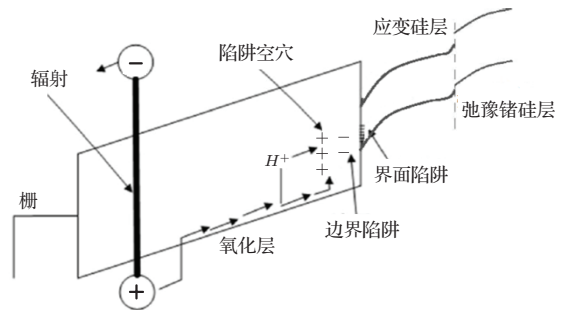


图3 双轴应变Si PMOSFET辐照产生的载流子输运过程

如图3所示的氧化层载流子输运过程中,假设辐照在氧化层中均匀产生电子空穴对,并且电子空穴对逃脱初始复合,由于电子和空穴的迁移率不同,只考虑空穴的迁移,同时不考虑电荷在界面处的空间电荷效应.在氧化层中可以用一维连续性方程来描述空穴的产生过程、空穴和陷阱的作用过程、质子产生过程以及质子和界面钝化Si悬挂键的作用过程<sup>[6]</sup>:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \kappa_g f_y D' - \frac{\partial f_p}{\partial x}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial p_t}{\partial t} = (N_t - p_t)\sigma_{pt}f_p - \frac{p_t}{\tau_t}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial H^+}{\partial t} = N_{DH}\sigma_{DH}f_p - \frac{\partial f_{H^+}}{\partial x}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial N_{it}}{\partial t} = (N_{Si-H} - N_{it})\sigma_{it}f_{H^+} - \frac{N_{it}}{\tau_{it}}, \quad (4)$$

式中,  $f_y$  的经验公式<sup>[7-9]</sup>为  $f_y(E) = [0.27/(E + 0.084) + 1]^{-1}$ .

对于(1)式, 当时间趋近于无限长时, PMOS-FET 栅氧化层中由于辐照而产生的空穴浓度会达到平衡, 不会一直增大. 故有

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \kappa_g f_y D' - \frac{\partial f_p}{\partial x} = 0 \quad (t \rightarrow \infty), \quad (5)$$

$$f_p = \kappa_g f_y D' x + c, \quad (6)$$

式中  $c$  为解微分方程所得不定常数.

由于栅极电场的作用, 空穴在产生后被“扫向”沟道方向, 且由于空穴移动速度缓慢, 会被氧化层中的空穴陷阱俘获形成氧化层固定电荷, 所以在栅极表面空穴密度为零. 故有

$$f_p = \kappa_g f_y D' x + c = 0 \quad (x = 0), \quad (7)$$

$$f_p = \kappa_g f_y D' x. \quad (8)$$

联立(1), (2), (8)式, 可解得

$$p_t = N_t(1 - e^{-\sigma_{pt}\kappa_g f_y D' x t}), \quad (9)$$

$$f_p = \kappa_g f_y D' x. \quad (10)$$

忽略掉质子对氧化层中正电荷的贡献, 辐射产生的正电荷的浓度为

$$N_{ot} = \frac{1}{t_{ox}} \int_0^{t_{ox}} p_t x dx$$

$$= N_t \left[ \frac{1}{2} t_{ox} + \frac{e^{-\sigma_{pt}\kappa_g f_y t_{ox} D' t}}{\sigma_{pt}\kappa_g f_y D' t} + \frac{(e^{-\sigma_{pt}\kappa_g f_y t_{ox} D' t} - 1)}{(\sigma_{pt}\kappa_g f_y D' t)^2 t_{ox}} \right]. \quad (11)$$

对于(3)式, 当时间趋近于无限长时, PMOS-FET 栅氧化层中由于空穴引起的氧化层释放的质子浓度会达到平衡, 不会一直增大. 故有

$$\begin{aligned} \frac{\partial H^+}{\partial t} &= N_{DH}\sigma_{DH}f_p - \frac{\partial f_{H^+}}{\partial x} \\ &= 0 \quad (t \rightarrow \infty), \end{aligned} \quad (12)$$

$$f_{H^+} = N_{DH}\sigma_{DH}f_p x + d, \quad (13)$$

式中  $d$  为解微分方程所得不定常数.

由于栅极电场的作用, 空穴在产生后被“扫向”沟道方向, 空穴无法达到栅氧化层表面, 所以在栅氧化层表面由空穴引起的氧化层释放的质子的通量为零. 故有

$$f_{H^+} = N_{DH}\sigma_{DH}f_p x + d = 0 \quad (x = 0), \quad (14)$$

$$f_{H^+} = N_{DH}\sigma_{DH}f_p x. \quad (15)$$

联立(3), (4)和(15)式, 同时认为栅氧边界处的质子通量为零, 解得

$$N_{it} = N_{Si-H}(1 - e^{-\frac{1}{2}\sigma_{DH}\sigma_{it}N_{DH}\kappa_g f_y t_{ox}^2 D' t}), \quad (16)$$

式中总剂量  $D = D' t$ .

另外对器件的各层分别列泊松方程有

$$\begin{cases} \frac{d^2\Phi_1(x)}{dx^2} = 0 & (0 \leq x < t_{ox}), \\ \frac{d^2\Phi_2(x)}{dx^2} = -\frac{qN_{ch}}{\epsilon_0\epsilon_{SSi}} & (t_{ox} \leq x < t_{ox} + t_{SSi}), \\ \frac{d^2\Phi_3(x)}{dx^2} = -\frac{qN_b}{\epsilon_0\epsilon_{SiGe}} & (t_{ox} + t_{SSi} \leq x < t_{ox} + t_{SSi} + t_d). \end{cases} \quad (17)$$

根据电位移连续性原理和电势连续性原理得到(13)式的边界条件:

$$\begin{cases} \left. \epsilon_0\epsilon_{SSi} \frac{d\Phi_2(x)}{dx} \right|_{x=t_{ox}} = \epsilon_0\epsilon_{ox} \left. \frac{d\Phi_1(x)}{dx} \right|_{x=t_{ox}}, & \Phi_2(t_{ox}) = \Phi_1(t_{ox}), \\ \left. \epsilon_0\epsilon_{SSi} \frac{d\Phi_2(x)}{dx} \right|_{x=t_{ox}+t_{SSi}} = \epsilon_0\epsilon_{SiGe} \left. \frac{d\Phi_3(x)}{dx} \right|_{x=t_{ox}+t_{SSi}}, & \Phi_2(t_{ox} + t_{SSi}) = \Phi_3(t_{ox} + t_{SSi}), \\ \left. \frac{d\Phi_3(x)}{dx} \right|_{x=t_{ox}+t_{SSi}+t_d} = 0, & \Phi_3(t_{ox} + t_{SSi} + t_d) = \Phi_{sub} = 0, \end{cases} \quad (18)$$

(13)和(14)式联立解得

$$\left\{ \begin{aligned} \Phi_1(x) &= \left( \frac{qN_{ch}t_{SSi}}{\varepsilon_0\varepsilon_{ox}} + \frac{qN_b t_d}{\varepsilon_0\varepsilon_{ox}} \right) x - \frac{qN_{ch}t_{SSi}^2}{2\varepsilon_0\varepsilon_{SSi}} - \frac{qN_b t_{SSi}t_d}{\varepsilon_0\varepsilon_{SSi}} - \frac{qN_b t_d^2}{2\varepsilon_0\varepsilon_{SiGe}} - \frac{q(N_{ch}t_{SSi} + N_b t_d)t_{ox}}{\varepsilon_0\varepsilon_{ox}} \\ &\quad (0 \leq x < t_{ox}), \\ \Phi_2(x) &= -\frac{qN_{ch}x^2}{2\varepsilon_0\varepsilon_{SSi}} + \left[ \frac{qN_{ch}(t_{ox} + t_{SSi})}{\varepsilon_0\varepsilon_{SSi}} + \frac{qN_b t_d}{\varepsilon_0\varepsilon_{SSi}} \right] x - \frac{qN_{ch}(t_{ox} + t_{SSi})^2}{2\varepsilon_0\varepsilon_{SSi}} - \frac{qN_b t_d(t_{ox} + t_{SSi})}{\varepsilon_0\varepsilon_{SSi}} \\ &\quad - \frac{qN_b t_d^2}{2\varepsilon_0\varepsilon_{SiGe}} \quad (t_{ox} \leq x < t_{ox} + t_{SSi}), \\ \Phi_3(x) &= -\frac{qN_b x^2}{2\varepsilon_0\varepsilon_{SiGe}} + \frac{qN_b(t_{ox} + t_{SSi} + t_d)x}{\varepsilon_0\varepsilon_{SiGe}} - \frac{qN_b(t_{ox} + t_{SSi} + t_d)^2}{2\varepsilon_0\varepsilon_{SiGe}} \\ &\quad (t_{ox} + t_{SSi} \leq x < t_{ox} + t_{SSi} + t_d). \end{aligned} \right. \quad (19)$$

由(15)式得Si/SiO<sub>2</sub>界面处的电势为

$$\begin{aligned} \Phi_s &= \Phi_2(t_{ox}) \\ &= -\frac{qN_{ch}t_{SSi}^2}{2\varepsilon_0\varepsilon_{SSi}} - \frac{qN_b t_d t_{SSi}}{\varepsilon_0\varepsilon_{SSi}} - \frac{qN_b t_d^2}{2\varepsilon_0\varepsilon_{SiGe}}. \end{aligned} \quad (20)$$

将(16)式代入Φ<sub>1</sub>得

$$\begin{aligned} \Phi_1(x) &= \left( \frac{qN_{ch}t_{SSi}}{\varepsilon_0\varepsilon_{ox}} + \frac{qN_b t_d}{\varepsilon_0\varepsilon_{ox}} \right) x + \Phi_s \\ &\quad - \frac{q(N_{ch}t_{SSi} + N_b t_d)t_{ox}}{\varepsilon_0\varepsilon_{ox}} \\ &\quad (0 \leq x < t_{ox}). \end{aligned} \quad (21)$$

由(21)式得到栅氧化层上表面压降:

$$\begin{aligned} V_G &= \Phi_1(0) + V_{FB} \\ &= \Phi_s - \frac{q(N_{ch}t_{SSi} + N_b t_d)t_{ox}}{\varepsilon_0\varepsilon_{ox}} + V_{FB}, \end{aligned} \quad (22)$$

式中V<sub>FB</sub>为平带电压. 考虑辐照在氧化层中产生正电荷, 所以平带电压可表示为

$$V_{FB} = \frac{(\phi_{Si} - \phi_{SSi})}{q} + \frac{(Q_{0x} - N_{ot} - N_{it})}{C_{ox}}, \quad (23)$$

式中 $\phi_{SSi} = \chi_{SSi} + \left( E_{gSSi} - kT \ln \frac{N_v}{N_{ch}} \right)$ . 当应变Si沟道开始强反型时, 器件导通, 此时Si/SiO<sub>2</sub>界面处的电势 $\Phi_s = 2\Phi_f$ , 经推导得到弛豫SiGe和应变Si反型时的表面电势为<sup>[10]</sup>

$$\begin{aligned} \Phi_s &= -\frac{kT}{q} \left( \ln \frac{N_{ch}}{n_{i,SSi}} + \ln \frac{N_b}{n_{i,SiGe}} \right) \\ &\quad + \frac{\Delta E_c + \Delta E_v}{2q}, \end{aligned} \quad (24)$$

耗尽层宽度为

$$\begin{aligned} t_d &= -\frac{t_{SSi}\varepsilon_{SiGe}}{\varepsilon_{SSi}} + \left[ \left( \frac{t_{SSi}\varepsilon_{SiGe}}{\varepsilon_{SSi}} \right)^2 \right. \\ &\quad \left. - \frac{N_{ch}t_{SSi}^2\varepsilon_{SiGe}}{N_b\varepsilon_{SSi}} - \frac{2\varepsilon_0\varepsilon_{SiGe}\Phi_s}{qN_b} \right]^{0.5}. \end{aligned} \quad (25)$$

由上面的推导可知, 阈值电压的表达式为

$$\begin{aligned} V_{th} &= \Phi_s - \frac{q(N_{ch}t_{SSi} + N_b t_d)t_{ox}}{\varepsilon_0\varepsilon_{ox}} + V_{FB} \\ &= \Phi_s - \frac{q(N_{ch}t_{SSi} + N_b t_d)t_{ox}}{\varepsilon_0\varepsilon_{ox}} + \frac{(\phi_{Si} - \phi_{SSi})}{q} \\ &\quad + \frac{(Q_{0x} - N_{ot} - N_{it})}{C_{ox}}. \end{aligned} \quad (26)$$

研究已经表明, 总剂量辐照在栅氧与沟道界面处产生的界面态可以与沟道的载流子相互作用, 使器件的迁移率退化进而导致跨导下降<sup>[11]</sup>.

对于PMOSFET而言, 在线性区, 漏端电流可表示为

$$\begin{aligned} I_{ds} &= \mu_p C_{ox} \frac{W}{L} (V_{gs} - V_{th}) V_{ds} \\ &= \mu_p C_{ox} \frac{W}{L} \left[ V_{gs} - \Phi_s - \frac{q(N_{ch}t_{SSi} + N_b t_d)t_{ox}}{\varepsilon_0\varepsilon_{ox}} \right. \\ &\quad \left. + \frac{(\phi_{Si} - \phi_{SSi})}{q} \right. \\ &\quad \left. + \frac{(Q_{0x} - N_{ot} - N_{it})}{C_{ox}} \right] V_{ds}, \end{aligned} \quad (27)$$

式中,  $\mu_p$ 为空穴迁移率,  $V_{gs}$ 为栅源电压,  $V_{th}$ 为阈值电压,  $V_{ds}$ 为漏源电压, 跨导可由(27)式推导出:

$$g_m \equiv \frac{\partial I_{ds}}{\partial V_{gs}} = \mu_p C_{ox} \frac{W}{L} V_{ds}. \quad (28)$$

从(24)式可以看出, 决定 $g_m$ 的最主要的参数是迁移率. 早期的研究表明, 辐照引起的MOSFET的迁移率退化主要是由于栅氧和沟道区界面附近的界面态导致的, 而栅氧中的陷阱电荷的影响可以忽略不计<sup>[12]</sup>. 总剂量辐照对迁移率的影响由下式给出:

$$\begin{aligned} \frac{\mu}{\mu_0} &= \frac{1}{1 + \alpha_{it} N_{it}} \\ &= 1/[1 + \alpha_{it} N_{Si-H}] \end{aligned}$$



$$\times (1 - e^{-\frac{1}{2}\sigma_{DH}\sigma_{it}N_{DH}\kappa_g f_y t_{ox}^2 D^t}), \quad (29)$$

式中,  $\mu$  为辐照后载流子的有效迁移率,  $\mu_0$  为辐照前载流子的迁移率,  $\alpha_{it}$  是与界面态密度有关的经验常数 [13,14].

### 3 仿真分析与实验验证

#### 3.1 总剂量辐照的阈值电压漂移效应

对上面建立的辐照条件下的阈值电压模型进行 MATLAB 仿真得出阈值电压与 Ge 组分、辐照总剂量和栅氧化层厚度的关系. 仿真中用到的部分参数如表 1 所列 [4,15,16], 仿真得到的结果如图 4 所示.

辐照时偏置条件为: 栅极电压  $V_G = -5$  V, 漏

极电压  $V_D$  与源极电压  $V_S$  相等,  $V_D = V_S = 0$  V. 测试时所加栅极电压  $V_G = 0-5$  V, 扫描电压  $V_{step} = -50$  mV,  $V_D = -3$  V,  $V_S = 0$  V, 沟道电流  $I_{ds}$  限流为 10 mA. 测试采用现场测试, 在 30 min 之内完成. 总共 6 个样品, 分两次测试. 测试点为 0 kGy (Si), 0.6 kGy (Si), 1 kGy (Si), 1.5 kGy (Si), 2 kGy (Si), 3 kGy (Si), 5 kGy (Si), 辐照剂量率为 0.5 Gy/s (Si), Si 中的辐照剂量率与栅氧化物中的辐照剂量率有如下关系: 1 Gy (Si) = 0.58 Gy (SiO<sub>2</sub>).

在不同总剂量  $\gamma$  射线辐照下, 应变 Si PMOS-FET 阈值电压  $V_{th}$  随吸收剂量的变化关系如表 2 所列. 通过表 2 所列的数据可以看出, 辐照后阈值电压的绝对值变大, 并且随着辐照总剂量的增加, 阈值电压漂移的量增加.

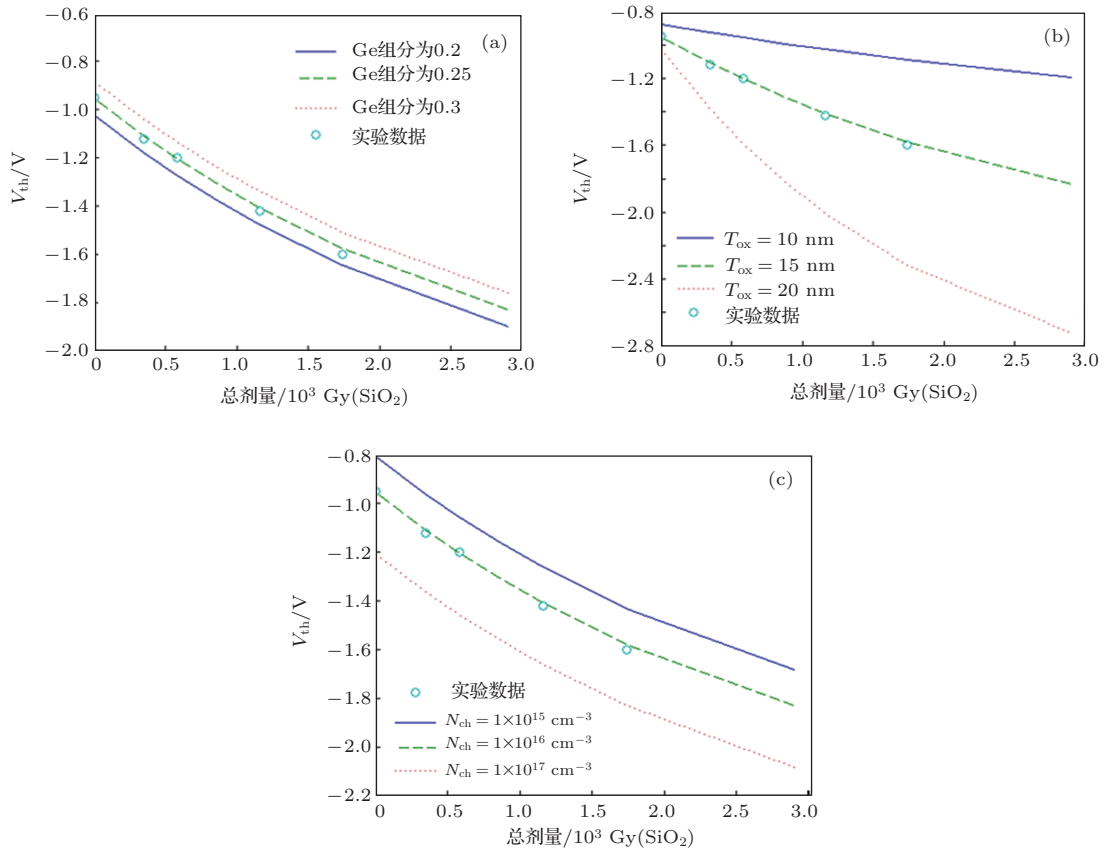


图 4 不同条件下应变 PMOSFET 阈值电压随辐照总剂量的变化 (a) 不同 Ge 组分下阈值电压 -总剂量关系; (b) 不同栅氧厚度下阈值电压 -总剂量关系; (c) 不同沟道掺杂下阈值电压 -总剂量关系

表 1 仿真所用的部分参数表 ( $x$  为 Ge 组分)

参数	取值	参数	取值	参数	取值
$\epsilon_{ox}$	3.9	$E_{gSSi}$	$1.08 - 0.58x$	$N_{ch}/cm^{-3}$	$1 \times 10^{16}$
$\chi_{SSi}$	$4.05 + 0.58x$	$E_{gSiGe}$	$1.08 - 0.7289x$	$T_{ox}/nm$	15
$\Delta E_v$	$x(0.74 - 0.53x)$	$\epsilon_{SiGe}$	$11.9 + 4.1x$	Ge	0.25
$\Delta E_c$	$0.63x$	$\kappa_g/cm^{-3} \cdot Gy^{-1}(SiO_2)$	$8.1 \times 10^{10}$	$N_b/cm^{-3}$	$3 \times 10^{16}$
$Q_{0x}/cm^2$	$0.4 \times 10^{11}$	$\sigma_{pt}/cm^2$	$4.0 \times 10^{13}$	$T_{SSi}/nm$	20

表2 在不同吸收剂量下应变 Si PMOSFET 的阈值电压  $V_{th}$

	吸收剂量/kGy (Si)						
	0	0.6	1	1.5	2	3	5
$V_{th}/V$	-0.95	-1.12	-1.2	-1.27	-1.42	-1.6	-1.9

将实验测得的不同总剂量下的阈值电压值与理论仿真结果的比较结果如图4所示。

由图4(a)可以看出, Ge组分对阈值电压的影响较小, 当Ge组分为0.25时仿真曲线和实验数据基本一致; 由图4(b)可以看出, 氧化层厚度对阈值电压的影响很大, 当 $T_{ox} = 15$  nm时仿真曲线和实验数据基本一致; 由图4(c)可以看出, 沟道掺杂浓度对阈值电压的影响较大, 当 $N_{ch} = 1 \times 10^{16}$  cm<sup>-3</sup>时仿真曲线和实验数据基本一致. 在不同的总剂量下Ge组分与沟道掺杂浓度对阈值电压的影响基本一致, 而栅氧化层厚度对阈值的影响呈现出 inconsistent 的特点, 即高剂量下栅氧化层厚度对阈值的影响比低剂量下要大, 沟道掺杂浓度对阈值的影响相对较大, 而且影响是非线性的。

### 3.2 总剂量辐照的载流子迁移率退化效应

在 $\gamma$ 射线辐照下, 器件的跨导与栅电压的关系如图5所示。

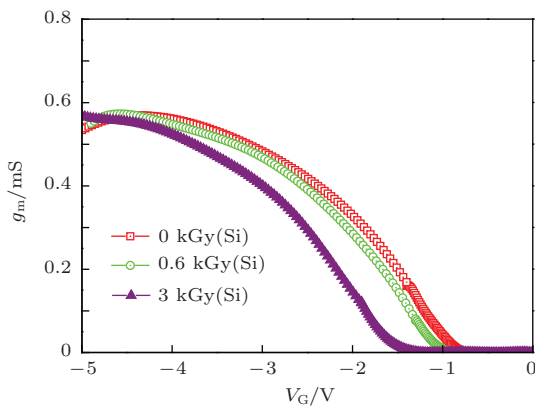


图5  $V_{ds} = -3$  V时, 不同总剂量辐照下应变 Si PMOSFET 的跨导

本文以未辐照跨导为基准, 作出 $g_{m0}/g_m$ , 其中,  $g_{m0}$ 为未辐照时的归一化跨导,  $g_m$ 为不同剂量率辐照后的归一化跨导. 图6为辐照剂量为0.6 kGy(Si), 1 kGy(Si)时的归一化跨导退化情况. 对上面建立的辐照条件下的载流子迁移率退化模型进行MATLAB仿真. (29)式中, 取经验常数 $\alpha_{it}$ 为<sup>[17]</sup> $2 \times 10^{-13}$ , 仿真结果如图7所示。

由图6和图7可知, 由于辐照产生的陷阱电荷增加了沟道区载流子之间的碰撞概率, 导致了沟道载流子迁移率的退化以及跨导的降低, 进而会使PMOSFET的归一化迁移率下降, 且成反比例关系. 仿真曲线和实验数据基本一致, 从而证明了经验常数 $\alpha_{it}$ 与归一化迁移率的退化模型的正确性。

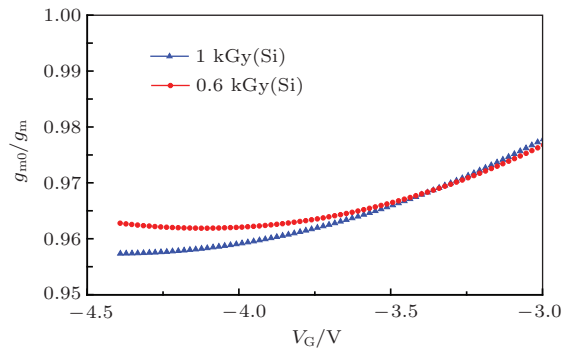


图6 辐照剂量为0.6 kGy(Si), 1 kGy(Si)时的归一化跨导退化情况

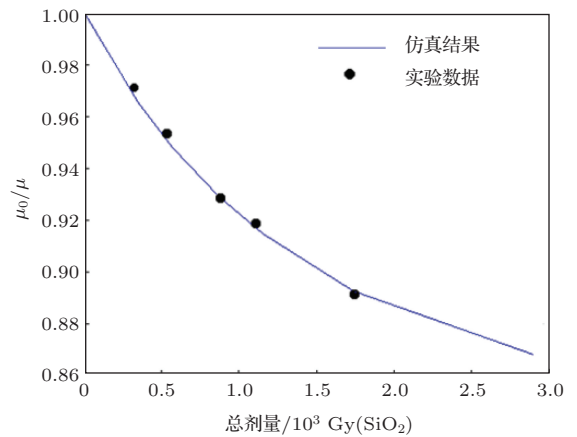


图7 应变 Si PMOSFET 归一化迁移率随辐照总剂量的变化

## 4 结 论

本文通过分析在 $\gamma$ 射线辐照下双轴应变 Si PMOSFET 载流子的输运过程, 建立了总剂量辐照条件下的双轴应变 Si PMOSFET 阈值电压与跨导的电学特性模型, 并通过MATLAB软件对所建立的模型进行了仿真. 在此基础上, 使用西安电子科技

大学设计并制造的器件进行了实验验证, 仿真结果与实验数据符合得很好. 由仿真结果与实验数据可以得出双轴应变 Si PMOSFET 阈值电压漂移与辐照总剂量的关系: 在辐照总剂量较低时两者呈正比例关系, 随着辐照剂量的增加, 逐渐偏离正比例关系并趋于饱和; 同时辐照产生的陷阱电荷增加了沟道区载流子之间的碰撞概率, 导致了沟道载流子迁移率的退化以及跨导的降低. 本文结果对于今后应变集成电路在辐照条件下的应用提供了理论与实践基础.

### 参考文献

- [1] Huang R, Zhang G Y, Li Y X, Zhang X 2005 *SOI CMOS Technologies and Applications* (Beijing: Science Press) p3 (in Chinese) [黄如, 张国艳, 李映雪, 张兴 2005 SOI CMOS 技术及其应用 (北京: 科学出版社) 第 3 页]
- [2] Xue S B, Huang R, Huang D T, Wang S H, Tan F, Wang J, An X, Zhang X 2010 *Chin. Phys. B* **19** 117307
- [3] Mou W B, Xu X 2005 *High Power Laser Particle Beams* **17** 309 (in Chinese) [牟维兵, 徐曦 2005 强激光与粒子束 **17** 309]
- [4] Yan S A, Tang M H, Zhao W, Guo H X, Zhang W L, Xu X Y, Wang X D, Ding H, Chen J W, Li Z, Zhou Y C 2014 *Chin. Phys. B* **23** 046104
- [5] Hjalmarson H P, Pease R L, Witczak S C, Shaneyfelt M R, Schwank J R, Edwards A H, Hembree C E, Mattsson T R 2003 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **50** 1901
- [6] Rashkeev S N, Cirba C R, Fleetwood D M, Schrimpf R D, Witczak S C, Michez A, Pantelides S T 2002 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **49** 2650
- [7] Graves R J, Cirba C R, Schrimpf R D, Milanowski R J, Michez A, Fleetwood D M, Witczak S C, Saigne F 1998 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **45** 2352
- [8] Liu S T, Anthony D, Heikkila W, Hughes H 2004 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **51** 3475
- [9] Benedetto J M, Boesch Jr H E 1986 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **33** 1317
- [10] Ning B X, Hu Z Y, Zhang Z X, Bi D W, Huang H X, Dai R F, Zhang Y W, Zou S C 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 076104 (in Chinese) [宁冰旭, 胡志远, 张正选, 毕大炜, 黄辉祥, 戴若凡, 张彦伟, 邹世昌 2013 物理学报 **62** 076104]
- [11] Hu Z Y, Liu Z L, Shao H, Zhang Z X, Ning B X, Bi D W, Chen M, Zou S C 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 050702 (in Chinese) [胡志远, 刘张李, 韶华, 张正选, 宁冰旭, 毕大炜, 陈明, 邹世昌 2012 物理学报 **61** 050702]
- [12] Pierret R F (translated by Huang R, Wang Q, Wang J Y) 2010 *Fundamentals of Semiconductor Device* (Beijing: Publishing House of Electronics Industry) pp275–277 (in Chinese) [皮埃洛 R F 著 (黄如, 王漪, 王金延译) 2010 半导体器件基础 (北京: 电子工业出版社) 第 275—277 页]
- [13] Qu J T, Zhang H M, Hu H Y, Xu X B, Wang X Y 2012 *J. Univ. Electron. Sci. Technol. China* **41** 316 (in Chinese) [屈江涛, 张鹤鸣, 胡辉勇, 徐小波, 王晓艳 2012 电子科技大学学报 **41** 316]
- [14] Liu H X, Wang Z, Zhuo Q Q, Wang Q Q 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 016102 (in Chinese) [刘红侠, 王志, 卓青青, 王倩琼 2014 物理学报 **63** 016102]
- [15] Chen X J, Barnaby H J, Vermeire B, Holbert K, Wright D, Pease R L 2007 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **54** 1913
- [16] Saks N S, Ancona M G, Rendell R W 2002 *Appl. Phys. Lett.* **80** 3219
- [17] Galloway K F, Gaitan M, Russell T J 1984 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **31** 1497



# Study on the influence of $\gamma$ -ray total dose radiation effect on the threshold voltage and transconductance of the strained Si p-channel metal-oxide-semiconductor field-effect transistor\*

Hu Hui-Yong Liu Xiang-Yu<sup>†</sup> Lian Yong-Chang Zhang He-Ming Song Jian-Jun  
Xuan Rong-Xi Shu Bin

(Key Lab of Wide Band-Gap Semiconductor Materials and Devices, School of Microelectronics, Xidian University,  
Xi'an 710071, China)

( Received 27 March 2014; revised manuscript received 3 July 2014 )

## Abstract

In this work, the carrier microscopic transport process of biaxial strained Si p-channel metal-oxide-semiconductor field-effect transistor (PMOSFET) under  $\gamma$ -ray radiation has been studied. Effect of  $\gamma$ -ray on devices and the relationship between the variation of device electrical characteristics and the total dose are investigated. A model for considering the degradation of threshold voltage and transconductance due to the total dose radiation is established. Based on this model, numerical simulation has been carried out. Results show that the threshold voltage of PMOSFET decreases with increasing radiation dose. At a lower total dose, the threshold voltage decreases linearly. However, at a higher total dose, it becomes saturated. The degradation can be explained by the generation of trapped charges which increase the impact possibility of carriers in the channel and induce the reduction of mobility and transconductance accordingly. Finally, the simulation results are compared with the experimental data. A good agreement is observed, indicating the validation of our proposed model.

**Keywords:** strained Si p-channel metal-oxide-semiconductor field-effect transistor, total dose irradiation, threshold voltage, transconductance

**PACS:** 61.80.Ed, 73.50.Dn, 85.30.TV

**DOI:** 10.7498/aps.63.236102

---

\* Project supported by the Doctoral Foundation of Ministry of Education, China (Grant No. JY0300122503) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities of China (Grant Nos. K5051225014, K5051225004).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [18537831656@163.com](mailto:18537831656@163.com)