

γ 射线总剂量辐照对单轴应变 Si 纳米 n 型金属氧化物半导体场效应晶体管栅隧穿电流的影响

郝敏如 胡辉勇 廖晨光 王斌 赵小红 康海燕 苏汉 张鹤鸣

Influence of γ -ray total dose radiation effect on the tunneling gate current of the uniaxial strained Si nanometer n-channel metal-oxide-semiconductor field-effect transistor

Hao Min-Ru Hu Hui-Yong Liao Chen-Guang Wang Bin Zhao Xiao-Hong Kang Hai-Yang Su Han Zhang He-Ming

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 66, 076101 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.076101

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.076101>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I7>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

总剂量辐照对热载流子效应的影响研究

Total dose dependence of hot carrier injection effect in the n-channel metal oxide semiconductor devices

物理学报.2016, 65(24): 246101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.246101>

总剂量效应致 0.13 μm 部分耗尽绝缘体上硅 N 型金属氧化物半导体场效应晶体管热载流子增强效应

Enhanced channel hot carrier effect of 0.13 μm silicon-on-insulator N metal-oxide-semiconductor field-effect transistor induced by total ionizing dose effect

物理学报.2016, 65(9): 096104 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.096104>

超深亚微米互补金属氧化物半导体器件的剂量率效应

Dose-rate sensitivity of deep sub-micro complementary metal oxide semiconductor process

物理学报.2016, 65(7): 076102 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.076102>

电离辐射环境下的部分耗尽绝缘体上硅 n 型金属氧化物半导体场效应晶体管可靠性研究

Reliability of partially-depleted silicon-on-insulator n-channel metal-oxide-semiconductor field-effect transistor under the ionizing radiation environment

物理学报.2015, 64(8): 086101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.086101>

深亚微米金属氧化物场效应晶体管及寄生双极晶体管的总剂量效应研究

Radiation effect of deep-submicron metal-oxide-semiconductor field-effect transistor and parasitic transistor

物理学报.2014, 63(22): 226101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.226101>

γ 射线总剂量辐照对单轴应变Si纳米n型金属氧化物半导体场效应晶体管栅隧穿电流的影响*

郝敏如[†] 胡辉勇 廖晨光 王斌 赵小红 康海燕 苏汉 张鹤鸣

(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)

(2016年10月13日收到; 2017年1月10日收到修改稿)

基于 γ 射线辐照条件下单轴应变Si纳米n型金属氧化物半导体场效应晶体管(NMOSFET)载流子的微观输运机制, 揭示了单轴应变Si纳米NMOSFET器件电学特性随总剂量辐照的变化规律, 同时基于量子机制建立了小尺寸单轴应变Si NMOSFET在 γ 射线辐照条件下的栅隧穿电流模型, 应用Matlab对该模型进行了数值模拟仿真, 探究了总剂量、器件几何结构参数、材料物理参数等对栅隧穿电流的影响. 此外, 通过实验进行对比, 该模型仿真结果和总剂量辐照实验测试结果基本符合, 从而验证了模型的可行性. 本文所建模型为研究纳米级单轴应变Si NMOSFET应变集成器件可靠性及电路的应用提供了有价值的理论指导与实践基础.

关键词: 单轴应变Si, 纳米n型金属氧化物半导体场效应晶体管, 总剂量, 栅隧穿电流

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

DOI: 10.7498/aps.66.076101

1 引言

随着微电子集成电路技术的快速发展, 以互补型金属氧化物为核心的半导体技术已进入纳米尺度. 栅氧化层厚度仅有几个纳米, 导致沟道反型层中的载流子隧穿栅氧化层概率增大, 从而增大了单个器件的栅电流及静态功耗, 而当前的集成电路已进入超大规模, 因此引起整个电路静态功耗急剧增大^[1-3], 因此对栅隧穿电流的研究越来越重视^[4]. 载流子迁移率高、带隙可调且与传统Si工艺兼容等为应变Si技术的优势, 是目前提高应变集成技术的重要途径之一^[5]. 随着应变集成器件及电路技术在空间、军事等领域的广泛应用, 在辐照条件下应变集成器件及电路的应用将会越来越多, 因此辐照特性及加固技术对应变集成器件的研究越来越重要^[6-8]. 在总剂量辐照条件下, 围绕弛豫和应变Si MOSFET研究器件电学特性的退化^[9,10], 其中栅隧穿电流作为在总剂量辐照条件下器件退化的重要参数指标, 仅有少量研究基于实验分析^[1,11,12],

而对于相应的理论模型研究甚少.

因此, 针对以上问题, 本文基于 γ 射线辐照下单轴应变Si纳米NMOSFET载流子的微观输运机制以及量子效应, 建立了总剂量辐照下小尺寸单轴应变Si NMOSFET栅隧穿电流模型, 应用Matlab对该模型进行了模拟仿真, 分析了总剂量、器件几何参数、物理参数等对栅隧穿电流的影响, 模型仿真结果与实验数据比较符合, 验证了模型的可行性. 为纳米级单轴应变Si NMOSFET对应变集成电路的应用提供了理论依据和实践基础^[13].

2 模型的建立

器件结构如图1所示, 其中沟道张应力通过淀积SiN应力膜引入. 纳米NMOSFET器件栅氧化层厚度只有几个纳米, 导致沟道反型层电子直接隧穿栅介质到达栅电极, 形成栅隧穿电流, 图2给出了单轴应变Si NMOSFET器件直接隧穿形成栅电流的原理图.

* 国家自然科学基金(批准号: 61474085)和陕西省科技计划项目(批准号: 2016GY-085)资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: haominru@163.com

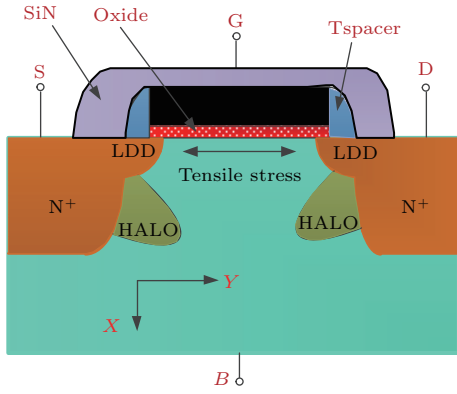


图1 (网刊彩色) 单轴应变Si纳米NMOSFET器件结构示意图

Fig. 1. (color online) Schematic structure of uniaxial strained Si nanometer NMOSFET device.

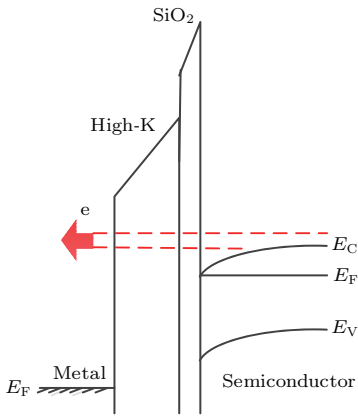


图2 单轴应变Si纳米NMOSFET器件直接隧穿栅电流形成示意图

Fig. 2. Schematic diagram of tunneling gate current for uniaxial strained Si nanometer NMOSFET device.

γ 射线照射对单轴应变Si纳米NMOSFET器件的影响之一是氧化层中激发产生电子空穴对^[14]. 在电场的作用下, 空穴向衬底移动, 一部分空穴被氧化层陷阱俘获形成氧化层陷阱电荷, 一部分空穴与陷阱作用产生质子, 质子运输至界面, 与界面处的Si悬挂键作用形成界面态电荷, 从而两种性质的电荷共同作用影响阈值电压的漂移. 两种电荷作用过程可表示为^[15]:

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

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

式中, P 和 t 分别表示栅介质中的空穴浓度和辐照的时间, D' 和 k_g 分别是辐照时的剂量率和在单位体积栅介质内单位辐照剂量产生的电子-空穴对数目, f_y 表示与栅介质层中电场相关的电子-空穴对逃脱复合的概率, f_p 为空穴通量, N_t 和 P_t 分别表

示为栅介质层内的空穴陷阱浓度和被空穴陷阱所俘获的浓度, σ_{pt} 和 τ_t 分别是空穴的俘获截面和空穴陷阱的退火时间.

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

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

式中, $[H^+]$ 为栅介质中的质子浓度, N_{DH} 和 σ_{DH} 分别被表示为在栅介质层内含氢的缺陷浓度以及含氢缺陷对空穴的俘获截面, f_{H^+} 为栅介质层的质子通量. N_{it} 和 N_{Si-H} 分别是栅介质/半导体界面处陷阱电荷密度和被氢钝化的硅悬挂键密度, σ_{it} 表示为界面处被氢钝化的硅悬挂键对质子的俘获截面, τ_{it} 是界面陷阱电荷的退火时间.

联立(1)和(2), (3), (4)式分别可得到 γ 射线辐照对NMOS器件栅介质层作用产生的空穴陷阱电荷模型(N_{ot})以及在栅介质与沟道界面处产生的界面态电荷模型(N_{it}):

$$\begin{aligned} N_{ot} &= \frac{1}{t_{ox}} \int_0^{t_{ox}} P_t x dx \\ &= N_t \left[\frac{1}{2} t_{ox} + \frac{e^{-\sigma_{pt} k_g f_y t_{ox} D' t}}{-\sigma_{pt} k_g f_y t_{ox} D' t} \right. \\ &\quad \left. + \frac{e^{-\sigma_{pt} k_g f_y t_{ox} D' t} - 1}{(-\sigma_{pt} k_g f_y t_{ox} D' t)^2 t_{ox}} \right], \end{aligned} \quad (5)$$

式中 N_{ot} 为辐照产生的正电荷浓度, 当NMOSFET在 γ 射线辐照条件下, γ 射线会在氧化层中激发产生电子空穴对, 在栅氧化层电场作用下空穴向界面处移动, 在此过程中空穴被氧化层中空穴陷阱俘获形成氧化层固定正电荷.

$$N_{it} = N_{Si-H} (1 - e^{-\sigma_{DH} \sigma_{it} N_{DH} k_g f_y t_{ox}^2 D' t}), \quad (6)$$

式中总剂量 $D = D' t$, t_{ox} 为栅介质厚度.

另一方面辐照射线会直接作用在单轴应变Si纳米NMOSFET的氮化硅薄膜上. Bordallo等^[16]通过实验的方法得到单轴应变硅器件不易受辐照的影响, 可能是因为氮化硅薄膜帽层对器件具有保护作用. Kamimura等^[17]通过实验得出结论: 在辐照的条件下, 由于氮化硅薄膜对器件的加固作用, 器件的电学特性退化减弱.

在栅压的作用下器件达到反型, 出现在应变硅表面的电子势阱被近似看作三角形, 由于量子效应, 导带被分裂成一系列的子能带. 同时考虑单轴应力的作用, 得到各个子能带的最低能量 $E_i(y)$, 可以表示为^[18]

$$E_i(y) = E_i^0(y) + \Delta E, \quad (7)$$

其中, y 表示源/漏之间的坐标, 见图 1 所示; ΔE 是在应力作用下量子化能级的变化量. $E_i^0(y)$ 可以表示为^[19]

$$E_i^0(y) = E_{c-S} + (\hbar^2/2m_{s-Si\perp}^*)^{\frac{1}{3}} \times \left[\frac{3}{2}\pi q \frac{E_{ox}(y)\varepsilon_{ox}}{\varepsilon_{s-Si}} \left(i + \frac{3}{4} \right) \right]^{\frac{2}{3}}, \quad (8)$$

其中, E_{c-S} 、 $E_{ox}(y)$ 分别为界面处应变 Si 的导带底能量和氧化层中的电场强度. $m_{s-Si\perp}^*$ 为单轴张应力作用下与界面垂直方向的电子有效质量, 表达式为^[20]

$$m_{s-Si\perp}^* = (0.914 + 0.0263\sigma^2)m_0, \quad (9)$$

其中, σ 、 m_0 分别为沟道中应力强度和电子静止质量. 由于沟道中单轴张应力作用, 导带中的四度简并能谷下降, 故 ΔE 表示为^[21,22]

$$\begin{aligned} \Delta E &= \Delta E_{\Delta 4}(\sigma) \\ &= [(\Xi_d + \Xi_u/3)(S_{11} + 2S_{12}) \\ &\quad - (\Xi_u/6)(S_{12} - S_{11})]\sigma, \end{aligned} \quad (10)$$

式中, 弹性常数 S_{11} 和 S_{12} 分别为 $7.69 \times 10^{-3}/\text{GPa}$ 和 $-2.24 \times 10^{-3}/\text{GPa}$; Ξ_d 、 Ξ_u 分别是流体静力学形变势和剪切形变势.

各个子能带电子的隧穿电流密度之和形成了栅隧穿电流密度. 研究发现, 总反型电子的密度中最低子能带所占比例大于 92%^[23], 故近似认为最

低的子能带中包括了半导体表面的所有反型电子. 因此, 栅隧穿电流密度可以表示为

$$J_t(y) \approx J_0(y) = |Q_n(y)|P_t(y)\zeta(y), \quad (11)$$

式中, $Q_n(y)$ 、 $P_t(y)$ 和 $\zeta(y)$ 分别为沟道反型电子面密度、隧穿概率以及平均碰撞频率. 沿沟道 y 方向对栅隧穿电流密度 $J_t(y)$ 进行积分, 可得到栅隧穿电流 I_{g-t} , 即

$$I_{g-t} = W \int_0^L J_t(y) dy, \quad (12)$$

其中, W 、 L 分别为沟道宽度和长度. 由 (12) 式可知, 得到沟道反型电子面密度、隧穿概率以及平均碰撞频率就可获得栅隧穿电流模型.

2.1 沟道反型电子面密度

根据高斯定律及边界条件, 简化整理得到沟道反型电子面密度表达式为

$$\begin{aligned} |Q_n(y)| &= |Q_m| - |Q_d| \\ &= \frac{\varepsilon_{ox}}{t_{ox}} [V_{gs} - V(y) - V_{th,sSi}], \end{aligned} \quad (13)$$

式中, Q_m 、 Q_d 分别是栅电极电荷面密度和栅极下耗尽层中的电荷面密度, ε_{ox} 为栅介质介电常数, $V_{th,sSi}$ 为器件的阈值电压, 考虑了量子化效应以及总剂量效应后高精度的单轴应变 Si 纳米 NMOS-FET 器件阈值电压为

$$V_{th,sSi} = V_{FB,sSi} - V_{DIBL} + \frac{\psi_{th,sSi} + \left[1 - 2 \frac{\sinh(L/2l)}{\sinh(L/l)} \right] \frac{qN_{A,eff}l^2}{\varepsilon_{Si}} - \frac{\sinh(L/2l)}{\sinh(L/l)} (2\psi_{bi,sSi} + V_{DS})}{\left[1 - 2 \frac{\sinh(L/2l)}{\sinh(L/l)} \right] \left[1 - \frac{6}{W_d^2} l^2 \right]}, \quad (14)$$

其中平带电压可以表示为

$$V_{FB,sSi} = \left(\frac{\phi_M - \phi_{sSi}}{q} \right) - \frac{(Q_{ox} + qN_{ot} - qN_{it})}{C_{ox}}. \quad (15)$$

由于应变作用对衬底功函数进行修正:

$$\phi_{sSi} = \chi_{sSi} + E_{g,sSi}/2 + \phi_{fp,sSi}, \quad (16)$$

式中, χ_{sSi} 和 E_{sSi} 分别为应变硅的电子亲和能和禁带宽度, $\phi_{fp,sSi}$ 为应变硅的费米势.

$$\chi_{sSi} = \chi_{Si} + 0.57\sigma/7.55,$$

$$E_{g,sSi} = 1.12 - 0.0336\sigma,$$

$$\phi_{fp,sSi} = V_t \ln(N_a/n_{sSi}),$$

其中, n_{sSi} 为应变硅的本征载流子浓度.

因此可知, 沟道反型电子面密度与总剂量、器件几何结构参数、材料物理参数等有关.

2.2 隧穿概率

由于目前器件尺寸进入纳米级, 故栅隧穿机制以直接隧穿为主, 采用 Wenzel-Kramers-Brillouin 近似^[24], 隧穿概率为

$$\begin{aligned} P_t(y) &= \exp \left\{ -\frac{4}{3} \sqrt{\frac{2m_{ox}}{\hbar^2}} \frac{1}{B} \right. \\ &\quad \left. \times \left[A^{\frac{3}{2}} - (A - Bt_{ox})^{\frac{3}{2}} \right] \right\}, \end{aligned} \quad (17)$$

其中 $A = E_{c-S} + E_b - E_0(y)$, $B = qE_{ox}(y)$, $E_{ox}(y) = \frac{1}{d}(V_{gs} - V_{FB,sSi} - \phi_s(y))$, m_{ox} 为电子在氧化层中的有效质量. 可知, 隧穿概率与应力大小以及辐照剂量相关.

2.3 碰撞频率

为获得单位时间内隧穿栅介质到达栅电极的电荷量, 需要得到反型电子从反型层到达栅电极的时间, 这部分时间包括隧穿栅介质时间和碰撞界面的平均时间, 即碰撞频率的倒数^[18]. 由于量子效应, 载流子隧穿氧化层的时间可忽略, 因此栅隧穿栅介质到达栅极的时间由沟道反型电子碰撞界面时间决定, 即碰撞频率的倒数.

碰撞频率表达式为^[25]

$$\zeta(y) = \frac{qE_{ox}(y)}{\sqrt{8m_{s-Si\perp}^*}(E_0(y) - E_{c-S})}, \quad (18)$$

可以看出, 碰撞频率与栅介质层电场强度、量子化能级以及沿垂直方向的电子有效质量有关, 因此碰撞频率与辐照剂量以及沟道应力强度有关.

2.4 栅隧穿电流

联立 (12)、(13)、(17) 和 (18) 式经整理可得到栅隧穿电流 I_{g-t} :

$$\begin{aligned} I_{g-t} &= W \int_0^L J_t(y) dy \\ &= W \int_0^L \{ \zeta[V(y)] Q_n[V(y)] P_t[V(y)] \\ &\quad \times [1 - f[V(y)]] \} dy. \end{aligned} \quad (19)$$

采用电场为电势的负梯度进行积分换元, 并假设 $F(y) = V_{ds}/L$, 最终得到了在总剂量辐照下单轴应变 Si 纳米 NMOSFET 栅隧穿电流模型:

$$\begin{aligned} I_{g-t} &= -WL \int_0^{V_{ds}} \zeta(V) Q_n(V) P(V) \\ &\quad \times [1 - f(V)] dV \times V_{ds}^{-1}, \end{aligned} \quad (20)$$

可以看出栅隧穿电流与器件几何结构参数、辐照剂量、材料物理参数等之间有密切的关系.

3 实验

采用西北核技术研究所的 ^{60}Co γ 射线源照射

进行了总剂量辐照实验, 剂量率的选取为 50 rad(Si)/s, 通过 HP4156 A 半导体精密参数测试仪对辐照前后器件的电学参数进行测量. 总剂量测试点分别为 50 krad(Si), 100 krad(Si), 150 krad(Si), 200 krad(Si), 250 krad(Si), 达到设定剂量点对器件进行移位测试. 为了保证测试数据的精确性, 每次测量在 30 min 之内完成. 辐照的偏置条件: 栅极电压 $V_G = 1$ V, 其他电极都接地. 测试时所加栅压为 $V_G = 0-1$ V, 扫描电压 $V_{step} = 50$ mV, $V_D = 50$ mV, $V_S = 0$. 图 3 及图 4 分别为单轴应变 Si 纳米 NMOSTET 器件的显微照片及剖面图, TiAl 作为金属栅极, 栅氧化层介质为 SiO_2 和 HfO_2 , 其等效栅介质厚度为 1 nm, 沟道长度 50 nm, 源漏区域结深为 25 nm.

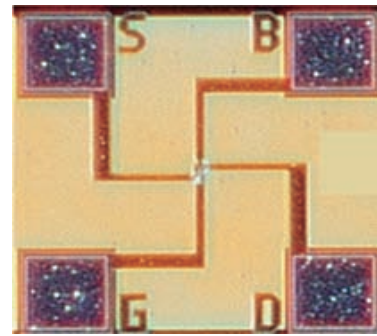


图 3 (网刊彩色) 单轴应变 Si 纳米 NMOSTET 器件的显微照片

Fig. 3. (color online) Micrograph of uniaxial strained Si nanometer NMOSFET device.

在不同总剂量辐照下, 弛豫 Si 纳米 NMOSFET 和单轴应变 Si 纳米 NMOSFET 器件阈值电压漂移量随吸收剂量的变化关系如表 1 所列. 通过表 1 所列的实验数据可以推断出辐照对单轴应变硅的氮化硅薄膜几乎没有影响, 即可认为应力没有被释放, 此实验结论与第二部分前人的实验结论符合.

表 1 在不同吸收剂量下弛豫和单轴应变 Si 纳米 NMOSFET 器件阈值电压漂移量

Table 1. The threshold voltage shift of relaxation nano Si NMOSFET and uniaxial strain Si nano NMOSFET device under the different absorbed dose.

Dose/kGy	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
$\Delta V_{th,Si}$	0.0356	0.0685	0.1017	0.1245	0.1543
$\Delta V_{th,sSi}$	0.0354	0.0686	0.1015	0.1243	0.1541

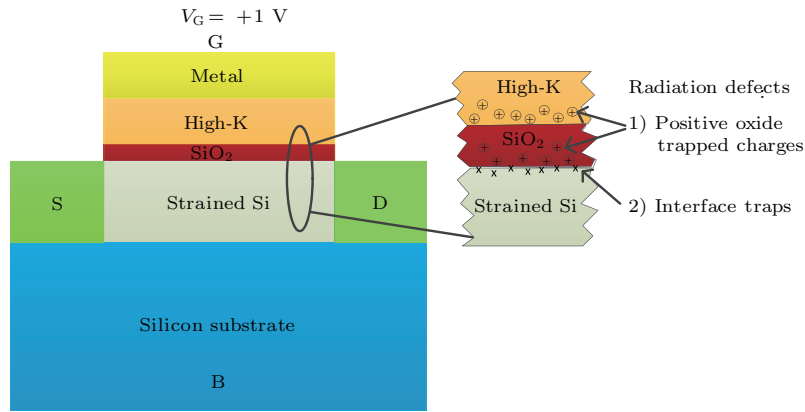


图4 (网刊彩色) 单轴应变Si纳米NMOSFET器件在辐照诱导下产生氧化层陷阱电荷和界面态电荷剖面图
 Fig. 4. (color online) Schematic cross-section of uniaxial strained Si nanometer NMOSFET indicating the buildup of radiation-induced oxide trapped charge and the generation of interface traps.

4 结果与讨论

本文采用Matlab对总剂量辐照条件下单轴应变Si纳米NMOSFET栅隧穿电流模型进行了数值模拟仿真,分析了总剂量、器件几何结构参数、材料物理参数等对栅隧穿电流的影响,并通过实验与模型仿真结果进行对比.数值模拟计算过程中用到的部分参数如表2所列.

图5是在一定结构参数和偏置下,辐照剂量与栅隧穿电流关系的仿真结果,其中纵坐标为总剂量辐照导致隧穿电流密度变化量与没有辐照时隧穿电流密度比值 $\Delta J_{tunnelling}/J_{tunnelling}$.从图5可以看出,随着辐照总剂量的增大,栅隧穿电流密度呈近似线性增大的趋势.利用本课题组制造的小尺寸单轴应变Si NMOSFET进行了总剂量辐照实验,

本文仿真结果与实验结果比较如表3,可见仿真结果与实验测试数据基本符合.

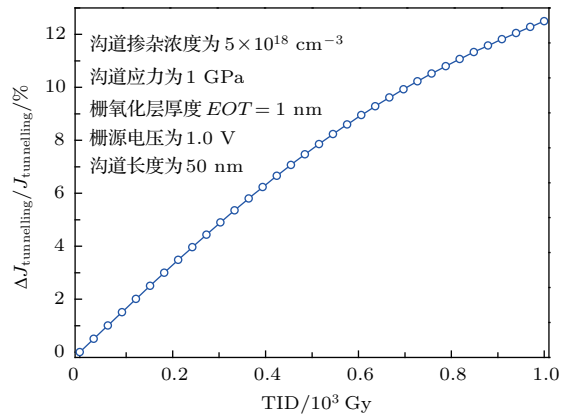


图5 $\Delta J_{tunnelling}/J_{tunnelling}$ 与辐照剂量的关系曲线
 Fig. 5. The relationship of $\frac{\Delta J_{tunnelling}}{J_{tunnelling}}$ and irradiation dose.

表2 仿真采用的部分参数

Table 2. Summary of partial model parameters for uniaxial strained Si nanometer NMOSFET.

参数	取值	参数	取值	参数	取值
EOT/nm	1	$k_g/cm^{-3} \cdot Gy^{-1}$	8.1×10^{10}	N_t/cm^2	8.0×10^{15}
T/K	300	N_a/cm^3	5×10^{19}	ϵ_{Si}	11.9
L/nm	50	$W/\mu m$	3	σ_{DH}/cm^2	2.0×10^{-11}
Q_{ox}/cm^2	0.4×10^{11}	N_{Si-H}/cm^2	4.8×10^{12}	N_{sub}/cm^{-3}	5×10^{18}

表3 与实验结果的比较

Table 3. Comparison of experimental results.

Dose/kGy		0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
$(\Delta J/J)/\%$	本文仿真	0	0.832	1.726	2.542	3.674	4.098
	实验结果	0	0.815	1.653	2.673	3.543	4.112

图6所示为辐照剂量、沟道长度与栅隧穿电流密度的关系. 由图6可以看出, 栅隧穿电流密度随辐照总剂量的增大而增大, 随沟道长度的减小而增大. 这可以解释为辐照剂量增大时, 阈值电压会减小, 引起氧化层中电场强度增大, 导致沟道反型电子面密度、碰撞频率以及隧穿概率均增大. 沟道长度的减小短沟道效应越明显, 栅控能力减弱, 阈值电压减小, 故沟道长度减小时栅隧穿电流密度增大. 此外, 由图6可看出实验结果与仿真结果符合较好, 从而验证了该模型的可行性.

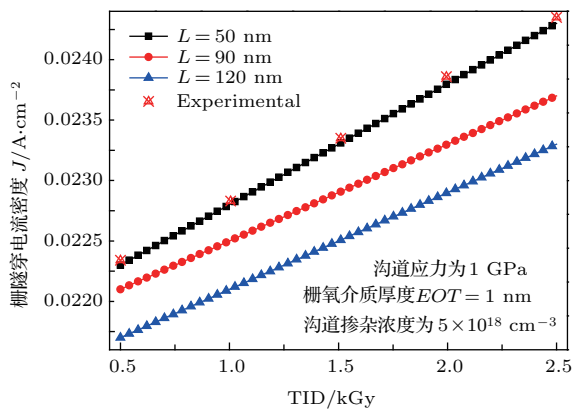


图6 (网刊彩色) 不同栅长栅隧穿电流密度与辐照剂量的关系
Fig. 6. (color online) The relationship of tunneling gate current density and irradiation dose with different channel length.

图7为辐照剂量、栅氧化层厚度与栅电流密度的仿真结果. 从图7中可以看出, 当辐照剂量一定, 栅隧穿电流随栅氧化层厚度的减小而增大. 栅氧化层越小, 栅氧化层电场越大, 导致沟道反型电子面密度、碰撞频率以及隧穿概率均增大. 同时, 由图7还可以得到栅电流随着辐照剂量的增大而微小增大, 这是由于栅氧化层越薄, 氧化层俘获的空穴很少, 辐照引起栅氧化层中产生的固定电荷越少, 最终导致沟道反型电子面密度小, 故栅隧穿电流随着辐照剂量的增大变化很小. 图7中的数值仿真结果与测试结果基本符合, 验证了模型的有效性.

图8给出了HfO₂栅介质、Al₂O₃栅介质和SiO₂栅介质这三种器件栅电流随辐照剂量的变化曲线. 由图8可看出, 同种栅介质下, 栅隧穿电流密度随着辐照剂量的增加而增大; 采用SiO₂栅介质的器件栅电流大于HfO₂和Al₂O₃栅介质. 这主要是由于栅介质介电常数越大, 栅氧化层的物理

厚度越大, 当沟道发生反型时需要的栅极电压就越大, 即提高了栅极对沟道的控制能力, 因此辐照剂量相等时阈值电压漂移越小, 导致沟道反型电子面密度越小, 因此产生的栅电流就越小. 随着微电子器件尺寸不断缩小, 栅氧化层厚度只有几个纳米, 在薄栅器件以及总剂量辐照条件下, 采用高K栅介质材料可以抑制栅隧穿电流的增大. 由图8可知, 仿真结果与实验结果基本一致, 进一步验证了模型的有效性与正确性.

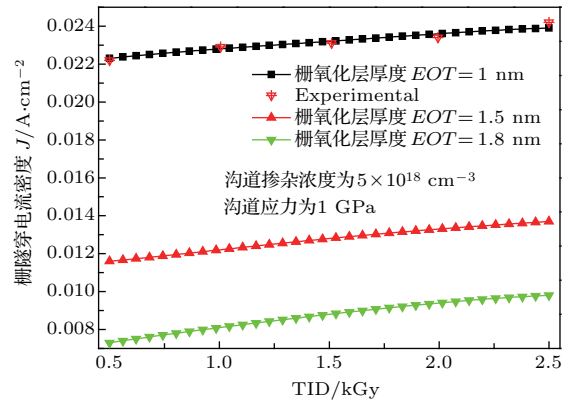


图7 (网刊彩色) 不同栅氧化层厚度栅隧穿电流随辐照剂量的关系
Fig. 7. (color online) The relationship of tunneling gate current density and irradiation dose with the different thickness of oxide layer.

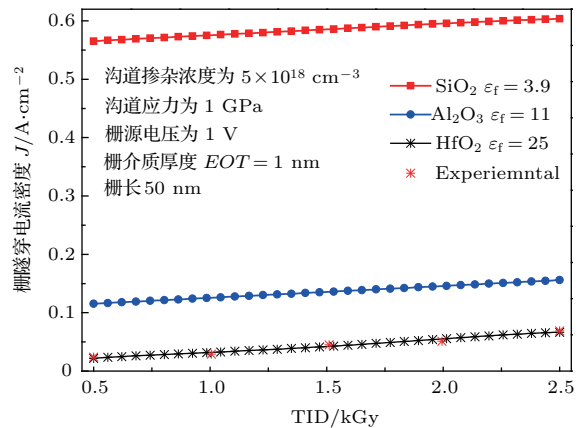


图8 (网刊彩色) 不同栅介质的栅电流密度随辐照剂量的变化关系
Fig. 8. (color online) The relationship of tunneling gate current density and irradiation dose with the different dielectric of oxide layer.

图9所示为辐照剂量、沟道应力强度与栅隧穿电流密度的关系. 由图9可知, 栅隧穿电流随沟道应力强度的增大而减小, 应力的增大引起沟道表面电子面密度增加, 但由于应力增大了应变沟道中电子的亲势, 从而导致隧穿概率的迅速减小, 使得

隧穿概率随应力增大而减小的速率超过沟道表面电子面密度的增加速率, 故应力增强时栅隧穿电流减小. 同样的沟道应力强度时, 隧穿电流密度随辐照剂量的增大而增大. 这主要是因为当沟道应力强度固定时, 阈值电压随辐照剂量的增加而减小, 沟道反型电子面密度增大, 最终导致栅隧穿电流增大. 由图 9 可得知, 总剂量辐照条件下, 增大沟道中的应力强度可以减小栅隧穿电流. 由图 9 可见仿真结果与实验数据比较符合.

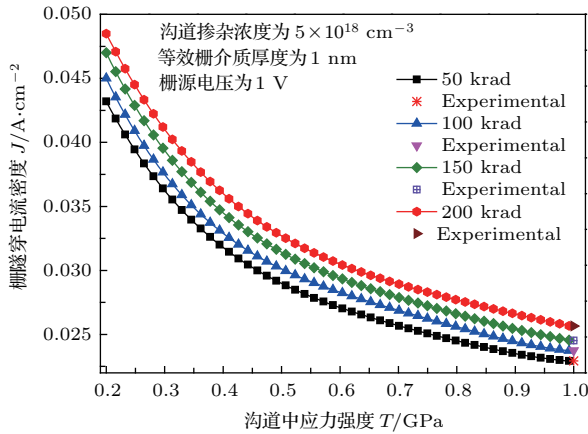


图 9 (网刊彩色) 不同辐照剂量下沟道应力强度与栅电流密度的关系

Fig. 9. (color online) The relationship of tunneling gate current density and stress with the different threshold voltage shifts.

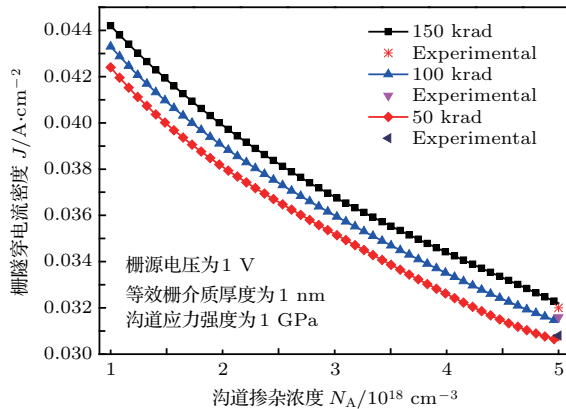


图 10 (网刊彩色) 不同辐照剂量栅电流密度随掺杂浓度的变化关系

Fig. 10. (color online) The relationship of tunneling gate current density and doping concentration with irradiation dose.

图 10 是辐照剂量、沟道掺杂浓度与栅隧穿电流的关系. 由图 10 可看出, 栅隧穿电流随沟道掺杂浓度的增大而减小. 这可以解释为: 当辐照剂量固定时, 沟道反型电子面密度随掺杂浓度的提高而下

降, 引起栅隧穿电流密度的减小; 而当掺杂浓度一定时, 辐照剂量大栅隧穿电流也大. 因此, 可以适当提高沟道掺杂浓度来减小栅隧穿电流.

图 11 所示为辐照剂量、漏/源电压与栅隧穿电流密度的关系. 由图 11 可知, 当漏/源偏置一定时, 栅隧穿电流密度随辐照剂量的增加而增大; 当辐照剂量固定时, 漏/源电压增大时栅隧穿电流密度减小, 这是由于漏/源电压增大导致栅氧化层中电场减小, 引起隧穿概率和碰撞频率减小, 同时还会引起沟道反型电子面密度的减小.

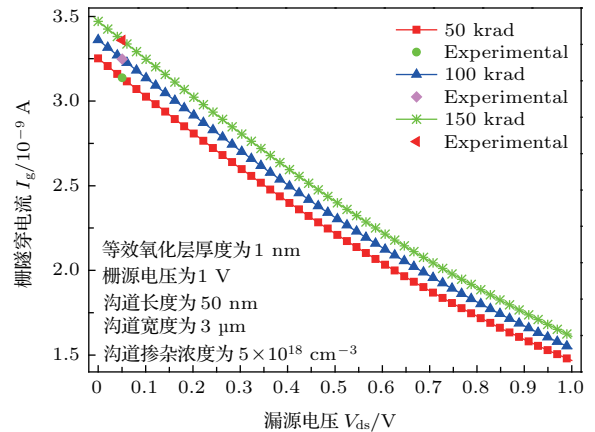


图 11 (网刊彩色) 不同辐照剂量栅隧穿电流与源漏电压的关系

Fig. 11. (color online) The relationship of tunneling gate current density and source / drain voltage with irradiation dose.

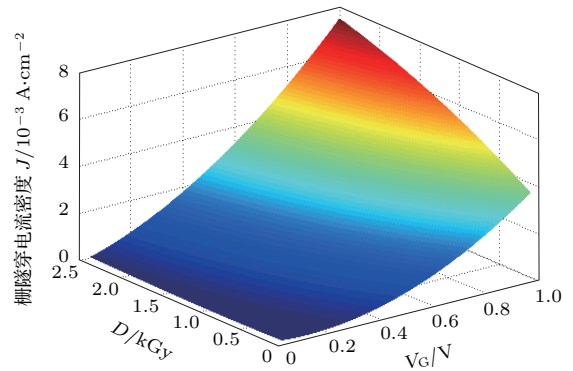


图 12 (网刊彩色) 辐照剂量与栅压对栅电流密度的关系

Fig. 12. (color online) The variation of tunneling gate current density with irradiation dose and gate voltage.

图 12 所示为栅压与辐照剂量对栅隧穿电流的影响. 分析表明, 当辐照剂量一定时, 栅压越大, 栅隧穿电流越大. 这主要是因为栅压越大, 栅氧化层中的电场越大, 引起沟道反型电子面密度、隧穿概率以及碰撞频率均增大. 由图 12 还可以看出, 当栅压较小时, 栅隧穿电流随着辐照剂量增大变化不明

显. 导致这种现象的原因是一方面栅压小, 栅氧层的电场小, 引起栅电流小; 另一方面栅压小, 栅氧化层俘获的空穴少, 阈值电压的漂移就不明显, 引起沟道反型电子面密度变化不大, 故栅电流变化不大.

5 结 论

基于总剂量辐照下单轴应变Si纳米NMOS-FET载流子的微观输运机制以及量子机制, 建立了小尺寸单轴应变Si NMOSFET在 γ 射线辐照下栅隧穿电流模型, 应用Matlab对该模型进行了数值模拟仿真, 分析了总剂量、器件几何结构参数、材料物理参数等对栅隧穿电流的影响. 该模型数值仿真结果与单轴应变Si纳米NMOSFET的总剂量辐照实验结果比较符合, 从而验证了模型的有效性与正确性. 从仿真结果可知: 总剂量与偏置条件一定时, 栅隧穿电流随着栅氧化层厚度的减小而增大, 随沟道长度的减小而增大, 随介电常数的增大而减小. 栅源电压、氧化层厚度及应力一定时, 沟道掺杂的增大导致栅隧穿电流的减小, 而当沟道掺杂浓度固定时, 栅隧穿电流随总剂量的增大而增大. 结构参数、应力以及栅源电压一定时, 栅隧穿电流随总剂量的增加而增大, 当总剂量固定时, 源漏电压大, 栅隧穿电流小. 本文结果可对今后应变集成电路应用以及单轴应变Si纳米NMOSFET辐照可靠性提供参考.

参考文献

- [1] Chaves F A, Jiménez D, García Ruiz F J, Godoy A, Suñé J 2012 *IEEE Trans. Electron Dev.* **59** 2589
- [2] Chen W B, Xu J P, Zou X, Li Y P, Xu S G, Hu Z F 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 5036 (in Chinese) [陈卫兵, 徐静平, 邹晓, 李艳萍, 许胜国, 胡致富 2006 物理学报 **55** 5036]
- [3] Rodríguez-Ruiz G A, Gutiérrez-Domínguez E A, Sarmiento-Reyes A, Stanojevic Z, Kosina H, Guarín F J, García-Ramírez P J 2015 *IEEE Electron Dev. Lett.* **36** 387
- [4] Ghetti A, Sangiorgi E, Bude J 2000 *IEEE Trans. Electron Dev.* **47** 2358
- [5] Hu H Y, Liu X Y, Lian Y C, Zhang H M, Song J J, Xuan R X, Shu B 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 236102 (in Chinese) [胡辉勇, 刘翔宇, 连永昌, 张鹤鸣, 宋建军, 宣荣喜, 舒斌 2014 物理学报 **63** 236102]
- [6] 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]
- [7] Zheng Q W, Yu X F, Cui J W, Guo Q, Ren D Y, Cong Z C, Zhou H 2014 *Chin. Phys. B* **23** 106102
- [8] Zhao Q W, Zhuang Y Q, Bao J L, Hu H 2016 *Chin. Phys. B* **25** 046104
- [9] Sun X, Xue F, Chen J, Zhang E X, Cui S, Lee J, Fleetwood D M, Ma T P 2013 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **60** 402
- [10] Liu H X, Zhuo Q Q, Wang Z, 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]
- [11] Ceschia M, Paccagnella A, Scarpa A, Ghidini G 1998 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **45** 2375
- [12] Cho B J, Kim S J, Ling C H, Joo M S, Yeo I S 1999 *Proceedings of the 7th International Symposium on Physical and Failure Analysis of Integrated Circuits* p30
- [13] 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]
- [14] Schwank J R, Shaneyfelt M R, Fleetwood D M, Felix J A, Dodd P E, Ferlet-Cavrois P P V 2008 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **55** 1833
- [15] Kamimura H, Akiyama M, Kuboyama S 1994 *J. Nucl. Sci. Technol.* **31** 24
- [16] Bordallo C C M, Teixeira F F, Silveira M A G, Agopian P G D, Simoen E, Claeys C, Martino J A 2013 *IEEE Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS), 14th European Conference on* p1-4
- [17] Kamimura H, Yoshioka S, Akiyama M, Kuboyama S 1994 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **31** 24
- [18] Wu H Y, Zhang H M, Song J J, Hu H Y 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 097302 (in Chinese) [吴华英, 张鹤鸣, 宋建军, 胡辉勇 2011 物理学报 **60** 097302]
- [19] Wu H, Zhao Y, White M H 2006 *Solid State Electron.* **50** 1164
- [20] Ungersboeck E, Dhar S, Karlowatz G 2007 *J. Comput. Electron.* **6** 55
- [21] Lim J S, Yang X, Nishida T, Thompson S E 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 073509
- [22] Hsieh C Y, Chen M J 2007 *IEEE Electron Dev. Lett.* **28** 818
- [23] Irisawa T, Numata T, Toyoda E 2007 *Symposium on VLSI Technology Digest of Technolcal* p36
- [24] Ghatak A, Lokanathan S 2004 *Quantum Mechanics Theory and Application* (5th Ed.) (New Delhi, India: McMillan) p380
- [25] Zhao Y J, White M H 2004 *Solid State Electron.* **48** 1801

Influence of γ -ray total dose radiation effect on the tunneling gate current of the uniaxial strained Si nanometer n-channel metal-oxide-semiconductor field-effect transistor*

Hao Min-Ru[†] Hu Hui-Yong Liao Chen-Guang Wang Bin Zhao Xiao-Hong
Kang Hai-Yang Su Han Zhang He-Ming

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

(Received 13 October 2016; revised manuscript received 10 January 2017)

Abstract

The carrier microscopic transport process of uniaxial strained Si n-channel metal-oxide-semiconductor field-effect transistor (NMOSFET) is analyzed under γ -ray radiation. The model of radiation-induced defect densities that are quantitative representations of trapped charges integrated across the thickness of the oxide (N_{ot}), and the number of interface traps at the semiconductor/oxide interface (N_{it}), is established. The variations of electrical characteristics of the uniaxial strained Si nanometer NMOSFET are also investigated under the total dose radiation. The device of uniaxial strained Si nanometer NMOSTET is irradiated by a ^{60}Co γ -ray laboratory source at a constant dose rate of 0.5 Gy (Si)/s. The TID is deposited in several steps up to a maximum value of 2.5 kGy. Electrical measurements are performed at each TID step. All irradiated samples are measured using field test, and are required to finish measurement within 30 min, in order to reduce the annealing effect. Static drain-current I_D vs. gate-voltage V_{GS} electrical characteristics are measured with an HP4155B parametric analyzer. Some parameter extractions presented here come from these static measurements including the threshold voltage V_{TH} , the trans-conductance g_m , and the leakage current I_{OFF} (I_D at $V_{GS} = 0$ V and $V_{DS} = V_{DD}$). Irradiation bias: $V_G = +1$ V, drain voltage V_D is equal to source voltage V_S ($V_D = V_S = 0$). Measurement bias: $V_G = 0-1$ V, scanning voltage $V_{step} = 0.05$ V, $V_D = 50$ mV, and $V_S = 0$. The results indicate the drift of threshold voltage, the degradation of carrier mobility and the increase of leakage current because of the total dose radiation. Based on quantum mechanics, an analytical model of tunneling gate current of the uniaxial strained Si nanometer is developed due to the total dose irradiation effect. Based on this model, numerical simulation is carried out by Matlab. The influences of total dose, geometry and physics parameters on tunneling gate current are simulated. The simulation results show that when radiation dose and bias are constant, the tunneling gate current increases as the channel length decreases. When the structure parameters and the stress are fixed, the tunneling gate current increases with the increase of radiation dose. Whereas at a given the radiation dose, tunneling gate current will decrease due to the stress. When radiation dose and bias are kept unchanged, the tunneling gate current increases with the thickness of the gate oxide layer decreasing. When the gate-source voltage, the thickness of oxide layer and stress are fixed, tunneling gate current is reduced with the increase of doping concentration in channel. When the structural parameters, the gate-source voltage and radiation dose are constant, the tunneling gate current decreases with increasing drain-source voltage. In addition, to evaluate the validity of the model, the simulation results are compared with experimental data, and good agreement is confirmed. Thus, the experimental results and proposed model provide good reference for research on irradiation reliability and application of strained integrated circuit of uniaxial strained Si nanometer n-channel metal-oxide-semiconductor field-effect transistor.

Keywords: uniaxial strained Si, nanometer NMOSFET, total dose, tunneling gate current

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

DOI: 10.7498/aps.66.076101

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61474085) and the Science Research Plan in Shaanxi Province of China (Grant No. 2016GY-085).

[†] Corresponding author. E-mail: haominru@163.com