

电离辐射环境下金属-铁电-绝缘体-基底结构铁 电场效应晶体管电学性能的模拟*

吴传禄¹⁾ 马颖^{1)2)†} 蒋丽梅¹⁾ 周益春¹⁾²⁾ 李建成³⁾

1)(湘潭大学材料科学与工程学院, 湘潭 411105)

2)(低维材料及其应用技术教育部重点实验室, 湘潭 411105)

3)(国防科技大学电子科学与工程学院, 长沙 410073)

(2014年5月18日收到; 2014年6月24日收到修改稿)

本文利用改进的米勒模型模拟了金属-铁电-绝缘体-基底结构铁电场效应晶体管在电离辐射环境下的铁电薄膜极化、界面电荷密度和电荷迁移率, 最终得出在不同辐射总剂量和辐射剂量率下, 铁电场效应晶体管的电容和漏源电流曲线. 计算结果表明, 总剂量为10 Mrad时, 对铁电场效应晶体管的漏源电流和电容影响甚微; 总剂量为100 Mrad ($1 \text{ rad} = 10^{-2} \text{ Gy}$)时, 对其有很明显的影响. 当辐射的剂量率发生变化时, 铁电场效应晶体管的电流和电容也会发生改变. 模拟结果表明, 铁电场效应晶体管有较强的抗辐射能力.

关键词: 总剂量, 剂量率, 电容, 漏源电流

PACS: 61.80.A2, 85.30.TV, 02.60.C6, 61.66.Fn

DOI: 10.7498/aps.63.216102

1 引言

铁电场效应晶体管 (ferroelectric field effect transistor, FeFET) 是一种数据存储单元器件, 其利用铁电薄膜的极化双稳态来控制漏源电极的导通与关闭, 即“1”与“0”态, 以达到存储数据的目的. 传统结构的 FeFET 包括金属 (Metal, M)、铁电 (Ferroelectric, F) 和基底 (Substrate, S) 层 (MFS-FET), 由于铁电层和硅基底之间存在反应和相互扩散, 使得器件本身的保持性能很差. 在铁电层与基底之间引入绝缘 (Insulator, I) 层, MFIS 结构 FeFET 很好地克服了这一缺陷. FeFET 具有非破坏性读出、快速开关、高密度、永久性等特点, 有望成为下一代高性能存储器.

铁电材料及其器件的另一个重要特点是它们具有很强的抗辐射性能^[1-4]. 随着人类航天事业的快速发展, 在宇宙空间这样高辐射环境里, 对航天

器中电子元器件的抗辐射性能有很高的要求. 铁电材料的抗辐射特性使其在航空工业中具有较高的潜在应用价值. Schwank 等^[5-7] 对铁电薄膜及其电容器的辐射效应进行了研究, 得出了一些铁电材料在辐射环境中的物理变化规律. Soubra 等^[8-11] 对金属 (Metal, M)、氧化物 (Oxide, O) 和基底 (Substrate, S) 结构的场效应晶体管的辐射效应进行了研究. Li 等^[12] 对 MFS 结构 FeFET 的辐射效应进行了研究. 遗憾的是, MFIS 结构 FeFET 的性能优于 MFS 结构 FeFET, 但是 MFIS 结构 FeFET 的抗辐射性能还不清楚, 有必要进行深入的实验和理论研究以探明其抗辐射性能及相关物理机理.

计算机模拟同样是一种非常重要的研究手段. 基于米勒模型^[13] 的计算机模拟被广泛用于研究 FeFET 的电学性能. 遗憾的是, 米勒模型无法描述铁电材料和器件的辐射效应. 对于 FeFET 而言, 辐射效应不仅仅限于铁电层在辐射条件下的性能变化, 其他各层均会受到辐射的影响. 比如, 硅基底

* 国家自然科学基金 (批准号: 11172257, 61176093) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: yma@xtu.edu.cn

界面电荷受到辐射后, 其电荷密度会受到影响, 进而影响到电荷迁移率, 最终影响到漏源电流. 基于此, 本文进一步发展了米勒模型, 使之适用于研究 FeFET 的辐射效应. Guo 等^[14,15]对 FET 的单粒子辐射效应进行了研究. 本文主要考虑电离辐射, 分别模拟了不同总剂量和不同剂量率条件下 MFIS 结构 FeFET 的电容和漏源电流变化曲线, 并探讨了相应的物理机理.

2 理论模型

2.1 FeFET 的栅电压和电容

图 1 给出了 MFIS-FeET 的结构图. FeFET 的物理性质符合麦克斯韦方程:

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho, \quad (1)$$

上式中, ρ 为自由电荷密度, \mathbf{D} 为电位移矢量, 且电位移矢量可用下式表示:

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \varepsilon_S \mathbf{E}_S = \varepsilon_0 \varepsilon_I \mathbf{E}_I = \varepsilon_0 \varepsilon_F \mathbf{E}_F + \mathbf{P}_d, \quad (2)$$

上式中, ε_0 为真空的介电常数, ε_S 为硅的介电常数, ε_I 为绝缘层的介电常数, ε_F 为铁电层的介电常数, \mathbf{E}_S , \mathbf{E}_I , \mathbf{E}_F 分别为硅层, 绝缘层, 铁电层的电场强度, \mathbf{P}_d 为铁电层的极化强度, 其大小随铁电层电场 \mathbf{E}_F 的强度变化而改变, 而 \mathbf{E}_F 又随栅电压的变化而变化.

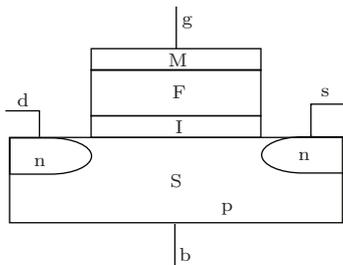


图 1 MFIS 结构铁电场效应晶体管示意图, 其中 M, F, S 分别代表金属层、铁电层、绝缘层和基底, g, d, s, b 分别为 FET 的栅极、漏极、源极、基极, n^- , p^+ 代表掺氮的 n 型硅、掺硼的 p 型硅

由 (1), (2) 式和方程 $\mathbf{E} = -\nabla\phi$ 联合可得出 FeFET 的栅电压表达式:

$$V_{gb} = \phi_s - \frac{\sigma_s}{C_{stack}} - P_d(E_F) \frac{d_F}{\varepsilon_0 \varepsilon_F}, \quad (3)$$

$$C_{stack} = \left(\frac{d_I}{\varepsilon_0 \varepsilon_I} + \frac{d_F}{\varepsilon_0 \varepsilon_F} \right). \quad (4)$$

其中 V_{gb} , C_{stack} 分别代 FET 的栅电压和绝缘层与铁电层串联总电容.

由高斯定理可知

$$\varepsilon_0 \varepsilon_S E_S = -\sigma_s(\phi_s). \quad (5)$$

上面三个式子中, d_I , d_F 分别为绝缘层和铁电层的厚度. ϕ_s 为硅表面势, 当硅基底不与绝缘层接触时, 表面有一电势 (为 0), 当硅与绝缘层接触时, 表面电势就会发生变化, 这就是所谓的接触电势, 两层接触前后电势的变化值就是硅表面势. σ_s 为硅的表面电荷, 由于硅表面势的存在, 硅基底中的载流子向硅表面迁移, 形成硅表面电荷. 于是 σ_s 的大小就受 ϕ_s 制约, 即 σ_s 有关于 ϕ_s 的函数关系. 本文我们研究电离辐射对 FeFET 电学性能的影响, 电离辐射会影响到 σ_s 的大小, 因此, 受到辐射后的硅表面电荷^[16]

$$\begin{aligned} \sigma_s(\phi_s) = & \operatorname{sgn}(\phi_s) \sqrt{2} ((\varepsilon_0 \varepsilon_S) / \beta L_D) \\ & \times [(e^{-\beta \phi_s} + \beta \phi_s - 1) \\ & + (n_i^2 / N_a + \Delta n) / N_a \\ & \times (e^{\beta \phi_s} - \beta \phi_s - 1)]^{1/2}, \quad (6) \end{aligned}$$

其中德拜长度 $L_D = [\varepsilon_0 \varepsilon_S / (\beta q (N_a + \Delta n))]^{1/2}$, $\beta = kT/q$, k , T 和 q 分别为波尔兹曼常数、器件所处的温度和单个电子所带电荷量, n_i 为硅的本征电离电荷密度, 硅在没有掺杂的时候, 由于热激发作用, 硅的部分电子会从价带迁移到导带, 形成电子-空穴. 对 N_a 为硅的掺杂密度, 在这里我们研究的是 p 型硅, 它是在没有掺杂的硅中注入硼产生的, 其载流子中, 空穴占优. 还有另外一种掺杂氮的硅, 其载流子中, 电子占优. 在模拟过程中, 它们的理论推导原理相同. Δn 为辐射电离出的载流子密度

$$\Delta n = g_0 \dot{D} \cdot \tau_r, \quad (7)$$

其中 g_0 ^[17] 为单位体积的硅接受 1 Gy 的辐射时, 电离出的电荷密度, \dot{D} 为辐射剂量率 (Gy/s), τ_r 为辐射电离出的载流子寿命, 辐射电离出的电子-空穴对, 会自由扩散, 这一过程使电子-空穴对发生复合作用, 即电子-空穴对消失.

$$\frac{\tau_r}{\tau} = \frac{n_{p0}}{n_{p0} + \Delta n}, \quad (8)$$

n_{p0} 为 p 型硅中空穴的密度, 其大小等于 p 型硅的掺杂密度 N_a . τ 为在没有辐射前少子寿命. 由 (7), (8) 式可得出

$$\tau_r = \frac{-n_{p0} + \sqrt{n_{p0}^2 + 4g_0 \dot{D} n_{p0} \tau}}{2g_0 \dot{D}}. \quad (9)$$

对于 MFIS 结构的 FeFET 而言, 每一层结构都有不同的电容, 其中 $C_F = d_F / \varepsilon_F \varepsilon_0$ 为铁电层电容,

$C_1 = d_1/\epsilon_1\epsilon_0$ 为绝缘层电容, $C_{Si} = d\sigma_s/d\phi_s$ 为硅层电容. 因此总电容为

$$C = 1/(1/C_F + 1/C_1 + 1/C_{Si}). \quad (10)$$

2.2 FeFET的漏源电流

当界面能达到一定值时, 硅基底表面将形成一条电荷沟道, 场效应晶体管的漏源极被这条电荷沟道连接, 沟道中将会有电流产生. 通过沟道的电流由两部分构成, 一部分是载流子受到漏源电压的作用, 漂移产生的; 另一部分是载流子受浓度梯度作用扩散产生的, 两种机理产生的电流分别沿着沟道发生变化. 然而, 总电流的大小与位置是无关的, 否则电荷会在沟道中堆积. 由于电荷密度的调节, 沟道中的电流将保持稳定, 沟道中电荷密度随着位置发生变化, 它受费米能制约. 在这里费米能被准费米能替代, 使沟道产生恒定的电流.

当FeFET受到辐射后, 硅界面层电荷密度会发生变化, 受其制约的载流子迁移率也会发生变化. 电荷漂移和扩散产生的电流, 可以写成关于准费米能的表达式^[18]

$$I = -Wq\mu N_I \frac{d\phi_{F_n}}{dx}, \quad (11)$$

上式中, W 为沟道的宽度, μ 为电荷的迁移率, F_n 为准费米能, N_I 为反型层电荷密度, x 为电荷在沟道中的位置, 准费米能 F_n 均与栅电压、铁电层极化强度、硅表面势, 以及漏源电压 V_{ds} 有关, 对于MFIS-FET而言, 当 $\phi_s < \phi_F$ 时, (ϕ_F 为费米势) $I = 0$, 当 $\phi_s > \phi_F$ 时, 源漏电流表达式如下:

$$\begin{aligned} I = & \frac{-W}{L} \frac{\mu c_{stack}}{\beta^2} \\ & \times \left[\left(1 + \beta V_{gb} + \frac{\beta d_F}{\epsilon_0 \epsilon_F} P_d(E_F) \right) (\beta \phi_{sL} - \beta \phi_{s0}) \right. \\ & - \frac{1}{2} [(\beta \phi_{sL})^2 - (\beta \phi_{s0})^2] \\ & - \frac{2}{3} a [(\beta \phi_{sL})^{3/2} - (\beta \phi_{s0})^{3/2}] \\ & \left. + a [(\beta \phi_{sL})^{1/2} - (\beta \phi_{s0})^{1/2}] \right], \quad (12) \end{aligned}$$

上式中 ϕ_{s0} , ϕ_{sL} ^[13] 分别为源极和漏极的硅表面势, L 为FET沟道的长度, $a = \sqrt{2}(\epsilon_0 \epsilon_S)/(L_D C_{stack})$.

沟道中的总电荷由反型层电荷和耗尽层电荷构成, 其中反型层电荷量为 $-qN_I$, 耗尽层电荷量为 $-qN_{dpl}w$.

$$\sigma_S = -qN_I - qN_{dpl}w. \quad (13)$$

耗尽层的宽度可写为

$$w = \sqrt{2}L_D(\beta\phi_s)^{1/2}. \quad (14)$$

通过上面两式消去 w 得

$$N_I = \frac{c_{total}}{\beta} (-a(\beta\phi_s)^{1/2} - \frac{\beta\sigma_s}{C_{stack}}). \quad (15)$$

另外, 电荷迁移率^[19]为

$$\mu = 1/(1/\mu_{ph} + 1/\mu_{sr}), \quad (16)$$

其中 μ_{ph} 受声子散射限制, μ_{sr} 受界面粗糙度限制:

$$\mu_{ph} = A \cdot E_{eff}^{-0.3} \cdot T^{-1.75}, \quad (17)$$

$$\mu_{sr} = B \cdot E_{eff}^{-2.6}, \quad (18)$$

$$E_{eff} = (q/\epsilon_S)(N_{dpl} + \theta N_I), \quad (19)$$

其中 θ , A , B 均为参数, 其大小与材料本身决定. 为引起载流子迁移率变化的有效电场.

2.3 铁电层极化在辐射环境下的模拟

在这里用米勒模型模拟铁电层在辐射前后的极化, 其中饱和极化

$$P_{sat}^+(E) = P_s \tanh[(E - E_c)/2\delta], \quad (20)$$

$$\delta = E_c \left[\ln \left(\frac{1 + P_r/P_s}{1 - P_r/P_s} \right) \right], \quad (21)$$

$$P_{sat}^-(E) = -P_{sat}^+(-E), \quad (22)$$

上式中, P_s , P_r 和 E_c 分别为饱和极化、剩余极化、矫顽场. 在FeFET中, 由于各层的分压作用, 铁电层极化可能达不到饱和, 那么上面的式子就不适用了, 米勒对其进行修正^[20]:

$$\frac{\partial P_d}{\partial E} = \Gamma \frac{\partial P_{sat}}{\partial E}, \quad (23)$$

$$\Gamma = 1 - \tanh \left[\left(\frac{P_d - P_{sat}^{1/2}}{\xi P_s - P_d} \right) \right], \quad (24)$$

$$P_{d_{m+1}} = (E_{m+1} - E_m) \frac{\partial P_d}{\partial E_m} + P_{d_m}, \quad (25)$$

上式中, 当 $dE/dt > 0$ 时, $\xi = +1$; 当 $dE/dt < 0$ 时, $\xi = -1$.

场效应晶体管在辐射环境中, 铁电层的自发极化、剩余极化、矫顽场、介电常数都会受辐射影响. 目前还没有找出这些参量与辐射的关系表达式. 但是有相关的实验结果, 在这里稍加改变拟合思路, 用米勒模型对实验结果进行拟合. 我们对回滞线两支分别进行拟合, 得出的结果不再使米勒模型中的(22)式成立, 即 $P_{sat}^-(E) \neq -P_{sat}^+(-E)$. 它们的表达式形式并没有不同, 不同的是它们的相关参数, 即

自发极化、剩余极化、矫顽场、介电常数. 其中一支的拟合表达式为

$$P_{\text{sat}}^+(E) = h \tanh[(E - E_c/2\delta) + d\epsilon_0 E], \quad (26)$$

拟合后, h 为自发极化, d 为介电常数, 同理可得 $P_{\text{sat}}^-(E)$ 这一支的相关参数.

以上的理论推导就是 FeFET 在辐射环境下, 漏源电流和电容随着栅电压变化的情况, 以及所用到的铁电层极化模型. 下面通过数值计算对 FeFET 的辐射效应进行定量计算分析.

3 数值计算与讨论

3.1 初始条件

在计算的过程中, 栅电压 V_g 振幅为 10 V, 且为低频的线性交流电, 另外需要给定一些参数, 给定

的值如表 1 所示.

另外, 对于铁电层, 利用文献中的实验结果 [21] 进行拟合, 所得参数如表 2 所示.

图 2 为实验结果与模拟结果对比图, 从图中可以看出稍加改进的米勒模型与实验结果很相符, 因此, 拟合的参数可以运用到计算当中.

表 1 模拟计算过程中所用到的参数

参数	数值	参数	数值
d_I/nm	20	N_a/m^{-3}	3×10^{20}
d_F/nm	250	n_i/m^{-3}	1.5×10^{16}
ϵ_I/nm	100	$g_0/\text{m}^{-3}\cdot\text{rad}$	8.1×10^{18}
A	2.5×10^5	V_{ds}/V	0.1
B	4.5×10^{19}	L/m	4×10^{-6}
θ	1/2	W/m	4×10^{-6}

表 2 铁电层在辐射前后拟合的相关参数对比

	$P_s/(\mu\text{C}/\text{cm})$	$P_r^+/(\mu\text{C}/\text{cm})$	$P_r^-/(\mu\text{C}/\text{cm})$	$E_c^+/(k\text{V}/\text{cm})$	$E_c^-/(k\text{V}/\text{cm})$	$\epsilon_F/1$
pre-rad	30.77	22.99	22.21	93.02	72.87	333
10 Mrad	28.60	21.43	20.90	93.02	72.87	287
100 Mrad	17.52	14.42	13.90	106.98	77.52	157

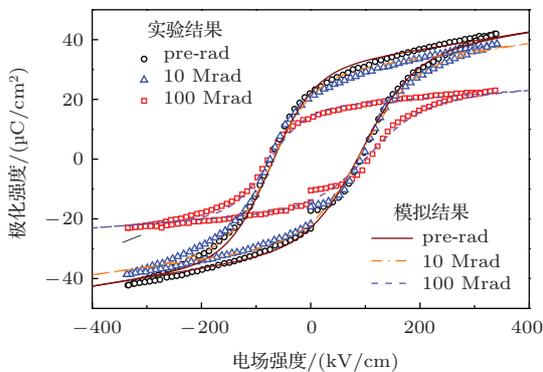


图 2 (网刊彩色) 不同辐射剂量辐射时, 铁电薄膜极化的模拟和实验图

3.2 电离辐射的总剂量效应

如图 3 所示, 漏源电流随着栅电压的增大而增大, 从图 3 还可以看出, 当栅电压为 0 的时候, FeFET 依然导通, 这是由于栅电压为 0 时, 铁电层极化并不为 0, 根据串联电路原理, 总电压为 0, 其中一分电压不为 0, 那么其他分压也必不为 0, 即硅表面势不为 0, 并且此时硅表面势大于费米势, 因此 FeFET 导通. 这一特点正是 FeFET 区别与传统的场效应晶体管的地方, 当栅电压为 0 时, 传统的场

效应管是绝不会导通的.

如图 3 所示, 辐射的总剂量效应使 FeFET 的开启电压 (绝对值) 增大, 并且, 总剂量为 0.1 MGy 时, 总剂量效应对漏源电流基本没有影响 (传统的场效应管在这个总剂量下, 漏源电流已经有了很大的变化); 当总剂量为 1 MGy 时, 总剂量效应对漏源电流有了明显的影响. 辐射的总剂量效应直接作用在铁电层, 它使铁电层的自发极化、剩余极化、矫顽场、和介电常数均减小. 由 (3) 式可看出辐射的总剂量效应对铁电层物理参数的影响不仅仅局限于铁电层本身, 并且间接的影响到其他层的物理参数, 例如硅表面势、硅界面电荷密度等. 我们从图 3 发现, 漏源电流图像的左支, 当栅电压为 0 V 时, 漏源电流随辐射总剂量的增大而增大; 当栅电压为 8 V 的时候漏源电流随辐射总剂量的增大而减小.

如图 4 所示, 本文我们运用的是低频交流栅压, 在低频交流栅电压作用下, FeFET 的电容曲线呈现蝶型. 由式 (6) 可得, 硅界面层电荷是关于硅表面势的函数, 硅表面势是随着栅电压的变化而变化的, 再由式 (10) 可得, FeFET 中硅基底电容是硅表面电荷关于硅表面势的导数, 因此 FeFET 的电

容曲线就呈现图4所示的蝶型形状. FeFET的电容在总剂量效应的作用下, 其两窗口向栅电压(绝对值)增大的方向平移. 同样, 总剂量为0.1 MGy时, FeFET的电容变化很小; 总剂量为1 MGy时, FeFET的电容才有了明显的变化.

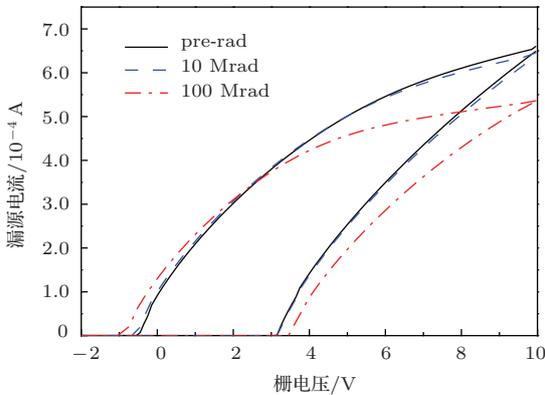


图3 (网刊彩色) 总剂量效应对 FeFET 漏源电流的影响

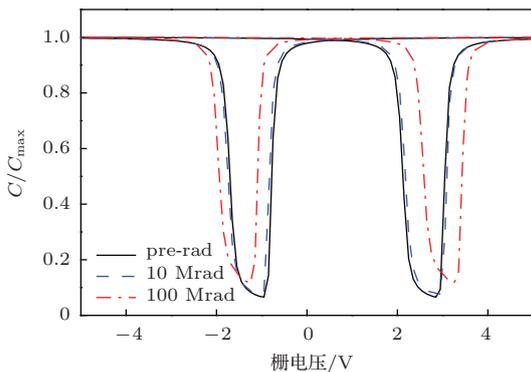


图4 (网刊彩色) 总剂量效应对 FeFET 电容的影响

3.3 电离辐射的剂量率效应

如图5所示, 剂量率效应并没有影响到漏源电流曲线的形状, 但是, 漏源电流曲线向左平移. 剂量率效应是直接作用在硅基底层的, 它直接影响到硅表面电荷的密度, 由(3)式可看出它也间接的影响着铁电层极化的大小. 剂量率效应对漏源电流曲线影响并不大. 如图6所示, FeFET的电容窗口随辐射剂量率的增大而减小, 剂量率效应对FeFET电容的影响要比漏源电流大一些. 在实际的辐射环境中电离辐射的总剂量效应和剂量率效应是不可能分开的, 在此, 为了更加清楚的研究他们的作用机理才分开研究模拟的, 这也是模拟计算的优势所在. 它们对FeFET的漏源电流和电容曲线均有影响, 但是, 他们的作用机理完全不同. 总剂量效应

主要影响铁电层的物理参数, 进而影响 FeFET 的电学性能; 剂量率效应主要影响硅表面电荷密度, 进而影响 FeFET 的电学性能.

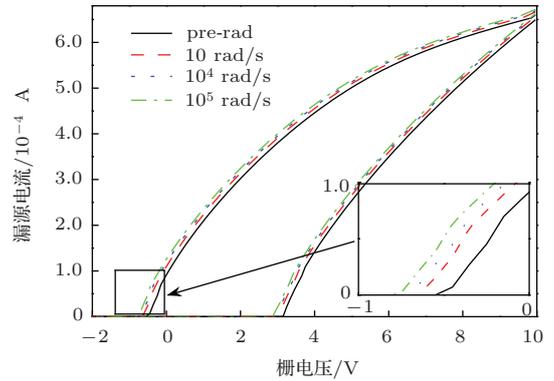


图5 (网刊彩色) 剂量率效应对 FeFET 漏源电流的影响

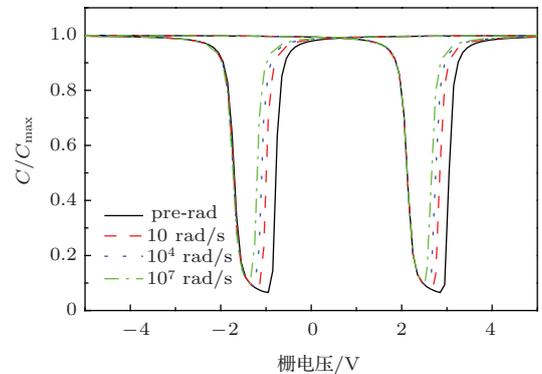


图6 (网刊彩色) 剂量率效应对 FeFET 电容的影响

4 结 论

本文推导了电离辐射环境下的米勒模型, 并就电离辐射的总剂量效应和剂量率效应对 FeFET 电学性能的影响进行了研究. 由于电离辐射效应主要表现为在材料中产生电子-空穴对而不改变材料的微观结构, 本模型主要考虑了辐射对铁电层极化和硅基底界面电荷密度的影响, 对铁电层及其他各层的结构变化做了忽略处理. 模拟结果表明, 在较低的辐射环境里, 辐射对 FeFET 的性能影响甚微, 高辐射环境里有一定的影响, 但是 FeFET 仍能正常运行. 这说明了 FeFET 具有较强的抗辐射性能.

参考文献

- [1] Philpy S T, Kamp D A, DeVilbiss A D, Isacson A F, Derbenwick G F 2000 *Aerospace Conference Proceedings* Big Sky MT, America, March 18-25, 2000 p377

- [2] Verbeck C, Gaucher P 1993 *Radiation and its Effects on Components and Systems* St. Malo, France, September 13–16, 1993 p166
- [3] MacLeod T C, Sims W H, Varnavas K A, Sayyah R, Ho F D 2009 *Non-Volatile Memory Technology Symposium* Portland America, October 25–28, 2009 p24
- [4] Zhang X Y, Guo Q, Lu W, Zhang X F, Zheng Q W, Cui J W, Li Y D, Zhou D 2013 *Acta. Phys. Sin.* **62** 156107 (in Chinese) [张兴尧, 郭旗, 陆妩, 张孝富, 郑齐文, 崔江维, 李豫东, 周东 2013 物理学报 **62** 156107]
- [5] Schwank J R, Nasby R D, Miller S L, Rodgers M S, Dressendorfer P V 1990 *IEEE T. Nucl. Sci.* **37** 1703
- [6] Liu B, Ma Y, Zhou Y, Li J 2013 *Radiat Eff. Defects Solids* **168** 115
- [7] Usher T D 1998 *APS March Meeting Abstracts Los Angeles, America*, March 16–20, 1998 p1709
- [8] Li X J, Geng H B, Lan M J, Yang D Z, He S Y, Liu C M 2010 *Chin Phys. B* **19** 056103
- [9] Soubra M, Cygler J, Mackay G 1994 *Med. Phys.* **21** 567
- [10] He B P, Zhang F Q, Yao Z B 2007 *Chin. J. Comput. Phys.* **1** 109 (in Chinese) [何宝平, 张凤祁, 姚志斌 2007 计算物理 **1** 109]
- [11] Sun P, Du L, Chen W H, He L, Zhang X F 2012 *Acta. Phys. Sin.* **61** 107803 (in Chinese) [孙鹏, 杜磊, 陈文豪, 何亮, 张晓芳 2012 物理学报 **61** 107803]
- [12] Li Z, Xiao Y G, Tang M H, Chen J W, Ding H, Yan S A, Zhou Y C 2014 *Mater. Sci. Forum* **787** 247
- [13] Miller S L, McWhorter P J 1992 *J. Appl. Phys.* **72** 5999
- [14] Guo Y, Chen J J, He Y B, Liang B, Liu B W 2013 *Chin Phys. B* **22** 046103
- [15] 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** 046103
- [16] Chauhan R K, Chakrabarti P 2002 *Microelectron. J.* **33** 197
- [17] Inza M G, Lipovetzky J, Carbonetto S, Salomone L S, Redin E, Faigon A 2012 *Technology and Application-sin Micro-Nanoelectronics* Cordoba, Argentina, August 9–10, 2012 p79
- [18] Brews J R 1981 *Appl. Solid State Science* (New York: Academic Press) pp11–120
- [19] Takagi S I, Toriumi A, Iwase M, Tango H 1994 *IEEE T. Electron Dev.* **41** 2357
- [20] Miller S L, Nasby R D, Schwank J R, Rodgers M S, Dressendorfer P V 1990 *J. Appl. Phys.* **68** 6463
- [21] Shi Q, Ma Y, Li Y, Zhou Y 2011 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B* **269** 452

Computer simulation of electric properties of metal-ferroelectric-substrate structured ferroelectric field effect transistor under ionizing radiation*

Wu Chuan-Lu¹⁾ Ma Ying^{1)2)†} Jiang Li-Mei¹⁾ Zhou Yi-Chun¹⁾²⁾ Li Jian-Cheng³⁾

1) (*Faculty of Materials, Optoelectronics and Physics, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China*)

2) (*Key Laboratory of Low Dimensional Materials & Application Technology, Ministry of Education, Xiangtan 411105, China*)

3) (*School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan, China 410073*)

(Received 18 May 2014; revised manuscript received 24 June 2014)

Abstract

This article uses the Miller model to simulate the ferroelectric polarization of the metal-ferroelectrics-insulator-substrate (MFIS) structured ferroelectric field effect transistor (FeFET), interfacial charge concentration, and charge migration rate under ionizing radiation. The capacitance and source-drain current at different total dose and different dose rate are calculated. Results show that the total dose of 0.1 MGy changes slightly the source leakage current and capacitance of the FeFET, and the total dose of 1 MGy leads to a larger variation in these quantities. When the radiation dose rate is varied, the minimal changes in the drain-source current and capacitance are observed. These results suggest that FeFET has a relatively large radiation hardness.

Keywords: total-dose, dose rate, capacitance, drain-source current

PACS: 61.80.A2, 85.30.TV, 02.60.C6, 61.66.Fn

DOI: [10.7498/aps.63.216102](https://doi.org/10.7498/aps.63.216102)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11172257, 61176093).

† Corresponding author. E-mail: yma@xtu.edu.cn