

HfO₂基铁电场效应晶体管读写电路的单粒子翻转效应模拟

黎华梅 侯鹏飞 王金斌 宋宏甲 钟向丽

Single-event-upset effect simulation of HfO₂-based ferroelectric field effect transistor read and write circuits

Li Hua-Mei Hou Peng-Fei Wang Jin-Bin Song Hong-Jia Zhong Xiang-Li

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 69, 098502 (2020) DOI: 10.7498/aps.69.20200123

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200123>

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

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

纳米体硅鳍形场效应晶体管单粒子瞬态中的源漏导通现象

Effect of source-drain conduction in single-event transient on nanoscaled bulk fin field effect transistor

物理学报. 2020, 69(8): 086101 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191896>

空间高能离子在纳米级SOI SRAM中引起的单粒子翻转特性及物理机理研究

Single event upset characteristics and physical mechanism for nanometric SOI SRAM induced by space energetic ions

物理学报. 2017, 66(24): 246102 <https://doi.org/10.7498/aps.66.246102>

基于重离子试验数据预测纳米加固静态随机存储器质子单粒子效应敏感性

Prediction of proton single event upset sensitivity based on heavy ion test data in nanometer hardened static random access memory

物理学报. 2020, 69(1): 018501 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20190878>

14 nm FinFET和65 nm平面工艺静态随机存取存储器中子单粒子翻转对比

Comparison of neutron induced single event upsets in 14 nm FinFET and 65 nm planar static random access memory devices

物理学报. 2020, 69(5): 056101 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191209>

选择性埋氧层上硅器件的单粒子瞬态响应的温度相关性

Temperature dependence of single-event transient response in devices with selective-buried-oxide structure

物理学报. 2019, 68(4): 048501 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20191932>

HfO₂ 基铁电场效应晶体管读写电路的单粒子翻转效应模拟*

黎华梅¹⁾ 侯鹏飞^{1)2)†} 王金斌¹⁾ 宋宏甲¹⁾ 钟向丽^{1)‡}

1) (湘潭大学材料科学与工程学院, 湘潭 411105)

2) (工业和信息化部电子第五研究所, 电子元器件可靠性物理及其应用技术重点实验室, 广州 510610)

(2020年1月16日收到; 2020年2月23日收到修改稿)

使用器件-电路仿真方法搭建了氧化铪基铁电场效应晶体管读写电路, 研究了单粒子入射铁电场效应晶体管存储单元和外围灵敏放大器敏感节点后读写数据的变化情况, 分析了读写数据波动的内在机制. 结果表明: 高能粒子入射该读写电路中的铁电存储单元漏极时, 处于“0”状态的存储单元产生的电子空穴对在器件内部堆积, 使得栅极的电场强度和铁电极化增大, 而处于“1”状态的存储单元由于源极的电荷注入作用使得输出的瞬态脉冲电压信号有较大波动; 高能粒子入射放大器灵敏节点时, 产生的收集电流使处于读“0”状态的放大器开启, 导致输出数据波动, 但是其波动时间仅为 0.4 ns, 数据没有发生单粒子翻转能正常读出. 两束高能粒子时间间隔 0.5 ns 先后作用铁电存储单元漏极, 比单束高能粒子产生更大的输出数据信号波动, 读写“1”状态的最终输出电压差变小.

关键词: 铁电场效应晶体管, 单粒子瞬态, 单粒子翻转

PACS: 85.30.Tv, 78.70.-g, 02.60.Cb

DOI: 10.7498/aps.69.20200123

1 引言

航天电子器件长时间工作在太空环境下, 会受到各种辐射粒子的影响而引发各种复杂的辐照问题^[1,2]. 铁电存储器是以铁电薄膜的极化特性来存储信息的, 具有非挥发性、高存取速度、低功耗、强抗辐射能力等优点, 在航天电子器件中有独特的优势^[3-7]. 铁电存储器根据单元结构的不同可以分为电容型 (1T-1C 和 2T-2C) 和晶体管型 (1T). 相对电容型铁电存储器来说, 铁电场效应晶体管 (ferroelectric field effect transistor, FeFET) 可以实现非破坏性读取, 并且具有结构简单、集成度高等优

点, 已经引起了研究人员的广泛关注^[8-12]. 铁电薄膜是 FeFET 的核心材料, 其尺寸效应、保持性能和抗辐照能力直接决定 FeFET 的器件性能^[13-15]. 以锆钛酸铅 (PZT) 为代表的传统钙钛矿材料与互补金属氧化物半导体 (complementary metal oxide semiconductor, CMOS) 工艺兼容性差, 已经不能满足 FeFET 高集成度化等的发展需求^[16,17], 因此需要寻找与 CMOS 工艺兼容的新型铁电薄膜材料. 2012 年德国科学家发现掺杂 HfO₂ 薄膜具有铁电性, 并且厚度可以薄至几纳米, 从此新型氧化铪铁电材料的研究成为一个热点^[18,19]. Gong 和 Ma^[20] 研究了基于 HfO₂, PZT 和 SrBi₂Ta₂O₉ 铁电薄膜的 FeFET 的保持性能, 表明 HfO₂ 是比较适

* 国家自然科学基金 (批准号: 11875229) 和电子元器件可靠性物理及其应用技术重点实验室开放基金 (批准号: ZHD201803) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: pfhou@xtu.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: xlzhong@xtu.edu.cn

合 FeFET 的铁电薄膜材料. Sharma 和 Roy^[21] 针对氧化铪基 FeFET 存储阵列进行了擦写和读取操作, 表明氧化铪基 FeFET 存储阵列可以在超低功耗下进行读写. HfO₂ 基 FeFET 应用到航天电子器件时, 需要考虑各种辐射粒子的影响. 刘巧灵^[22] 发现了氧化铪基 FeFET 栅结构电容受到 5 Mrad(Si) 的 ⁶⁰Co γ 射线辐照后剩余极化值和保持性能基本没有变化, 证明了该器件具有优异的抗总剂量效应性能. HfO₂ 基 FeFET 比传统 FeFET 的物理尺寸小, 总剂量辐射效应相对来说较弱, 却更容易产生单粒子效应^[23-25]. 目前, HfO₂ 基 FeFET 存储器仍在试验阶段, 市场上还没有 HfO₂ 基 FeFET 芯片, 因此难以开展其单粒子效应试验研究. 而仿真模拟具有不需要成品器件且能直观系统地分析器件内部变化的优点, 还可以降低研发成本和对铁电存储阵列和铁电电路进行准确的性能评估, 并在性能评估的基础上再对其进行各方面的参数优化. 因此, 在当前没有 HfO₂ 基 FeFET 成品器件的情况下, 使用器件-混合仿真方法研究 HfO₂ 基 FeFET 单粒子效应是开展 HfO₂ 基 FeFET 单粒子效应研究较为必要且可行的内容.

本文使用半导体仿真软件搭建了 45 nm 工艺 HfO₂ 基 FeFET 读写电路, 对其不同敏感节点进行了单粒子翻转效应研究, 分析了存储数据发生变化的内在机制, 这对航空电子器件结构的设计和抗单粒子电路的搭建具有重要意义.

2 仿真设置

据报道, Hf_{0.5}Zr_{0.5}O₂(HZO) 厚度为 10 nm 时仍有良好铁电性能, 饱和极化强度 $2P_r$ 可达到 $40 \mu\text{C}/\text{cm}^2$, 矫顽场强度为 $1 \text{ MV}/\text{cm}$ ^[22], 本文选用 HZO 铁电薄膜参数和利用 Sentaurus TCAD^[26] 建立 45 nm 工艺的 HfO₂ 基 FeFET 模型, 如图 1 所示, 器件的具体工艺参数如表 1 所列. 随后利用器件-电路混合仿真方法搭建了 2×2 铁电存储阵列的读写电路, 如图 2 所示, SGS 和 SGD 表示选通控制信号; WL 表示字线信号; BL 表示位线信号; Out 1 和 Out 2 表示灵敏放大器输出信号; Sa_in 表示铁电存储阵列的输出信号; Sa_ref 表示参考输入信号. 其中 SPICE (simulation program with integrated circuit emphasis) 模型采用亚利桑那州立大学的 45 nm 工艺 BSIM4 SPICE 集约模型^[27], 进行了读写时序的仿真, 如图 3 所示.

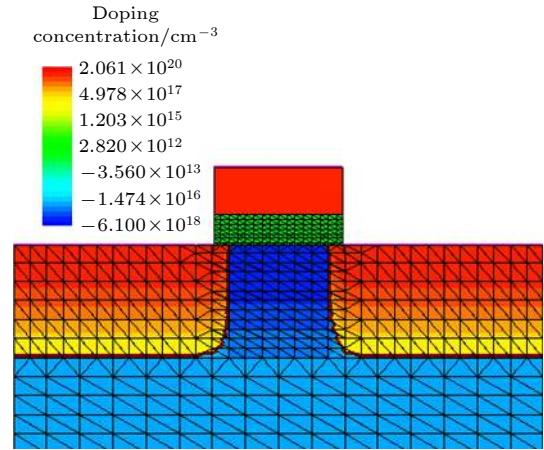


图 1 HfO₂ 基 FeFET 器件物理模型

Fig. 1. Device physical models of HfO₂-based FeFET.

表 1 HfO₂ 基 FeFET 工艺参数
Table 1. Process parameters of HfO₂-FeFET.

参数	数值
多晶硅厚度/nm	20
栅氧层厚度/nm	1
铁电层厚度/nm	10
沟道长度/nm	45
N型衬底浓度/cm ⁻³	1×10^{16}
N阱浓度/cm ⁻³	5×10^{16}
源/漏浓度/cm ⁻³	2×10^{20}
阈值电压掺杂浓度/cm ⁻³	5×10^{17}
饱和极化值 $P_s/\mu\text{C}\cdot\text{cm}^{-2}$	28
剩余极化值 $P_r/\mu\text{C}\cdot\text{cm}^{-2}$	23
矫顽场强度 $E_c/\text{MV}\cdot\text{cm}^{-1}$	1
介电常数 E_{ps}	22

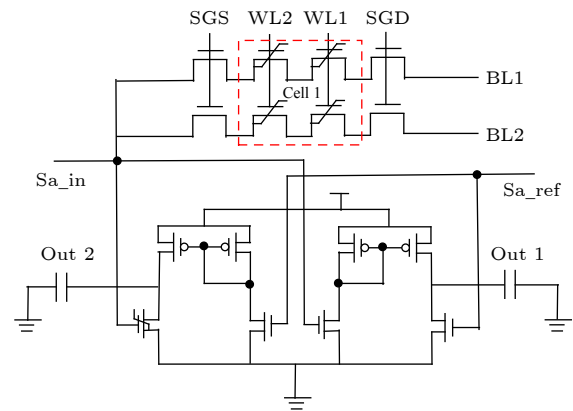


图 2 2×2 铁电存储阵列的读写电路

Fig. 2. Read and write circuit of 2×2 ferroelectric memory array.

对于深亚微米级器件, 使用流体动力学模型去描述器件的载流子输运过程, 流体动力学模型有如下几个基本方程:

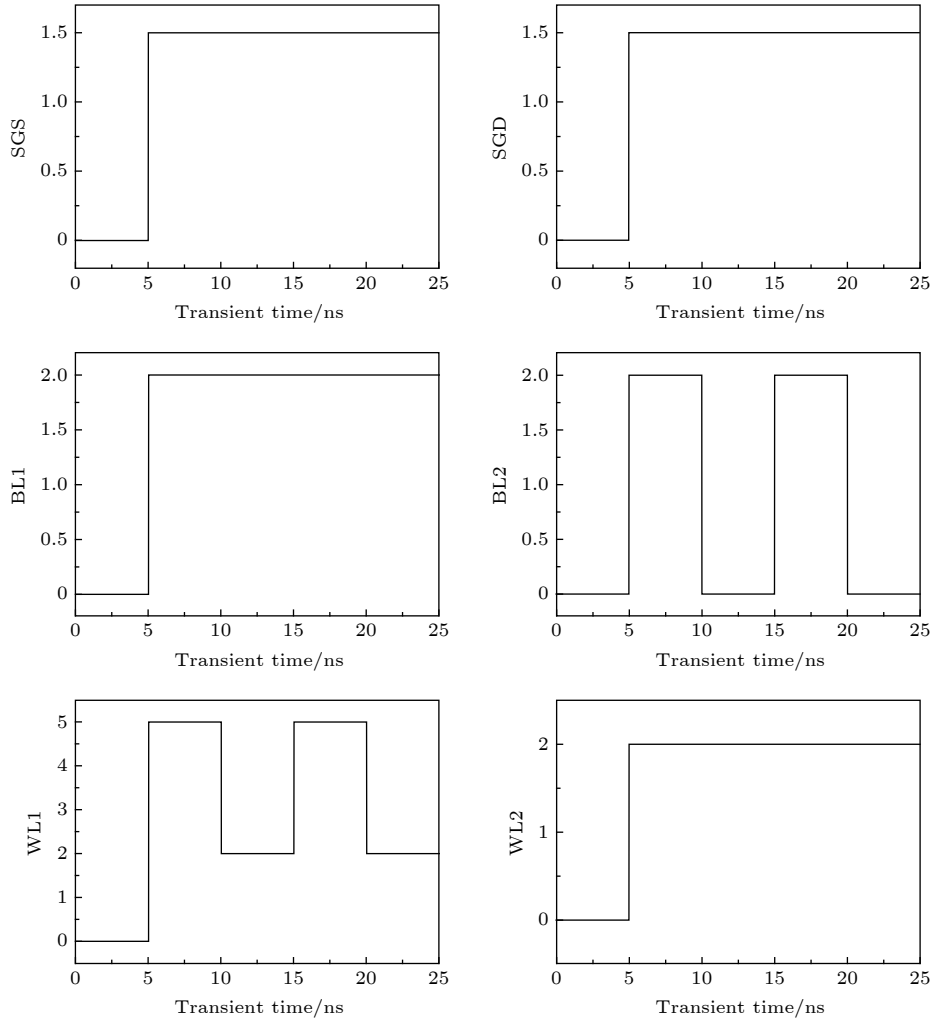

 图3 2×2 铁电存储阵列控制仿真时序

 Fig. 3. Control simulation timing of 2×2 ferroelectric memory array.

泊松方程

$$\nabla \cdot \varepsilon \nabla \psi = -q(p - n + N_D^+ - N_A^-), \quad (1)$$

载流子连续性方程

$$\nabla \cdot \mathbf{J}_n = qR_{\text{net}} + q \frac{\partial n}{\partial t}, \quad (2)$$

$$-\nabla \cdot \mathbf{J}_p = qR_{\text{net}} + q \frac{\partial p}{\partial t}, \quad (3)$$

电子和空穴流密度方程

$$\mathbf{J}_n = -qk\mu_n T_L \nabla n - qn\mu_n \nabla \psi - n\mu_n [kT_L \nabla \ln n_{ie}], \quad (4)$$

$$\mathbf{J}_p = -qk\mu_p T_L \nabla p - qp\mu_p \nabla \psi - p\mu_p [kT_L \nabla \ln n_{ie}], \quad (5)$$

其中 ε 为介电常数, $\nabla \psi$ 为静电势的梯度, q 为基本电荷量, p 和 n 为空穴和电子密度, N_D^+ 和 N_A^- 为电离的施主和受主浓度, T_L 为晶格常数, μ_n 和 μ_p 为硅材料中的电子和空穴的迁移率, n_{ie} 是本征载流子浓度.

FeFET 器件中铁电层和沟道是高掺杂区域, 在数值器件模拟中为了更贴合实际器件考虑了掺杂、电场以及载流子之间的散射和碰撞电离模型对迁移率的影响, 主要包括掺杂 SRH 复合模型、Auger 复合模型和高浓度掺杂下的禁带变窄模型. 通过引入量子势 (载流子浓度和浓度梯度的函数) 来考虑量子效应, 在传输方程中还采用了密度梯度模型、泊松方程和载流子连续方程解算量子势方程. 影响晶体管物理模型电学特性的详见半导体器件仿真工具 [26].

铁电性能模型能描述仿真模拟铁电电容的瞬态电学特性和非饱和状态下极化特性, 是根据 Miller 和 Mcwhorter [28] 提出的铁电模型进行了优化, 引入了铁电电容率模型, 通过搭建等效电路对铁电极化特征进行了全面准确的描述, 同时包括饱和极化模型和非饱和极化模型. 优化模型的具体表达式如下:

附加电场的瞬态变化,

$$\frac{d}{dt}F_{\text{aux}}(t) = \frac{F(t) - F_{\text{aux}}(t)}{\tau_E}, \quad (6)$$

附加极化强度,

$$P_{\text{aux}} = cP_s \tanh(w(F_{\text{aux}} \pm F_c)) + P_{\text{off}}, \quad (7)$$

$$w = \frac{1}{2F_c} \ln \frac{P_s + P_r}{P_s - P_r}, \quad (8)$$

实际的极化瞬态行为,

$$\frac{d}{dt}P(t) = \frac{P_{\text{aux}}[F_{\text{aux}}(t)] - P(t)}{\tau_P} \left(1 + k_n \left| \frac{d}{dt}F_{\text{aux}}(t) \right| \right). \quad (9)$$

上述方程式中, τ_E 和 τ_P 为材料的附加电场弛豫时间常数和极化强度弛豫时间常数, P_s 为饱和极化强度, P_r 为剩余极化强度, F_c 为矫顽电场, k_n 为材料的非线性耦合特征常数, c 和 P_{off} 为铁电材料的极化参数.

采用了 Gaussian 分布建立单粒子辐射模型, 设置了轰击高能粒子的初始入射半径为 $0.05 \mu\text{m}$, 入射深度为 $1 \mu\text{m}$, 其他参数由 TCAD 默认设置. 详细求解高能粒子引起的电子空穴对产生率 G 的基本方程式如下:

$$G(l, w, t) = G_{\text{LET}}(l) \times R(w, l) \times T(t), \quad (10)$$

$$G_{\text{LET}}(l) = \frac{1}{\pi w_t^2} (1 + \text{LET}_f(l)), \quad (11)$$

$$R(w, l) = \exp \left[- \left(\frac{w}{w_t(l)} \right)^2 \right], \quad (12)$$

$$T(t) = \frac{2 \times \exp \left[- \left(\frac{t - t_0}{\sqrt{2} \cdot s_{\text{hi}}} \right)^2 \right]}{\sqrt{2\pi} \cdot s_{\text{hi}} \left[1 + \text{erf} \left(\frac{t_0}{\sqrt{2} \cdot s_{\text{hi}}} \right) \right]}, \quad (13)$$

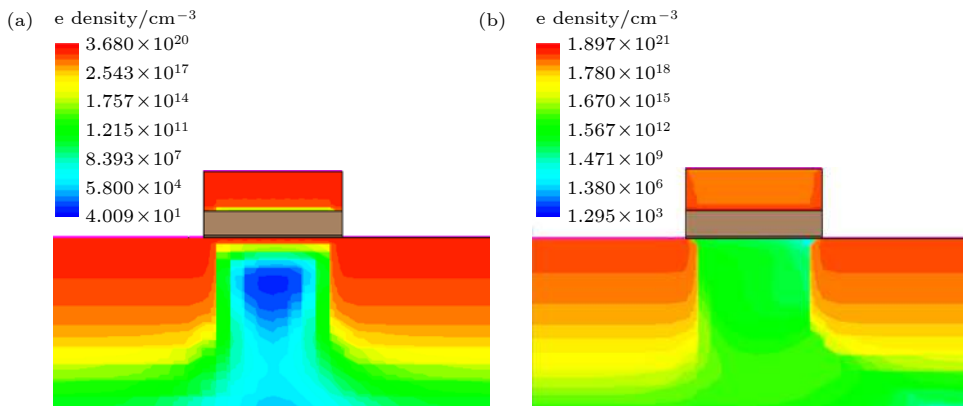


图 4 HfO₂ 基 FeFET 写入时器件内部的电荷密度分布 (a) 写入“1”器件内部电荷分布; (b) 写入“0”时器件内部电荷分布

Fig. 4. Charge density distribution inside the device when HfO₂-based FeFET is written: (a) The internal charge distribution of the device is written with “1”; (b) the internal charge distribution of the device is written with “0”.

其中 $\text{LET}_f(l)$ 为辐射产生的线性能量转移值 (linear energy transfer, LET), l 为入射深度, $w_t(l)$ 为高能粒子入射半径, t_0 为初始入射时间, s_{hi} 为 Gaussian 时序分布特征延迟时间.

对器件混合电路进行辐照模拟时, 首先通过 (1)–(5) 式和 (9) 式计算器件混合电路的电学特性求得稳态解, 然后结合单粒子辐射模型公式 (10) 计算出瞬态解.

3 模拟结果

3.1 HfO₂ 基 FeFET 电路的读写

当栅极电压为负电压, 铁电极化从上指向下为负方向, 在沟道处有大量的累积电荷, 在漏源之间加小电压读出数据“0”; 当栅极电压为正电压, 铁电极化从下指向上为正方向, 沟道处出现了反型层, 在漏源之间加一个小电压读出数据“1”, HfO₂ 基 FeFET 写入“1”和“0”状态时器件内部的电荷密度分布如图 4 所示. 输入 2×2 铁电存储阵列读写电路的控制时序如图 3 所示, 得到了 HfO₂ 基 FeFET 读写电路的灵敏放大器输出信号变化、铁电存储单元 cell 1 输出信号变化和铁电存储单元 cell 1 极化强度变化, 如图 5 所示. 通过输出电压的大小来定义存储状态“1”和“0”, 经过灵敏放大器进行数据读出. 当输入正栅压时, 铁电极化为正, 输出高电压为存储数据“1”; 当输入负栅压时铁电极化为负, 输出低电压为存储数据“0”.

3.2 单粒子入射铁电存储管漏极对存储信息的影响

铁电存储单元作为 FeFET 读写电路的主要敏

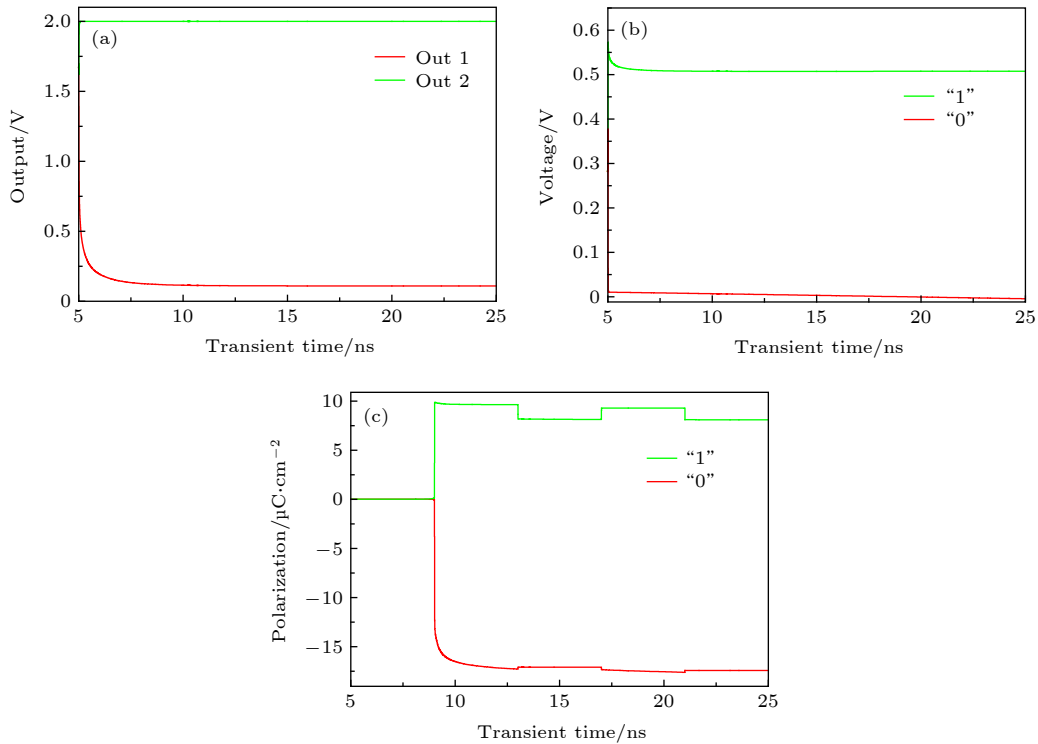


图 5 铁电存储阵列的读写信号 (a) 灵敏放大器输出信号变化; (b) cell 1 输出信号变化; (c) cell 1 极化强度变化

Fig. 5. Reading and writing of ferroelectric memory arrays: (a) Changes in the output signal of the sense amplifier; (b) changes in the output signal of cell 1; (c) changes in the polarization of cell 1.

感节点之一, 其对单粒子瞬态效应的敏感度会直接影响数据的擦写, 因此非常有必要研究高能粒子入射其漏极的瞬态效应.

图 6 为单粒子入射读写“0”的铁电存储单元 cell 1 时, 漏极的各节点瞬态效应变化. 图 6(a) 为高能粒子入射铁电存储单元 cell 1 漏极产生的漏极电流脉冲变化, 漏极电流脉冲随着高能粒子的 LET 值增加而变大. 如图 6(b) 所示, 在粒子入射存储管漏极后, 在 cell 1 内部产生了大量电子空穴对, 同时部分电子或空穴被漏极收集导致器件被迫导通, 电流方向变为负, 因此铁电存储单元 cell 1 输出电压从 0 V 变为负电压. 如图 6(c) 所示, 电子空穴对的产生增强了铁电存储单元 cell 1 栅极和基底的电场强度, 使得极化强度增大. 从图 6(d) 可以看出, 在读写“0”状态时, 高能粒子进入 cell 1 内部产生的微小收集电流经灵敏放大器放大后, 仅略微增大了输出电压, 数据能正确读出.

从图 7(a) 铁电存储单元 cell 1 输出信号变化可以看出, 在粒子入射铁电存储单元 cell 1 漏极后, 铁电存储单元 cell 1 输出电压随着入射粒子的 LET 值增大而增大. 虽然在器件内部产生了大量电子空穴对, 但是此时 cell 1 处于开启状态, 电

子空穴对能及时导出, 内部电场强度只是稍稍增大, 使得极化强度的变化没有图 6(c) 明显. 随着高能粒子 LET 值增大, 图 7(b) 中铁电存储单元 cell 1 输出瞬态电压峰值随着增大, 在粒子 LET 值为 $30 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$ 时, 铁电存储单元 cell 1 输出电压的峰值接近于 0 V, 在 5 ns 之后能恢复初始状态, 经过灵敏放大器放大后得到图 7(c) 灵敏放大器输出信号变化, 但是输出电压出现波动的时间只有 0.5 ns, 从而数据能正常读出.

为了更全面地分析单粒子入射铁电存储单元 cell 1 对存储信息的影响, 表 2 列出了不同 LET 值下输出端 Out 1 和 Out 2 之间的电位差变化. 尽管 Sa_{in} 和 Sa_{ref} 之间的电位差随着 LET 值的增加在不断减小, 但模拟中所采用的是理想型灵敏放大器能正确放大 Sa_{in} 和 Sa_{ref} 之间微小的电位差, 因此图 7(c) 中能够正确放大读出数据. 但是实际工作中没有理想型灵敏放大器, 灵敏放大器存在一个能够正确放大的最小输入电压差. 高能粒子入射铁电存储单元 cell 1 的漏极后, 在某个 LET 值下 Sa_{in} 和 Sa_{ref} 之间的电位差可能会小于灵敏放大器的最小分辨电压差, 导致数据信号不能正确放大读出以及回写, 引发单粒子翻转效应.

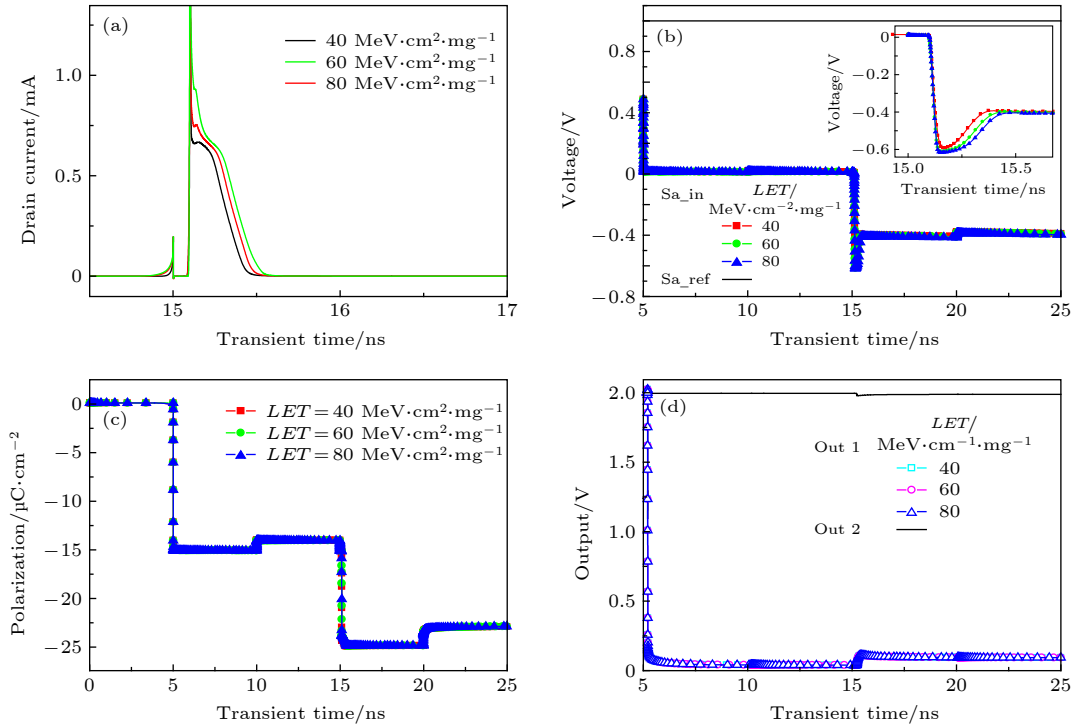


图 6 单粒子入射读写“0”铁电存储单元 cell 1 漏极的瞬态效应 (a) cell 1 漏极电流脉冲变化; (b) cell 1 输出信号变化; (c) cell 1 极化强度变化; (d) 灵敏放大器输出信号变化

Fig. 6. Transient effects of single-particle incident read and write “0” ferroelectric storage tube drain: (a) Change of drain current pulse; (b) change of cell 1 output signal; (c) change of cell 1 polarization intensity; (d) change of sense amplifier output signal.

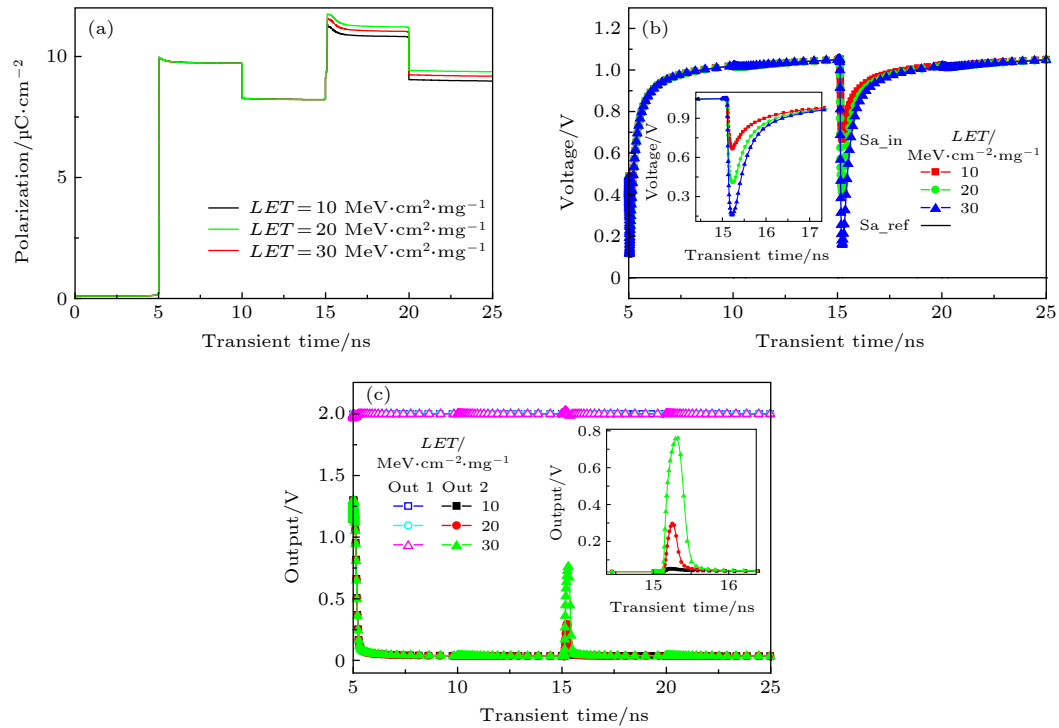


图 7 单粒子入射读写“1”铁电存储单元 cell 1 漏极的瞬态效应 (a) cell 1 极化强度变化; (b) cell 1 输出信号变化; (c) 灵敏放大器输出信号变化

Fig. 7. Transient effects of single-particle incident read and write “1” ferroelectric storage tube drain: (a) Change of cell 1 polarization intensity; (b) change of cell 1 output signal; (c) change of sense amplifier output signal.

表 2 输出端 Out 1 和 Out 2 之间的电位差变化
Table 2. Voltage difference change between Out 1 and Out 2.

	LET值/MeV·cm ² ·mg ⁻¹						
	0	10	20	30	120	150	180
电压差/V	1.9	1.85	1.7	1.2	1	0.95	0.9

3.3 单粒子入射放大器节点对存储信息的影响

灵敏放大器的作用是正确放大无法正常分辨的微弱信号, 转换为满足数据分辨功能要求的大输出信号, 因此放大器的灵敏节点对单粒子效应的敏感度是直接影响数据能不能正确放大读出的关键.

图 8 为单粒子入射读写“0”时灵敏放大器输入管后铁电存储单元 cell 1 极化强度变化和灵敏放大器输出信号变化. 从图 8(a) 可知高能粒子入射读写“0”的灵敏放大器的输入管时, 对铁电存储单元 cell 1 极化强度几乎没有影响, 即数据可以正确

读写. 图 8(b) 中高能粒子轰击灵敏放大器输入管产生了一个漏极脉冲电流, 灵敏放大器开始工作而放大输出电压, 灵敏放大器输出电压产生了很大的波动, 但是仅在 0.4 ns 后就恢复了初始状态, 因此数据能正常读出. 图 9 为读写“1”时, 单粒子入射灵敏放大器输入管后铁电存储单元 cell 1 极化强度变化和灵敏放大器输出信号变化. 从图 9(a) 可知铁电存储单元 cell 1 极化强度几乎没有影响, 存储单元能正确读写. 高能粒子轰击灵敏放大器输入管产生的漏极脉冲电流极小, 对读“1”时处于开启状态的灵敏放大器工作电流几乎没有影响, 输出信号数据能正常读出, 如图 9(b) 所示.

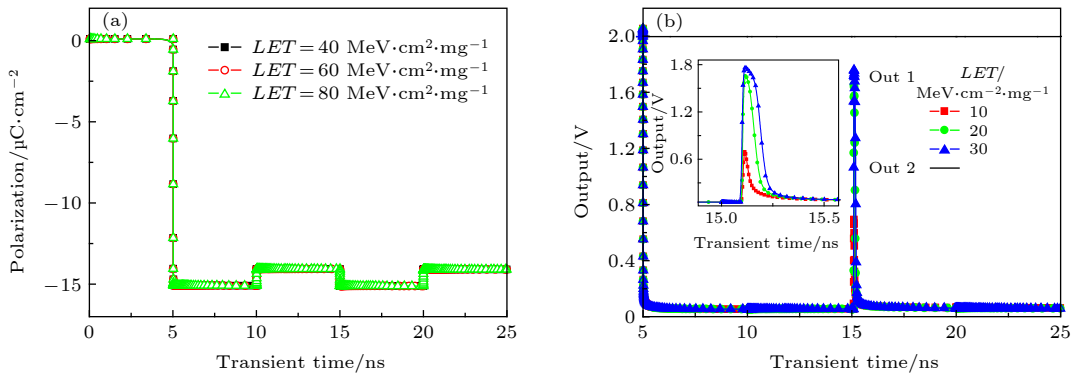


图 8 读写“0”时, 单粒子入射灵敏放大器输入管的瞬态效应 (a) 铁电存储单元 cell 1 极化强度变化; (b) 灵敏放大器输出信号变化

Fig. 8. Transient effects of a single-particle incident sensible amplifier input tube when reading and writing “0”: (a) Change of ferroelectric cell 1 polarization intensity; (b) change of sense amplifier output signal.

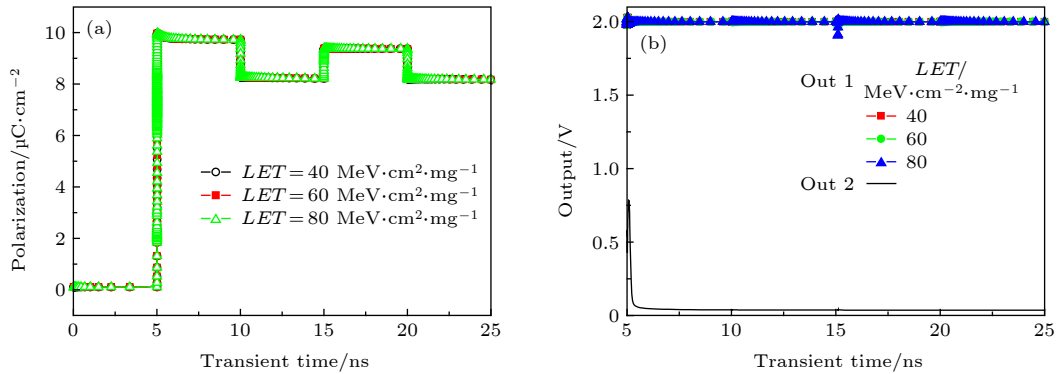


图 9 读写“1”时, 单粒子入射灵敏放大器输入管的瞬态效应 (a) 铁电存储管极化强度变化; (b) 灵敏放大器输出信号变化

Fig. 9. Transient effects of a single-particle incident sensible amplifier input tube when reading and writing “1”: (a) Change of ferroelectric transistor polarization intensity; (b) change of sense amplifier output signal.

3.4 不同剩余极化和矫顽场强度对存储信息的影响

生长工艺、掺杂水平、厚度等原因致使 HZO 铁电薄膜具有不同的铁电性能. 因此, 分析 HZO 铁电薄膜有不同的剩余极化和矫顽场对研究结果的影响, 将使该模拟工作更具有实际应用价值. 铁电薄膜的存储能力决定了存储单元的存储性能. 图 10(a) 为不同剩余极化和矫顽场强度的 HZO 铁电薄膜下的铁电存储单元 cell 1 极化强度. 高能粒子在 7 ns 时进入 cell 1 漏极后, 管内电荷增加使得 cell 1 极化强度增高. 从图 10(b) 可知, 铁电薄膜的剩余极化强度越大, 铁电存储单元抗单粒子的能力越强, 在辐射环境下工作更加稳定.

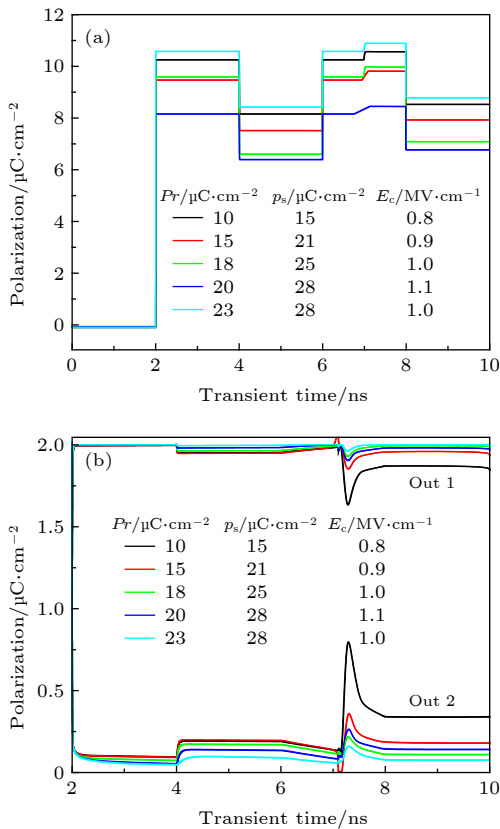


图 10 单粒子作用于不同剩余极化和矫顽场的 HZO 铁电薄膜下的铁电存储单元 cell 1 的信号变化 (a) 铁电存储单元的极化强度变化; (b) 灵敏放大器输出信号变化

Fig. 10. Signal change of ferroelectric memory cell cell 1 under single-particle HZO ferroelectric thin film with different remanent polarization and coercive field: (a) Change of ferroelectric transistor polarization intensity; (b) change of sense amplifier output signal.

3.5 多束高能粒子对存储信息的影响

两束 LET 值均为 $60 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$ 的高能粒子先后进入写“1”铁电存储单元 cell 1 后各节点的

信号变化见图 11, 时间间隔为 0.5 ns. 在图 11(a) 中的脉冲电流有两个峰值, 时间间隔为 0.5 ns. 在图 11(b) 和图 12(a) 中, 由于内部大量的电子空穴对使得极化强度增加, 其中图 12(a) 由于处于关态, 极化强度明显增大. 从图 7(c) 可知单个单粒子入射 cell 1 漏极后, 输出数据信号能迅速回复初始位置. 但是, 在图 11(c) 可以看到输出信号不能回复的初始状态, 且出现了双峰值, 最后两端输出的电压差减小, 影响数据正常的读出. 图 12 为两束 LET 值为 $60 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$ 高能粒子在时间间隔为 0.5 ns 先后进入写“1”状态的铁电存储单元 cell 1

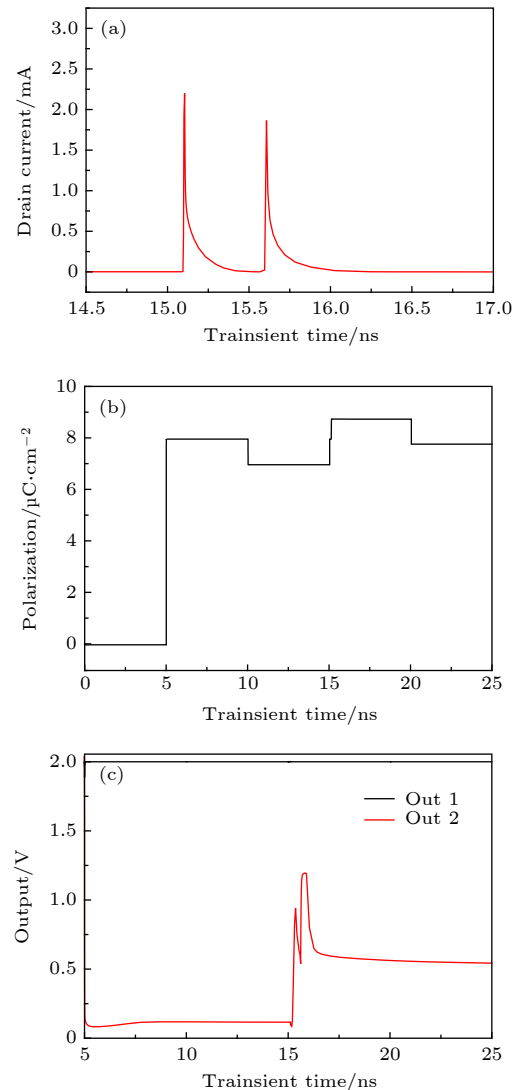


图 11 两束单粒子入射读写“1”铁电存储单元 cell 1 漏极的瞬态效应 (a) cell 1 漏极电流脉冲变化; (b) cell 1 极化强度变化; (c) 灵敏放大器输出信号变化

Fig. 11. Transient effects of two single-particle incident read and write “1” ferroelectric storage tube drain: (a) Change of drain current pulse; (b) change of cell 1 polarization intensity; (c) change of sense amplifier output signal.

后各节点的信号变化. 由图 6(d) 和图 12(b) 可以看出, 一束和两束高能粒子作用存储单元漏极都没有致使输出信号发生明显的波动, 说明处于关态的存储单元有很好的抗单粒子的能力.

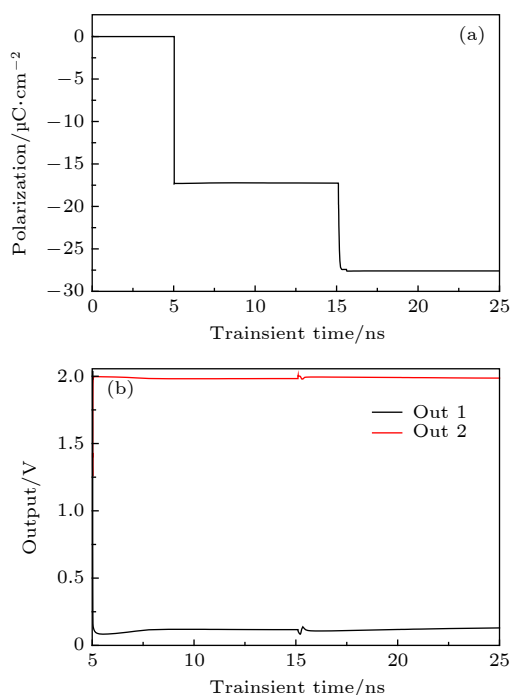


图 12 两束单粒子入射读写“0”铁电存储单元 cell 1 漏极的瞬态效应 (a) cell 1 极化强度变化; (b) 灵敏放大器输出信号变化

Fig. 12. Transient effects of two single-particle incident read and write “0” ferroelectric storage tube drain: (a) Change of cell 1 polarization intensity; (b) change of sense amplifier output signal.

4 结 论

使用半导体仿真软件 Sentaurus TCAD 对 HfO_2 基 FeFET 读写电路不同敏感节点进行了单粒子翻转效应研究, 分析了存储数据发生变化的内在机制. 仿真结果表明, 当单粒子入射 HfO_2 基 FeFET 读写电路的铁电存储单元时, 发生了数据信号的波动, 但是在 0.5 ns 后可以回复初始状态, 不会引起数据发生单粒子翻转, 说明该铁电存储单元有很好的抗单粒子翻转的性能. 当单粒子入射 HfO_2 基 FeFET 读写电路的灵敏放大器输入管时, 放大器在读“0”状态的输出信号瞬态脉冲在 0.4 ns 可以回复初始状态, 因此数据可以正确读出, HfO_2 基 FeFET 读写电路具有优异的抗单粒子能力. 两束高能粒子先后间隔 0.5 ns 进入读写“1”状态的存储单元漏极, 输出数据信号的波动较大, 电

压差的减少容易造成数据的读出出错.

参考文献

- [1] Irom F, Nguyen D N, Underwood M L, Virtanen A 2010 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **57** 3329
- [2] Weller R A, Mendenhall M H, Reed R A, Schrimpf R D 2010 *Trans. Nucl. Sci.* **57** 1726
- [3] Fu C J, Guo D Y 2006 *Micro-nano Technology* **9** 14 (in Chinese) [付承菊, 郭冬云 2006 微纳电子技术 **9** 14]
- [4] Mikolajick T, Slesazeck S, Park M H, Schroeder U 2018 *MRS Bull.* **43** 340
- [5] Li H, Hu M, Li C, Duan S 2014 *IEEE Computer Society Annual Symposium on VLSI (ISVLSI)* Tampa, FL, USA, July 9–11, 2014 p65
- [6] He W 2007 *Ph. D. Dissertation* (Chendu: University of Electronic Science and Technology) (in Chinese) [何伟 2007 硕士学位论文 (成都: 电子科技大学)]
- [7] Sharma D K, Khosla R, Sharma S K 2015 *Solid-State Electron.* **42** 111
- [8] Wang P, Wang Y, Ye L, Wu M, Xie R, Wang X, Hu W 2018 *Small* **14** 1800492
- [9] Wang J, Fang H, Wang X, Chen X, Lu W, Hu W 2017 *Small* **13** 1700894
- [10] Wang X, Wang P, Wang J, Hu W., Zhou, X, Guo N, Chu J 2015 *Adv. Mater.* **27** 6575
- [11] Tu L, Cao R, Wang X, Chen Y, Wu S, Wang F, Chu J 2020 *Nat. Commun.* **11** 1
- [12] Tu L, Wang X, Wang J, Meng X, Chu J 2018 *Adv. Electron. Mater.* **4** 1800231
- [13] Tang M H 2007 *Ph. D. Dissertation* (Xiangtan: Xiangtan University) (in Chinese) [唐明华 2007 博士学位论文 (湘潭: 湘潭大学)]
- [14] Amusan O A, Massengill L W, Baze M P 2007 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **54** 2584
- [15] Coic Y M, Musseau O, Leray J L 1994 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **41** 495
- [16] Li X, Lai L 2018 *IEEE Computer Society Annual Symposium on VLSI (ISVLSI)* Hong Kong, China, July 8–11, 2018 p750
- [17] Ni K, Li X Q, Jeffrey A S, Matthew J, Suman D 2018 *IEEE Electron Device Lett.* **39** 1656
- [18] Lee D, Yoon A, Jang S Y, Yoon J G, Chung J S, Kim M, Scott J F, Noh T W 2011 *Phys. Rev. Lett.* **107** 057602
- [19] Takahashi M, Zhang W, Sakai S 2018 *IEEE International Memory Workshop (IMW)* Kyoto, Japan, May 13–16, 2018 p1
- [20] Gong N B, Ma T P 2016 *IEEE Electron Device Lett.* **37** 1123
- [21] Sharma A, Roy K 2018 *IEEE Electron Device Lett.* **39** 359
- [22] Liu Q L 2018 *Ph. D. Dissertation* (Xiangtan: Xiangtan University) (in Chinese) [刘巧灵 2018 硕士学位论文 (湘潭: 湘潭大学)]
- [23] Ding M 2019 *Strong Laser and Particle Beam* **31** 066001 (in Chinese) [丁曼 2019 强激光与粒子束 **31** 066001]
- [24] Bossler A L, Gupta V, Javanainen A 2018 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **65** 1708
- [25] 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
- [26] Synopsys Inc. <https://www.synopsys.com/silicon/tcad.html> [2019-11-10]
- [27] Nanoscale Integration and Modeling Group <http://ptm.asu.edu/> [2019-11-10]

Single-event-upset effect simulation of HfO₂-based ferroelectric field effect transistor read and write circuits^{*}

Li Hua-Mei¹⁾ Hou Peng-Fei^{1)2)†} Wang Jin-Bin¹⁾

Song Hong-Jia¹⁾ Zhong Xiang-Li^{1)‡}

1) (*Department of Material Science and Engineer, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China*)

2) (*Science and Technology on Reliability Physics and Application Technology of Electronic Component Laboratory, Fifth Institute of Electronics of the Ministry of Industry and Information Technology, Guangzhou 510610, China*)

(Received 16 January 2020; revised manuscript received 23 February 2020)

Abstract

Ferroelectric field effect transistor (FeFET) is a promising memory cell for space application. The FeFET can achieve non-destructive reading, and has the advantages of simple structure and high integration. Ferroelectric thin film's size effect, retention performance and radiation resistance of ferroelectric thin films directly determine the performances of FeFET devices. The HfO₂ is widely used as a dielectric in complementary metal oxide semiconductor (CMOS) device and can solve the common integration problems for ferroelectric materials due to its CMOS compatibility. When the HfO₂-based FeFETs are applied to aerospace electronics, the effects of various radiation particles need to be considered. The HfO₂-based FeFET memory is still in the experimental stage, and there are no products of HfO₂-based FeFET chips available from the market, so it is difficult to carry out experimental research on its single particle effect. In the case of lacking the finished products of HfO₂-based FeFET devices, using the device-hybrid simulation method to study the HfO₂-based FeFET single-particle effect is a necessary and feasible content for the research on HfO₂-based FeFET single-particle effects. In this paper, the device-circuit simulation method is used to build a read-write circuit of HfO₂-based ferroelectric field-effect transistor. The change of read and write data after a single particle is incident on a ferroelectric field effect transistor memory cell and a sensitive node of a peripheral sense amplifier is studied, and the internal mechanism of read and write data fluctuation is analyzed. The results show that when high-energy particles enter into the drain of the ferroelectric memory cell in the read-write circuit, the memory cells in the "0" state generate electron-hole pairs, which accumulate inside the device, causing the gate electric field strength and ferroelectricity to increase, and the memory cell in the "1" state has a large fluctuation in the output transient pulse voltage signal due to the charge injection of the source, indicating that the ferroelectric memory cell has a good performance against particle flipping; when high-energy particles enter into the amplifier's sensitive node, a collection current is generated, causing the amplifier in the state of reading "0" to turn on, and the output data to fluctuate. Owing to the fluctuation time being only 0.4 ns, the data does not have single-particle flipping energy under normal readout, and the HfO₂-based FeFET read-write circuit has excellent resistance to single particles. When two beams of high-energy particles act on the drain of a ferroelectric memory cell successively in a time interval of 0.5 ns, the output data signal fluctuates more than in the case of a single beam of high-energy particles, and the final output voltage difference in the reading and writing "1" state becomes smaller.

Keywords: ferroelectric field effect transistor, single-event transient, single event upset

PACS: 85.30.Tv, 78.70.-g, 02.60.Cb

DOI: 10.7498/aps.69.20200123

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11875229) and the Opening Project of Science and Technology on Reliability Physics and Application Technology of Electronic Component Laboratory, China (Grant No. ZHD201803).

[†] Corresponding author. E-mail: pfhou@xtu.edu.cn

[‡] Corresponding author. E-mail: xlzhong@xtu.edu.cn