

УДК 621.315.592

DOI: 10.17223/00213411/64/8/131

*WEIGUO ZHU, DEXING LIAN, QINGZHAO ZHANG, CHANGSONG HOU***МЕХАНИЗМ ПОВРЕЖДЕНИЯ И СПОСОБ ЗАЩИТЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ УСТРОЙСТВ ОТ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ \***

На основе анализа характеристик электромагнитного излучения рассматриваются механизм и метод защиты полупроводниковых устройств от повреждений ионизирующим излучением. На основании исследований изменения емкости в зависимости от напряжения на затворе сегнетоэлектрического полевого транзистора (FEFET) разработана модель поляризации сегнетоэлектрического слоя. Проанализирован механизм повреждения электрических характеристик такого транзистора ионизирующим излучением с учетом двух аспектов – горизонтального напряжения и дрейфа порогового напряжения. Была реализована конструкция сегнетоэлектрического полевого транзистора с использованием антирадиационного эффекта в схеме FPGA (Field Programmable Gate Arrays). Для защиты электронных устройств от ионизирующего излучения в конструкции применен метод проектирования с трехкратным резервированием, основанный на мгновенном воздействии ионизирующего излучения. Результаты показывают, что дрейф порогового напряжения, вызванный зарядом оксидной ловушки, пропорционален дозе облучения. При этом дрейф порогового напряжения, вызванный зарядом ловушки на границе раздела, пропорционален дозе облучения в случае низкой дозы, а при дозе облучения, превышающей 60 крад ( $\text{SiO}_2$ ), зависимость становится экспоненциальной. В спроектированной схеме FPGA FEFET повторная задержка сигнала отсутствует, что доказывает эффективность защиты от ионизирующего излучения.

**Ключевые слова:** электрические характеристики, ионизирующее излучение, механизм повреждения, методы защиты.

**Введение**

Радиационное воздействие на материалы изучается в течение длительного времени. Считается, что высокоэнергетическим лучевым воздействием может быть создано в оксидном теле и на границе раздела большое количество зарядовых оксидных и межфазных ловушек. Эти заряды будут модулировать поверхностный потенциал и влиять на режим движения носителей в близлежащей области [1], вызывая тем самым деградацию электрических параметров полупроводниковых приборов. Была предложена модель для объяснения временной задержки заряда радиационно-индуцированной оксидной ловушки и получено, что заряд ловушки находится в пропорции к дозе облучения. До сих пор существуют споры о связи между плотностью заряда межфазной ловушки и дозой облучения.

После ряда исследований радиационных эффектов в материалах внимание постепенно переключается на другие параметры, помимо электрических параметров устройств. В 1990-х годах изучалась взаимосвязь между шумом полевого МОП-транзистора (металл – оксид – подложка или MOS – Metal (M), Oxide (O), and Substrate (S)) до и после радиационного воздействия [2]. Результаты показывают, что низкочастотный шум может чувствительно отражать различные потенциальные дефекты и их деградацию в полупроводниковых устройствах. Существует положительная корреляция между ухудшением характеристик устройства после облучения и образованием дефектов в оксидном слое. Изучение характеристик радиационных эффектов электронных устройств в основном сосредоточено на двух аспектах – методе, применяемом при исследованиях радиационного повреждения материалов, и методе, использующем внешние параметры устройств. Первый метод непосредственно изучает характер повреждения внутренних материалов устройств [3] в соответствии с особенностями повреждения, а второй основан на исследовании внешних параметров устройства, включая электрические параметры. По изменению внешних параметров в сочетании с внутренним повреждением материала характеризуется деградация устройства.

Основными методами, используемыми для характеристики деградации электронных устройств при воздействии ионизирующего излучения, являются измерение их электрических параметров, радиационный отжиг и множественный регрессионный анализ. Метод измерения электрических параметров предназначен для оценки их изменений до и после радиационной нагрузки, а также для оценки антирадиационных характеристик устройств по абсолютным и относительным величинам этих изменений. При этом общими электрическими параметрами являются коэффициент усиления триода и прямое напряжение диода.

\* Работа была поддержана Министерством науки и технологии Китайской Народной Республики [2012YQ180118].

Достоинства метода тестирования электрических параметров заключаются в преимуществах и недостатках их производительности и степени деградации реактивных устройств [4]. Выбор устройства осуществляется непосредственно путем измерения его электрических параметров. Недостатком является то, что при небольшой дозе облучения электрические параметры устройства часто мало меняются, что не позволяет точно отражать деградацию характеристик устройства. Метод радиационного отжига используется для проверки электрических параметров устройств. Разница между методом испытания устройства на радиационную нагрузку и методом испытания электрических параметров заключается в том, что после радиационного воздействия измеряются электрические параметры устройства соответственно до и после отжига [5]. Хотя этот метод в определенной степени может имитировать космическую радиационную среду, он имеет особенности – длительное время обнаружения, высокую стоимость и определенную деструктивность. Метод множественного регрессионного анализа в основном применим к большим выборкам, когда посредством радиационного стресс-теста случайно выбранных устройств устанавливается взаимосвязь между чувствительными параметрами структуры и общей дозой до и после облучения устройства.

Сегнетоэлектрические материалы и устройства характеризуются высокой радиационной стойкостью. В связи с быстрым развитием авиакосмической промышленности в такой радиационной среде, как космос, предъявляются высокие требования к радиационной стойкости электронных компонентов космических аппаратов. Радиационная стойкость сегнетоэлектрических материалов делает их потенциально полезными в авиационной промышленности [6].

Были исследованы радиационные эффекты в тонких сегнетоэлектрических пленках и конденсаторах, а также получены закономерности физических изменений сегнетоэлектрических материалов в радиационной среде. Изучены радиационные эффекты полевых транзисторов со структурой MOS и со структурой MFS (Metal – Ferroelectric – Substrate). К сожалению, характеристики полевого транзистора со структурой MFIS (Metall – Ferum – Insilato – Semiconductor) были лучше, чем у транзистора со структурой MFS, однако радиационная стойкость MFIS транзистора не была установлена. Поэтому потребовались глубокие исследования, чтобы выяснить его радиационную стойкость и связанный с этим физический механизм. Для исследования электрических характеристик полевого транзистора широко используется компьютерная симуляция на основе модели Миллера [7], однако эта модель не позволяет описывать радиационные эффекты сегнетоэлектрических материалов и устройств на их основе. Для FET (Field Effect Transistor) эффект радиации не ограничивается изменением характеристик сегнетоэлектрического слоя в условиях воздействия излучения, поскольку и другие слои будут подвергаться такому воздействию. Например, после того, как интерфейсный заряд кремниевой подложки подвергается облучению, изменяется его зарядовая плотность, что влияет на подвижность заряда и величину тока сток-исток [8]. На основании этого модель Миллера получила дальнейшее развитие для изучения эффекта ионизирующего излучения в FET. Разработана теоретическая модель для исследования механизма повреждения электронных устройств ионизирующим излучением и предложен способ их защиты от излучения.

## Материалы и методы

### Теоретическая модель электронных устройств

FEFET выбирается как электронное устройство с электрическими характеристиками, физические свойства которого соответствуют уравнению Максвелла

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

где  $D$  – плотность свободного заряда;  $\rho$  – вектор смещения, а вектор потенциала смещения может быть выражен как

$$D = \varepsilon_0 \varepsilon_S E_S = \varepsilon_0 \varepsilon_I E_I = \varepsilon_0 \varepsilon_F E_F + P_d. \quad (2)$$

Здесь  $\varepsilon_0$ ,  $\varepsilon_S$ ,  $\varepsilon_I$ ,  $\varepsilon_F$  – диэлектрическая проницаемость вакуума, кремния, изолирующего и сегнетоэлектрического слоев;  $E_S$ ,  $E_I$ ,  $E_F$  – напряженность электрического поля кремниевое, изолирующего и сегнетоэлектрического слоев;  $P_d$  – напряженность поляризации сегнетоэлектрического слоя, которая зависит от  $E_F$ , а  $E_F$  изменяется с напряжением затвора.

Выражение для напряжения затвора FEFET может быть получено путем объединения (1) и (2) с уравнением  $E = -\nabla\phi$ :

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

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

где  $V_{gb}$  – напряжение затвора FEFET;  $C_{\text{stack}}$  – общая емкость набора изолирующих и сегнетоэлектрических слоев.

Согласно теореме Гаусса,

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

В выражениях (3) – (5)  $d_I$  и  $d_F$  – толщины слоев изоляционного и железа соответственно;  $\phi_s$  – поверхностный потенциал Si. Если кремниевая подложка не контактирует с изолирующим слоем, то  $\phi_s = 0$ . Для Si, контактирующего с изолирующим слоем, величина  $\phi_s$  будет изменяться [9]. Это так называемый контактный потенциал. Поверхностный заряд кремния  $\sigma_S$  ограничен значением  $\phi_s$ . Ионизирующее излучение влияет на величину  $\phi_s$  и поэтому поверхностный заряд кремния после облучения определяется выражением

$$\sigma_S(\phi_s) = \text{sgn}(\phi_s) \sqrt{2} ((\varepsilon_0 \varepsilon_S) / \beta L_D) [(e^{-\beta \phi_s} + \beta \phi_s - 1) + (n_i^2 / N_a + \Delta n) / N_a (e^{\beta \phi_s} - \beta \phi_s - 1)]^{1/2}. \quad (6)$$

Здесь  $L_D = [\varepsilon_0 \varepsilon_S / (\beta q (N_a + \Delta n))]^{1/2}$  – длина Дебая;  $\beta = kT / q$ ;  $k$ ,  $T$  и  $q$  – постоянная Больцмана, температура прибора и заряд электрона соответственно;  $n_i$  – собственная плотность ионизационного заряда кремния;  $n_a$  – плотность примесей в кремнии;  $\Delta n$  – плотность носителей за счет радиационной ионизации. В нелегированном Si некоторые электроны переходят из валентной зоны в зону проводимости из-за теплового возбуждения, образуя пару электрон – дырка [10]. Рассматривается Si(B)  $p$ -типа проводимости, а также  $n$ -Si(N). Для оценки величины  $\Delta n$  справедливо выражение

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

где  $g_0$  – плотность заряда единицы объема ионизованного излучением 1 Гр Si;  $\dot{D}$  – мощность дозы излучения;  $\tau_r$  – время жизни образованного ионизирующим излучением носителя. При этом электронно-дырочные пары свободно диффундируют [11], а в процессе диффузии исчезают

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

где  $n_{p0}$  – плотность дырок в  $p$ -Si;  $\tau$  – время жизни неосновного носителя. Из (7) и (8) следует

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

Для FEFET каждый слой имеет индивидуальную емкость [12], причем  $C_F = d_F / \varepsilon_F \varepsilon_0$  – емкость сегнетоэлектрического,  $C_I = d_I / \varepsilon_I \varepsilon_0$  – изоляционного и  $C_{Si} = d \sigma_S / d \phi_s$  – кремниевого слоев, а общая емкость структуры составляет

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

Модель Миллера используется при рассмотрении поляризации сегнетоэлектрического слоя до и после облучения. Поляризация насыщения сегнетоэлектрического слоя

$$P_{\text{sat}}^+(E) = P_s \text{th}[(E - E_c) / 2\delta]; \quad (11)$$

$$\delta = E_c \left[ \ln \left( \frac{1 + P_r / P_s}{1 - P_r / P_s} \right) \right]; \quad (12)$$

$$P_{\text{sat}}^-(E) = -P_{\text{sat}}^+(-E), \quad (13)$$

где  $P_s$ ,  $P_r$  и  $E_c$  – поляризации насыщения и остаточная и коэрцитивное поле соответственно. В FEFET поляризация сегнетоэлектрического слоя может не достигать насыщения из-за частичного сжатия [13], поэтому приведенная формула неприменима. Миллер изменил ее следующим образом:

$$\frac{\partial P_d}{\partial E} = \Gamma \frac{\partial P_{\text{sat}}}{\partial E}; \quad (14)$$

$$\Gamma = 1 - \text{th} \left[ \left( \frac{P_d - P_{\text{sat}}^{1/2}}{\xi P_s - P_d} \right) \right]; \quad (15)$$

$$P_{d_{m+1}} = (E_{m+1} - E_m) \frac{\partial P_d}{\partial E_m} + P_{d_m}. \quad (16)$$

В выражениях (3) и (4) при  $d_E/d_t > 0$  имеем  $\xi = +1$ , а при  $d_E/d_t < 0$  –  $\xi = -1$ .

В условиях облучения спонтанная и остаточная поляризации, коэрцитивное поле и диэлектрическая постоянная сегнетоэлектрического слоя будут изменяться. Параметры удовлетворяют модели Миллера и двум линиям гистерезиса соответственно [14]. При этом формула (13) в рамках модели Миллера уже не является корректной, т.е.  $P_{\text{sat}}^-(E) \neq -P_{\text{sat}}^+(-E)$ . Хотя выражения не различаются, но с ними связаны такие параметры, как спонтанная и остаточная поляризации, коэрцитивное поле и диэлектрическая постоянная. Подходящим выражением является

$$P_{\text{sat}}^+(E) = h \text{th}[(E - E_c)/2\delta] + d\epsilon_0 E. \quad (17)$$

После подгонки  $h$  – спонтанная поляризация и  $d$  – диэлектрическая проницаемость. Аналогично можно получить корреляционный параметр. Вывод состоит в том, что емкость FEFET изменится с изменением напряжения затвора в условиях воздействия ионизирующего излучения, и на этом строится поляризационная модель сегнетоэлектрического слоя.

#### Механизм повреждения электрических характеристик ионизирующим излучением

Напряжение плоской энергетической зоны FEFET – это отрицательное напряжение, приложенное к металлической сетке для противодействия влиянию разности работ выхода, чтобы изменить энергию поверхностной зоны транзистора от изогнутой до состояния плоской зоны.

Из-за высокой подвижности электронов в большинстве случаев используют подложку  $p$ -типа проводимости с  $n$ -каналом, для которого напряжение плоской зоны  $V_{FB}$  составляет:

$$V_{FB} = - \left( \phi_{ms} + \frac{Q_{ss}}{C_{\text{ox}}} \right). \quad (18)$$

Пороговое напряжение  $V_{\text{th}}$  затвора, соответствующее условию генерации канала FEFET, известно также как напряжение открытия [15]. Соответственно для  $n$ -канального FEFET  $p$ -типа пороговое напряжение определяется выражением

$$V_{\text{th}} = - \left( \phi_{ms} + \frac{Q_{ss}}{C_{\text{ox}}} \right) + 2\phi_F + \left( \frac{4\epsilon_S \epsilon_0 N_A e \phi_F}{C_{\text{ox}}^2} \right)^{1/2}; \quad (19)$$

$$V_{\text{th}} = V_{FB} + 2\phi_F + \left( \frac{4\epsilon_S \epsilon_0 N_A e \phi_F}{C_{\text{ox}}^2} \right)^{1/2}. \quad (20)$$

Аналогично пороговое напряжение  $p$ -канального FEFET  $n$ -типа представлено ниже

$$V_{\text{th}} = - \left( \phi_{ms} + \frac{Q_{ss}}{C_{\text{ox}}} \right) + 2\phi_F + \left( \frac{4\epsilon_S \epsilon_0 N_D e \phi_F}{C_{\text{ox}}^2} \right)^{1/2}, \quad (21)$$

где  $\phi_{ms}$  – контактная разность потенциалов между металлом и полупроводником;  $Q_{ss}$  – фиксированный положительный заряд на границе раздела;  $C_{\text{ox}}$  – емкость оксида;  $\phi_F$  – потенциал Ферми

*in vivo*;  $\epsilon_S$  – диэлектрическая проницаемость Si;  $N_A$  и  $N_D$  – концентрация легирующих акцепторов и доноров соответственно.

После ионизационного облучения изолятор затвора транзистора будет генерировать электронно-дырочные пары, большинство которых смешиваются друг с другом, при этом некоторые дырки захватываются глубокими межфазными дефектными состояниями, что приводит к положительному сдвигу барьера затвора (например, напряжению плоской зоны). При этом, чтобы выбить атомы Si в объемной решетке, энергия электронов должна достигать 150 кэВ [16], но всего несколько эВ требуется для изменения напряжения плоской зоны в слое изоляции затвора. Из-за увеличения заряда оксидных ловушек и заряда ловушек интерфейса в МОП-структуре будет изменяться напряжение плоской зоны. Для FEFET напряжение плоской зоны дрейфует, когда устройство работает при определенном напряжении смещения. Из выражения (21) видно, что дрейф напряжения плоской зоны вызывает дрейф порогового напряжения. Если рассматривать только создаваемый ионизирующим излучением положительный заряд оксидных ловушек, то дрейфы  $V_{th}$  и  $V_{FB}$  будут одинаковыми. Однако из-за формирования нового состояния границы раздела ионизирующим излучением дрейфы  $V_{th}$  и  $V_{FB}$  будут различаться.

Ионизирующее излучение приводит к генерации заряда, захваченного между электродом и оксидом затвора, а также к повреждению структуры решетки между Si и SiO<sub>2</sub>, что формирует пограничные состояния высокой плотности (энергетические уровни в запрещенной зоне). Эти интерфейсные или поверхностные состояния имеют высокую скорость тепловыделения на поверхности транзистора. При этом ловушки, генерируемые на границах раздела Si/SiO<sub>2</sub>, могут взаимодействовать с носителями в объеме Si, что приводит к образованию генерируемых теплом электронно-дырочных пар, тем самым увеличивая темновой ток FEFET [17]. Скорость генерации  $G$  индуцированных ионизирующим излучением электронно-дырочных пар определяется выражением

$$G = \frac{\sigma_n \sigma_p v_{th} D(E_t)(pn - n_i^2)}{\sigma_n [n + n_i \exp\{(E_t - E_i)/kT\}] + \sigma_p [p + n_i \exp\{-(E_t - E_i)/kT\}]}, \quad (22)$$

где  $\sigma_n$  и  $\sigma_p$  – поперечные сечения захвата электронов и дырок соответственно;  $n(p)$  – концентрации электронов (дырок);  $v_{th}$  – скорость тепловыделения;  $D(E_t)$  – распределение плотности энергетических уровней дефектных состояний;  $E_t$  – уровень дефекта;  $E_i$  – уровень Ферми;  $n_i$  – собственная концентрация носителей. Поэтому генерируемая теплом электронная дырка важна только в области обеднения и обедненной поверхности [18]. Когда  $n \gg n_i$  и  $p \ll n_i$ , тогда будет выполняться выражение

$$G = \int_{E_V}^{E_C} \frac{\sigma_n \sigma_p v_{th} n_i D(E_t)}{\sigma_n \exp\{(E_t - E_i)/kT\} + \sigma_p \exp\{-(E_t - E_i)/kT\}} dE_t. \quad (23)$$

Дефектные состояния, сформированные ионизационным повреждением, должны быть интегрированы во всем диапазоне их энергетических уровней, чтобы получить величину скорости образования носителей, т.е.

$$G = \int_{E_V}^{E_C} \frac{\sigma_n \sigma_p v_{th} n_i D(E_t)}{\sigma_n \exp\{(E_t - E_i)/kT\} + \sigma_p \exp\{-(E_t - E_i)/kT\}} dE_t. \quad (24)$$

Для упрощения расчета можно разумно аппроксимировать энергетическое распределение уровней дефектов в запрещенной зоне константой равномерного распределения  $D(E_t) = D_t$ . Тогда

$$G = \frac{\pi}{2} (\sigma_n \sigma_p)^{1/2} v_{th} k D_t T n_i \quad (25)$$

и выражение поверхностной плотности темнового тока  $J_s$  имеет вид

$$J_s = q (\sigma_n \sigma_p)^{1/2} v_{th} k D_t \pi T n_i / 2. \quad (26)$$

Пусть поперечное сечение захвата интерфейсного состояния  $\sigma = (\sigma_n \sigma_p)^{1/2}$  и скорость поверхностной рекомбинации  $s_0 = \frac{\pi}{2} \sigma v_{th} D_i kT$ , тогда выражение для плотности поверхностного темнового тока выглядит следующим образом:

$$J_s = qn_i s_0. \quad (27)$$

Существуют различия в увеличении амплитуды темнового тока, обусловленные структурой и технологией электронных устройств. Индуцированный ионизирующим излучением поверхностный темновой ток может быть подавлен, если заставить FEFET работать в состоянии поверхностной инверсии в режиме MPP (Multi-Pinned Phase) или использовать антирадиационную схему FPGA (Field Programmable Gate Arrays).

#### Методы защиты от воздействия ионизирующего излучения

##### *Усиливающая конструкция защиты схемы FPGA с предохранителем*

В соответствии с мгновенным эффектом ионизирующего излучения и механизмом радиационного повреждения схема FPGA реализована в виде конструкции усиления FEFET. Ключевая проблема заключается в том, что важные данные в схеме FPGA могут быть сохранены во времени до появления излучения. После его возникновения нормальное рабочее состояние FPGA может быть восстановлено немедленно, а время сохранения данных и их восстановления должно соответствовать общим требованиям FEFET по временной погрешности [19]. Структурная схема антирадиационной конструкции схемы FPGA приведена на рис. 1.

Аппаратное обеспечение схемы в основном состоит из микросхемы FPGA с чипом A1460A, сегнетоэлектрической памятью FRAM (внешней памятью), схемы сброса и внешнего кварцевого генератора. FRAM изготовлен по сегнетоэлектрической технологии, энергонезависимые данные хранятся в течение 10 лет при отключении питания; он может считывать и записывать данные так же быстро, как оперативная память. Время чтения и записи составляет 1 мс, что позволяет эффективно избежать шумовых помех и источника питания. Тестовые радиационные эксперименты показали, что FRAM подходит для исследования электронных схем в радиационной среде, а использованный в этой конструкции FRAM – это интегральная схема серийного интерфейса FM24C16A.

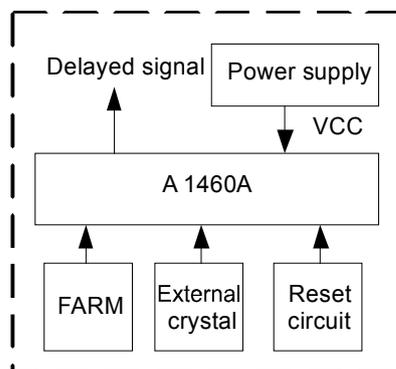


Рис. 1. Структурная конструкция антирадиационной схемы FPGA

##### *Тройное резервирование на основе эффекта мгновенного воздействия ионизирующего излучения*

В приведенном программном обеспечении, чем больше время чтения и записи данных FPGA и FRAM, тем больше вероятность воздействия мгновенного ионизирующего излучения. Если ионизирующее излучение происходит в промежутке между считыванием и записью данных FPGA в данные FRAM, т.е. FPGA считала сохраненные данные из FRAM в регистр, то внезапно возникающее ионизирующее излучение вызывает очистку данных регистра FPGA. Затем данные регистра записываются в FRAM как обычные, вызывая уничтожение данных в FRAM. Вероятность такой ситуации связана с периодом чтения и записи и общим количеством чтения и записи. Чтобы избежать этой ситуации, в разработку программного обеспечения вводится резервирование.

Метод тройного резервирования сохраняет одну и ту же информацию в трех физических пространствах хранения. При чтении сравниваются три содержания, и в качестве положительных ре-

шений принимаются два непротиворечивых значения [20]. Этот метод используется, в основном, для решения проблемы инверсии одиночных частиц, вызванной ионизирующим излучением на электронных устройствах.

Данный метод также применяется при программном проектировании усиленной схемы защиты от мгновенного ионизирующего излучения в схеме FPGA. Конкретный алгоритм выглядит следующим образом: каждый раз, когда данные FPGA и FRAM считываются и записываются, одна и та же группа данных сохраняется в трех независимых адресных единицах в FRAM [21–24]. После оценки данных, работы и повторного хранения каждого адресного блока сравнение данных трех адресных блоков в FRAM осуществляется непрерывно. В качестве положительного решения принимаются два согласованных значения, которые являются исходными данными для последующей работы.

Принцип работы защищенной схемы заключается в том, чтобы хранить важные данные FPGA на внешней энергонезависимой памяти FRAM и регулярно считывать их. При возникновении ионизирующего излучения максимальная погрешность сигнала задержки может контролироваться в цикле чтения – записи. В фиксированном промежутке времени, чем больше время чтения и записи, тем меньше максимальная погрешность сигнала задержки FPGA после приема ионизирующего излучения [25, 26]. Отсюда чем больше времена чтения и записи, тем выше требования к производительности внешней памяти, которая должна меняться в соответствии с фактическими потребностями.

## Результаты

Радиационный эксперимент проводился на источнике  $^{60}\text{Co}$  с мощностью дозы ионизированного  $\gamma$ -излучения 10 рад ( $\text{SiO}_2$ )/с. Для моделирования наихудшей ситуации напряжение смещения, прикладываемое FEFET в процессе радиационного воздействия, составляет 4 В, а общая доза излучения – 10–200 крад.

Передаточная характеристика измеряется разработанной «системой контроля и анализа электрических параметров электронных устройств». Аппаратное обеспечение системы состоит, в основном, из микрокомпьютера, карты GPIB (General Purpose Interface Bus), блока измерения источника 238 и источника питания LPs304 [27]. Блок источника 238 соединен с компьютером через шину GPIB, а LPs304 – с компьютером через шину последовательного порта RS-232, и соответствующая схема смещения добавлена для формирования полной аппаратной платформы автоматической тестовой системы на основе виртуального прибора. Компьютер является ядром всей системы и управляет другим оборудованием системы через шину GPIB и шину RS-232.

На рис. 2 показан дрейф порогового напряжения, вызванный зарядами оксидной ловушки, в зависимости от дозы облучения. Видно, что дрейф прямо пропорционален дозе облучения, при этом пороговое напряжение непрерывно возрастает с увеличением дозы. Насыщения оксидных ловушек не обнаружено при дозе облучения 200 крад ( $\text{SiO}_2$ ) [28]. По кривой дозовой зависимости дрейфа видно, что результаты моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными, что подтверждает правильность модели и выбора ее параметров.

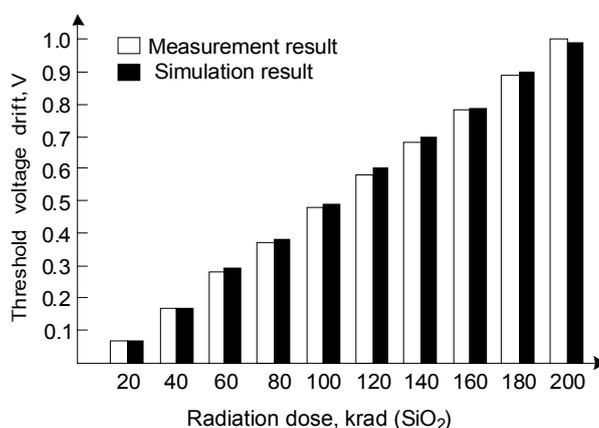


Рис. 2. Дрейф порогового напряжения, вызванный зарядами оксидных ловушек, как функция дозы  $^{60}\text{Co}$

На рис. 3 показаны дозовые изменения дрейфа, вызванные зарядом интерфейсных ловушек, полученные из эксперимента и из модельных данных. Для модельных расчетов сделаны следующие допущения: плотность исходных ловушек пренебрежимо мала по сравнению с числом оксидных ловушек, образованных радиационным воздействием, а приведенные выше допущения справедливы для FEFET с малой толщиной оксидного затвора. Согласно экспериментальным данным, вызванный зарядом межфазных ловушек дрейф пропорционален дозе облучения в случае низкой дозы (ниже 60 крад  $\text{SiO}_2$ ). При превышении дозы имеет место отклонение от линейности к экспоненциальной зависимости, которая проявляется и в модельных расчетах. При этом рассчитанный дрейф порогового напряжения несколько превышает фактическое измеренное значение.

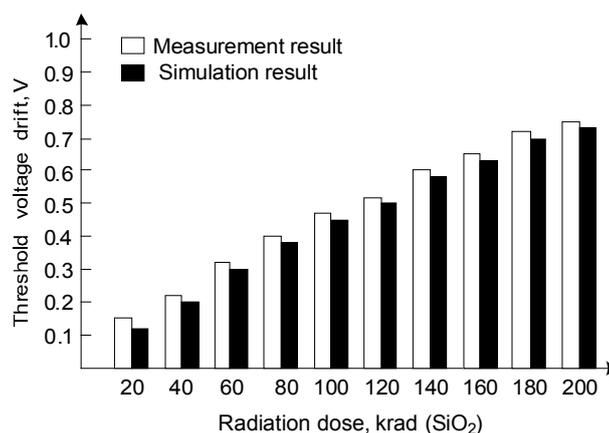


Рис. 3. Дрейф порогового напряжения, вызванный изменением заряда интерфейсных ловушек, как функция дозы

По результатам эксперимента (рис. 2 и 3) при малой дозе облучения соотношение плотности зарядов оксидных и межфазных ловушек имеет определенную пропорцию. Так, при дозе облучения 30 крад это соотношение составляет 1.67 и оно сильно не изменяется при 60–100 крад. При дозе 200 крад оно равно 2.76, т.е. заряд оксидных ловушек не достигает насыщения при этой дозе, а плотность заряда интерфейсных ловушек начинает насыщаться. Это происходит потому, что толщина границы раздела меньше толщины оксидного слоя, т.е. количество интерфейсных ловушек меньше, и они заполняются при меньшей дозе.

На рис. 4 приведены зависимости фактора частоты шума ( $a$ ) и амплитуды шума ( $b$ ) FEFET от дозы облучения  $^{60}\text{Co}$ .

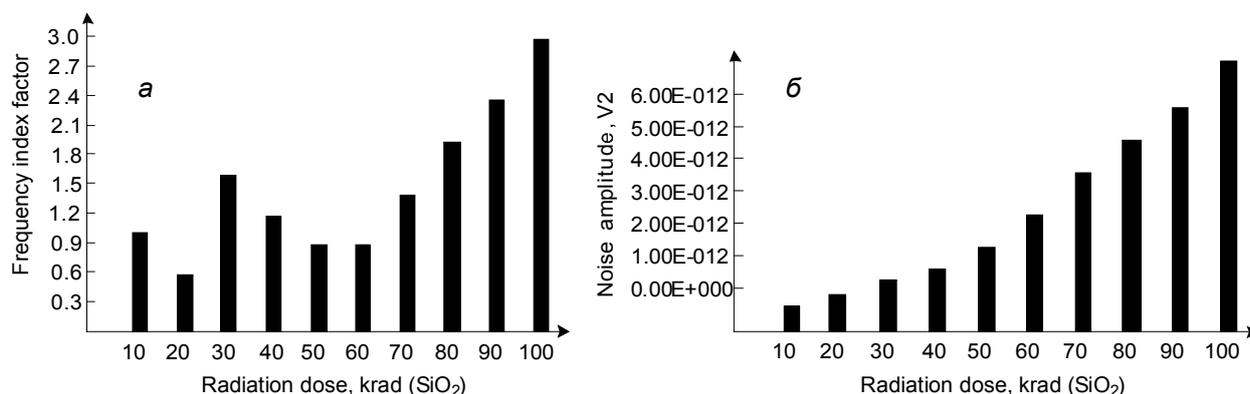


Рис. 4. Изменения в зависимости от дозы облучения  $^{60}\text{Co}$ :  $a$  – фактора частоты шума;  $b$  – амплитуды шума

Экспериментальные результаты рис. 4 показывают, что с увеличением дозы облучения эти два параметра испытывают существенные изменения. Энергетическое и пространственное распределение дефектов в оксидном слое отражается шумовым коэффициентом частотного индекса. До облучения распределение дефектов в запрещенной зоне Si имеет форму «U», т.е. края запрещенной зоны обладают более высокой плотностью дефектов по сравнению с ее центром. С увеличением дозы облучения распределение дефектов по энергии имеет тенденцию к инвертированной фор-

ме «U», причем плотность дефектов в середине запрещенной зоны Si увеличивается быстрее. Из-за этого возрастает вероятность обмена носителей между каналом и дефектами с более высокой энергией, что приводит к увеличению коэффициента индекса частоты шума.

Коэффициенты пространственного распределения дефектов также имеют тенденцию к росту после облучения, в то время как до облучения оно является обратным экспоненциальным распределением. С увеличением дозы облучения этот коэффициент постепенно увеличивается, показывая экспоненциальное распределение. Это обусловлено тем, что по мере облучения оксидные ловушки, которые могут обмениваться с носителями канала, накапливаются вблизи границы раздела Si/SiO<sub>2</sub> и их плотность быстро увеличивается с ростом дозы облучения, что приводит к росту захвата и эмиссии носителей.

Изменение темнового тока FEFET при энергиях 1.5 и 10 МэВ показано на рис. 5.

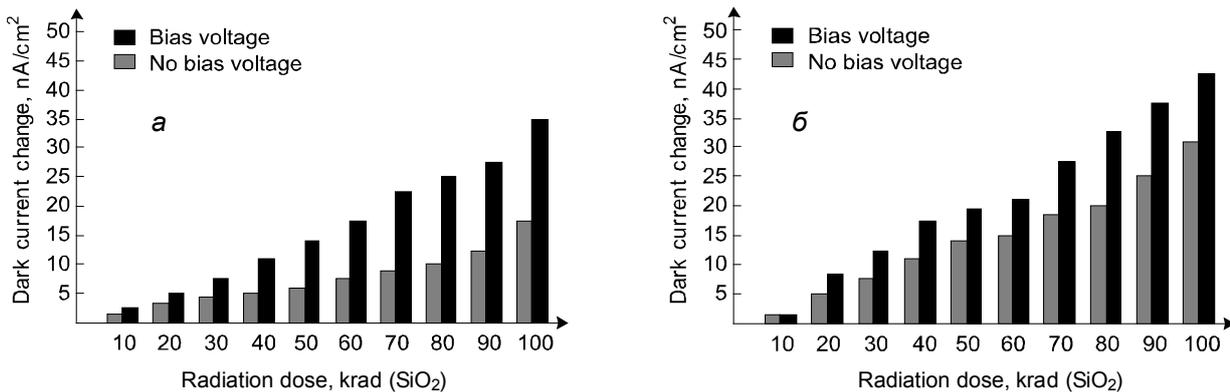


Рис. 5. Зависимость темнового тока от дозы ионизирующего облучения: *a* – энергия 1.5 МэВ; *б* – энергия 10 МэВ

Диапазон увеличения плотности индуцированного ионизирующим излучением темнового тока на поверхности FEFET обычно составляет 1–10 нА/см<sup>2</sup>/крад (Si) при температуре окружающей среды 20 °С. Зависимость плотности темнового тока от дозы облучения приблизительно линейна.

В таблице приведены задержки выхода FEFET для случаев, когда доза ионизирующего облучения различна, а электронное устройство находится на высоком уровне – 270 мс.

**Сравнение высокоуровневой задержки выхода до и после усиления конструкции**

Доза облучения, крад	Нормальный выход сигнала, мс	Выход после усиления, мс	Выход без усиления, мс
10	150	158	183
20	240	251	284
30	330	338	367
40	400	411	456
50	440	448	483
60	480	486	521
70	520	527	567
80	560	565	594
90	580	585	605
100	620	628	668

Из результатов таблицы следует, что разница между выходом FEFET с различной дозой ионизирующего излучения и выходом FEFET без ионизирующего излучения мала после антирадиационного усиления конструкции. Задержка выхода FEFET при отсутствии усиления конструкции значительно больше, чем у FEFET с усилением, описанным в настоящей работе. По сравнению с нормальным сигналом ошибка находится в пределах проектного диапазона, что свидетельствует об эффективности метода.

## Обсуждение

Для изучения механизма повреждения электронных устройств с электрическими характеристиками ионизирующим излучением разработана теоретическая модель. Естественно, что при воздействии ионизирующего излучения уязвимы не только электронные устройства с электрическими характеристиками, но и человек, животные, растения и т.д. В настоящее время защитный механизм антирадиационных средств защиты неясен.

### Очистка активных кислородных радикалов

Основной механизм можно сформулировать следующим образом. Ионизирующее излучение индуцирует образование активных радикалов (таких, как гидроксильные радикалы, синглетный кислород) и производит токсичные вещества (такие, как перекись водорода и т.д.), которые вызывают повреждение макромолекулярных веществ (ДНК, белка, фосфолипида и пр.). Особенно опасно повреждение ДНК. Разрыв ДНК является фатальным повреждением при ионизирующем облучении, потому что именно он является мишенью радиационного повреждения клеток. В это же время активные кислородные радикалы поглощают атомы водорода в соседних соединениях, что приводит к цепной реакции и клеточной токсичности.

Супероксидный анион и гидроксильный радикал могут опосредовать вызванное стабильностью генов повреждение ДНК и приводить к гибели клеток. В физиологических исследованиях супероксид реагирует с эндогенным оксидом азота с образованием пероксинитрита (ONOO-), в то время как ONOO- образует аддукт ДНК, вызывая -SH-денатурацию. Исследования *in vitro* показывают, что большинство радиационно-защитных агентов обладают активностью продувки активных кислородных радикалов, что может снизить их радиационную токсичность.

### Ингибирование перекисного окисления липидов

Перекисное окисление липидов производится радиационно-индуцированными свободными радикалами, которые могут привести к различным заболеваниям. Перекисное окисление липидов *in vivo* повреждает структуру и функцию клеточной мембраны, в то же время оно вступает в реакцию с макромолекулами, такими, как белок и нуклеиновая кислота, и влияет на функцию клетки. Радиационно-защитные средства могут ингибировать перекисное окисление липидов, защищать клеточные мембраны от радиационного повреждения и снижать окислительный стресс. Однако это не означает, что все радиационные протекторы, способные поглощать свободные радикалы, обладают функцией ингибирования перекисного окисления липидов. Например, дрожжевой маннан обладает активностью антилипидного перекисного окисления, но не обладает способностью поглощать свободные радикалы.

### Повышение активности антиоксидантных ферментов

Полученные результаты показывают, что активность антиоксидантных ферментов (SOD, CAT и GST) в печени и эритроцитах снижается после облучения за счет усиления окислительного стресса. Эндогенные антиоксидантные ферменты выполняют множество функций, таких, как поддержание тиолдисульфидного баланса, синтез предшественников ДНК и обеспечение внутриклеточного АТФ. SOD может заставить супероксидный анион образовывать  $H_2O_2$  путем диспропорционирования, а затем разлагаться на гидроксильные радикалы с помощью CAT. Радиация изменяет структуру эндогенных антиоксидантных ферментов и снижает активность антиоксидантных ферментов *in vivo*. Поэтому повышение активности эндогенных антиоксидантных ферментов может снизить выработку активных свободных радикалов кислорода и тем самым уменьшить радиационное повреждение.

### Восстановление повреждений ДНК

Радиационно-индуцированное повреждение ДНК может временно остановить процесс репликации для репарации, который включает в себя кооперацию ферментов репарации, таких, как полимеразы репарации и ДНК-лигаза. Неповрежденная ферментная система может эффективно восстанавливать поврежденную ДНК и поддерживать целостность и стабильность генома. Хотя вызванное радиацией первичное повреждение может быть восстановлено за считанные минуты или часы, поврежденная ДНК часто восстанавливается без ферментной системы.

Радиационно-защитные агенты могут уменьшить вызванную ионизирующим излучением фрагментацию ДНК, регулируя гены репарации. Ингибирование фаз G1 и G2 перед репликацией или митозом может восстановить поврежденную ДНК. P53 связан с фазой G1 и G2 и относительно стабилен. Он может передавать свою функцию через транскрипцию, активировать несколько генов-мишеней, временно ингибировать клетки в фазе G1-S, осуществлять репарацию ДНК и ингибировать пролиферацию, терминальную дифференцировку или апоптоз. Экспрессия p53 и p21 на уровне белка повышается после ионизирующего излучения, а активация гена p53 приводит к увеличению экспрессии p21, кодирующего ключевой ингибитор киназы клеточного цикла G1/s, и ингибированию данного цикла. Радиационно-защитные агенты могут ингибировать увеличение экспрессии p53 и p21, вызванное излучением, и уменьшать повреждение ДНК.

#### Иные возможности

Некоторые радиационно-защитные агенты могут ингибировать повреждение ДНК, увеличивать небелковые сульфгидрильные группы, способствовать пролиферации клеток и метаболическому циклу для достижения радиационной защиты. Механизм радиационной защиты у разных веществ разный. Радиационная защита некоторых веществ является результатом действия нескольких механизмов.

Защитный механизм не единичен, несколько механизмов взаимодействуют для уменьшения радиационного поражения. В настоящее время радиозащитные средства выбирают, в основном, в виде безопасного вещества, которое может сочетаться с цитокиновым рецептором, стимулировать высвобождение одного или нескольких цитокинов, непосредственно влиять на пролиферацию и регенерацию гемопоэтических стволовых клеток и устранять вызванные излучением активные свободные радикалы кислорода.

#### Выводы

В условиях воздействия ионизирующего облучения токи источника питания и смещения, напряжение смещения и другие ключевые параметры электронных устройств будут изменяться. При этом различные дозы ионизирующего излучения будут вызывать различные повреждения электронных устройств. Посредством создания модели электронного устройства с электрическими характеристиками анализируется механизм повреждения таких устройств при воздействии ионизирующего излучения и предлагается конструкция усиления и метод защиты схемы FPGA с предохранителями. Экспериментальные результаты подтверждают эффективность использования разработанной модели для анализа механизма повреждения электронного устройства ионизирующим излучением и схемы FPGA с предохранителем. Для защиты электронных устройств от ионизирующего излучения необходим всесторонний подход, а эффективные методы защиты позволят успешно противостоять вызванным ионизирующим излучением повреждениям.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pei H.K., Yang X., and Hou L.Q. // *J. China Acad. Electron. Info. Technol.* – 2019. – V. 14. – P. 212–217.
2. Yang G.R., Xiao F., and Fan X.X. // *J. Power Supply.* – 2018. – V. 16. – P. 1–8.
3. Zhang W., Liu L.K., and Tang H. // *Chinese J. Power Sources.* – 2019. – V. 43. – P. 162–164+170.
4. Xu R.H., Li D.X., and Qu J.Z. // *Autom. Instrum.* – 2017. – V. 05. – P. 169–171.
5. Bao J., and Ou R.X., Jilin J. // *Univ. (Sci. Ed.).* – 2018. – V. 56. – P. 130–134.
6. Yan T., Zhao Y.C., and Cui D.X. // *Comput. Simul.* – 2019. – V. 36. – P. 73–77.
7. Yiğiterol F., Güllü H.H., and Bayraklı Ö. // *J. Electron. Mater.* – 2018. – V. 47. – P. 1–9.
8. Kim S. W., Khanal G.P., and Nam H. W. // *J. Appl. Phys.* – 2017. – V. 122. – P. 164105.
9. Silvia H., Davide B., and Maher T. // *Appl. Phys. Express.* – 2018. – V. 11. – P. 041002.
10. Kumar S., Goel E., Singh K., et al. // *IEEE Trans. Electron Devices.* – 2017. – V. 64. – P. 960–968.
11. Zheng X. F., Wang A.C., and Hou X. H. // *Chinese Phys. Lett.* – 2017. – V. 34. – P. 027301.
12. Kononov N. N., Davydova D.V., and Bubenov S. S. // *Semiconductors.* – 2019. – V. 53. – P. 552–565.
13. Hyeuknam K., Seward B.R., and Benjamin S. // *Physiol. Meas.* – 2017. – V. 38. – P. 1748–1765.
14. Xin W., Brandon O., and Pragun B. // *J. Forensic Sci.* – 2017. – V. 63. – P. 415–421.
15. Manjari G., Tejas R., and Naik C.S. // *Appl. Phys. Lett.* – 2018. – V. 112. – P. 163502.
16. Ahn J. H., Choi S.J., and Im M. // *Appl. Phys. Lett.* – 2017. – V. 111. – P. 113701.
17. He Q. M., Mu W.X., and Dong H. // *Appl. Phys. Lett.* – 2017. – V. 110. – P. 093503.
18. Frey B., Rückert M., and Deloch L. // *Immunol. Rev.* – 2017. – V. 280. – P. 231–248.
19. Trebitsch M., Blaizot J., and Rosdahl J. // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* – 2017. – V. 470. – P. 224–239.

20. Liang J., Zhou H.X., and Yang W.J. // *Autom. Instrum.* – 2017. – V. 7. – P. 152–155.
21. Fernández-Pousa C.R. // *Appl. Math. Nonlinear Sci.* – 2018. – V. 3. – P. 23–32.
22. Gao W., Zhu L., Guo Y., and Wang K. // *J. Intelli. Fuzzy Syst.* – 2017. – V. 33. – P. 3153–3163.
23. Gao W. and Wang W. // *Colloq. Math.* – 2017. – V. 149. – P. 291–298.
24. Kheilat F. and Khormizi M.B. // *Appl. Math. Nonlinear Sci.* – 2018. – V. 3. – P. 15–22.
25. Lakshminarayana G., Vajravelu K., Sucharitha G., and Sreenadh S. // *Appl. Math. Nonlinear Sci.* – 2018. – V. 3. – P. 41–54.
26. Naeem M., Siddiqui M.K., Guirao J.L.G., and Gao W. // *Appl. Math. Nonlinear Sci.* – 2018. – V. 3. – P. 209–228.
27. Elmali C.S. and Ugr T. // *Appl. Math. Nonlinear Sci.* – 2020. – V. 5. – No. 1. – P. 475–478.
28. Hosamani S.M., Awati V.B., and Honmore R.M. // *Appl. Math. Nonlinear Sci.* – 2019. – V. 4. – No. 2. – P. 503–512.

Поступила в редакцию 17.11.2020.

China CDC, National Institute for Radiological Protection,  
Chinese Center for Disease Control and Prevention,  
University of south China, Beijing, China

---

**Weiguo Zhu**, Master, Associate Researcher Chinese Center for Disease Control and Prevention, National Institute for Radiological Protection, e-mail: zhuweiguo@nirp.chinacdc.cn;

**Dexing Lian**, Master, Assistant Researcher University of south China, Institute of Radiological Protection, Chinese Center for Disease Control and Prevention, e-mail: liandexing@nirp.chinacdc.cn;

**Qingzhao Zhang**, Master, Assistant Researcher Chinese Center for Disease Control and Prevention, Institute of Radiological Protection, e-mail: hangqingzhao@nirp.chinacdc.cn;

**Changsong Hou**, Master, Researcher Chinese Center for Disease Control and Prevention, Institute of Radiological Protection, e-mail: nihao456455@sina.com.