ISSN 0002-306Х. Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2011 Т. LXIV, ¹ 1.

УДК 681.32

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА

О.А. ПЕТРОСЯН

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ КМОП ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАПОМИНАЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ФЛЭШ-ПАМЯТИ

Рассмотрены конструктивно-технологические и схемотехнические методы повышения радиационной стойкости КМОП интегральных схем. Исследовано влияние дозы ионизирующего излучения на удельную крутизну и пороговое напряжение. Впервые применен схемотехнический метод, основанный на эффекте подложки МОП транзистора, для повышения радиационной стойкости запоминающих элементов флэш-памяти. Проведено моделирование запоминающих элементов на основе метода эффекта подложки с использованием программного пакета HSPICE.

Ключевые слова: ионизирующее излучение, радиация, заряд, доза, концентрация, пороговое напряжение, флэш-память, моделирование.

Введение. К интегральным схемам (ИС) космического и военного применения предъявляются повышенные требования для обеспечения устойчивости к сбоям, вызванным радиационным воздействием. При разработке сверхбольших ИС переход к субмикронным (<0,5 *мкм*) и наноразмерным (<100 *нм*) проектным нормам существенно меняет значимость разных механизмов деградации, что требует новых конструктивно-технологических и схемотехнических решений [1,2]. При моделировании процессов деградации это имеет важное значение, так как затрагиваются процессы в материалах и структурах компонентов, а также в схемных элементах.

Воздействие ионизирующего излучения (ИИ - total ionization dose effects -TID). Под действием ИИ в подзатворном окисле и на границе раздела Si/SiO₂ структуры КМОП накапливается положительный заряд (рис.1 а), а на границе раздела окисла с подложкой возникает паразитный проводящий слой. В результате происходит изменение пороговых напряжений, подвижности носителей заряда, удельной проводимости и увеличение токов утечки [1]. Высокие значения фототоков, вызванные мгновенной большой дозой радиации, могут привести к резкому скачку напряжения на шинах питания и случайным сбоям переключения (Single Event Transient-SET), защелкиванию транзисторов (latch-up), а также к повреждению линий питания. Чаще всего неполадки происходят по причине случайных воздействий (Single Event Effects-SEE) [2,3], когда тяжелые частицы попадают в ИС (рис.1 б). Одним из самых опасных подвидов SEE является защелкивание транзисторов (single effect latchup, SEL), связанное с большой разностью потенциалов на входе транзистора и паразитных структур.

При воздействии одиночной заряженной частицы сбор носителей заряда идет только с части площади р-п перехода, которая пересекается треком заряженной частицы [4]. Электрическое поле, первоначально локализованное в переходе, при прохождении заряженной частицы из-за высокой концентрации носителей заряда в треке перераспределяется в подложке.

Методы повышения радиационной стойкости ИС. Существуют конструктивнотехнологические и схемотехнические методы повышения радиационной стойкости ИС. Конструктивно-технологические методы. Одним из способов борьбы с одиночными сбоями и накоплением индуцированного ИИ заряда является изготовление ИС по технологии кремний на изоляторе (Silicon on Insulator, SOI) и на основе карбида кремния (SiC) [5]. Эти технологии являются устойчивыми к высокой температуре и радиационной стойкости, что обеспечивает снижение токов утечки, паразитных емкостей, исключает образование паразитных структур и приводит к снижению величины накапливаемого заряда в десять раз. Конструктивным способом является использование охранных p+ областей и транзисторов с кольцевой геометрией, обеспечивающей работоспособность ИС при дозах облучения до 10³ рад [5].



Рис.1. Влияние ИИ на n-канальный транзистор (а) и пример воздействия (б)

Схемотехнические методы. Повышение надежности КМОП ИС на уровне схемотехнических элементов осуществляется за счет:

- увеличения длины затвора в критически важных транзисторах;

- повышения уровней сигналов и отключения питания для флэш-памяти;

- использования метода тройного (Triple Modular Redundancy, TMR) резервирования или двойных DICE (Dual Inter-locked Storage Cell) - защелок в ячейках памяти, но это увеличивает число элементов для выполнения одной и той же функции;

 оснащения некоторых элементов структурами задержки, удерживающих переключение логики в течение времени, достаточного для рекомбинации зарядов, генерированных ионами;

- сохранения (Temporal Sampling) состояний узлов схемы с периодом, бо́льшим длительности импульса тока, вызванного излучением.

Целью работы является исследование деградации параметров КМОП ИС при воздействии ИИ, применение схемотехнического метода, основанного на эффекте подложки МОП транзистора, для повышения радиационной стойкости запоминающих элементов (ЗЭ) и моделирование ЗЭ с применением метода эффекта подложки [6,7].

Деградация параметров КМОП ИС. Основными радиационно-чувствительными параметрами КМОП являются удельная крутизна и пороговое напряжение. Плотность дырок, захваченных в окисле при поглощении полной дозы D, равна [3,8]

$$\Delta Q_{\rm OT} \propto \mathbf{e} \cdot \mathbf{F}_{\rm t} \cdot \mathbf{Y}(\mathbf{E}_{\rm ox}) \cdot K_g \cdot \mathbf{d}_{\rm OX} \cdot \mathbf{D}.$$
(1)

Здесь е - заряд электрона; Ft - эффективность захвата дырок (доля захваченных дырок от их полного количества при ИИ), которая оценивается выражением

$$F_{t} \cong \sigma_{p} N_{VO} l , \qquad (2)$$

Nvo - объемная концентрация ловушек дырок; σ_p - сечение захвата дырок; l - толщина термического слоя окисла, где расположены ловушки (~ 2–5 *нм*); Y(E_{ox}) - доля пар, избежавших рекомбинацию, определяемая как

$$Y(E_{ox}) = \left(\frac{a+E_{ox}}{b+E_{ox}}\right)^{\beta},$$
(3)

а и β - эмпирические коэффициенты, зависящие от вида излучения, температуры и напряженности поля E_{ox} в окисле; K_g - количество электронно-дырочных пар на единицу дозы и объема SiO₂ (~8·10¹² см³·рад¹ (SiO₂) пар); d_{ox} - толщина подзатворного окисла.

Процессы накопления положительного заряда в окисле протекают более активно при повышении Е_{ох} из-за увеличения выхода рекомбинации и других эффектов (рис.2, моделирование проведено программным пакетом Matlab).



Удельная крутизна sn(p)(D) зависит от подвижности носителей. Воздействие ИИ уменьшает эффективную подвижность носителей. Дозовая зависимость удельной крутизны для транзисторов n и р типов определяется эмпирическим выражением

$$S_{n(p)}(D) = \frac{S_{n(p)}(0)}{1 + \alpha_{n(p)} \Delta N_{\text{IT}}(D)},$$
(4)

где $S_{n(p)}(0)$ - крутизна транзистора до облучения; $\alpha_{n(p)}$ - эмпирическая константа, равная $(8\pm 2)\cdot 10^{-13}$ см²; $\Delta N_{IT}(D)$ - зависимость плотности поверхностных состояний от дозы ИИ: при высокой мощности дозы $\Delta N_{IT}(D) \sim D^{2/3}$, при низкой - $\Delta N_{IT}(D) \sim D$.

Моделирование показывает, что крутизна является убывающей функцией для любых мощностей доз и для всех типов транзисторов (рис.3).



Пороговые напряжения. ИИ приводит к изменению порогового напряжения ΔV_{TH} МОП транзистора. Характер изменения ΔV_{TH} от дозы зависит от типа транзистора и мощности дозы ИИ. Изменение ΔV_{TH} определяется выражением [6,8,9]

$$\Delta V_{\rm TH} = \Delta V_{\rm OT} + \Delta V_{\rm IT} , \qquad (5)$$

где ΔV_{OT} и ΔV_{IT} - изменение порогового напряжения, вызванное появлением дырок в ловушках и поверхностными ловушками соответственно.

Накопление положительного заряда в подзатворном окисле приводит к отрицательному сдвигу пороговых напряжений транзисторов (в p-МОП транзисторе увеличивается, а в n-МОП - уменьшается). Если ловушки дырок локализованы вблизи границы с кремнием, то величина $\Delta V_{\rm OT}$ определяется выражением

$$\Delta V_{\rm OT} = -\Delta Q_{\rm OT} / C_{\rm ox} = -e \cdot F_{\rm OT} Y(E_{\rm ox}) \frac{d^2 \sigma_{\rm ox}}{\varepsilon_{\sigma \rm ox} \cdot \varepsilon_0} K_{\rm g} \cdot D, \qquad (6)$$

где Cox – емкость, обусловленная окисным слоем.

Изменение порогового напряжения ΔV_{IT} определяется выражением

$$\Delta V_{\Pi} = \frac{e \cdot \Delta N_{\Pi} (D)}{C_{OX}} .$$
(7)

Как видно из выражений (5)-(7), положительный заряд подзатворного окисла приводит к уменьшению порогового напряжения n-MOII транзистора, а отрицательный заряд, обусловленный поверхностными ловушками, - к его увеличению (рис.4,5). Следовательно, в зависимости от технологии суммарный сдвиг порогового напряжения может быть разным и по направлению. Подтверждаются экспериментальные данные о том, что структуры с меньшей толщиной окисла являются более радиационно стойкими. Это объясняется вкладом туннелирования и другим распределением напряженности поля.



Для повышения радиационной стойкости ЗЭ с архитектурой NOR и NAND флэш-памяти [10] впервые применен схемотехнический метод, основанный на эффекте подложки МОП транзистора [6], когда потенциал подложки изменяется с изменением радиационной дозы. На основе программного пакета HSPICE проведено моделирование статических и динамических параметров ЗЭ при изменении дозы радиации от 900 *Крад* до 18 *Мрад*, температуры от - 40 до +135 °C и числа последовательно включенных ЗЭ от 1 до 16 для архитектуры NAND. Результаты моделирования приведены на рис.6-10.



Рис.5. Иллюстрация зависимости изменения порогового напряжения $\Delta V_{\rm IT}~$ от дозы и толщины окисла







выводы

1. Результаты моделирования, проведенного с помощью программного пакета Matlab, показывают, что:

- процессы накопления положительного заряда в окисле протекают более активно при повышении Е_{ох} из-за увеличения выхода рекомбинации;

- крутизна является убывающей функцией для любых мощностей доз и для всех типов транзисторов;

 положительный заряд подзатворного окисла приводит к уменьшению порогового напряжения n-MOП транзистора, а отрицательный заряд - к его увеличению, в результате чего суммарный сдвиг порогового напряжения может быть разным и по направлению;

 структуры с меньшей толщиной окисла являются более радиационно стойкими, что объясняется вкладом туннелирования и другим распределением напряженности поля.

2. Результаты моделирования, проведенного с помощью программного пакета HSPICE, при изменении в широком диапазоне радиационной дозы (900 *Крад* до 18 *Мрад*), температуры (- 40 °C до +135 °C) и числа последовательно включенных ЗЭ (от 1 до 16) показывают значительное улучшение статических и динамических параметров ЗЭ флэш- памяти, подтверждая эффективность использованного метода.

 Результаты исследования показывают, что изменение порогового напряжения, в основном, зависит от конструктивно-технологических параметров, которые необходимо учитывать при проектировании радиационно стойких ИС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Зебрев Г.И. Моделирование дозовых и одиночных радиационных эффектов в кремниевых микрои наноэлектронных структурах для целей проектирования и прогнозирования: Автореферат дис. ... докт. техн. наук / МИФИ. - М., 2009. - 48 с.
- James R. Schwank, Marty R. Shaneyfelt, and Paul E. Dodd. Radiation Hardness Assurance Testing of Microelectronic Devices and Integrated Circuits: Radiation Environments, Physical Mechanisms, and Foundations for Hardness Assurance SANDIA NATIONAL LABORATORIES DOCUMENT SAND. -2008. -59 p.
- Вологдин Э.Н., Лысенко А.П. Радиационные эффекты в интегральных микросхемах и методы испытаний изделий полупроводниковой электроники на радиационную стойкость: Учебное пособие / МГИЭМ. -М., 2002. - 46 с.
- Поверхностные радиационные эффекты в интегральных схемах / А.В. Согоян, Г.И. Зебрев, А.Ю. Никифоров и др. ЭНПО "СПЭЛС", МИФИ, 2008. -28 с.
- Юдинцев В. Радиационно стойкие интегральные схемы. Надежность в космосе и на земле // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. -2007.- N 5. - С. 72-77.
- Melikyan V.Sh., Hovsepyan A.A., Harutyunyan T. S. Schematic protection method from influence of total ionization dose effects on threshold voltage of MOS Transistors // IEEE East-West Design & Test. Proceedings of the 7th international conference. - Moscow, 2009. - P. 260-262.
- 7. Baker R. Jacob. CMOS Circuit Design, Layout and Simulation. Second Edition. -2005. 1022 p.

- Gnana A. P. Prakash, S. C. Ke, K. Siddappa High-energy radiation effects on subthreshold characteristics, transconductance and mobility of n-channel MOSFETs // Semiconductor Science and Technology. -2003. - Vol. 18, N° 12. - P. 1037-1042.
- Stabile A., Liberali V., Calligaro C., Design of a rad-hard library of digital cells for space applications// 15th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems, ICECS 2008, Aug. 31-Sept. 3. - 2008. - P. 149-152.
- 10. Giorgio Cellere, Paolo Pellati, Andrea Chimenton et al. Radiation Effects on Floating-Gate Memory Cells // IEEE Transactions on Nuclear Scienc.- 2001. Vol. 48, No. 6. P. 2222-2228.

ГИУА(П). Материал поступил в редакцию 12.10.2010.

Օ.Հ. ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ

ԿՄՕԿ ԻՆՏԵԳՐԱԼ ՍԽԵՄԱՆԵՐԻ ՌԱԴԻԱՑԻՈՆ ԿԱՅՈՒՆՈՒԹՅԱՆ ՄԵԹՈԴՆԵՐԻ ՎԵՐԼՈՒԾՈՒԹՅՈՒՆԸ ԵՎ ՖԼԵՇ-ՀԻՇՈՂՈՒԹՅԱՆ ՀԻՇՈՂ ՏԱՐՐԵՐԻ ՄՈԴԵԼԱՎՈՐՈՒՄԸ

Դիտարկված են կոմպլեմենտար մետաղ-օքսիդ-կիսահաղորդիչ (ԿՄՕԿ) ինտեգրալ սխեմաների ռադիացիոն կայունության կոնստրուկտիվ-տեխնոլոգիական և սխեմատեխնիկական բարձրացման մեթոդները, ինչպես նաև իոնային ձառագայթման չափաբաժնի ազդեցությունը տեսակարար դիքության և շեմային լարման վրա։ Հարթակի երևույթի վրա հիմնված մեթոդի և HSPICE ծրագրային փաթեթի օգտագործումով կատարված է ֆլեշ հիշողության հիշող տարրերի մոդելավորում։

Առանցքային բառեր. իոնային Ճառագայթում, ռադիացիա, լիցք, չափաբաժին, կոնցենտրացիա, շեմային լարում, ֆլեշ-հիշողություն, մոդելավորում։

O.H. PETROSYAN

THE ANALYSIS OF RADIATION RESISTANCE INCREASE METHODS OF CMOS INTEGRATED CIRCUITS AND FLASH MEMORY STORAGE ELEMENT SIMULATION

Constructive technological and circuit design methods to improve radiation hardness of CMOS integrated circuits are considered. Ionizing radiation dose on the specific toughness and threshold voltage is studied. Based on the substrate effect method the software package HSPICE simulation is performed.

Keywords: ionizing radiation, radiation, charge, dose, concentration, threshold voltage, flash memory, modelling.