Андрей Г. Петров[1], Иван И. Швецов-Шиловский[2], Сергей Б. Шмаков[3],
Анастасия В. Уланова[4], Анна Б. Боруздина[5]
[1,2,3,4,5]Акционерное общество «Экспериментальное научно-производственное объединение СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ»,
Каширское ш., 31, Москва, 115409, Россия
[1,2,3,4,5]Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
Каширское ш., 31, Москва, 115409, Россия
[1]e-mail: agpet@spels.ru, https://orcid.org/0000-0001-5052-7175
[2]e-mail: iish@spels.ru, http://orcid.org/0000-0002-8161-9926
[3]e-mail: sbshmak@spels.ru, http://orcid.org/0000-0002-4692-9355
[4]e-mail: avulan@spels.ru, https://orcid.org/0000-0001-7376-6339
[5]e-mail: abbor@spels.ru, https://orcid.org/0000-0003-0679-9864

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СТОЙКОСТИ РЕЗИСТИВНОЙ И ДРУГИХ ВИДОВ ЭНЕРГОНЕЗАВИСИМОЙ ПАМЯТИ К ВОЗДЕЙСТВИЮ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

DOI: http://dx.doi.org/10.26583/bit.2022.2.08

Аннотация. В данной работе рассмотрены перспективы использования микросхем резистивной памяти (ReRAM, CBRAM) в космической аппаратуре. Представлены результаты исследований радиационного подведения отдельных тестовых ячеек резистивной памяти ReRAM и серийно-выпускаемых микросхем при воздействии тяжелых заряженных частиц и накопленной дозы. Проведен сравнительный анализ достигнутых уровней стойкости к воздействию ионизирующего излучения космического пространства резистивной памяти и микросхем других типов энергонезависимой памяти, таких как флэш-память, сегнетоэлектрическая память (FRAM) и магниторезистивная память (MRAM). Описаны основные преимущества и недостатки использования различных технологий для изготовления микросхем энергонезависимой памяти с повышенной стойкостью к ионизирующему воздействию.

Ключевые слова: резистивная память, тяжёлые заряженные частицы, накопленная доза, микросхема энергонезависимой памяти.

Для цитирования: ПЕТРОВ, Андрей Г. и др. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СТОЙКОСТИ РЕЗИСТИВНОЙ И ДРУГИХ ВИДОВ ЭНЕРГОНЕЗАВИСИМОЙ ПАМЯТИ К ВОЗДЕЙСТВИЮ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА. Безопасность информационных технологий, [S.l.], т. 29, № 2, с. 100–111, 2022. ISSN 2074-7136. URL: https://bit.spels.ru/index.php/bit/article/view/1421. DOI: http://dx.doi.org/10.26583/bit.2022.2.08.

Andrey G. Petrov[1], Ivan I. Shvetsov-Shilovskiy[2], Sergey B. Shmakov[3],
Anastasia V. Ulanova[4], Anna B. Boruzdina[5]
[1,2,3,4,5]Joint Stock Company "Experimental Research and Production Association SPECIAL ELECTRONIC SYSTEM",
Kashirskoe sh., 31, Moscow, 115409, Russia[2]
[1,2,3,4,5]National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute),
Kashirskoe sh., 31, Moscow, 115409, Russia
[1]e-mail: agpet@spels.ru, https://orcid.org/0000-0001-5052-7175
[2]e-mail: iish@spels.ru, http://orcid.org/0000-0002-8161-9926
[3]e-mail: sbshmak@spels.ru, http://orcid.org/0000-0002-4692-9355
[4]e-mail: avulan@spels.ru, https://orcid.org/0000-0001-7376-6339
[5]e-mail: abbor@spels.ru, https://orcid.org/0000-0003-0679-9864

Comparative analysis of tolerance to space ionizing radiation for ReRAM and other non-volatile memory types

DOI: http://dx.doi.org/10.26583/bit.2022.2.08

Abstract. The aim of the study is to consider the prospects of using resistive memory microcircuits (RRAM, CBRAM) for space applications. Total dose and single event effects in resistive memory test cells and finished CMOS RRAM microcircuits were investigated. A comparative assessment of typical radiative hardness levels for other types of non-volatile memories such as flash, ferroelectric (FRAM), magnetoresistive (MRAM) memory was provided in this study. The main advantages and disadvantages of using various technologies for the manufacture of non-volatile memory microcircuits with increased resistance to ionizing effects are described.
Keywords: resistive memory, heavy ions, total dose, non-volatile memory chip.
For citation: PETROV, Andrey G. et al. Comparative analysis of tolerance to space ionizing radiation for ReRAM and other non-volatile memory types. IT Security (Russia), [S.l.], v. 29, no. 2, p. 100–111, 2022. ISSN 2074-7136. URL: https://bit.spels.ru/index.php/bit/article/view/1421. DOI: http://dx.doi.org/10.26583/bit.2022.2.08.

Введение

Современным космическим аппаратам требуется накапливать и хранить значительные объемы различных данных. Это могут быть данные, получаемые в ходе работы, коды программ и прошивок, различная служебная информация и др. Обычно космические аппараты в той или иной степени имеют сессионный характер работы: имеются временные периоды, во время которых идет активное накопление данных, периоды, когда идет передача полученной информации, а также периоды, когда большая часть аппаратуры отключается от питания и находится в «спящем» режиме. Воздействие космического излучения может приводить к искажению записанной информации в микросхемах памяти, в том числе и энергонезависимой [1–3]. Данные эффекты необходимо учитывать при разработке бортовой аппаратуры для обеспечения ее безопасного функционирования и сохранности получаемых в ходе работы данных. Радиационное поведение различных типов энергонезависимой памяти, таких как флэш-память, EEPROM, FRAM, MRAM, достаточно широко исследовано [3–5]. При этом в настоящее время идет активное развитие резистивной памяти (ReRAM, CBRAM), которая рассматривается как потенциальная замена классической флэш-памяти с элементом хранения заряда, т.к. данная технология потенциально может обладать хорошей масштабируемостью и совмещаться со стандартными КМОП техпроцессами [6].

В резистивной памяти ReRAM в качестве элемента хранения логического состояния используются структуры метал-диэлектрик-метал. В используемых диэлектрических материалах наблюдается эффект скачкообразного изменения сопротивления слоя в зависимости от величины приложенного электрического поля между электродами элемента хранения. Примерами таких диэлектрических материалов являются NiO, TiO2, SiOx, HfO2, Ta2O5 и др. Сопротивление изменяется в зависимости от приложенного напряжения. Переключение ячейки происходит путем образования «проводящей нити» (CF – conductive filament) в диэлектрике. Проводящий канал соединяет нижний и верхний электроды ячейки памяти и имеет очень малый диаметр. Состояние низкого сопротивления (LRS) с высокой проводимостью достигается, когда нить соединяет электроды, а состояние высокого сопротивления (HRS), когда нить не полностью соединяет электроды и между ними есть зазор (рис. 1) [7]. CBRAM является разновидностью памяти ReRAM, отличие состоит в применении электролитического материала вместо диэлектрика [8].

Если не считать отличий в принципах хранения информации и строении элемента хранения, цифровая управляющая логика кристалла микросхем ReRAM схожа с другими типами микросхем энергонезависимой памяти и может производиться с применением стандартных КМОП-технологий и введением дополнительных технологических операций. Как правило, сначала изготавливается КМОП-основание кристалла микросхемы, а после проводятся технологические операции по нанесению слоев элемента хранения. Таким

образом, ReRAM микросхемы, возможно, изготавливать с любыми популярными цифровыми интерфейсами (USB, SATA, SPI, и др.) для доступа к записанной информации и включать блоки такой памяти в состав других сложнофункциональных микросхем. В настоящее время память ReRAM и ее разновидности рассматриваются как потенциальная замена традиционной флэш-памяти [9–10]. Применение памяти ReRAM в нейронных сетях позволяет улучшить их стабильность и помехоустойчивость [11].

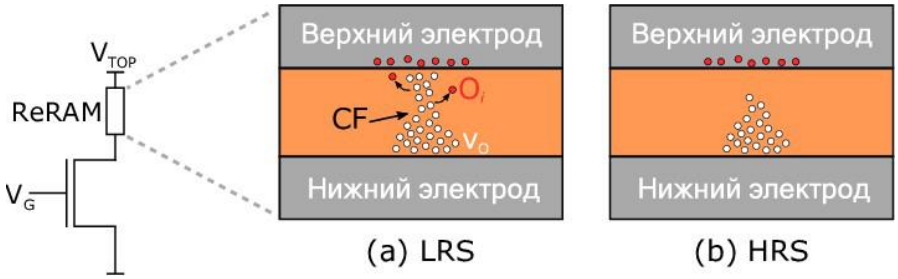

Рис. 1. Иллюстрация структуры ячейки ReRAM в состояниях высокого (HRS) и низкого сопротивления (LRS) [7]
Fig. 1. ReRAM cell in HRS and LRS states [7]

В микросхемах флэш-памяти для записи/стирания необходимо использовать повышенное напряжение (как правило, 16–20 В). Для этого в состав флэш-памяти входит встроенный блок генератора повышенного напряжения, который является одним из наиболее чувствительных к ионизирующему воздействию [3]. Кроме того, ионизирующее воздействие может вызывать потерю информации в ячейке флэш-памяти из-за возникновения утечки хранимого заряда [3].

Резистивная память не требует для проведения записи информации формирования высокого напряжения внутри микросхемы и, таким образом, потенциально может обладать более высокой стойкостью к одиночным и дозовым радиационным эффектам.

В данной работе будут представлены исследования стойкости отдельных тестовых ячеек и коммерчески доступных микросхем резистивной памяти по дозовым и одиночным радиационным эффектам, а также проведено сравнение с другими типами энергонезависимой памяти.

1. Дозовые эффекты в ячейках резистивной памяти

Исследования радиационной стойкости тестовых ячеек проводилось с использованием источника Cs^{137}. Тестовые ячейки были изготовлены с применением КМОП технологии с проектными нормами 0,18 мкм и включали резистивный элемент хранения и транзистор выбора. Эквивалентная схема ячейки памяти представлена на рис. 2.

Полученная вольтамперная характеристика представлена на рис. 3: ячейка переключается между состояниями HRS и LRS в зависимости от приложенного напряжения. Переходы между состояниями для резистивной памяти обозначают как Set и Reset. Диэлектрические материалы, которые обычно имеют очень высокое сопротивление, могут образовывать внутри себя проводящие нити с низким сопротивлением при приложении достаточно высокого напряжения и фактически превращаться из диэлектрика в проводник.

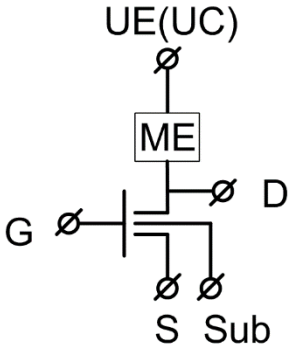

Рис. 2. Эквивалентная схема резистивной ячейки памяти: UE (UC) – контакт верхнего электрода, G – затвор транзистора выбора, S – исток транзистора выбора, D – сток транзистора выбора, Sub – контакт к подложке
Fig. 2. Equivalent circuit of the memory cell.: UE (UC) – upper electrode upper contact (ReRAM) memory cell, G – sampling transistor gate, D – sampling transistor drain, S – sampling transisor source, Sub – substrate contact (contact to n- or p-well depending on the transistor type)

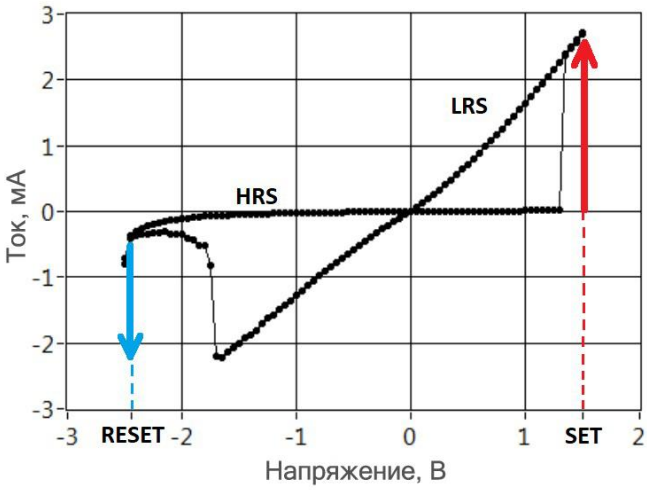

Рис. 3. Вольтамперная характеристика, полученная для тестовых ячеек резистивной памяти
Fig. 3. Current-Voltage characteristic observed during ReRAM cell rewriting

При приложении соответствующих уровней напряжения проводящие нити могут быть либо разорваны (и материал снова станет изолятором), либо снова сформированы (и материал снова станет проводником).

Аппаратно-программный комплекс и методики проведения экспериментов были описаны в [12]. Тестовые ячейки были облучены до уровня воздействия $2{,}4 \cdot 10^6$ рад (Si) при этом никаких изменений вольтамперной характеристики не наблюдалось. Данный эксперимент демонстрирует, что микросхемы на основе таких ячеек потенциально могут обладать очень высоким уровнем стойкости к дозовым воздействиям. Полученные результаты хорошо согласуются с данными по стойкости для других типов ячеек памяти ReRAM с различными материалами элемента хранения, представленными в [13-20]. Обобщенные результаты по подтвержденным уровням стойкости для различных типов ячеек ReRAM представлены на рис. 4.

Рис. 4. Подтвержденные уровни стойкости к дозовому воздействию для ячеек памяти ReRAM изготовленных на основе различных материалов [13-20]
Fig. 4. Confirmed levels of TID hardness for various types of RRAM, CBRAM memory cells. Blue columns – data from [13-20], and the red column - data obtained during our research

2. Исследования дозовых и одиночных радиационных эффектов в коммерческих микросхемах CBRAM

Авторами также были получены оценки показателей стойкости серийно-выпускаемых микросхем резистивной памяти CBRAM к дозовым и одиночным эффектам. В ходе проведения данных экспериментов использовались методики и аппаратно-программный комплекс, разработанные для исследований других типов энергонезависимой памяти, таких как FRAM, MRAM, флэш-память и др. [3–4, 21–24]. В ходе исследований проводился контроль наиболее критичных электрических параметров КМОП-микросхем к ионизирующему воздействию (выходных напряжений логических уровней Voh and Vol, тока потребления), а также функциональный контроль в каждой контрольной точке. При проведении функционального контроля до воздействия проводилась запись эталонной информации в накопитель микросхем, а после воздействия проводилось считывание информации и сравнения с записанным эталоном.

Облучения образцов микросхем проводились при температурах среды минус 40°C, +25°C и +85°C. Полученный в ходе испытаний уровень стойкости к дозовому воздействию составил 40 крад (Si) и определялся одновременным функциональным (невозможностью считывания и записи информации) и параметрическим (выходом тока потребления за максимальное значение, установленное производителем в документации на микросхему) отказом. Зависимости тока потребления микросхемы от уровня воздействия показаны на рис. 5. Отказов отдельных ячеек до регистрации полного функционального отказа не наблюдалось. Такое поведение указывает на то, что функциональный отказ произошел в КМОП части микросхемы.

Для микросхем энергонезависимой памяти характерно проявление и контроль следующих одиночных эффектов:

- необратимый катастрофический (необратимый) отказ (SEHE);
- тиристорный эффект (SEL) (проявляется как скачкообразное возрастание тока потребления);
- одиночный сбой (SEU) (изменение логического состояния ячейки);

- функциональный сбой (SEFI) (проявляются как различного рода сбои в работе микросхемы, изменение тока потребление, восстановление нормального режима работы возможно по команде сброса или путем сброса питания микросхемы).

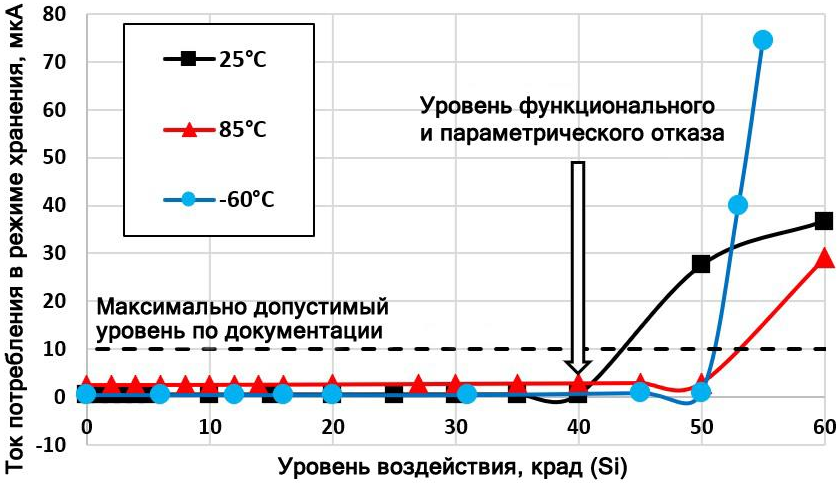

Рис. 5. Зависимости тока потребления микросхемы CBRAM от уровня воздействия
Fig. 5. Dependence of current consumption in storage mode on TID value

Эти эффекты предположительно возникают в основном в КМОП-периферии кристалла (усилителях считывания, регистровых структурах и др.). Маловероятно, что они произойдут в самих ячейках ReRAM т.к. большую часть площади кристалла занимает массив ячеек, в котором отсутствуют тиристорные структуры. Таким образом, сечение тиристорного эффекта ограничено площадью периферии кристалла.

В ходе исследований тиристорного эффекта, катастрофического отказа и одиночных сбоев в микросхемах не наблюдалось при воздействии ионами ксенона со значением линейных потерь энергии ЛПЭ 60 МэВ·см^2/мг. При этом наблюдались эффекты функциональных сбоев (ФС) двух типов:

а) Потеря информации из-за возникновения сбоя в управляющих узлах микросхемы. Зависимость сечения ФС от ЛПЭ ионов представлена на рис. 6.

б) Временная потеря работоспособности, устраняемая путем сброса питания.

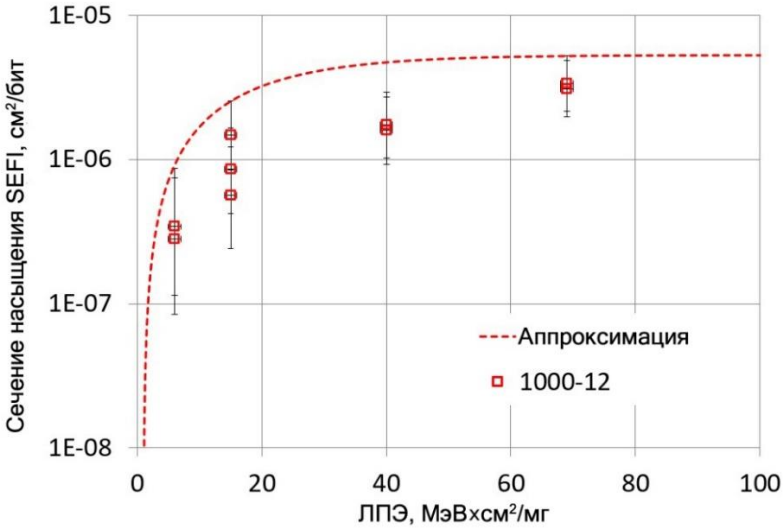

Рис. 6. Зависимости сечения SEFI в микросхемах памяти CBRAM от ЛПЭ ионов
Fig. 6. SEFI cross section at various ions LET

3. Сравнительный анализ радиационной стойкости резистивной памяти с другими типами энергонезависимой памяти

Анализ возможностей различных технологий в части изготовления радиационно-стойких микросхем энергонезависимой проводился по данным из открытых источников и результатами исследований, проведенных авторами. При этом данные исследований по уровням стойкости к ионизирующему воздействию отдельных элементов хранения не всегда могут дать полное представление о стойкости серийной микросхемы изготовленных на их основе.

Сравнительная таблица достигнутых характеристик микросхем памяти различных типов по данным компаний Objective Analysis и Coughlin Associates, представленным на конференции Storage Developer Conference (2019) показана в табл. 1 [25]. В представленных данных содержится информация, в том числе об устойчивости к дозовым (TID) и одиночным эффектам (SEL, SEU).

Таблица 1. Характеристики микросхем памяти различных типов [25]

Характеристика	Единицы измерения	SRAM	DRAM	NOR флэш	NAND флэш	Toggle MRAM	ST-MRAM	FRAM	PCM	ReRAM
Время считывания байта	нс	2	10	25	10000	35	<10	55	16	10
Время записи байта	нс	2	10	5000000	200000	35	<10	55	16	10
Ток потребления в режиме хранения	мА	<1	45	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
Ток потребления в режиме считывания	мА	20	220	20	25	30	15	<10	15	15
Ток потребления в режиме хранения	мА	20	240	50	25	30	15	<10	20	20
Максимальное количество циклов перезаписи	Цикл	Неогр.	Неогр.	10^5	10^4	10^{11}	10^{13}	10^{14}	10^6	10^6
Время хранения	Лет при 55 С	0	10^{-9}	>10	>10	>20	>20	>10	>10	>10
Предел масштабирования	нм	5	10?	45?	14	65	5	5	5	5
Площаль ячейки	f^2	50	6-8	6-8	4	35-40	8-9	8-20	4	4
Выбор ячейки	-	Транз.	Транз.	Транз.	Транз.	Транз.	Транз.	Транз.	Диод	Диод
Многоуровневая ячейка	бит/ячейка	1	1	2	4	2	4	1	4	н/д
Нечувствительность к SEL	-	нет	нет	нет	нет	да	да	нет	да	да
Нечувствительность к SEU	-	нет	нет	нет	нет	да	да	нет	да	да
Стойкость к дозовому воздействию	крад (Si)	<100	<100	<100	<100	>1000	>1000	<100	>1000	>1000

Согласно представленным данным такие технологии как MRAM, PCM (память с изменением фазового состояния) и ReRAM обладают экстремальной устойчивостью к ионизирующим воздействиям: полностью нечувствительны к возникновению тиристорного эффекта и одиночных сбоев в ячейках, стойкость к дозовым воздействиям свыше 1000 крад (Si), это подтверждается и результатами, представленными в данной работе. Необходимо отметить, что указанные уровни по всей видимости приведены именно для элементов памяти, и могут быть использованы в качестве ориентира для выбора технологии изготовления микросхем, устойчивых к ионизирующему воздействию. В тоже время нельзя утверждать, что любая микросхема, изготовленная с применением указанных технологий, будет по умолчанию обладать такими уровнями стойкости. Уровень стойкости микросхемы будет определяться в том числе стойкостью КМОП части, в которой может наблюдаться тиристорный эффект (SEL) в микросхемах MRAM [26] или возникать их дозовая деградация. Также часть производителей флэш-памяти приводят для своих

микросхем уровни стойкости к дозовым воздействиям свыше 100 крад (Si). В табл. 2 приведены уровни стойкости коммерчески доступных микросхем известных производителей с различными элементами хранения информации по данным документации производителей и открытых источников [27–32].

Таблица 2. Типовые уровни стойкости серийно выпускаемых энергонезависимых микросхем памяти различных типов подтвержденной стойкостью

Тип памяти	Производитель	Объем памяти	Стойкость к накопленной дозе	Стойкость по одиночным эффектам, МэВ·см^2/мг	Ссылки на источники
RRAM, CBRAM*	Adesto technologies, США	256 Кбит	40 крад (Si)	SEU: нечувствительны SEL: 60 SEFI: 1	По результатам данных исследований
Flash memory NOR	3D Plus, Франция	64 Мбит… 2 Гбит	20 крад (Si)	SEU: 10 SEL: 15...40 SEFI: 3…15	[27]
Flash memory NOR (SONOS)	Shanghai Fudan Microelectronics Group Co, Китай	32…64 Мбит	100 крад (Si)	SEU: нет данных SEL: 15...40 SEFI: нет данных	[28,29]
Flash memory NOR (65 nm)	Cypress, США	256 Мбит	20 крад (Si) в режиме записи 30 крад (Si) в режиме чтения	SEU: 28 SEL: 60 SEFI: 60	[29]
Flash memory NOR (SONOS)	CAES, США	64Мбит… 1Гбит	300 крад (Si)	SEU: нечувствительны SEL: >80 SEFI: нечувствительны	[30]
Flash memory NAND	3D Plus, Франция	8 Гбит… 128 Гбит	60 крад (Si)	SEU: 1,3 SEL: >62,5 SEFI: нет данных	[27]
Flash memory NAND	CAES, США	4 Тбит	30…50 крад (Si)	SEU: нет данных SEL: >62,5 SEFI: нет данных	[31]
MRAM	3D Plus, Франция	1…64Мбит	50	SEU: нечувствительны SEL: >85 SEFI: нет данных	[27]
MRAM	CAES, США	16..64Мбит	1000	SEU: нечувствительны SEL: 85 SEFI: нет данных	[31]
FRAM	3D Plus, Франция	16 Мбит	25	SEU: 2,7 SEL: >70 SEFI: 2,7	[27]
FRAM*	Cypress, США	256 Кбит… 2Мбит	25	SEU: 1 SEL: >40 SEFI: 1	[4]
C-RAM (PCM)	BAE Systems, Великобритания	2… 20 Мбит	>500	SEL: 60	[32]

*Примечание: * - микросхемы, не ориентированные на применение в космической аппаратуре.*

Заключение

На основании данных проведенных исследований видно, что стойкость микросхем, изготовленных на основе однотипных элементов хранения, может существенно отличаться у разных производителей. Также можно заключить, что независимо от технологии существует возможность достичь значительных уровней стойкости. В настоящее время наилучшие показатели стойкости для серийно выпускаемых радиационно-стойких микросхем энергонезависимой памяти достигнуты для технологий MRAM и PCM, но достигнутая емкость таких микросхем невелика и составляет десятки Мбит. При этом из табл. 1 следует, что ячейки резистивной памяти ReRAM имеют одни из лучших характеристик масштабируемости технологии, времени доступа и не уступают MRAM и PCM в потенциальной стойкости к ионизирующему воздействию. В настоящее время производители памяти серийно не выпускают радиационно-стойкие микросхемы памяти ReRAM, но исходя из анализа представленных данных и возможности совмещения данной технологии со стандартными КМОП техпроцессами можно заключить, что есть принципиальная возможность разработки энергонезависимой памяти ReRAM с хорошими показателями стойкости к ионизирующему воздействию, большой информационной емкости и с малым временем доступа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Nikiforov A.Y., Boychenko D.V., Telets V.A., Smolin A.A., Elesin V.V., Ulanova A.V, and Kessarinskiy L.N. Basic trends in electronic components product range development: Radiation hardness aspects, in Proc. 30th Int. Conf. on Microelectronics, MIEL 2017; Nis, Serbia, October 2017, p. 45–48. DOI: https://doi.org/10.1109/MIEL.2017.8190066.
2. Boruzdina A., Ulanova A., Grigor'ev N., Nikiforov A. Radiation-induced degradation in the dynamic parameters of memory chips, Russian Microelectronics. 2012, vol. 41, no. 4, p. 259–265. DOI: https://doi.org/1010.1134/s106373971204004x
3. Petrov Andrey, Vasil'ev Alexey, Ulanova Anastasia, Chumakov Alexander and Nikiforov Alexander. Flash memory cells data loss caused by total ionizing dose and heavy ions. Open Physics. 2014, vol. 12, no. 10, p. 725–729. DOI: https://doi.org/10.2478/s11534-014-0503-6.
4. Boruzdina A.B., Ulanova A.V., Orlov A.A., Pechenkin A.A., Yanenko A.V. and Nikiforov A.Y. Influence of FRAM operational mode on its SEE susceptibility, 16th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS). 2016, p. 1–4. DOI: https://doi.org/10.1109/RADECS.2016.8093213.
5. Pechenkin A.A., Boruzdina A.B., Yanenko A.V., Protasov D.E., Shvetsov-Shilovskiy I.I. and Sangalov A.A. SEL and cell failures in MRAM under ion and focused laser irradiation. 17th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS). 2017, p. 1–6. DOI: https://doi.org/10.1109/RADECS.2017.8696211.
6. Zhang Yang; Duan Ziqing; Li et al. Vertically integrated ZnO-Based 1D1R structure for resistive switching. Journal of Physics D: Applied Physics. 2013, 46 (14): 145101. DOI: https://doi.org/10.1088/0022-3727/46/14/145101.
7. Sklénard B., Blaise P., Traoré B., Dragoni A., Nail C. and Vianello E. Advances in the understanding of microscopic switching mechanisms in ReRAM devices (Invited paper), 47th European Solid-State Device Research Conference (ESSDERC). 2017, p. 46–49. DOI: https://doi.org/10.1109/ESSDERC.2017.8066588.
8. Daniele Ielmini. Resistive switching memories based on metal oxides: mechanisms, reliability and scaling. Semicond. Sci. Technol. 2016, 31 063002. DOI: https://doi.org/10.1088/0268-1242/31/6/063002.
9. Zahoor F., Azni Zulkifli T.Z. & Khanday F.A. Resistive Random Access Memory (RRAM): an Overview of Materials, Switching Mechanism, Performance, Multilevel Cell (mlc) Storage, Modeling, and Applications. Nanoscale Res Lett 15, 90 (2020). DOI: https://doi.org/10.1186/s11671-020-03299-9.
10. Jana D., Roy S., Panja R. et al. Conductive-bridging random access memory: challenges and opportunity for 3D architecture. Nanoscale Res Lett 10, 188 (2015). DOI: https://doi.org/10.1186/s11671-015-0880-9.
11. Kobayashi Masaharu & Wu Jixuan & Mo Fei & Saraya Takuya & Hiramoto Toshiro. (2020). (Invited) 3D Neural Network: Monolithic Integration of Resistive-RAM Array with Oxide-Semiconductor FET. ECS Transactions. 98. p. 57–61. DOI: https://doi.org/10.1149/09808.0057ecst.
12. Shvetsov-Shilovskiy I.I., Boruzdina A.B., Ulanova A.V., Orlov A.A., Amburkin K.M. and. Nikiforov A.Y. Measurement system for test memory cells based on keysight B1500A semiconductor device analyzer running

LabVIEW software. International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). 2017, p. 1–4. DOI: https://doi.org/10.1109/SIBCON.2017.7998542.

13. Butcher B., He X., Huang M., Wang Y., Liu Q., Lv H., Liu M. & I. O. D. Kumar R., Aluguri U., Chand T.Y. Tseng, Metal oxide resistive switching memory: Materials, properties and switching mechanisms, Ceramics International. 2017, vol. 43, supplement 1, p. S547–S556. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.05.289.
14. Wang W. (2010). Proton-based total-dose irradiation effects on Cu/HfO2:Cu/Pt ReRAM devices. Nanotechnology, 21 47, 475206. DOI: https://doi.org/10.1088/0957-4484/21/47/475206.
15. Tong W.M. et al. Radiation Hardness of TiO2{\rm TiO}_{2} Memristive Junctions. IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 57, no. 3, p. 1640–1643, 2010. DOI: https://doi.org/10.1109/TNS.2010.2045768.
16. Hughart D.R. et al. Total ionizing dose and displacement damage effects on TaOx memristive memories. IEEE Aerospace Conference, 2013, p. 1–10. DOI: https://doi.org/10.1109/AERO.2013.6497381.
17. He X., Wang W., Butcher B., Tanachutiwat S. and Geer R.E. Superior TID Hardness in TiN/HfO $_{2}$/TiN ReRAMs After Proton Radiation. IEEE Transactions on Nuclear Science. 2012, vol. 59, no. 5, p. 2550–2555. DOI: https://doi.org/10.1109/TNS.2012.2208480.
18. Lee D. et al. Proton Irradiation Effects on Resistive Random Access Memory With ZrO_{\rm x}_{\rm x} /HfO_{\rm x}_{\rm x} Stacks. IEEE Transactions on Nuclear Science. 2011, vol. 58, no. 6, p. 3317–3320. DOI: https://doi.org/10.1109/TNS.2011.2165731.
19. Taggart J.L., Chen W., Gonzalez-Velo Y., Barnaby H.J., Holbert K. and. Kozicki M.N. In Situ Synaptic Programming of CBRAM in an Ionizing Radiation Environment. IEEE Transactions on Nuclear Science. 2018, vol. 65, no. 1, p. 192–199. DOI: https://doi.org/10.1109/TNS.2017.2779860.
20. Vianello E. et al. Sb-doped GeS2 as performance and reliability booster in Conductive Bridge RAM. International Electron Devices Meeting. 2012, p. 31.5.1–31.5.4. DOI: https://doi.org/10.1109/IEDM.2012.6479145.
21. Boruzdina Anna B., Anastasia V. Ulanova, Alexander I. Chumakov and Andrey V. Yanenko. A method for registration of multiple cell upsets in high capacity memory cells induced by single nuclear particles. Russian Microelectronics 45 (2016): 292-297. DOI: https://doi.org/10.1134/S1063739716040041.
22. Boruzdina A.B, Orlov A.A., Ulanova A.V., Grigor'ev N.G. and Nikiforov A.Y. Automatic control system for memory chips performance in a radiation experiment. International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). 2015, p. 1–4. DOI: https://doi.org/10.1109/SIBCON.2015.7147007.
23. Boruzdina Anna, Yanenko Andrey, Tikhomirov Georgy and Tumanov Vitaly. NI Based System for Seu Testing of Memory Chips for Avionics. MATEC Web Conf. 2016, vol. 79. DOI: https://doi.org/10.1051/matecconf/20167901028.
24. Chepov V.A., Shmakov S.B., Shvetsov-Shiovsky I.I., Petrov A.G. and Kalashnikov V.D. Solid-state drives parameters control system for ionizing radiation tests, in Proc. 15th International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2021, May 13-15, article number 9438860. DOI: https://doi.org/10.1109/SIBCON50419.2021.9438860.
25. Objective Analysis & Coughlin Associates Presentation. URL: https://www.snia.org/sites/default/files/SDC/2019/presentations/ (дата обращения: 18.05.2022).
26. Pechenkin A.A., Boruzdina A.B., Yanenko A.V., Protasov D.E., Shvetsov-Shilovskiy I.I. and Sangalov A.A. SEL and cell failures in MRAM under ion and focused laser irradiation, 17th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS). 2017, p. 1–6. DOI: https://doi.org/10.1109/RADECS.2017.8696211.
27. 3D PLUS Products. URL: https://www.3d-plus.com/products.php (дата обращения: 18.05.2022).
28. Fudan Products and solutions. URL: http://eng.fmsh.com/feihuifaxingcunshuqi/ (дата обращения: 18.05.2022).
29. Zhou Q. et al. Design of a Compact and Reconfigurable Onboard Data Handling System. IEEE Intl Conf on Parallel & Distributed Processing with Applications, Ubiquitous Computing & Communications, Big Data & Cloud Computing, Social Computing & Networking, Sustainable Computing & Communications (ISPA/IUCC/BDCloud/SocialCom/SustainCom). 2018, p. 260–264. DOI: https://doi.org/10.1109/BDCloud.2018.00049.
30. Infineon press release. URL:https://www.infineon.com/cms/en/about-infineon/press/market-news/2021/INFATV202107-085.html (дата обращения: 18.05.2022).
31. Caes products. URL: https://caes.com/products/radiation-hardened-solutions-high-reliability-components/memory (дата обращения: 18.05.2022).
32. BAE Systems. Radiation-hardened electronics product guide. URL: https://www.baesystems.com/en-media/uploadFile/20210404065929/1434555681546.pdf (дата обращения: 18.05.2022).

REFERENCES:

[1] Nikiforov A.Y., Boychenko D.V., Telets V.A., Smolin A.A., Elesin V.V., Ulanova A.V, and Kessarinskiy L.N. Basic trends in electronic components product range development: Radiation hardness aspects, in Proc. 30th Int.

Conf. on Microelectronics, MIEL 2017; Nis, Serbia, October 2017, p. 45–48. DOI: https://doi.org/10.1109/MIEL.2017.8190066.

[2] Boruzdina A., Ulanova A., Grigor'ev N., Nikiforov A. Radiation-induced degradation in the dynamic parameters of memory chips, Russian Microelectronics. 2012, v. 41, no. 4, p. 259–265. DOI: https://doi.org/10.1134/s106373971204004x.

[3] Petrov Andrey, Vasil'ev Alexey, Ulanova Anastasia, Chumakov Alexander and Nikiforov Alexander. Flash memory cells data loss caused by total ionizing dose and heavy ions. Open Physics. 2014, vol. 12, no. 10, p. 725–729. DOI: https://doi.org/10.2478/s11534-014-0503-6.

[4] Boruzdina A.B., Ulanova A.V., Orlov A.A., Pechenkin A.A., Yanenko A.V. and Nikiforov A.Y. Influence of FRAM operational mode on its SEE susceptibility, 16th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS). 2016, p. 1–4. DOI: https://doi.org/10.1109/RADECS.2016.8093213.

[5] Pechenkin A.A., Boruzdina A.B., Yanenko A.V., Protasov D.E., Shvetsov-Shilovskiy I.I. and Sangalov A.A. SEL and cell failures in MRAM under ion and focused laser irradiation. 17th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS). 2017, p. 1–6. DOI: https://doi.org/10.1109/RADECS.2017.8696211.

[6] Zhang Yang; Duan Ziqing; Li et al. Vertically integrated ZnO-Based 1D1R structure for resistive switching. Journal of Physics D: Applied Physics. 2013, 46 (14): 145101. DOI: https://doi.org/10.1088/0022-3727/46/14/145101.

[7] Sklénard B., Blaise P., Traoré B., Dragoni A., Nail C. and Vianello E. Advances in the understanding of microscopic switching mechanisms in ReRAM devices (Invited paper), 47th European Solid-State Device Research Conference (ESSDERC). 2017, p. 46–49. DOI: https://doi.org/10.1109/ESSDERC.2017.8066588.

[8] Daniele Ielmini. Resistive switching memories based on metal oxides: mechanisms, reliability and scaling. Semicond. Sci. Technol. 2016, 31 063002. DOI: https://doi.org/10.1088/0268-1242/31/6/063002.

[9] Zahoor F., Azni Zulkifli T.Z. & Khanday F.A. Resistive Random Access Memory (RRAM): an Overview of Materials, Switching Mechanism, Performance, Multilevel Cell (mlc) Storage, Modeling, and Applications. Nanoscale Res Lett 15, 90 (2020). DOI: https://doi.org/10.1186/s11671-020-03299-9.

[10] Jana D., Roy S., Panja R. et al. Conductive-bridging random access memory: challenges and opportunity for 3D architecture. Nanoscale Res Lett 10, 188 (2015). DOI: https://doi.org/10.1186/s11671-015-0880-9.

[11] Kobayashi Masaharu & Wu Jixuan & Mo Fei & Saraya Takuya & Hiramoto Toshiro. (2020). (Invited) 3D Neural Network: Monolithic Integration of Resistive-RAM Array with Oxide-Semiconductor FET. ECS Transactions. 98. p. 57–61. DOI: https://doi.org/10.1149/09808.0057ecst.

[12] Shvetsov-Shilovskiy I.I., Boruzdina A.B., Ulanova A.V., Orlov A.A., Amburkin K.M. and. Nikiforov A.Y. Measurement system for test memory cells based on keysight B1500A semiconductor device analyzer running LabVIEW software. International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). 2017, p. 1–4. DOI: https://doi.org/10.1109/SIBCON.2017.7998542.

[13] Butcher B., He X., Huang M., Wang Y., Liu Q., Lv H., Liu M. & I. O. D. Kumar R., Aluguri U., Chand T.Y. Tseng, Metal oxide resistive switching memory: Materials, properties and switching mechanisms, Ceramics International. 2017, vol. 43, supplement 1, p. S547–S556. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.05.289.

[14] Wang W. (2010). Proton-based total-dose irradiation effects on Cu/HfO2:Cu/Pt ReRAM devices. Nanotechnology, 21 47, 475206. DOI: https://doi.org/10.1088/0957-4484/21/47/475206.

[15] Tong W.M. et al. Radiation Hardness of TiO2{\rm TiO}_{2} Memristive Junctions. IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 57, no. 3, p. 1640–1643, 2010. DOI: https://doi.org/10.1109/TNS.2010.2045768.

[16] Hughart D.R. et al. Total ionizing dose and displacement damage effects on TaOx memristive memories. IEEE Aerospace Conference, 2013, p. 1–10. DOI: https://doi.org/10.1109/AERO.2013.6497381.

[17] He X., Wang W., Butcher B., Tanachutiwat S. and Geer R.E. Superior TID Hardness in TiN/HfO $_{2}$/TiN ReRAMs After Proton Radiation. IEEE Transactions on Nuclear Science. 2012, vol. 59, no. 5, p. 2550–2555. DOI: https://doi.org/10.1109/TNS.2012.2208480.

[18] Lee D. et al. Proton Irradiation Effects on Resistive Random Access Memory With ZrO_{\rm x}_{\rm x} /HfO_{\rm x}_{\rm x} Stacks. IEEE Transactions on Nuclear Science. 2011, vol. 58, no. 6, p. 3317–3320. DOI: https://doi.org/10.1109/TNS.2011.2165731.

[19] Taggart J.L., Chen W., Gonzalez-Velo Y., Barnaby H.J., Holbert K. and. Kozicki M.N. In Situ Synaptic Programming of CBRAM in an Ionizing Radiation Environment. IEEE Transactions on Nuclear Science. 2018, vol. 65, no. 1, p. 192–199. DOI: https://doi.org/10.1109/TNS.2017.2779860.

[20] Vianello E. et al. Sb-doped GeS2 as performance and reliability booster in Conductive Bridge RAM. International Electron Devices Meeting. 2012, p. 31.5.1–31.5.4. DOI: https://doi.org/10.1109/IEDM.2012.6479145.

[21] Boruzdina Anna B., Anastasia V. Ulanova, Alexander I. Chumakov and Andrey V. Yanenko. A method for registration of multiple cell upsets in high capacity memory cells induced by single nuclear particles. Russian Microelectronics 45 (2016): 292-297. DOI: https://doi.org/10.1134/S1063739716040041.
[22] Boruzdina A.B, Orlov A.A., Ulanova A.V., Grigor'ev N.G. and Nikiforov A.Y. Automatic control system for memory chips performance in a radiation experiment. International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). 2015, p. 1–4. DOI: https://doi.org/10.1109/SIBCON.2015.7147007.
[23] Boruzdina Anna, Yanenko Andrey, Tikhomirov Georgy and Tumanov Vitaly. NI Based System for Seu Testing of Memory Chips for Avionics. MATEC Web Conf., vol. 79, 2016. DOI: https://doi.org/10.1051/matecconf/20167901028.
[24] Chepov V.A., Shmakov S.B., Shvetsov-Shiovsky I.I., Petrov A.G. and Kalashnikov V.D. Solid-state drives parameters control system for ionizing radiation tests, in Proc. 15th International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2021, May 13-15, article number 9438860. DOI: https://doi.org/10.1109/SIBCON50419.2021.9438860.
[25] Objective Analysis & Coughlin Associates Presentation. URL: https://www.snia.org/sites/default/files/SDC/2019/presentations (accessed: 18.05.2022)
[26] Pechenkin A.A., Boruzdina A.B., Yanenko A.V., Protasov D.E., Shvetsov-Shilovskiy I.I. and Sangalov A.A. SEL and cell failures in MRAM under ion and focused laser irradiation, 17th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS). 2017, p. 1–6. DOI: https://doi.org/10.1109/RADECS.2017.8696211.
[27] 3D PLUS Products. URL: https://www.3d-plus.com/products.php (accessed: 18.05.2022).
[28] Fudan Products and solutions. URL: http://eng.fmsh.com/feihuifaxingcunshuqi/ (accessed: 18.05.2022).
[29] Zhou Q. et al. Design of a Compact and Reconfigurable Onboard Data Handling System. IEEE Intl Conf on Parallel & Distributed Processing with Applications, Ubiquitous Computing & Communications, Big Data & Cloud Computing, Social Computing & Networking, Sustainable Computing & Communications (ISPA/IUCC/BDCloud/SocialCom/SustainCom). 2018, p. 260–264. DOI: https://doi.org/10.1109/BDCloud.2018.00049.
[30] Infineon press release. URL:https://www.infineon.com/cms/en/about-infineon/press/market-news/2021/INFATV202107-085.html (accessed: 18.05.2022).
[31] Caes products. URL: https://caes.com/products/radiation-hardened-solutions-high-reliability-components/memory (accessed: 18.05.2022).
[32] BAE Systems. Radiation-hardened electronics product guide. URL: https://www.baesystems.com/en-media/uploadFile/20210404065929/1434555681546.pdf (accessed: 18.05.2022).

Поступила в редакцию – 18 мая 2022 г. Окончательный вариант – 27 мая 2022 г.
Received – May 18, 2022. The final version – May 27, 2022.