

**ВЛИЯНИЕ ПРОТОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ДЕГРАДАЦИЮ И СБОИ
В РАБОТЕ МИКРОСХЕМ ОПЕРАТИВНОЙ ПАМЯТИ**
**INFLUENCE OF PROTON RADIATION ON THE DEGRADATION AND FAILURES
OF RAM CHIPS**

Котляров В.В., аспирант ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Kotlyarov V.V., Postgraduate student, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Шевченко А.В., магистр ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Shevchenko A.V., Master's student Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Аннотация. Рассматривается влияние протонного облучения на полупроводниковые микросхемы оперативной памяти (ОЗУ) в условиях космического пространства. Актуальность темы обусловлена тем, что протоны космического излучения способны вызывать как мгновенные сбои в работе динамической и статической памяти (DRAM, SRAM, DDR), так и накопительное деградационное повреждение структуры, угрожающее надёжности бортовой аппаратуры. Приводится анализ физических механизмов воздействия протонов на элементы памяти и возникающих радиационных эффектов: одиночных сбоев (битовых ошибок), паразитных эффектов, деградации диэлектриков и накопления дефектов. Описаны типичные виды отказов памяти под действием ионизирующего излучения и их механизмы.

Abstract: The influence of proton irradiation on semiconductor random-access memory (RAM) chips in the space environment is examined. The relevance of the topic stems from the fact that cosmic-ray protons are capable of causing both instantaneous malfunctions in dynamic and static memory (DRAM, SRAM, DDR) and cumulative structural degradation that threatens the reliability of onboard equipment. The analysis focuses on the physical mechanisms by which protons affect memory elements and the resulting radiation effects, including single-event upsets (bit flips), parasitic latch-up effects, dielectric degradation, and defect accumulation. Typical failure modes of memory under ionizing radiation and their mechanisms are described.

Ключевые слова: протонное облучение; оперативная память; радиационная стойкость; сбои; деградация; одиночный сбой, SEU.

Keywords: proton irradiation; random-access memory; radiation hardness; failures; degradation; single-event upset, SEU.

Интенсивное ионизирующее излучение космического пространства – в особенности протоны солнечного ветра и радиационных поясов Земли – представляет серьёзную опасность для полупроводниковых устройств памяти. Актуальность проблемы

подтверждается статистикой отказов спутников: одиночные события (SEU), вызывающие спонтанные битовые ошибки, признаны одной из основных причин сбоев аппаратуры на орбите. Случаи единичных сбоев памяти регистрировались начиная с первых космических миссий, а с миниатюризацией микросхем проблема лишь обостряется: уменьшение размеров транзисторов и зарядов хранения делает ячейки памяти более уязвимыми к воздействиям даже одиночных частиц. Помимо мгновенных нарушений состояния памяти, протоны способны вызывать и долговременную деградацию материалов микросхем. Проникая в кремниевую структуру с достаточной энергией, протон приводит к ионизации и выбиванию атомов решётки. Накопление таких дефектов со временем ухудшает параметры микросхем – растут токи утечки, смещаются пороговые напряжения транзисторов, сокращается время удержания заряда в DRAM.

Протонное излучение при взаимодействии с полупроводником вызывает два основных типа эффектов: ионизационные и эффекты смещения. Ионизационное воздействие связано с тем, что пролетающая заряженная частица оставляет за собой трек из образованных электронно-дырочных пар в кремнии. В области микросхемы, где протон тормозится, возникает локальный импульс тока – так называемый пик тока ионизации, способный изменить состояние логических узлов. Энергии одиночного протона часто недостаточно для прямого перевода транзистора, но высокоэнергетические протоны могут вступать в ядерные реакции с атомами материала, порождая вторичные осколки – тяжелые ионы с большим линейным энерговыделением (LET).

Эффекты смещения связаны с выбиванием атомов из узлов кристаллической решётки при соударении с протоном. Такие столкновения приводят к дефектам – вакансиям и межузельным атомам – формируя в кремнии центры рекомбинации и захвата носителей. В результате изменяются электрические свойства материала: рекомбинационные центры сокращают время жизни носителей, увеличивают токи утечки p–n переходов, а заряд, захваченный на диэлектрических ловушках, смещает режимы работы транзисторов.

Следует отметить, что чувствительность памяти к радиации усиливается с каждым новым технологическим поколением. Сокращение линейных размеров ячеек (SRAM 6Т, конденсаторов DRAM) приводит к уменьшению электрической ёмкости C хранимого заряда. Минимальный заряд, необходимый для удержания логического состояния ($Q_{crit} \approx C \cdot \Delta V$), также снижается, что облегчает его компенсацию радиационно-индуцированным зарядом. Иными словами, чем меньше геометрия и напряжение питания V_{DD} , тем меньше заряд способен изменить бит в памяти.

Поражение микросхемы памяти протоном может проявляться как временный сбой (переключение состояния бита), так и как непоправимый отказ устройства, в зависимости от характера события. К счастью, в большинстве случаев речь идёт о так называемых мягких сбоях – одиночных изменениях данных без физического разрушения элемента. Наиболее распространённый вид – одиночный сбой памяти (Single Event Upset, SEU), когда частица выбивает заряд в одной ячейке, меняя её логическое состояние. Такой сбой не повреждает саму ячейку и может быть исправлен перезаписью правильного значения.

При более сильном воздействии частицы возможны и жёсткие отказы – возникающие, когда радиационный импульс запускает паразитные структуры в кристалле. Классическим примером является паразитный latch-up – несанкционированное включение паразитного тиристора в КМОП-структуре, приводящее к пробое и сильному току сквозь микросхему. Если своевременно не снять питание, latch-up способен вывести чип из строя.

Другой вариант необратимых изменений – деградация ячеек памяти под большой дозой. Здесь проявляются уже упомянутые накопительные эффекты: после облучения определённой дозой отдельные ячейки DRAM могут перестать удерживать заряд длительное время или вовсе перейти в устойчиво «битое» состояние.

На рис. 1 представлены схематические иллюстрации примеров сбоев памяти под воздействием одиночных частиц. В нормальном режиме (верхняя панель) массив памяти функционирует без ошибок. При возникновении SEU (средняя панель) одна из ячеек переворачивается (показана красным цветом) вследствие попадания ионизирующей частицы; встроенная схема контроля и коррекции ошибок (EDAC) способна обнаружить этот одиночный битовый сбой и исправить его, переписав правильное значение. Напротив, при SEFI (нижняя панель) частица поражает узел управляющей логики (например, регистр адресации), и это приводит к чтению неверного адреса и множественным ошибкам по всей строке памяти.

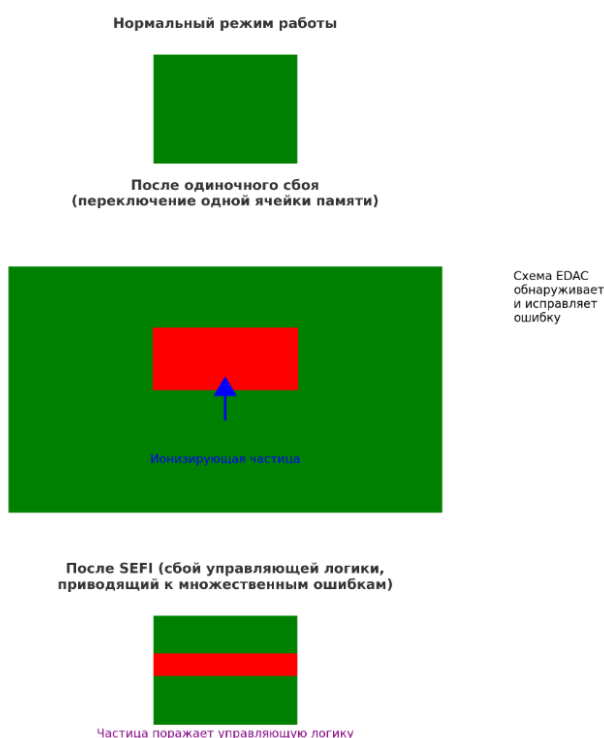


Рисунок 1 — Схема проявления сбоев памяти при воздействии протонного излучения

Рисунок 1 — Схема проявления сбоев памяти при воздействии протонного излучения: (верх) нормальная работа без ошибок; (середина) одиночный сбой (битовая ошибка) в одной ячейке памяти, обнаруженный и исправленный схемой EDAC; (низ) функциональный сбой (SEFI) – сбой управляющей логики приводит к чтению неверной строки и множественным ошибкам.

Протонное излучение в космосе является одним из ключевых факторов, влияющих на надёжность оперативной памяти космических аппаратов. Однако разработка эффективных методов радиационной защиты и постоянное совершенствование конструктивных решений остаются ключевыми направлениями в повышении надёжности оперативной памяти космических аппаратов, что в конечном итоге позволяет минимизировать риск отказов и обеспечить стабильность функционирования систем в условиях агрессивного космического излучения.

Список литературы

1. Liu Y., Cao R., Tian J. и др. Исследование эффектов одиночного события, обусловленных эффектами смещения повреждений под действием протонного облучения в статической оперативной памяти. *Electronics*, 2023, 12(24): 5028. DOI: 10.3390/electronics12245028
2. Pavan Kumar M., Lorenzo R. Обзор радиационно-устойчивых ячеек памяти для космических и наземных приложений. *International Journal of Circuit Theory and Applications*, 2023, 51(1): 27–63. DOI: 10.1002/cta.3429
3. Zhang B., Zhang S., Shen G. и др. Мониторинг одиночных сбоев и линейной передачи энергии космического излучения на навигационных спутниках Beidou. *Open Astronomy*, 2023, 32(1): 20220206. DOI: 10.1515/astro-2022-0206
4. Sanchez-Cano B., Witasse O., Knutsen E.W. и др. События солнечных энергетических частиц, выявленные в данных обслуживания флотилии космических аппаратов ESA в Солнечной системе. *Space Weather*, 2023, 21(7): e2023SW003443. DOI: 10.1029/2023SW003443
5. Lee G.-J., Suh M., Ryu M. и др. Исследование деградации DDR4 DRAM под воздействием общего ионизирующего дозового эффекта. *IEEE Access*, 2023, 11: 97456–97465. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3312926

References

1. Liu Y., Cao R., Tian J., et al. Study of Single-Event Effects Influenced by Displacement Damage Effects under Proton Irradiation in Static Random-Access Memory. *Electronics*, 2023, 12(24): 5028. DOI: 10.3390/electronics12245028
2. Pavan Kumar M., Lorenzo R. A review on radiation-hardened memory cells for space and terrestrial applications. *Int. J. Circuit Theory Appl.*, 2023, 51(1): 27–63. DOI: 10.1002/cta.3429
3. Zhang B., Zhang S., Shen G., et al. Monitor of the single event upsets and linear energy transfer of space radiation on the Beidou navigation satellites. *Open Astronomy*, 2023, 32(1): 20220206. DOI: 10.1515/astro-2022-0206
4. Sanchez-Cano B., Witasse O., Knutsen E.W., et al. Solar Energetic Particle Events Detected in the Housekeeping Data of the ESA's Spacecraft Flotilla in the Solar System. *Space Weather*, 2023, 21(7): e2023SW003443. DOI: 10.1029/2023SW003443
5. Lee G.-J., Suh M., Ryu M., et al. Investigation into the Degradation of DDR4 DRAM Owing to Total Ionizing Dose Effects. *IEEE Access*, 2023, 11: 97456–97465. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3312926