

07

Определение доминирующего механизма сбоев в оперативном запоминающем устройстве микроконтроллера $0.18\ \mu\text{m}$ при импульсном воздействии протонов низких энергий

© М.В. Марчук,^{1,2} О.В. Ткачев,² А.С. Пилипенко,² С.М. Дубровских,² А.С. Кустов,² Е.А. Шibaков,²
К.В. Сафронов,² А.С. Тищенко,² В.А. Флегентов,² С.А. Горохов²

¹ Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина,
620002 Екатеринбург, Россия

² Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский институт
технической физики им. акад. Е.И. Забабахина,
456770 Снежинск, Челябинская обл., Россия
e-mail: A.S.Pilipenko@vniitf.ru

Поступило в Редакцию 12 июля 2023 г.

В окончательной редакции 13 ноября 2023 г.

Принято к публикации 6 декабря 2023 г.

Исследованы сбои во встроенном оперативном запоминающем устройстве микроконтроллера, облучаемого импульсами протонов низких энергий. Рассмотрены особенности проведения эксперимента по облучению исследуемого образца на лазер-плазменном источнике. Представлены оценка линейных потерь энергии от прямой ионизации протонами чувствительного объема и расчет мощности поглощенной дозы с учетом структуры и химического состава кристалла исследуемого микроконтроллера. Проведено сопоставление результатов с ранее полученными данными по облучению тормозным излучением и анализ карт сбоев. Показано, что сбои в оперативном запоминающем устройстве микроконтроллера обусловлены одиночными радиационными эффектами.

Ключевые слова: протонное излучение, тормозное излучение, микроконтроллер, одиночные сбои, низкоэнергетические протоны, импульсное воздействие, лазерное ускорение.

DOI: 10.61011/JTF.2024.02.57079.177-23

Введение

В настоящее время порядка 40–50% от всего объема радиационных испытаний, проводимых в интересах предприятий космической отрасли, приходится на тематику одиночных радиационных эффектов (ОРЭ) [1].

Одним из проявлений ОРЭ является нарушение логического состояния элемента памяти под воздействием отдельных частиц, так называемые одиночные сбои (ОС).

До недавнего времени считалось, что ОС в космическом пространстве вызывают только тяжелые ионы и высокоэнергетические протоны. Сбои из-за прямой ионизации протонами были впервые предсказаны в 1982 г. [2] и впоследствии экспериментально подтверждены в 2007 г. для протонов низкой энергии, генерируемых на статическом ускорителе Ван де Граафа [3]. В дальнейшем в работах различных авторов на статическом ускорителе и установках, работающих в квазистатических режимах, было подтверждено, что прямая ионизация протонами может быть причиной одиночных сбоев [4,5]. При этом в данных исследованиях сечение сбоев под действием низкоэнергетических протонов на несколько порядков превышало значение для протонов высоких энергий.

Особенностью постановки эксперимента в настоящей работе является использование импульсного источни-

ка протонов на основе лазер-плазменного источника. Несмотря на то, что идея лазерного ускорения частиц не нова [6,7], авторам не известны работы, в которых бы подобный источник применялся для исследований реакции микрoeлектронных устройств на воздействие отдельных ядерных частиц. На наш взгляд, такой источник является перспективным, однако существует вопрос, связанный с относительной большой плотностью потока протонов лазер-плазменного источника (порядка $10^{13} - 10^{16}\ \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), вследствие чего возможно возникновение эффектов объемной ионизации. Подобная проблемная ситуация рассматривалась ранее на импульсном источнике протонов, но с другими параметрами и высокими энергиями [8]. Согласно РД 134-0191-2011 [9] для исключения эффектов объемной ионизации: „... средняя плотность потока протонов в одном импульсе протонного излучения любой длительности не должна превышать $5 \cdot 10^{10}\ \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ “. Т.е. в данном случае требуется оценить корректность моделирования протонного излучения (низкоэнергетического) космического пространства на лазер-плазменной установке.

В связи с этим цель настоящей работы заключалась в определении доминирующего механизма сбоев исследуемого образца при воздействии импульса низкоэнергетических протонов.

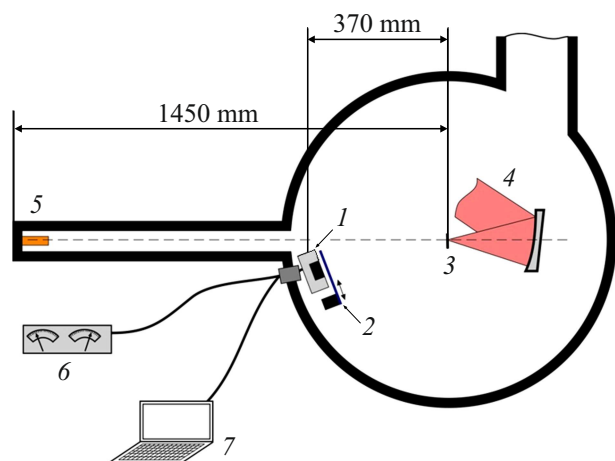


Рис. 1. Геометрия эксперимента: 1 — МК в контактном устройстве, 2 — дистанционно-управляемая заслонка, 3 — мишень, 4 — лазерный импульс, 5 — п/п детектор ФДУК 1УВСКМ, 6 — источник питания, 7 — персональный компьютер.

1. Методика измерений

В качестве объекта исследования использовался микроконтроллер (МК) с ядром ARM, изготовленный по технологии «объемный кремний» с проектными нормами $0.18\ \mu\text{m}$. Реакция объекта на гамма- и нейтронное воздействие ранее была исследована в [10,11]. Металлическая крышка МК толщиной $\sim 0.5\ \text{mm}$ непрозрачна для низкоэнергетических протонов, генерируемых на лазер-плазменном ускорителе, поэтому перед экспериментами МК подвергался декапсуляции.

В ходе экспериментов исследовалось возникновение сбоев во встроенной памяти МК объемом 32 kB. Перед каждым выстрелом лазера все ячейки оперативного запоминающего устройства (ОЗУ) инициализировались значениями 0xAAAAAAAA. Запись и чтение информации из ОЗУ осуществлялись с использованием встроенного интерфейса отладки [10].

Источником протонов служила алюминиевая мишень толщиной $6\ \mu\text{m}$, на которую фокусировался мощный импульс излучения Ti:Sa-лазера с энергией до 2 J и ультракороткой длительностью $\sim 25\ \text{fs}$.

Исследуемый объект был установлен в контактное устройство внутри вакуумной мишенной камеры на пути протонного пучка, эмитируемого с тыльной поверхности мишени в момент облучения лазерным импульсом. К контактному устройству через вакуумный разъем подключался источник питания и персональный компьютер для записи/считывания данных.

Энергетический спектр и поток протонов контролировались с помощью время-пролетной методики, детектором которой являлся pin-диод (п/п детектор ФДУК 1УВСКМ), расположенный под углом 0° относительно нормали мишени на расстоянии 1450 mm от ее поверхности. Исследуемый МК располагался под углом 10° относительно нормали мишени на расстоянии 370 mm от ее поверхности (рис. 1).

Максимальная энергия протонов в пучке при расположении детектора под углом 0° и 10° относительно нормали мишени положительно коррелировала с энергией лазерного излучения (рис. 2, а). Однако увеличение энергии лазерного импульса приводило к увеличению разброса по значению максимальной энергии протонов.

На рис. 2, b приведена зависимость флюенса протонов от энергии лазерного излучения при расположении pin-диода под углом 10° (т.е. в месте расположения объекта). Видно, что максимальная энергия лазерно-ускоренных протонов составила около 6 MeV. Несмотря на некоторый разброс значений, зависимость удовлетворительно описывается степенной функцией. Также по осциллограммам с pin-диода определялась длительность протонного импульса в месте размещения образца. Она составляла $\sim 40\ \text{ns}$.

Для учета различий во флюенсе частиц, падающих на pin-диод и на МК, был введен коэффициент связи по флюенсу, который определялся экспериментально из отношения зависимостей флюенса протонов на pin-диод

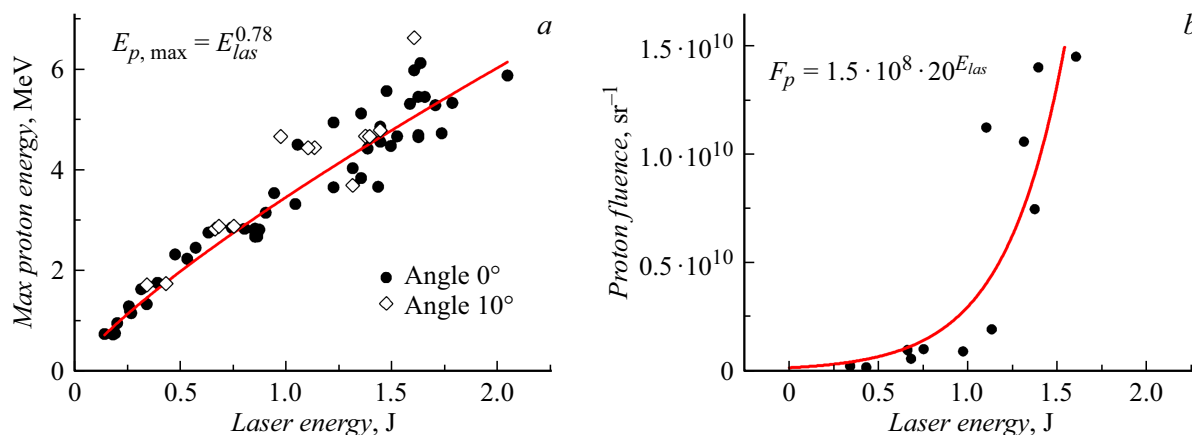


Рис. 2. Зависимости максимальной энергии протонов при расположении детектора под углами 0° и 10° (а) и флюенса протонов с энергиями более 0.6 MeV при расположении детектора под углом 10° (б) от энергии лазерного излучения.

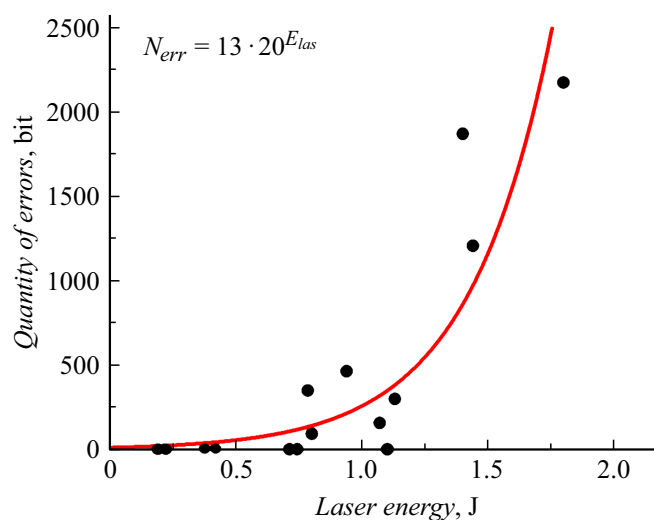


Рис. 3. Зависимость количества сбоев в ОЗУ МК от энергии лазерного излучения (а) и от флюенса протонов с энергиями более 0.6 MeV (b).

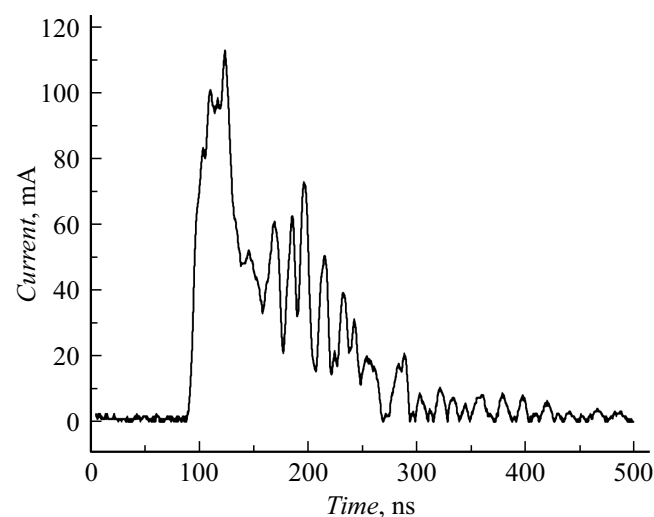


Рис. 4. Характерная форма ионизационного тока МК при воздействии протонов.

под углом 0° и флюенса протонов на МК от энергии лазерного излучения.

2. Результаты экспериментов

В ходе экспериментов регистрировали сбои в ОЗУ МК. Зависимость количества сбоев от энергии лазерного излучения представлена на рис. 3, а. При превышении некоторого порога лазерной энергии примерно 0.55 J (рис. 2, б) наблюдается рост количества ошибок в памяти МК. На рис. 3, б представлена пересчитанная зависимость количества ошибок в ОЗУ МК от флюенса протонов.

Также в экспериментах регистрировался радиационно-наведенный ток в цепи питания (интегральная ионизационная реакция МК). На рис. 4 приведена характерная форма ионизационного тока МК при энергии лазерного излучения 1.78 J — импульс с амплитудой ~ 100 mA и временем спада ~ 250 ns.

Для определения влияния сопутствующего электромагнитного излучения (ЭМИ) на реакцию МК проводились эксперименты с экраном из лавсана, который поглощал протоны, но являлся прозрачным для ЭМИ. При наличии данного экрана сбои не регистрировались, следовательно, основной причиной сбоев является ионизирующее излучение, а не ЭМИ.

3. Обсуждение результатов

Как было отмечено в цели, основным вопросом работы является оценка возможного влияния эффектов объемной ионизации на реакцию исследуемого объекта. Для этого требуется определить поглощенную дозу (через линейные потери энергии — ЛПЭ) от протонного излучения в чувствительной области (ЧО) объекта, для чего необходимо знать его структуру.

3.1. Задание модельной структуры объекта

Для определения модельной геометрии кремниевый кристалл исследовали в поперечном направлении, для чего использовали оптический микроскоп высокого разрешения, а также электронный микроскоп. Установлено, что МК содержит 6 слоев металлизации толщиной $\sim 0.7 \mu\text{m}$, 6 слоев изоляции толщиной $\sim 0.9 \mu\text{m}$, контактный слой толщиной $\sim 1 \mu\text{m}$ и приборный слой толщиной $\sim 1.5 \mu\text{m}$ (рис. 5, а).

Для определения элементного состава применялась масс-спектрометрия и электронный микроскоп. Выявлено, что слои металлизации состоят из Al и Ti, изоляционные слои — из SiO_2 , контакты из W.

Используемая для расчетов структура представлена на рис. 5, б. В отличие от реальной структуры слои металлизации/пассивации Al,Ti/ SiO_2 и слой W были заданы в виде сплошных слоев. Соотношение алюминия и титана в слое металлизации было взято в пропорции: Al:Ti = 4:1. Такая структура в целом соответствует представленным в литературе моделям кремниевых кристаллов объемной технологии [12,13].

3.2. Оценка ЛПЭ от прямой ионизации протонами ЧО

Рассмотрим процедуру обработки данных на примере одного из пусков установки. При обработке записей осциллограмм сигналов с pin-диода (пример приведен на рис. 6, а) по времяпролетной методике восстанавливался дифференциальный энергетический спектр протонов (рис. 6, б).

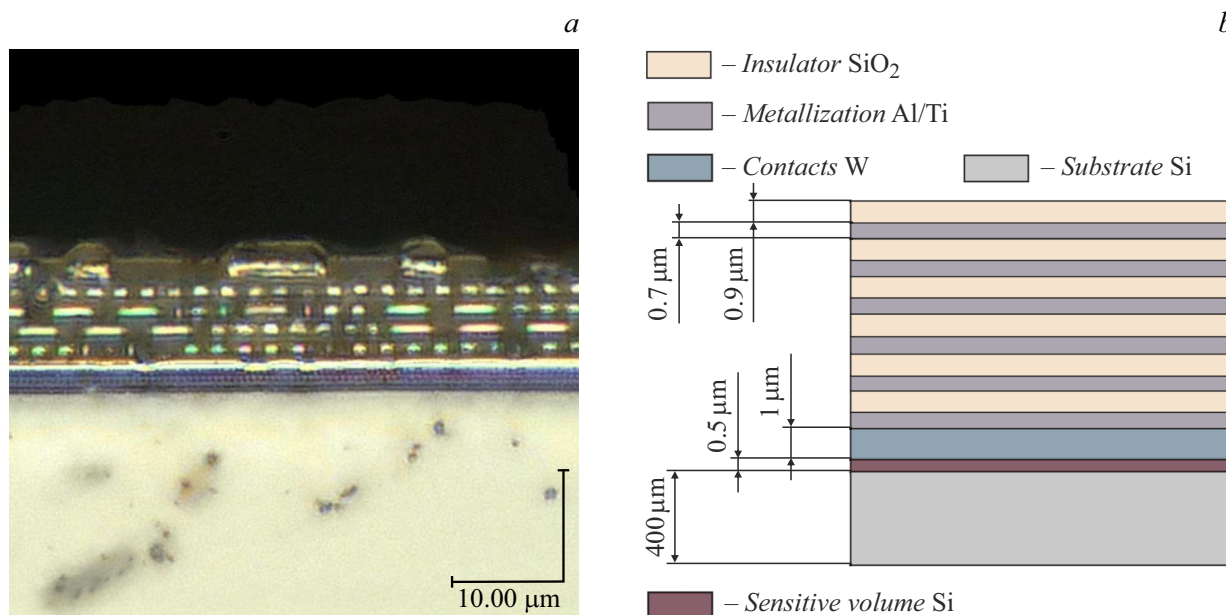


Рис. 5. Реальная структура исследуемого образца (a) и используемая для расчетов структура (b).

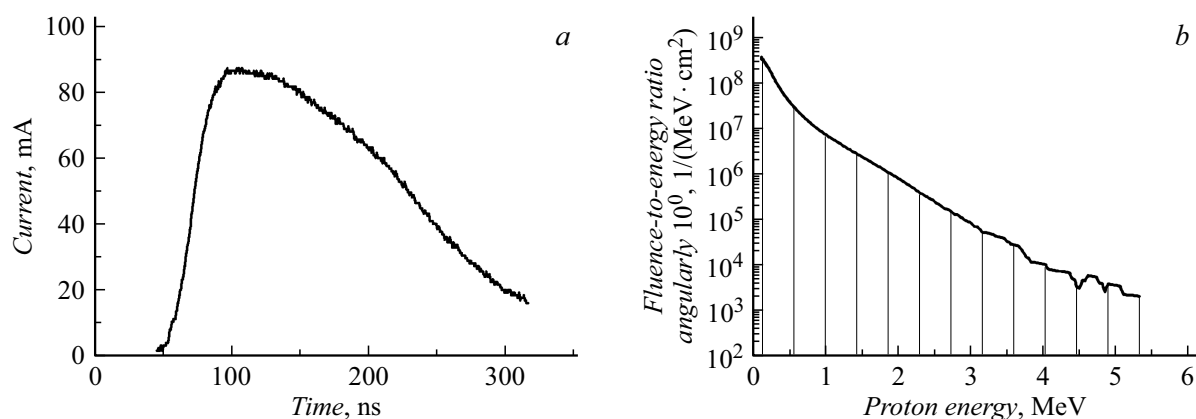


Рис. 6. Характерная форма тока детектора (pin-диода) при воздействии протонов (a) и соответствующий дифференциальный энергетический спектр протонов (b).

Из рис. 6, b видно, что в рассматриваемом пуске зарегистрированы протоны в диапазоне энергий от 0.1 до 5.3 MeV. Для дальнейших расчетов спектр был разбит на 12 энергетических интервалов, каждому из которых соответствовали свои средние значения энергии и флюенса.

Для моделирования энерговыделения в ЧО кристалла МК была использована программа SRIM [14]. Для каждой энергии, соответствующей середине интервалов разбиения дифференциального спектра (рис. 6, b), было получено распределение ЛПЭ в послойной структуре. На рис. 7, a приведено вышеупомянутое распределение на примере протонов с энергией 1.1 MeV, падающих нормально на образец.

Используя распределения ЛПЭ протонов в послойной структуре, были определены значение ЛПЭ и мощность

поглощенной дозы от протонов в ЧО МК (слой SV — sensitive volume на рис. 7, a). При прохождении протонного излучения через поглощающие слои наиболее эффективно работает та часть энергетического спектра, пик Брэгга которой попадает в ЧО. Для данной структуры максимум ЛПЭ протонов наблюдался при энергии налетающих протонов около 1 MeV (рис. 7, b) и составлял 0.69 MeV·cm²·mg⁻¹.

Максимальное значение ЛПЭ при прямой ионизации протонами довольно близко к порогу возникновения сбоев для рассматриваемого объекта (примерно 0.9 MeV·cm²·mg⁻¹ [15]). Если принять во внимание, что значения пороговых ЛПЭ определяются с достаточно большой погрешностью, например, ±30% в работе [16], то может иметь место механизм сбоев вследствие прямой ионизации протонами. Однако

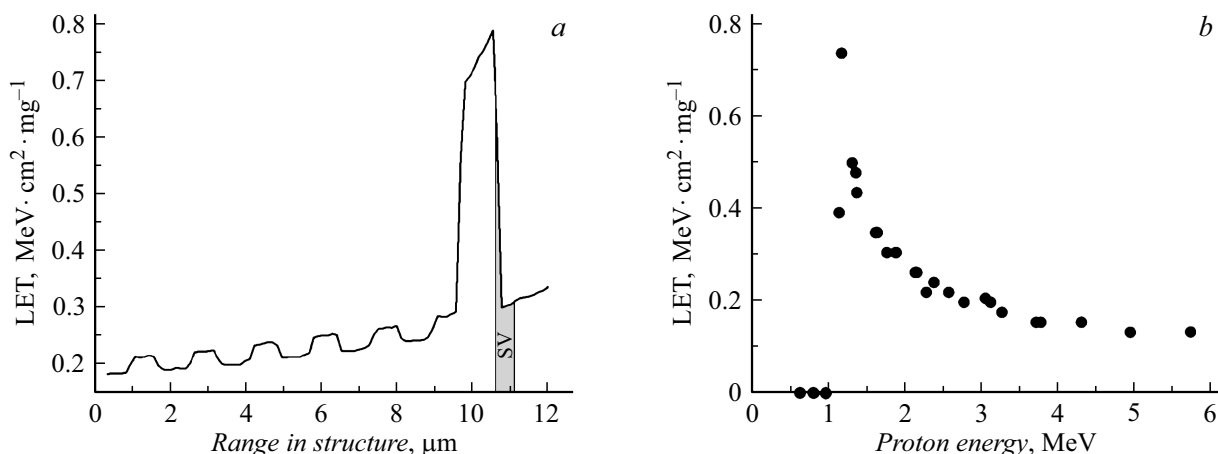


Рис. 7. Моделирование в SRIM зависимости ЛПЭ протонов от их пробега в послойной структуре исследуемого образца (а) и зависимость ЛПЭ протонов в ЧО от начальной энергии протонов (b).

необходимо рассмотрение дополнительных аспектов для подтверждения данной гипотезы.

3.3. Оценка мощности дозы от прямой ионизации протонами ЧО

Мощность поглощенной дозы в ЧО за импульс была рассчитана по формуле

$$P = \frac{\sum_j^{12} D_j}{t} = \frac{(LET_{SV})_j \cdot F_j}{t \cdot \rho}, \quad (1)$$

где $(LET_{SV})_j$ — ЛПЭ протонов в ЧО структуры при прохождении протонов энергии E_j , F_j — соответствующий E_j флюенс протонов, t — время прохождения протонов (~ 40 ns) от мишени до МК (согласно рис. 1), ρ — плотность кремния.

Значения энергий E_j и флюенса F_j брались из энергетического дифференциального спектра (рис. 6, b).

В результате расчетов по формуле (1) получено, что мощность поглощенной дозы от протонов в ЧО составляет $\sim 10^9$ rad(Si)/s для энергии лазерного излучения от 0.7 до 2 J.

3.4. Анализ вклада эффекта объемной ионизации

Ранее для данного типа МК исследовали реакцию на воздействие импульса тормозного излучения, вследствие которого наблюдались сбои в ОЗУ, вызванные эффектом объемной ионизации [10]. Зависимость сбоев в ОЗУ от уровня воздействия тормозного излучения имеет пороговый характер, обусловленный просадкой напряжения питания на внутренних шинах питания микросхемы, возникающей при протекании больших радиационно-наведенных токов [17,18]. Массовый сбой ОЗУ регистрировался при мощности дозы порядка $3 \cdot 10^9$ rad(Si)/s. Длительности импульсов и уровни воздействия по мощности дозы для случаев тормозного [10] и протонного

излучений на лазерной установке примерно совпадали. Расчетные мощности дозы в ЧО при воздействии протонного излучения по порядку величины совпадают со значением мощности дозы от тормозного излучения, при котором наблюдается массовый сбой ОЗУ. Однако в нашем случае массового сбоя не зарегистрировано, количество сбоев линейно растет с флюенсом протонов. Отметим, что ионизационные токи, возникающие в МК от протонного ($\sim 10^2$ mA) и от тормозного ($\sim 10^3$ mA) излучений, отличаются на порядок. Различие амплитуды ионизационных токов связано с тем, что суммарный заряд генерируемых носителей заряда в объеме образца неодинаков. В случае воздействия тормозного излучения объем, через который протекает ток, ограничен всей толщиной подложки (порядка $400 \mu\text{m}$), в то время как при протонном излучении объем протекания тока определяется пробегом протонов ~ 1 MeV, создающих наибольшую дозу в ЧО глубиной порядка $40 \mu\text{m}$.

В качестве дополнительного инструмента для анализа возможного вклада эффектов объемной ионизации использовались карты сбоев. Как показано в работе [19], визуальный анализ и цифровая обработка карт сбоев (при известном расположении ячеек в массиве) позволяют однозначно выявить наличие эффектов объемной ионизации. Как было отмечено выше, при воздействии высокоинтенсивного ионизирующего излучения в микросхемах протекают значительные радиационно-наведенные токи по внутренним шинам питания, и напряжение на отдельных ячейках может опуститься ниже напряжения хранения, что приведет к потере информации. А вследствие периодического распределения шин питания такие ячейки будут также расположены с некоторой периодичностью, что на карте сбоев будет проявляться в виде „полос“, что и наблюдается для рассматриваемого объекта при его облучении импульсом тормозного излучения (рис. 8, a).

Полученная при облучении импульсом протонов карта сбоев представлена на рис. 8, b. Анализ представлен-

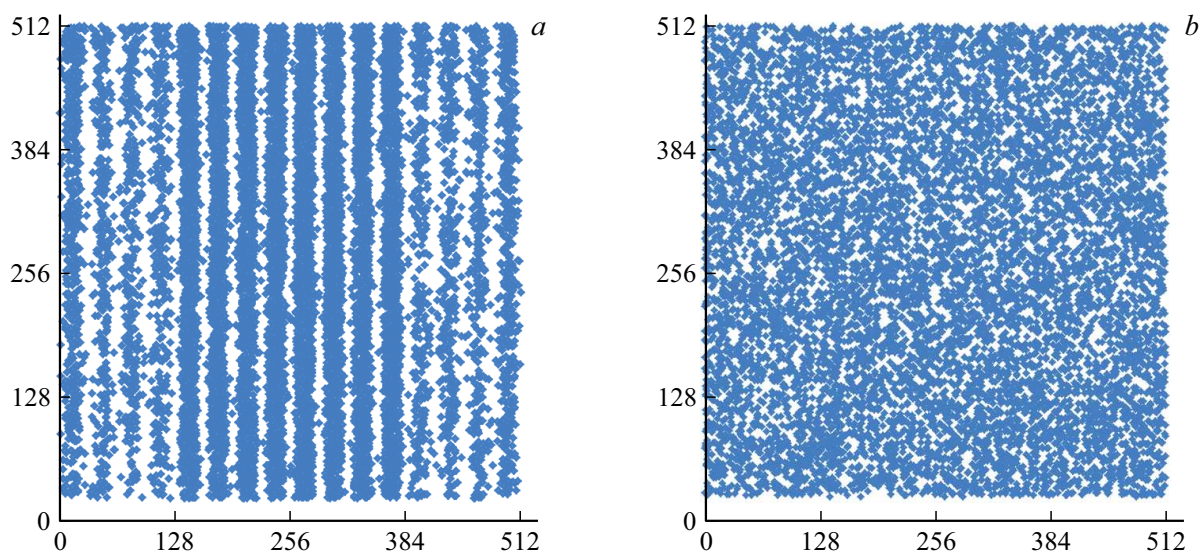


Рис. 8. Карта сбоев ОЗУ МК при воздействии тормозного (а) и протонного излучения (б).

ной карты сбоев указывает на случайное распределение сбоев на карте, что говорит об отсутствии вклада объемной ионизации.

Заключение

В работе была впервые исследована реакция МК на импульс протонов, генерируемых на лазер-плазменном источнике заряженных частиц. Показано, что при воздействии протонного пучка имеет место инверсия ячеек памяти микроконтроллера. На основании анализа карт сбоев, радиационно-наведенных токов потребления МК, полученных при различных воздействиях: импульса тормозного излучения и пучка протонов, установлено, что в случае протонного воздействия инверсия ячеек происходит по причине локальных ионизационных эффектов, индуцированных отдельными протонами. Дополнительно на основе микродозиметрических расчетов показано, что ОС обусловлены механизмом прямой ионизации протонами ЧО, поскольку ЛПЭ протонов в ЧО близки к пороговому значению для данного объекта. Следует отметить, что в отечественных нормативных документах не установлены методы испытаний на воздействие низкоэнергетических протонов.

Результаты работы показывают, что лазерные ускорители заряженных частиц являются перспективным испытательным оборудованием для решения задач в области радиационных исследований и испытаний.

Благодарности

Авторы выражают благодарность П.А. Санниковой за помощь с проведением масс-спектрометрического анализа и О.А. Филину за предоставленные данные по анализу структуры с использованием электронного микроскопа.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] *Радиационная стойкость изделий ЭКБ*: Научное издание, под. ред. д-ра техн. наук, проф. А.И. Чумакова (НИЯУ МИФИ, 2015)
- [2] E.L. Petersen, P. Shapiro, J.H. Adams, Jr. E.A. Burke. IEEE Trans. Nucl. Sci., **NS-29** (6), 2055 (1982). DOI: 10.1109/tns.1982.4336495
- [3] K.P. Rodbell, D.F. Heidel, H.H.K. Tang, M.S. Gordon, P. Oldiges, C.E. Murray. IEEE Trans. Nucl. Sci., **54** (6), 2474 (2007). DOI: 10.1109/tns.2007.909845
- [4] D.F. Heidel, P.W. Marshall, K.A. LaBel, J.R. Schwank, K.P. Rodbell, M.C. Hakey, M.D. Berg, P.E. Dodd, M.R. Friendlich, A.D. Phan, C.M. Seidleck, M.R. Shaneyfelt, M.A. Xapsos. IEEE Trans. Nucl. Sci., **55** (6), 3394 (2008). DOI: 10.1109/tns.2008.2005499
- [5] B.D. Sierawski, J.A. Pellish, R.A. Reed, R.D. Schimpf, K.M. Warren, R.A. Weller, M.H. Mendenhall, J.D. Black, A.D. Tipton, M.A. Xapsos, R.C. Baumann, X. Deng, M.J. Campola, M.R. Friendlich, H.S. Kim, A.M. Phan, C.M. Seidleck. IEEE Trans. Nucl. Sci., **56** (6), 3085 (2009). DOI: 10.1109/tns.2009.2032545
- [6] I.J. Kim, K.H. Pae, I.W. Choi, Ch.-L. Lee, H.T. Kim, H. Singhal, J.H. Sung, S.K. Lee, H.W. Lee, P.V. Nickles, T.M. Jeong, Ch.M. Kim, Ch.H. Nam. Phys. Plasmas, **23** (7), 070701 (2016). DOI: 10.1063/1.4958654
- [7] A. Higginson, R.J. Gray, M. King, R.J. Dance, S.D.R. Williamson, N.M.H. Butler, R. Wilson, R. Capdessus, C. Armstrong, J.S. Green, S.J. Hawkes, P. Martin, W.Q. Wei, S.R. Mirfayzi, X.H. Yuan, S. Kar, M. Borghesi, R.J. Clarke, D. Neely, P. McKenna. Nature Commun., **9** (1), 1 (2018). DOI: 10.1038/s41467-018-03063-9

- [8] M.A. Xapsos, L.W. Massengill, W.J. Stapor, P. Shapiro, A.B. Campbell, S.E. Kerns, K.W. Fernald, A.R. Knudson. IEEE Trans. Nucl. Sci., **34** (6), 1419 (1987). DOI: 10.1109/tns.1987.4337491
- [9] ГОСТ Р 59312-2021. РД 134-0191-2011. АППАРАТУРА РАДИОЭЛЕКТРОННАЯ БОРТОВАЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ. Методы испытаний аналоговых и аналого-цифровых интегральных микросхем на стойкость к воздействию одиночных высокоэнергетических протонов и тяжелых заряженных частиц космического пространства на ускорителях заряженных частиц. Электронный ресурс. Режим доступа: <https://npalib.ru/2021/02/05/gost-r-59312-2021-id145135/p60/>
- [10] А.С. Пилипенко. Радиотехника и электроника, **67** (5), 514 (2022).
- [11] A.S. Pilipenko, M.I. Tikhonov. Microelectronics Reliability, **149**, (2023). DOI: 10.1016/j.microrel.2023.115201
- [12] X. Cao, L. Xiao, L. Li, J. Li, T. Wang. IEEE Intern. Conf. IC Design and Technology (ICICDT), 1–4 (2019). DOI: 10.1109/ICICDT.2019.8790935
- [13] D. Lambert, F. Desnoyers, D. Thouvenot. IEEE Europe. Conf. Radiation and Its Effects on Components and Systems, 148–154 (2009). DOI: 10.1109/radecs.2009.5994571
- [14] J.F. Zeigler, J.P. Biersack. SRIM <http://www.srim.org>
- [15] М.М. Арманов, А.С. Кустов, О.В. Ткачев, К.Д. Кокшарова. ВАНТ. Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру, (3), 17 (2021).
- [16] В.В. Гаганов, А.В. Грунин, И.Ю. Дроздов, К.А. Игнатов, Ф.К. Киселев, Е.Н. Крылевский, Ю.Г. Кудрявцев, С.А. Лазарев, К.М. Музюкин, А.В. Силаев, Б.В. Цыганков, Я.Я. Петричкович, В.В. Гусев, Л.П. Мироненко. *Современные проблемы ядерной и радиационной физики* (2017), с. 57–63.
- [17] D.G. Mavis, D.R. Alexander, G.L. Dinger. IEEE Trans. Nucl. Sci., **36** (6), 2239 (1989).
- [18] L.W. Massengill, S.E. Diehl-Nagle. IEEE Trans. Nucl. Sci., **31** (6), 1337 (1984).
- [19] А.С. Пилипенко, А.С. Кустов, Л.С. Зубков. ВАНТ. Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру, (4), 14 (2022).