

УДК 004.056:539.12.04
doi: 10.26583/bit.2024.4.10

Александр И. Чумаков¹, Дмитрий В. Бобровский², Сергей А. Соловьев³,
^{1,2,3}Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
Каширское ш., 31, Москва, 115409, Россия
^{1,2,3}Акционерное общество «Экспериментальное научно-производственное объединение
СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ»,
Каширское ш., 31, Москва, 115409, Россия
¹e-mail: aichum@spels.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6270-2663>
²e-mail: dvbob@spels.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3036-2953>
³e-mail: sasol@spels.ru, <https://orcid.org/0009-0001-8622-1394>

ВЛИЯНИЕ ИМПУЛЬСНОГО ХАРАКТЕРА ИЗЛУЧЕНИЯ НА ПАРАМЕТРЫ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ К ОДИНОЧНЫМ РАДИАЦИОННЫМ ЭФФЕКТАМ*

Аннотация. В работе проводится анализ особенностей экспериментальной оценки сечений одиночных радиационных эффектов (ОРЭ) при воздействии импульсных пучков ионов. Анализируются основные эффекты, влияющие на достоверность получаемых результатов. К основным причинам, которые могут исказить результаты экспериментальных исследований, относятся возможные многократные попадания ионов в одну и ту же чувствительную область интегральной схемы (ИС) за время формирования ОРЭ, наличие нескольких ОРЭ в разных элементах ИС за один импульс, одновременное действие эффектов мощности дозы и ионизационной реакции от отдельной ядерной частицы и влияние эффектов мощности поглощенной дозы на условия возникновения ОРЭ. В работе проанализированы данные эффекты и показано, что при воздействии импульса ионов с эффективной поглощенной мощностью дозы менее 10^6 рад(Si)/с эффекты мощности дозы практически не влияют на параметры чувствительности ИС к ОРЭ. Отдельные сложности могут возникнуть при регистрации одиночных импульсных переходных процессов («иголок»), но из-за разных временных характеристик принципиально разделение эффектов мощности дозы и ОРЭ возможно. Проведена оценка по влиянию конечных пробегов на ограничения по максимальной плотности потока ионов и показано, что учет их дает возможность повысить этот уровень в несколько раз.

Ключевые слова: безопасность информационных систем, импульсные пучки ионов, одиночные радиационные эффекты, нуклотрон NICA.

Для цитирования: ЧУМАКОВ, Александр И.; БОБРОВСКИЙ, Дмитрий В.; СОЛОВЬЕВ, Сергей А. ВЛИЯНИЕ ИМПУЛЬСНОГО ХАРАКТЕРА ИЗЛУЧЕНИЯ НА ПАРАМЕТРЫ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ К ОДИНОЧНЫМ РАДИАЦИОННЫМ ЭФФЕКТАМ. *Безопасность информационных технологий, [S.l.]*, т. 31, № 4, с. 141–152, 2024. ISSN 2074-7136. URL: <https://bit.spels.ru/index.php/bit/article/view/1722>. DOI: <http://dx.doi.org/10.26583/bit.2024.4.10>.

**Благодарности.* Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, проект «Фундаментальные и прикладные исследования на экспериментальном комплексе класса мегасайенс NICA» № FSWU-2024-0024.

Alexander I. Chumakov¹, Dmitry V. Bobrovsky², Sergey A. Soloviev³
^{1,2,3}National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute),
Kashirskoe shosse., 31, Moscow, 115409, Russia
^{1,2,3}Joint Stock Company “Experimental Research and Production Association
SPECIALIZED ELECTRONIC SYSTEMS”,
Kashirskoe shosse, 31, Moscow, 115409, Russia
¹e-mail: aichum@spels.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6270-2663>
²e-mail: dvbob@spels.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3036-2953>
³e-mail: sasol@spels.ru, <https://orcid.org/0009-0001-8622-1394>

The influence of an impulsed ion radiation on the sensitivity parameters of integrated circuits to single event effects*

Abstract. The paper analyzes the features of the experimental evaluation of the cross sections of single event effects (SEE) under the influence of pulsed ion beams. The main reasons that can distort the results of the experiment are multiple ion exposures to the same sensitive area, several single event effects in different elements of integrated circuit (IC) in one exposure pulse, simultaneous effects of dose rate and ionization reaction from a single nuclear particle. All these effects are analyzed and it is shown that when exposed to an ion pulse with dose rate of less than 10^6 rad(Si)/s, the effects of dose rate have little effect on the sensitivity of IC to SEE. There may be difficulties when we register single event transient (SET), but due to different reaction parameters, it is possible to separate the effects of dose rate and SET. The effect of ion range on the maximum flux is estimated. It is shown that taking into account the ions range makes it possible to increase the permissible flux several times.

Keywords: security of information systems, pulsed ion beams, single event effects, NICA nuclotron.

For citation: CHUMAKOV, Alexander I.; BOBROVSKY, Dmitry V.; SOLOVIEV, Sergey A. The influence of an impulsed ion radiation on the sensitivity parameters of integrated circuits to single event effects. *IT Security (Russia)*, [S.l.], v. 31, no. 4, p. 141–152, 2024. ISSN 2074-7136. URL: <https://bit.spels.ru/index.php/bit/article/view/1722>. DOI: <http://dx.doi.org/10.26583/bit.2024.4.10>.

**Acknowledgements.* The work was carried out with the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, the project "Fundamental and Applied research at the experimental complex of the NICA megascience class" No. FSWU-2024-0024.

Введение

Современные средства обработки информации реализуются на микросхемах повышенной степени интеграции, которые имеют высокую чувствительность к одиночным радиационным эффектам (ОРЭ) при воздействии отдельных ядерных частиц. Оценки сбоев или отказоустойчивости информационно-вычислительных систем в известном поле тяжелых заряженных частиц базируется на использовании зависимости сечений ОРЭ СБИС от линейных потерь энергии (ЛПЭ) [1–3]. Эти результаты используются для оценки вероятности сбоев или отказов информационно-вычислительных систем [3–5]. Традиционная методика определения сечений ОРЭ СБИС основана на экспериментальном определении сечений ОРЭ на ускорителях ионов в стационарном поле ядерных частиц. Вместе с тем, в РФ в состав комплекса NICA (ОИЯИ, г. Дубна) для проведения подобных работ входит стенд «СОЧИ», структура пучка которого имеет импульсный характер. Естественно, что возникает резонный вопрос, насколько ионизационная реакция изделия ЭКБ от эффектов мощности дозы может повлиять на результаты оценки стойкости к ОРЭ.

1. Характеристики стенда «СОЧИ»

Стенд «СОЧИ» (рис. 1) создан на базе линейного ускорителя ионов НЛАС, формирующего пучки ионов с энергией 3.2 МэВ/нуклон в импульсном режиме, характеристики которого представлены в табл. 1 [6, 7].

С точки зрения временной структуры пучка для стенда «СОЧИ» можно выделить:

- микробанчевую структуру пучка, формируемую оборудованием ионных ускорителей (СВЧ-накачка);
- импульсный пучок, сформированный на выходе установки.

Плотность потока φ ионов для подобной установки в первом приближении можно представить в виде произведения двух составляющих:

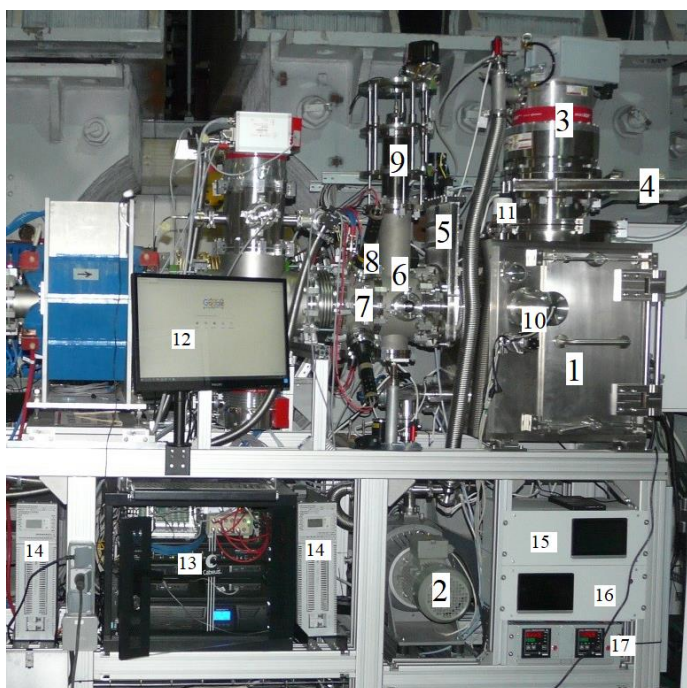
$$\varphi(t) = \varphi_{mx} \cdot \sin^2(\pi \cdot t \cdot f_b) \cdot \sin^2\left(\frac{\pi t}{2T_p}\right), \quad t \leq 2T_p, \quad (1)$$

Александр И. Чумаков, Дмитрий В. Бобровский, Сергей А. Соловьев,
ВЛИЯНИЕ ИМПУЛЬСНОГО ХАРАКТЕРА ИЗЛУЧЕНИЯ НА ПАРАМЕТРЫ
ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ К ОДИНОЧНЫМ
РАДИАЦИОННЫМ ЭФФЕКТАМ

где φ_{mx} – максимальное значение плотности потока в импульсе длительностью T_p ,
 f_b – частота микробанчей.

Таблица 1. Основные характеристики стенда «СОЧИ»

Тип и энергия ионов	Ион	Энергия МэВ/н	Пробег (в Si) мкм	ЛПЭ (в Si) $\frac{\text{МэВ см}^2}{\text{мг}}$
	$^{197}\text{Au}^{79+}$	3,2	43	94
	$^{131}\text{Xe}^{54+}$		36	69
	$^{84}\text{Kr}^{36+}$		35	41
	$^{40}\text{Ar}^{18+}$		34	16
	$^{12}\text{C}^{6+}$		44	2,8
Поток, ион/(см ² с) Импульсный режим	$10^3 \dots 10^5$			
Длительность импульса выведенного пучка, мкс	30			
Частота следования импульсов тока, Гц	10			
Количество импульсов	3			
Частота следования макро- импульсов, Гц	0,25			
Область облучения, мм	$\varnothing 29$			
Неравномерность	10%			
Диаметр пучка, мм	$\varnothing 73$			



- 1 – главная вакуумная камера;
- 2 – форвакуумный насос;
- 3 – турбомолекулярный насос;
- 4 – шиберный затвор турбомолекулярного насоса;
- 5 – шибер ионопровода;
- 6 – вакуумная камера №2;
- 7 – вакуумная камера №1;
- 8 – система контроля параметров пучка в режиме реального времени;
- 9 – система позиционирования детекторов;
- 10 – система видеоконтроля позиционирования объектов испытаний;
- 11 – вакуумметр;
- 12 – монитор пульта управления системами SOCHI;
- 13 – стойка с оборудованием управления системами SOCHI;
- 14 – стабилизатор напряжения;
- 15 – блок управления вакуумной системой;
- 16 – блок управления системой позиционирования объектов;
- 17 – блоки управления системой задания температуры.

Рис. 1. Внешний вид стенда «СОЧИ»

Особенности воздействия импульсного пучка ионов

Паразитное влияние импульсного характера пучка ионов имеет место в виде следующих основных проявлений:

- возможные «двойные» попадания ионов в одну и ту же чувствительную область ИС за время формирования ОРЭ;
- наличие нескольких ОРЭ в разных элементах ИС за один импульс;
- одновременное действие эффектов мощности дозы и ионизационной реакции от отдельной ядерной частицы;
- влияния эффектов мощности поглощенной дозы на условия возникновения ОРЭ.

Учет первого фактора проводится достаточно просто. Необходимо обеспечить, чтобы в одну и ту же чувствительную область элемента СБИС не попало одновременно два иона за время формирования ОРЭ. В этом приближении, с одной стороны, необходимо определить площадь чувствительной области отдельного элемента A_{sl} , а с другой, τ_{sl} – время, в течение которого двойного попадания не должно быть. Таким образом, ограничения на максимальную плотность потока ионов φ_{mx} можно записать в следующем виде:

$$\varphi_{mx} \ll 1/(A_{sl} \cdot \tau_{sl}). \quad (2)$$

Величина A_s может быть оценена через сечение насыщения ОРЭ для отдельного чувствительного элемента. В качестве консервативного значения для СБИС по эффектам отказов ее можно принять равной не более 1000 мкм² (площадь одного кармана). Значение τ_{sl} определяется временем формированием ионизационной реакции для возникновения конкретного ОРЭ, и ее величина не превышает для большинства элементов СБИС по эффектам сбоев и отказов 1 мкс. С учетом этих ограничений можно утверждать, что для большинства изделий микроэлектроники максимальная плотность потока частиц не должна превышать 10¹⁰ ион/(см²·с).

Только для ряда ИС, использующих принцип работы элементов на основе интегрирования заряда (ячейки динамической памяти, элементы ПЗС матрицы и ряд других), это время определяется условиями функционирования/интегрирования и/или длительностью импульса. В анализируемом случае это время не превышает 10 мкс поэтому для подобных ИС из соотношения (2) следует, что φ_{mx} не более 10⁹ ион/(см²·с).

Оценка максимальной мощности поглощенной дозы P_{mx} проводится из соотношения:

$$P_{mx} = 1.6 \cdot 10^{-5} \cdot \varphi_{mx} \cdot L_z, \quad [\text{рад}(\text{Si})/\text{с}], \quad (3)$$

где L_z – значение ЛПЭ в МэВ·см²/мг.

Таким образом, например, при воздействии ионами ксенона при $\varphi_{zm} = 10^9$ ион/(см²·с) эквивалентная мощность поглощенной дозы может составлять величину порядка 10⁶ рад(Si)/с, что, как правило не приводит к появлению эффектов мощности дозы в ИС.

Вместе с тем при таком значении максимальной плотности потока ионов за один 10 мкс импульс формируется флюенс только на уровне 10⁴ ион/см². С учетом того, что во многих случаях необходимо набирать флюенсы на уровне 10⁶...10⁷ ион/см², получается достаточно длительное время облучения (около 100...1000 импульсов). Поэтому возникает вопрос о возможности увеличения максимальной плотности потока частиц.

В целом, для большинства СБИС это реализуется за счет снижения ограничений на максимальную площадь отдельного элемента. Действительно, если рассматриваем эффекты сбоев, то они формируются отдельными элементами с размерами 1 мкм² и менее. Наибольшее уменьшение размеров имеет место как раз для ИС с элементами

интегрирования. Поэтому по эффектам двойного попадания максимальную плотность потока ионов можно установить на уровне 10^{10} ион/(см²·с).

С другой стороны, принятая оценка максимальной площади чувствительной области A_s представлена с очень большим запасом. Как показывают результаты лазерного сканирования [8], она обычно лежит в районе 10 мкм² и не превышает 100 мкм², что позволяет еще в несколько раз повысить плотность потока частиц.

2. Наложение ОРЭ за один импульс

Более значимым эффектом является наличие сразу нескольких ОРЭ в ИС за один импульс пучка ионов. Подобное наложение не оказывает влияния при исследовании эффектов сбоев в цифровых ИС. В данном случае для оценки сечения эффектов просто надо посчитать количество сбоев за один импульс и разделить их на флюенс за импульс. Полученная величина и будет сечением одиночных сбоев.

Несколько сложнее обстоит дело с функциональными сбоями, которые могут приводить к зависанию ИС. В этом случае, для уменьшения влияния наложения ОРЭ необходимо установить флюенс за импульс таким, чтобы эффект возникал не при каждом импульсе. Учитывая, достаточно небольшое сечение функциональных сбоев на уровне менее 10^{-5} см²/ИС, такие события маловероятны при флюенсах не более 10^4 ион/см². Однако в микросхемах, имеющих в своем составе большое количество конфигурационных регистров или памяти, хранящей исполняемую программу, например, АЦП с калибровочной таблицей, микропроцессоры, микроконтроллеры, ПЛИС типа FPGA, сечение функциональных сбоев может быть относительно большим на уровне 10^{-2} см² [1, 9].

Аналогичная рекомендация имеет место и при исследовании эффектов отказов. Здесь также необходимо обеспечить условие, чтобы не в каждом импульсе ионов имели место эффекты отказов. Если же все-таки не удастся этого достичь, то исследуемая СБИС имеет очень высокое сечение насыщения (более 10^{-2} см²/ИС), что является критерием невозможности ее применения в ответственных информационно-вычислительных системах.

Существенно более сложная ситуация возникает при исследовании сбоев в аналоговых и смешанных ИС, когда исследуются переходные ионизационные реакции – «иголки». Подобные импульсы формируются как за счет эффектов мощности дозы, так и в случае возникновения ОРЭ.

3. Одновременное действие эффектов мощности дозы и ОРЭ

Как было отмечено выше, эти эффекты проявляются одновременно и соответственно возникает вопрос, возможно ли одиночные переходные эффекты наблюдать при импульсном воздействии пучков ионов. Ответ на этот вопрос можно получить по результатам расчетных оценок и/или расчетно-экспериментального моделирования. Ниже рассмотрим только расчетные оценки.

При анализе эффектов мощности дозы надо четко разделить ионизационные эффекты на интегральные, т.е. когда ионизационная реакция (ИР) формируется всем кристаллом ИС, в первую очередь, по цепи питания [1, 10, 11], и локальные, формируемые отдельным элементом. Как правило, сбои за счет эффектов мощности дозы формируются в первую очередь, за счет эффектов «просадки» питания, т.е. из-за интегрированной ИР всей ИС. Одиночные переходные эффекты формируются локально в ограниченной области ионизации.

Важно отметить, что в соответствии с условием (2) исключаются двойные попадания в один и тот же чувствительный объем отдельного элемента. Данное обстоятельство позволяет исключить из анализа рассмотрение ИР отдельного элемента за счет эффектов мощности дозы. При этом не исключается, наличие ОРЭ за время действия импульса ионов в нескольких элементах (см. предыдущий раздел).

Таким образом, одновременное действие эффектов мощности дозы и ОРЭ сводится к наличию «просадки» питания за счет эффектов мощности дозы и возникновению ОРЭ в отдельных элементах ИС. При этом между ними существует принципиальное различие в характерных временах формирования выходной реакции. ИР по цепи питания должна учитывать форму импульса ионизации, тогда как ИР воздействие одиночного иона можно описывать δ -функцией во времени. К тому же при формировании «просадки» питания участвует весь кристалл ИС с относительно большой емкостью, что приводит к относительно большим характерным временам ионизационной реакции τ_{ic} порядка 100 нс...10 мкс.

Формирование ИР от отдельного иона происходит на уровне одного элемента с относительно малыми значениями емкостей. Поэтому характерное время ионизационной реакции отдельного элемента τ , варьируется в более широких пределах. Оно может составлять несколько фс для СБИС с проектными нормами менее 20 нм и достигать единиц нс для элементов в аналоговых ИС с микронными проектными нормами. Однако следует иметь в виду, что, как правило, этот сигнал формируется внутри ИС, а на выходе он исказится за счет его прохождения через внутренние структуры ИС.

В общем случае, даже несмотря на нелинейный характер проявления ионизационной реакции оценка критериального параметра $U(t)$ для импульсов сложной формы может быть проведена с помощью аппарата сверток [12, 13]:

$$U(t) = k_U \cdot P_m \int_0^t f(t-x) \cdot h(x) dx, \quad (4)$$

где P_m – амплитуда мощности поглощенной дозы ионизирующего излучения с нормированной формой импульса $f(t)$; k_u – коэффициент пропорциональности между мощностью дозы и напряжением [12]; $h(t)$ – импульсная переходная характеристика, соответствующая аппроксимации (4):

$$h(t) = \left[1 + \left(\frac{\tau_s}{t} \right) \right]^{-v-1} \left(\frac{\tau_s}{t} \right)^{1+1/v}. \quad (5)$$

На рис. 2 представлены характерные формы ИР для трех значений τ_{ic} . Обращает на себя внимание, что даже при $\tau_{ic} = 10$ нс имеет уже место почти полное интегрирование внутренней структуры импульса (небольшие пики отражают ошибки интегрирования в программе MathCAD). Для справки на этом же рис. 2 представлены зависимости при $\tau_{ic} = 10$ пс, которая характерна для внутренних элементов цифровых БИС. Даже для этого случая ИР не повторяет форму импульса ионизации. Таким образом, на интегрированную ионизационную реакцию ИС по цепи питания для рассматриваемого случая не оказывает влияние микробанчевая структура импульса пучка ионов, она описывается огибающей и начинается при $t=0$.

Принципиальным отличием реакция элемента ИС на воздействие отдельного иона является его развитие со времени $t>0$ из-за стохастической природы взаимодействия излучения с веществом. Это является существенной отличительной особенностью между двумя различными ИР.

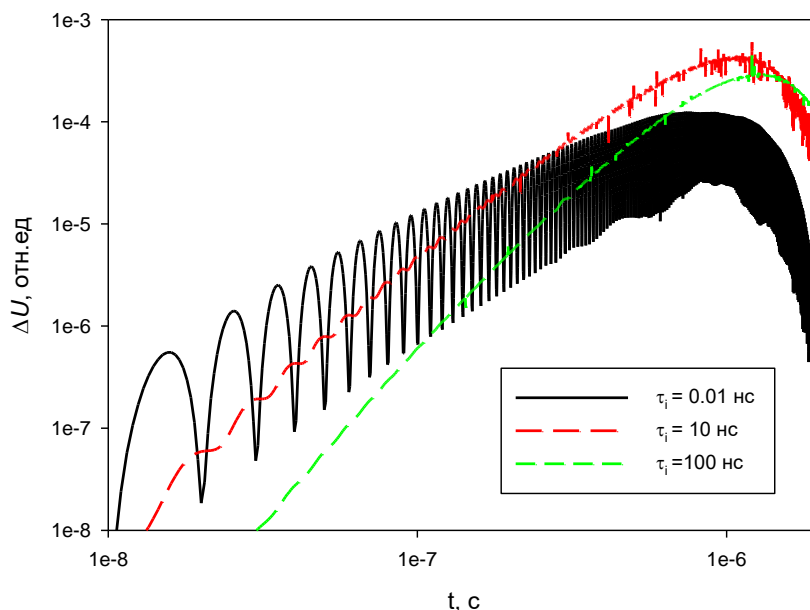


Рис. 2. Ионизационная реакция ИС при воздействии импульса с формой (1) и разных постоянных времени $\tau_{ис}$

Более сложно их разделить по амплитуде и форме импульса ИР. Основная причина кроется в том, что одиночные переходные процессы («иголочки») формируются внутренними элементами ИС, что приводит к существенному искажению первоначальной формы сигнала. При этом эти сигналы можно будет зарегистрировать в случае, если их амплитуда сравнима или более амплитуды ИР от всей ИС (рис. 3) [14]. Как правило, эта ситуация является типовой, так как уровень эквивалентной мощности дозы определен достаточно низким. Тем не менее, для ряда микросхем, например некоторых типов операционных усилителей, ИР при воздействии эффектов мощности дозы с уровнями $10^6 \dots 10^7$ рад/с (рис. 4) сопоставима с критерием регистрации «иголочки» при воздействии ТЗЧ (для данного объекта был установлен более 500 мВ) [15].

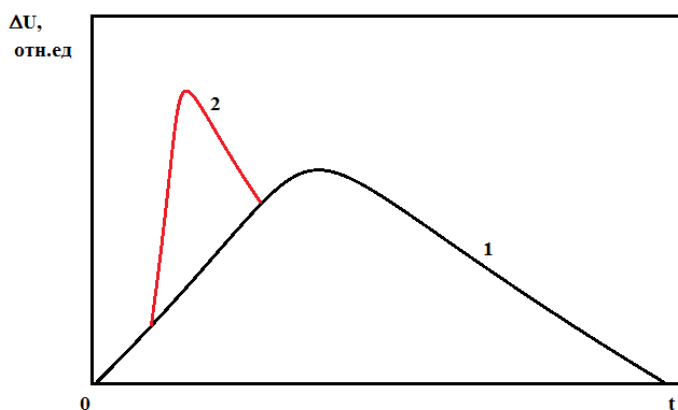


Рис. 3. Возможная реакция ИС при одновременном проявлении эффектов мощности дозы (1) и «иголок» (2)

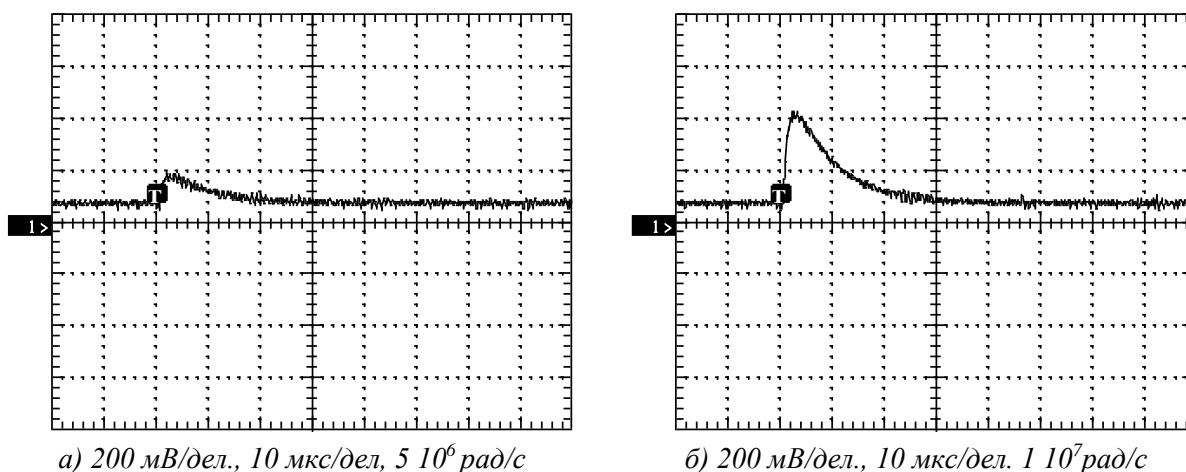


Рис. 4. Типовая реакция ИС операционного усилителя при воздействии эффектов мощности дозы

4. Влияние эффектов мощности дозы на формирование ОРЭ

Помимо рассмотренных выше эффектов возможно влияние эффектов мощности дозы на условия образования ОРЭ, так как они формируются при наличии ионизации всей структуры и в условиях «просадки» питания. Последнее обстоятельство действительно может оказать влияние, так как пороги возникновения ОРЭ зависят от напряжения питания. Другими словами, можно ожидать увеличение чувствительности ИС по эффектам сбоев и снижение – по эффектам отказов.

Заметные амплитуды сигналов помех будут при уровнях мощности дозы выше 10⁶ рад(Si)/с [1]. К тому же проведенные оценки по влиянию этих эффектов применительно к нейтронному импульсу [16, 17] показывают, что их роль будет сказываться на уровне порядка 10%, что позволяет в первом приближении пренебречь этим эффектом.

5. Влияние конечных пробегов

Экспериментальные исследования по эффектам сбоев и отказов элементов информационно-вычислительных систем в настоящее время в основном проводятся на ускорителях ионов с энергиями от 3 МэВ/нуклон до 5 МэВ/нуклон. В частности, для ионов стэнда «СОЧИ» их энергия равна 3,2 МэВ/нуклон, и соответственно, пробеги по кремнию лежат в диапазоне 40 мкм для ионов углерода и 35 мкм для ионов ксенона (табл. 1). При этом следует иметь в виду, что ион, прежде чем попасть, в чувствительную область должен пройти защитные слои из диэлектрика, металлизации и кремния с эффективной толщиной по кремнию от 2 мкм до 20 мкм в зависимости от количества слоев металлизации. Таким образом, реальный пробег иона в кремневой подложке, формирующей интегрированную ИР, может меняться от 20 мкм до 40 мкм.

С точки зрения ОРЭ приведенные значения длин пробегов достаточны для того, чтобы не оказывать влияние на процессы возникновения ОРЭ, за исключением высоковольтных приборов с напряжениями более 100 В. Но конечные значения пробегов будут сказываться на формирование интегрированной ионизационной реакции за счет эффектов мощности дозы.

В одномерном приближении, можно считать, что диффузионную составляющую импульса ионизационного тока в цепи питания при воздействии очень короткого импульса можно описать с помощью следующего соотношения [2, 18]:

$$I_{df}(R_o, t) = \frac{q \cdot L_z \cdot \rho \cdot L_d \cdot A_{ic}}{\varepsilon_i \sqrt{\pi \cdot \tau \cdot t}} \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{R_{de}^2}{4D_{at}}\right)\right], \quad (6)$$

где L_z – ЛПЭ иона в МэВ·см²/мг; q – заряд электрона; ρ – плотность кремния в мг/см³; L_d, D_d – диффузионная длина и коэффициент диффузии неосновных носителей заряда в подложке; A_{ic} – площадь кристалла ИС; ε_i – энергия образования одной электронно-дырочной пары; R_{oe} – эффективный пробег иона в квазинейтральной подложке, τ – время жизни неосновных носителей заряда в подложке. При $R_{oe} \rightarrow \infty$ получаем классическое выражение для импульсного ионизационного тока [1].

На рис. 5 представлены характерные формы импульсов ионизационного тока при воздействии прямоугольного импульса длительностью 1 мкс и разных пробегах ионов. Обращает на себя внимание, что для рассматриваемых ионов фактически ионизационные токи насыщаются уже при длительности импульса около 0,5 мкс (рис. 6).

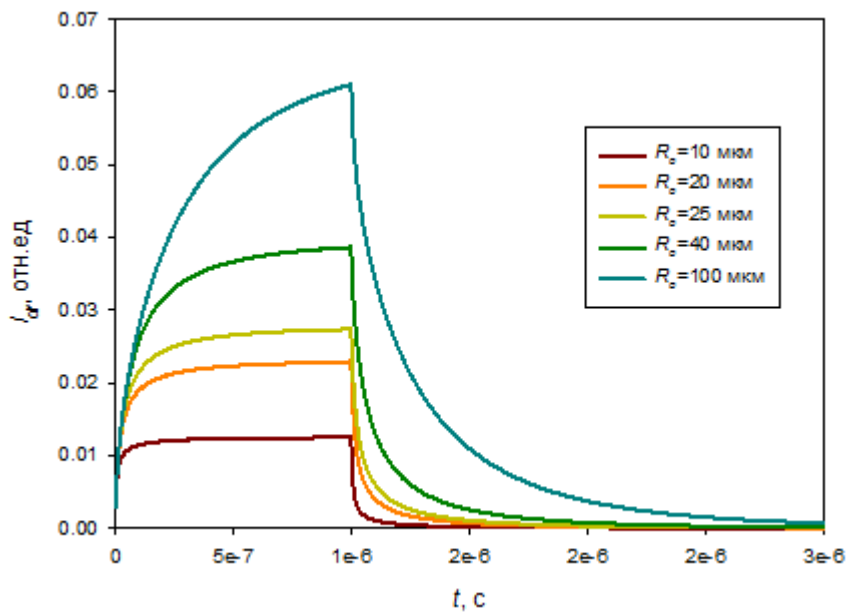


Рис. 5. Ионизационные токи при воздействии прямоугольного импульса длительностью 1 мкс и разных пробегах ионов в подложке p-типа

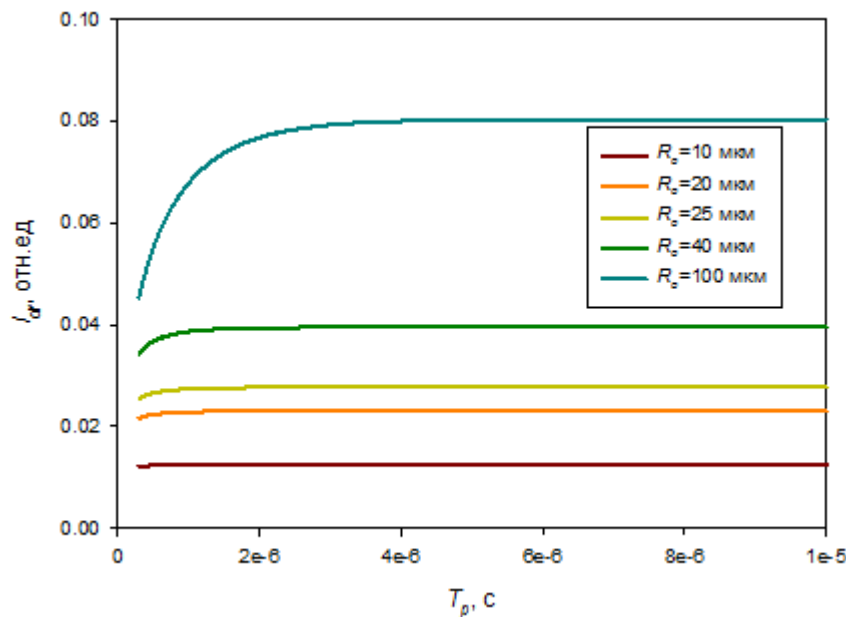


Рис. 6. Амплитуды ионизационных токов при воздействии прямоугольного импульса в зависимости от длительности и разных пробегах ионов

При других формах импульса ионизации амплитудно-временные характеристики могут быть получены с помощью аппарата сверки [12, 13]. Обращает на себя внимание уменьшения времени нарастания и амплитуды импульсов ионизационных токов при снижении эффективных пробегов в подложке. При этом если в качестве базового эффективного пробега в подложке принять $R_0=25$ мкм, то снижение амплитуды ионизационного тока происходит практически в 3 раза. Фактически это означает, что допустимый уровень мощности поглощенной дозы может быть увеличен в 3 раза по сравнению со случаем однородной ионизации.

Таким образом, представленные результаты показывают, что для короткопробежных ионов влияние эффектов мощности дозы будет проявляться при уровнях в 2...4 раза больших, чем для случая однородной ионизации подложки.

Заключение

Представленные в настоящей работе результаты, для оценки сбое- и отказоустойчивости информационно-вычислительных систем в поле отдельных тяжелых заряженных частиц по результатам испытаний на импульсном ускорителе ионов, кратко можно сформулировать следующим образом:

– оценка сбое- и отказоустойчивости информационно-вычислительных систем в поле отдельных тяжелых заряженных частиц проводится на основе экспериментально определенной зависимости сечений ОРЭ от ЛПЭ ионов;

– на результаты экспериментального определения сечений ОРЭ от ЛПЭ могут повлиять интегральные эффекты мощности дозы в ИС, роль которых для большинства практических случаев не существенна при эквивалентной мощности дозы не более 10^6 рад(Si)/с;

– с учетом ограничений на величину эквивалентной мощности поглощенной дозы максимальная плотность потока для ионов с ЛПЭ около 60 МэВ·см²/мг не должна превышать 10^9 ион/(см²·с);

– наибольшие затруднения могут возникнуть при оценках сечений для эффектов «иголок» в очень чувствительных аналоговых и смешанных ИС с учетом эффектов мощности дозы;

– при уменьшении значений ЛПЭ ионов ограничения на максимальную плотность потока могут быть увеличены во столько же раз;

– уровень максимальной плотности потока может быть увеличен в 2...4 раза с учетом ограниченных пробегов ионов в кремневой подложке;

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Радиационная стойкость изделий ЭКБ. Научное издание. Под ред. А.И. Чумакова. М.: НИЯУ МИФИ, 2015. – 512 с.
2. Чумаков А.И. Действие космической радиации на ИС. М.: Радио и связь. 2004. – 320 с.
3. Petersen E., Single Event Effects in Aerospace, John Wiley & Sons, Inc., 2011. – 520 p.
4. Чумаков Александр И. и др. Требования и нормы испытаний по радиационной стойкости интегральных схем к эффектам воздействия тяжелых заряженных частиц. Безопасность информационных технологий, [S.l.], т. 27, № 1, с. 83–97, 2020. ISSN 2074-7136. DOI: 10.26583/bit.2020.1.07. – EDN: ENVHAX.
5. Согоян Армен В.; Смолин Анатолий А.; Чумаков Александр И. Оценка соответствия интегральных схем требованиям по стойкости к воздействию тяжелых заряженных частиц. Безопасность информационных технологий, [S.l.], т. 27, № 1, с. 68–82, 2020. ISSN 2074-7136. DOI: 10.26583/bit.2020.1.06. – EDN: TTХAFV.
6. Slivin, A. et al. Construction of Stations for Applied Research at the NICA Accelerator Complex. Phys. Part. Nuclei Lett. 19, p. 528–531 (2022). DOI: 10.1134/S1547477122050375.

7. Syresin E. et al. New Heavy Ion Facility Design Project for Single Event Effect Tests. 20th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems, RADECS 2020 – Proceedings, 2020. DOI: 10.1109/RADECS50773.2020.985769.
8. Chumakov A.I., Pechenkin A.A., Egorov A.N. et al. Estimating IC susceptibility to single-event latchup. Russian Microelectronics. 2008, v. 37, no. 1, p. 41–46. DOI: 10.1134/S1063739708010058.
9. Nekrasov P.V., Karakozov A.B., Bobrovskiy D.V. and Marfin V.A. Investigation of Single Event Functional Interrupts in Microcontroller with PIC17 Architecture. 15th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS), Moscow, Russia, 2015, p. 1–4. DOI: 10.1109/RADECS.2015.7365625.
10. Chumakov A.I. Modeling rail-span collapse in ICs exposed to a single radiation pulse. Russ Microelectron 35, p. 156–161 (2006). DOI: 10.1134/S1063739706030048.
11. Massengill E.W. and Diehl-Nagle S.E. Transient Radiation Upset Simulations of CMOS Memory Circuits, IEEE Trans. Nucl. Sci., 1984, v. 31, no. 6, p. 1337–1343 DOI: 10.1109/TNS.1984.4333507.
12. Согоян А.В. Гарантирующее оценивание радиационной переходной характеристики изделий электронной компонентной базы. Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2021. № 2, с. 5–15. – EDN: GSLLOO.
13. Чумаков А.И., Согоян А.В., Яненко А.В. Ограничения методов оценки стойкости изделий микроэлектроники к одиночным радиационным эффектам на ускорителях ионов. Микроэлектроника. 2022, т. 51, № 1, с. 19–27. DOI: 10.1134/S1063739722010048. – EDN: LPEQSZ.
14. Криницкий А.А., Васильев А.Л., Чумаков К.А. Исследование ионизационной реакции операционного усилителя при воздействии отдельных ядерных частиц. Научно-технический сборник «Радиационная стойкость электронных систем - Стойкость-2007», М.: МИФИ, 2007, с. 49–50. ISBN 978-5-7262-0753-7.
15. Бойченко Д.В., Кессаринский Л.Н., Шведов С.В. Сравнительное исследование радиационного поведения аналоговых ИС. Научно-технический сборник «Радиационная стойкость электронных систем - Стойкость-2007», М.: МИФИ, 2007, с. 17–18. ISBN 978-5-7262-0753-7.
16. Чумаков А.И. и др. Моделирование сбоев в ИС при импульсном нейтронном воздействии. Часть 3. Область средних интенсивностей. Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2023, № 1, с. 10–15. – EDN: WDGXPV.
17. Чумаков А.И., Чумаков К.А., Дианков С.Ю. Особенности оценки ионизационной реакции СБИС при импульсном нейтронном воздействии. Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС). 2022, № 1, с. 59–64. DOI: 10.31114/2078-7707-2022-1-59-64. – EDN: BPVTQD.
18. Согоян А.В., Чумаков А.И. Диффузионная модель ионизационной реакции элементов БИС при воздействии ТЗЧ. Микроэлектроника. 2017, т. 46, № 4, с. 305–312. DOI: 10.1134/S1063739717040084. – EDN: YZBJKZ.

REFERENCES:

- [1] Radiacionnaya stoikost izdeliy EKB. Pod red. A.I. Chumakova. M. NIYaU MIFI. 2015. – 512 s. (in Russian).
- [2] Chumakov A.I., Deistvie kosmicheskoi radiatsii na IS (Effects of Cosmic Radiation on IC), Moscow: Radio i Svyaz'. 2004. – 320 s. (in Russian).
- [3] Petersen E., Single Event Effects in Aerospace, John Wiley & Sons, Inc., 2011. – 520 p.
- [4] Chumakov Alexander I. et al. Hardness assurance levels and requirements for single event effects testing of integrated circuits. IT Security (Russia), [S.l.], v. 27, no. 1, p. 83–97, 2020. ISSN 2074-7136. DOI: 10.26583/bit.2020.1.07 (in Russian). – EDN: ENVHAX.
- [5] Sogoyan Armen V.; Smolin Anatoly A.; Chumakov Alexander I. Single event effects qualification of integrated circuits. IT Security (Russia), [S.l.], v. 27, no. 1, p. 68–82, 2020. ISSN 2074-7136. DOI: 10.26583/bit.2020.1.06 (in Russian). – EDN: TTXAFV.
- [6] Slivin, A. et al. Construction of Stations for Applied Research at the NICA Accelerator Complex. Phys. Part. Nuclei Lett. 19, p. 528–531 (2022). DOI: 10.1134/S1547477122050375.
- [7] Syresin E. et al. New Heavy Ion Facility Design Project for Single Event Effect Tests. 20th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems, RADECS 2020 – Proceedings, 2020. DOI: 10.1109/RADECS50773.2020.985769.
- [8] Chumakov A.I., Pechenkin A.A., Egorov A.N. et al. Estimating IC susceptibility to single-event latchup. Russian Microelectronics. 2008, v. 37, no. 1, p. 41–46. DOI: 10.1134/S1063739708010058.
- [9] Nekrasov P.V., Karakozov A.B., Bobrovskiy D.V. and Marfin V.A. Investigation of Single Event Functional Interrupts in Microcontroller with PIC17 Architecture. 15th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS), Moscow, Russia, 2015, p. 1–4. DOI: 10.1109/RADECS.2015.7365625.

- [10] Chumakov A.I. Modeling rail-span collapse in ICs exposed to a single radiation pulse. Russ Microelectron 35, p. 156–161 (2006). DOI: 10.1134/S1063739706030048.
- [11] Massengill E.W. and Diehl-Nagle S.E. Transient Radiation Upset Simulations of CMOS Memory Circuits, IEEE Trans. Nucl. Sci., 1984, v. 31, no. 6, p. 1337–1343 DOI: 10.1109/TNS.1984.4333507.
- [12] Sogoyan A.V. Assuring estimation of radiation transient response of products of electronic component base. Problems of Atomic Science and Technology Series: Physics of Radiation Effects on Electronic Equipment. 2021, no. 2, p. 5–15 (in Russian). – EDN: GSLLOO.
- [13] Chumakov A.I., Sogoyan, A.V., Yanenko A.V. Limitations of Methods for Evaluating the Hardness of Microelectronic Devices to Single Event Effects on Ion Accelerators Russian. Microelectronics. 2022, v. 51, no. 1, p. 16–23. DOI: 10.1134/S1063739722010048 (in Russian). – EDN: LPEQSZ.
- [14] Krinitskii A.A., Vasil'ev A.L., Chumakov K.A. Issledovanie ionizacionnoj reakcii operacionnogo usilitelya pri vozdeystvii ot del'nyh yadernyh chastic. Nauchno-tekhnicheskij sbornik «Radiatsionnaya stoykost' elektronnykh sistem - Stoykost'-2007», M.: MIFI, 2007, p. 49–50. ISBN 978-5-7262-0753-7 (in Russian).
- [15] Boychenko D.V., Kessarinskiy L.N., Shvedov S.V. Sravnitel'noe issledovanie radiacionnogo povedeniya analogovyh IS. Nauchno-tekhnicheskij sbornik «Radiatsionnaya stoykost' elektronnykh sistem - Stoykost'-2007», M.: MIFI, 2007, p. 17–18. ISBN 978-5-7262-0753-7 (in Russian).
- [16] Chumakov A.I. et. al. Simulation of Failures in ICs under Pulsed Neutron Exposure. Part 3. Medium Intensity Area. Problems of Atomic Science and Technology Series: Physics of Radiation Effects on Electronic Equipment. 2023, no. 1, p. 10–15 (in Russian). – EDN: WDGXPV.
- [17] Chumakov A.I., Chumakov K.A., Diankov S.Y. Evaluation of VLSI ionization response under pulsed neutron exposure. Problems of Perspective Micro- and Nanoelectronic Systems Developmen. 2022, no. 1, p. 59–64. DOI: 10.31114/2078-7707-2022-1-59-64 (in Russian). – EDN: BPVTQD.
- [18] Sogoyan A.V., Chumakov A.I. Diffusion model of the ionization response of LSI elements under exposure to heavy charged particles. Russian Microelectronics. 2017, v. 46, no. 4, p. 305–312. DOI: 10.1134/S1063739717040084 (in Russian). – EDN: YZBJKZ.

*Поступила в редакцию – 30 августа 2024 г. Окончательный вариант – 13 октября 2024 г.
Received – August 30, 2024. The final version – October 13, 2024.*