

*G.S. Sorokoumov, D.V. Bobrovskiy, A.I. Chumakov, A.A. Pechenkin  
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), 31, Kashirskoe sh.,  
Moscow, 114509, Russian Federation, e-mail: gssor@spels.ru, e-mail: dvbob@spels.ru, e-mail: aichum@spels.ru,  
e-mail: aaitech@spels.ru*

## **FPGA and digital SOIC SET's control under heavy ion and proton irradiation**

*Key words: VLSI, FPGA, SOIC, SET*

The paper presents discussion about SETs generated in FPGA and SOIC under heavy ions and high energy protons irradiation and SET suppression in electronics. Schematic circuit for FPGA/SOIC SET detection is presented. The schematic circuit is designed for SET investigation both inside FPGA/SOIC and outside at package pin level. SET registration inside FPGA or SOIC is carried out as an event when logical cell is switched. Oscilloscope is used to register SETs at IC pin level. All SETs registered by oscilloscope are recorded and analyzed to collect data about SET amplitude and pulse width.

The SET control schematic circuit was carried out at two different facilities: U400M heavy ion accelerator at the Joint Institute for Nuclear Research (JINR, Dubna, Russia) and picosecond PICO-3 laser facility (JSC «ENPO SPELS», Moscow, Russia). SET experimental results are presented and discussed in the paper.

*Г.С. Сорокоумов, Д.В. Бобровский, А.И. Чумаков, А.А. Печенкин  
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,  
Каширское шоссе, 31, г. Москва, 115409, Россия, e-mail: gssor@spels.ru, e-mail: dvbob@spels.ru, e-mail:  
aichum@spels.ru, e-mail: aaitech@spels.ru*

## **КОНТРОЛЬ КРАТКОВРЕМЕННЫХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ОТДЕЛЬНЫХ ЯДЕРНЫХ ЧАСТИЦ В ПЛИС И ЦИФРОВЫХ БМК**

*Ключевые слова: СБИС, ПЛИС, БМК, кратковременные переходные процессы*

*В статье обсуждаются вопросы влияния кратковременных переходных процессов при воздействии отдельных ядерных частиц на ПЛИС и цифровые БМК с целью их дальнейшего парирования в РЭА. Предложена принципиальная схема, реализуемая в базе ПЛИС/БМК, для контроля кратковременных переходных процессов при исследованиях. Предлагаемая схема детектирования позволяет оценивать распространение кратковременных переходных процессов внутри СБИС и на внешние выводы корпуса ИС. Регистрация кратковременных переходных процессов внутри ИС проводится на уровне детектирования факта возникновения события, способного переключить логический элемент базы СБИС. Контроль кратковременных переходных процессов на внешних выводах корпуса ИС осуществляется с помощью осциллографа. Зарегистрированные кратковременные переходные события на внешних выводах ИС анализируются с целью получения информации об амплитуде и времени возникших событий.*

*Апробация предлагаемой схемы контроля кратковременных переходных процессов осуществлялась на циклотроне тяжелых короткопробежных ионов У-400М, ОИЯИ г. Дубна, источнике сфокусированного лазерного излучения ПИКО-3 (АО «ЭНПО СПЭЛС», г. Москва). В статье приведены практические результаты контроля кратковременных переходных процессов.*

### **Введение**

Вопросы информационной безопасности в сильной степени зависят от беспбойного функционирования радиоэлектронной аппаратуры (РЭА). К одному из существенных механизмов, приводящих к информационным ошибкам, можно отнести сбои и отказы, вызванные воздействием отдельных ядерных частиц (ОЯЧ) искусственного и естественного происхождения [1].

С развитием технологии изготовления интегральных схем (ИС) и, как следствие, уменьшением проектных норм (размеров отдельных элементов ИС) снижаются заряды переключения и энергии возникновения паразитных эффектов. Таким образом, с уменьшением проектных норм изготовления ИС, снижаются эффекты от накопленной

Г.С. Сорокоумов, Д.В. Бобровский, А.И. Чумаков, А.А. Печенкин  
КОНТРОЛЬ КРАТКОВРЕМЕННЫХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ  
ВОЗДЕЙСТВИИ ОТДЕЛЬНЫХ ЯДЕРНЫХ ЧАСТИЦ В ПЛИС И ЦИФРОВЫХ БМК

дозы и начинают доминировать эффекты от ОЯЧ – одиночные радиационные эффекты (ОРЭ) [2].

Отдельно стоящим классом ОРЭ являются одиночные самовосстанавливающиеся одиночные переходные эффекты (ОПЭ) (Single Event Transient – «иголки»). Отличительной особенностью данного класса эффектов, в отличие от классических ОРЭ, является то, что данный эффект является, по сути дела, кратковременным импульсом помехи, возникающим в произвольном узле ИС.

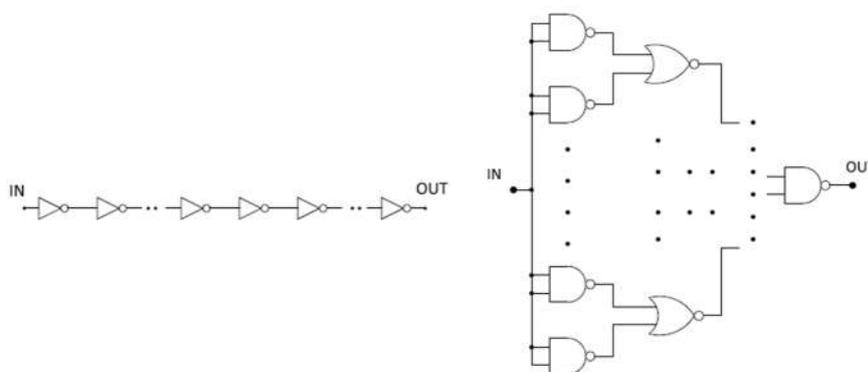
Следует подчеркнуть, что эффекты кратковременных переходных процессов рассмотрены в ряде работ зарубежных авторов [3-5] и фактически не исследуются в России, а освещаются только теоретические причины возникновения ОПЭ [6-9]. Вопросы практического наблюдения ОПЭ, равно как, и практическая оценка их параметров в цифровых сверх больших интегральных схемах (СБИС) не рассматривается.

Выработка практических методик, которые могли бы быть применены для регистрации ОПЭ и оценки их параметров при исследовании цифровых ИС на физических установках моделирующих воздействие ОЯЧ на кристалл ИС - является практически важной задачей.

**Теоретические аспекты формирования кратковременных переходных процессов**

Одиночный переходный процесс является следствием потери энергии ОЯЧ в чувствительном микрообъеме ИС. Локальное энерговыделение от ОЯЧ в пределах отдельного элемента ИС может приводить к кратковременной смене логического состояния компонента комбинационной схемы. При глубоких субмикронных проектных нормах емкость транзисторных структур крайне мала. Поэтому, даже малые индуцированные заряды могут приводить к формированию кратковременных переходных процессов. Если принять типовой емкостью субмикронной технологии в 0.1 пФ, то индуцированный заряд может формировать импульс напряжения до единиц вольт (при типовом питании ИС 1,2 В), что может приводить к смене логического состояния элемента комбинационной схемы.

Исходя из выше сказанного, анализ кратковременных переходных процессов, формируемых в логических элементах базиса ПЛИС/БМК, целесообразно проводить в элементах асинхронной логики. Существуют различные варианты построения схемы-детектора, реализуемого из асинхронных элементов базиса ПЛИС/БМК: последовательные цепочки (см. рис. 1.а), либо разветвленные параллельные цепочки (см. рис. 1.б).



а. последовательная цепочка

б. параллельная цепочка

Рисунок 1 – Примеры цепочек асинхронных элементов для контроля кратковременных переходных процессов

**Общее описание схемы в составе плис/бмк для контроля кратковременных переходных процессов**

На рис. 2 представлена принципиальная схема контроля ОПЭ, предлагаемая авторами для контроля кратковременных процессов в ПЛИС и БМК. Формирование исследуемого кратковременного процесса происходит в цепочке асинхронной логики (в рассматриваемом примере – цепочка, состоящая из инверторов, которые соединены последовательно). Внешний сигнал *inv\_in* задает логическое состояние выходного сигнала цепочки инверторов. Выход цепочки инверторов подключается как напрямую к внешнему выводу исследуемой ИС (сигнал *inv\_out*), так и на тактовые входы трех D-триггеров. Подключение вывода цепочки инверторов к трем D-триггерам позволяет контролировать факт формирования «иголки», способной переключить логическое состояние элементов, входящих в состав исследуемой ИС. Контроль факта формирования кратковременного переходного процесса осуществляется по результатам анализа состояния выхода мажоритарного элемента (TMR), подключенного на выходы D-триггеров, а также по состоянию сигналов *tmr\_out[2..0]*, являющимися сигналами выходов D-триггеров, подключенными к внешним выводам ИС. Выход *inv\_out* используется для контроля формы кратковременного переходного процесса, распространившегося за пределы исследуемой ИС. Исследование формы кратковременного переходного процесса осуществляется с помощью осциллографа, регистрирующего сигналы на выводе микросхемы, к которой подключена линия сигнала *inv\_out*.

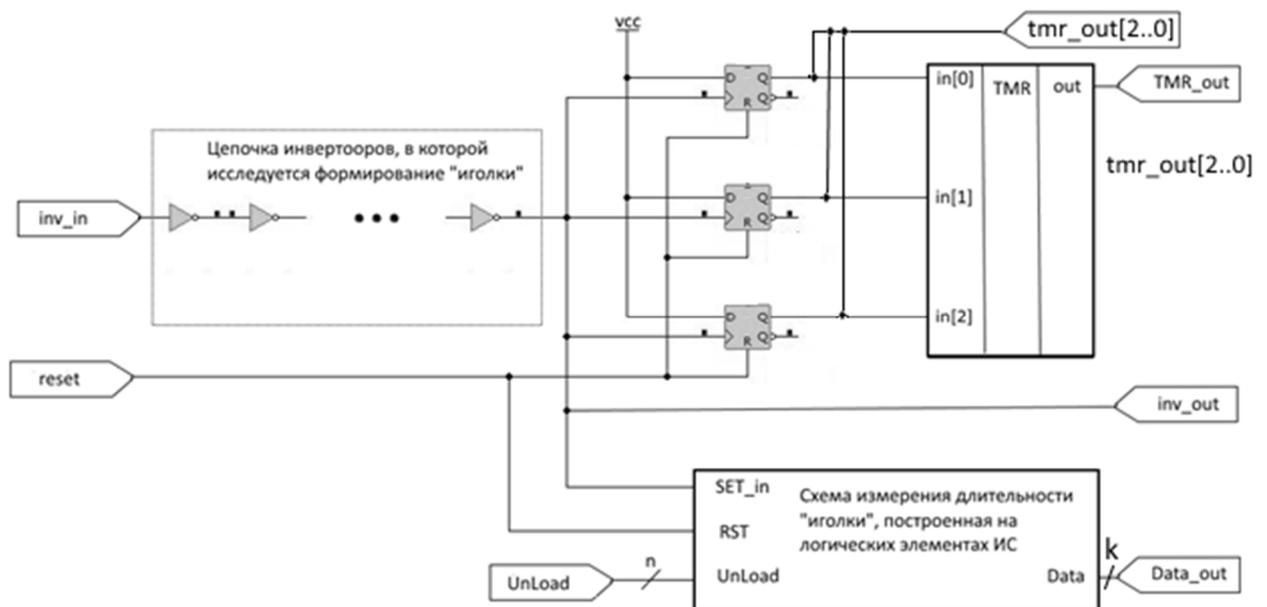


Рисунок 2 - Принципиальная схема контроля кратковременного переходного процесса

Методически регистрация ОПЭ строится по следующему алгоритму: вследствие переключения логического состояния элемента в цепочки инверторов из-за ионизации от воздействия ОЯЧ, на выходе цепочки инверторов формируется кратковременный переходный процесс. Сформированный кратковременный переходный процесс тактовыми входами D-триггеров распознается, как сигнал синхронизации, происходит защелкивание входных данных (логическая '1') D-триггеров. После регистрации факта возникновения

ОПЭ процесса подается внешний сброс, сигнал *reset*, по которому выходные сигналы D-триггеров принимают состояние '0'.

Принципиальная схема контроля ОПЭ (см. рис. 2) предполагает наличие блока (Блок измерения длительности - БИД), отвечающего за анализ длительности сформированного кратковременного процесса (рис. 3 «Схема измерения длительности кратковременного переходного процесса построенная на логических элементах»). БИД формируется из состава логических элементов, доступных в исследуемой ИС и позволяет измерять длительность ОПЭ, исходя из времени переключения логического элемента из состава ИС. Как видно из рис. 3, БИД разбит на две части. Первая часть БИД отвечает непосредственно за формирование информации о длительности ОПЭ, вторая часть – блок выгрузки полученных данных о длительности ОПЭ.

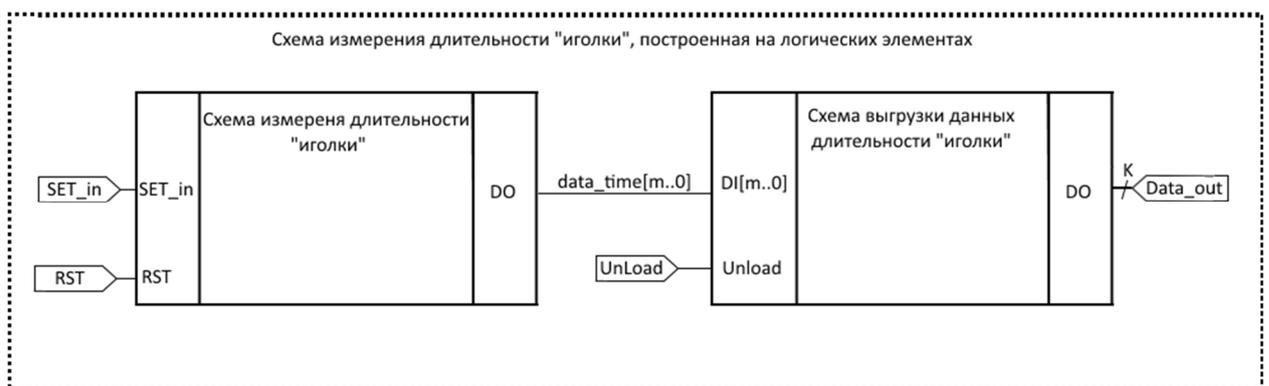


Рисунок 3 - Принципиальная схема измерения длительности

Как видно из рис. 4 длительность измеряется по количеству переключившихся инверторов за время нахождения кратковременного переходного процесса в состоянии логической '1'. Обратная связь, выполненная по сигналу *SET\_in*, на элементе «И» позволяет исключить случайное защелкивание D-триггером состояния '1' в случае возникновения ОПЭ в схеме измерения длительности.

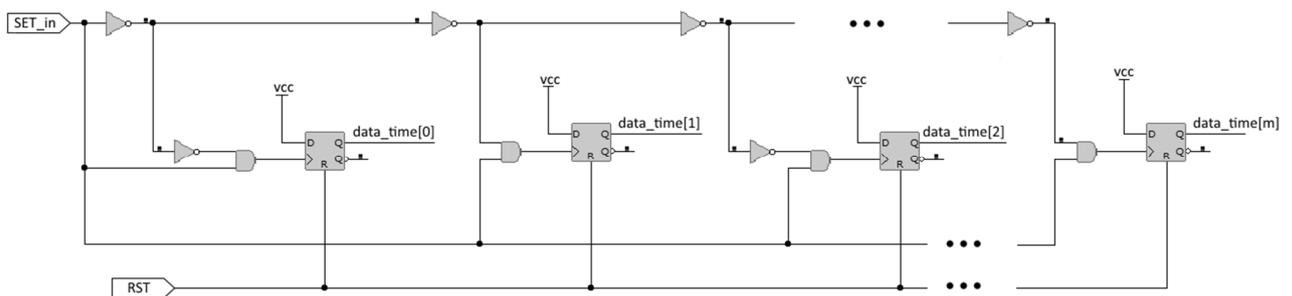


Рис.4. Структурная схема измерения длительности «иголки»

Схема выгрузки данных длительности кратковременного переходного процесса может быть реализована различными способами. В случае реализации блока в виде FIFO с параллельной загрузкой, совокупность сигналов *UnLoad* будет представлять следующий вид: сигнал параллельной загрузки – *Load*, сигнал разрешения выгрузки информации – *CE*, тактовый сигнал данных – *CLK*. Также возможна реализация, например, в виде мультиплексора, в этом случае сигнал *UnLoad* – сигналы адресации входов мультиплексора (см. рис. 5). Возможны и другие варианты реализации.

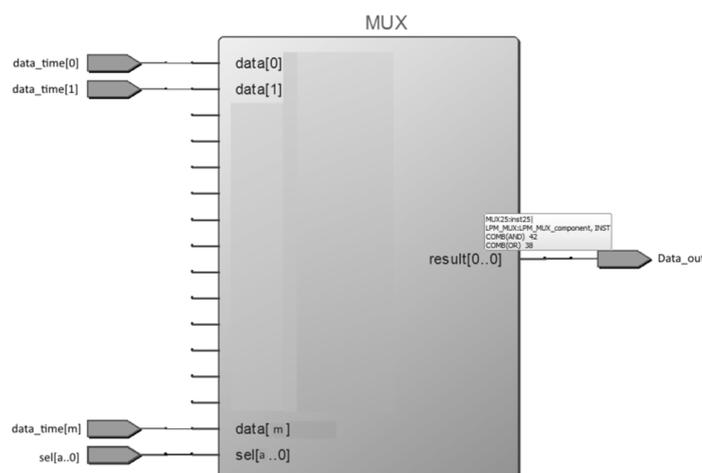


Рисунок 5 - Вариант реализации блока выгрузки информации о длительности ОПЭ в виде мультиплексора

### Экспериментальная апробация схемы контроля кратковременных переходных процессов

Апробация предлагаемой схемы контроля формирования ОПЭ проводилась на установках: циклотроне тяжелых короткопобежных ионов У-400М, ОИЯИ г. Дубна, источнике сфокусированного лазерного излучения ПИКО-3 (АО «ЭНПО СПЭЛС», г.Москва). Исследования проводились на ПЛИС, построенной по Antifuse технологии в КМОП технологическом базисе с проектными нормами 180 нм. В ходе исследования кратковременных переходных процессов на ускорителе ионов У-400М были зафиксированы «иглоки» длительностью от сотен нс до единиц мкс. Амплитуда зафиксированных ОПЭ составляла от сотен мВ до напряжения питания. В процессе выполнения эксперимента кратковременные переходные процессы фиксировались при линейных потерях энергии ионов от 6 МэВ•см<sup>2</sup>/мг(Si) до 69 МэВ•см<sup>2</sup>/мг(Si).

На втором этапе изучения и апробации предлагаемой методики исследования кратковременных переходных процессов ПЛИС Antifuse исследовалась на лазерном источнике ПИКО-3 (АО «ЭНПО СПЭЛС»). Облучение велось со стороны приборного слоя ИС лазерным излучением с длиной волны 1,064 мкм. На начальном этапе выполнения работы проводилось сканирование кристалла микросхемы с шагом 50 мкм и энергией 300 нДж. В процессе сканирования поверхности кристалла проводился контроль кратковременных переходных процессов на внешнем выводе микросхемы (линия inv\_out) и по состоянию выхода мажоритарного элемента (линия tmr\_out). После завершения сканирования кристалла микросхемы была проведена работа, направленная на локализацию мест формирования ОПЭ и подтверждения стабильности формирования «иглолок».

В результате проделанной работы установлено следующее:

- Выявлены области в которых формируются ОПЭ указаны на рис. 6.



Рисунок 6. Фотографии места локализации структур, приводящих к формированию «иголок».

- Установлено, что ОПЭ, представленные, приводят к срабатыванию мажоритарного элемента.
- Порог возникновения ОПЭ при сканировании со стороны приборного слоя – 200 нДж

В результате сопоставления формы и длительности зафиксированных «иголок», полученных на ускорителе ионов и сфокусированном лазерном источнике (см. рис. 7) сделан вывод о том, что лазерные методы исследования одиночных событий в цифровых СБИС [10] применимы и дают результаты с хорошей сходимостью с ускорителем ионов.

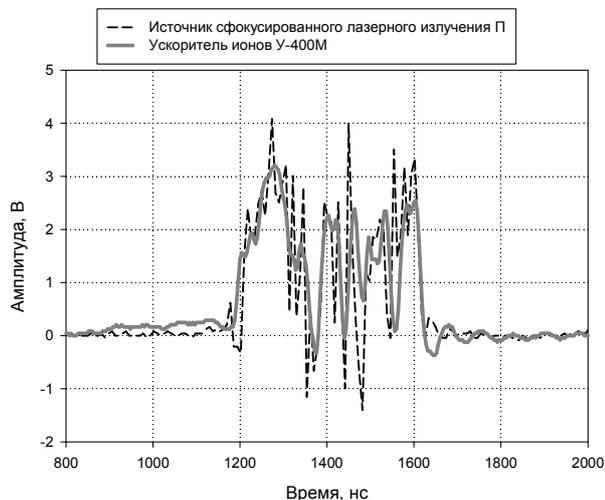


Рисунок 7. Результат сопоставления формы и длительности ОПЭ, полученные на ускорителе ионов и источнике сфокусированного лазерного излучения

### Заключение

Результаты экспериментов показывают, что исследование кратковременных переходных процессов («иголок») в цифровых СБИС является важным аспектом для оценки применимости микросхем для комплектации сбоеустойчивой аппаратуры. В современных СБИС при воздействии ОЯЧ формируются «иголки», способные внести ложные срабатывания комбинационных схем, приводящие к изменению хранящейся информации, т.е. ОПЭ перерастает в одиночный сбой. Понимание амплитудно-временных

Г.С. Сорокоумов, Д.В. Бобровский, А.И. Чумаков, А.А. Печенкин  
КОНТРОЛЬ КРАТКОВРЕМЕННЫХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ  
ВОЗДЕЙСТВИИ ОТДЕЛЬНЫХ ЯДЕРНЫХ ЧАСТИЦ В ПЛИС И ЦИФРОВЫХ БМК

характеристик формируемых подобных сигналов помех необходимо для построения структур фильтрации и парирования ОПЭ в сбоеустойчивой аппаратуре.

Полученные результаты на ускорителе ионов У-400М и лазерном источнике сфокусированного лазерного излучения ПИКО-3 показали хорошую корреляцию между собой. Применение лазерного источника для исследования ОПЭ позволяет локализовать структуры СБИС, ответственные за формирование «иголок» для дальнейшего их купирования.

На сегодняшний день, предлагаемая схема контроля кратковременных переходных процессов прошла экспериментальную апробацию на трех типах ПЛИС. Во всех ПЛИС фиксировались события при линейных потерях энергии от 6 МэВ•см<sup>2</sup>/мг(Si) до 69 МэВ•см<sup>2</sup>/мг(Si).

Работа выполнена в рамках государственного задания № 8.826.2014/К Минобрнауки России.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. A. I. Chumakov, and M. G. Tverskoy, "Estimation of ion- and proton-induced SEU rate by two values of saturation cross sections," in Proc. 6th European Conf. on Radiation and its Effects on Components and Systems, RADECS-2002, Grenoble; France, Sept. 10 -14, 2002, vol. 1, no. 2, pp. 405-409.
2. А.И. Чумаков, А.Л. Васильев, А.А. Козлов, Д.О. Кольцов, А.В. Криницкий, А.А. Печенкин, А.С. Тарараксин, А.В. Яненко, "Прогнозирование локальных радиационных эффектов в ИС при воздействии факторов космического пространства," *Микроэлектроника*, том. 39, № 2, с. 85-90, 2010.
3. Kastensmidt F. L., Tambara L., D. V. Bobrovskiy, A. A. Pechenkin, and A. Y. Nikiforov, "Laser testing methodology for diagnosing diverse soft errors in a nanoscale SRAM-Based FPGA," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 61, no. 6, pp. 3130-3137, 2014.
4. B. Narasimham, B.L. Bhuva, R.D. Schrimpf, L.W. Massengill, M.J. Gadlage, O.A. Amusan, W.T. Holman, A.F. Witulski, W.H. Robinson, J.D. Black, J.M. Benedetto, and P.H. Eaton, "Characterization of Digital Single Event Transient Pulse-Widths in 130-nm and 90-nm CMOS Technologies", *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 54, no. 6, pp. 2506-2511, 2007.
5. Kartik Mohanram, "Simulation of transients caused by single-event upsets in combinational logic", *IEEE International Conference on Test*, pp. 981-990, 2005.
6. А.И. Чумаков, "Оценка чувствительности интегральных схем к одиночным радиационным эффектам для точечной области собирания заряда," *Микроэлектроника*, том. 44, № 1, с. 34-40, 2015.
7. А.В. Сокоян, В.А. Полунин, "Модель формирования токов утечки диэлектриков МОП-структур при воздействии ТЗЧ," *Микроэлектроника*, том. 44, № 1, с. 54-59, 2015.
8. A. V. Gordienko, O. V. Mavritskii, A. N. Egorov, A. A. Pechenkin, and D. V. Savchenkov, "Correlation of the ionisation response at selected points of IC sensitive regions with SEE sensitivity parameters under pulsed laser irradiation," *Quantum Electronics*, vol. 44, no. 12, pp. 1173-1178, 2014.
9. Д.В. Бобровский, О.А. Калашников, П.В. Некрасов, "Оценка чувствительности ПЛИС к эффектам воздействия отдельных ядерных частиц," *Микроэлектроника*, том. 41, № 4, с. 226-230, 2012.
10. A. I. Chumakov, A. A. Pechenkin, D. V. Savchenkov, A. S. Tararaksin, A. L. Vasil'ev, and A. V. Yanenko, "Local laser irradiation technique for SEE testing of ICs," in Proc. 12th European Conf. on Radiation and its Effects on Components and Systems, RADECS-2011, Sevilla; Spain; Sept. 19 -23, 2011, pp. 449-453

#### REFERENCES:

1. A. I. Chumakov, and M. G. Tverskoy, "Estimation of ion- and proton-induced SEU rate by two values of saturation cross sections," in Proc. 6th European Conf. on Radiation and its Effects on Components and Systems, RADECS-2002, Grenoble; France, Sept. 10 -14, 2002, vol. 1, no. 2, pp. 405-409.
2. A. I. Chumakov, A. L. Vasil'ev, A. A. Kozlov, D. O. Kol'tov, A. V. Krinitckii, A. A. Pechenkin, A. S. Tararaksin, and A. V. Yanenko, "Single-event-effect prediction for ICs in a space environment," *Russian Microelectronics*, vol. 39, no. 2, pp. 85-90, 2010.
3. Kastensmidt F. L., Tambara L., D. V. Bobrovskiy, A. A. Pechenkin, and A. Y. Nikiforov, "Laser testing methodology for diagnosing diverse soft errors in a nanoscale SRAM-Based FPGA," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 61, no. 6, pp. 3130-3137, 2014.

Г.С. Сорокоумов, Д.В. Бобровский, А.И. Чумаков, А.А. Печенкин  
КОНТРОЛЬ КРАТКОВРЕМЕННЫХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ  
ВОЗДЕЙСТВИИ ОТДЕЛЬНЫХ ЯДЕРНЫХ ЧАСТИЦ В ПЛИС И ЦИФРОВЫХ БМК

4. B. Narasimham, B.L. Bhuva, R.D. Schrimpf, L.W. Massengill, M.J. Gadlage, O.A. Amusan, W.T. Holman, A.F. Witulski, W.H. Robinson, J.D. Black, J.M. Benedetto, and P.H. Eaton, "Characterization of Digital Single Event Transient Pulse-Widths in 130-nm and 90-nm CMOS Technologies", *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 54, no. 6, pp. 2506-2511, 2007.
5. Kartik Mohanram, "Simulation of transients caused by single-event upsets in combinational logic", *IEEE International Conference on Test*, pp. 981-990, 2005.
6. A. I. Chumakov, "An evaluation of the sensitivity of integrated circuits to single event effects for the point charge collection area," *Russian Microelectronics*, vol. 44, no. 1, pp. 34-40, 2015.
7. A. V. Sogoyan, and V. A. Polunin, "A model for the formation of leakage currents in the dielectrics of MOS structures under the effect of heavy charged particles," *Russian Microelectronics*, vol. 44, no. 1, pp. 54-59, 2015.
8. A. V. Gordienko, O. B. Mavritskii, A. N. Egorov, A. A. Pechenkin, and D. V. Savchenkov, "Correlation of the ionisation response at selected points of IC sensitive regions with SEE sensitivity parameters under pulsed laser irradiation," *Quantum Electronics*, vol. 44, no. 12, pp. 1173-1178, 2014.
9. D. V. Bobrovskii, O. A. Kalashnikov, and P. V. Nekrasov, "An estimate of the FPGA sensitivity to effects of single nuclear particles," *Russian Microelectronics*, vol. 41, no. 4, pp. 226-230, 2012.
10. A. I. Chumakov, A. A. Pechenkin, D. V. Savchenkov, A. S. Tararaksin, A. L. Vasil'ev, and A. V. Yanenko, "Local laser irradiation technique for SEE testing of ICs," in *Proc. 12th European Conf. on Radiation and its Effects on Components and Systems, RADECS-2011*, Sevilla; Spain; Sept. 19 -23, 2011, pp. 449-453