

# Нестабильные одиночные тиристорные эффекты в КМОП ИС

А.И. Чумаков, Д.В. Бобровский, А.А. Печенкин, Д.В. Савченков, Г.С. Сорокоумов

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» -  
АО «ЭНПО СПЭЛС», aichum@spels.ru

**Аннотация** — Проанализированы одиночные тиристорные эффекты, которые могут автоматически парироваться в зависимости от условий эксплуатации. Причина нестабильности тиристорного эффекта объясняется эффектами «просадки» питания, в том числе локальными, ниже порога удержания. Представлены экспериментальные результаты, подтверждающие данный механизм возникновения нестабильных одиночных тиристорных эффектов.

**Ключевые слова** — тяжелые заряженные частицы, одиночные тиристорные эффекты, «просадка» питания, СБИС.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Одиночные радиационные эффекты (ОРЭ), возникающие в изделиях микро- и нанoeлектроники при воздействии тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ), в значительной степени определяют функционирование радиоэлектронной аппаратуры [1]-[3]. К наиболее критичным эффектам относится одиночный тиристорный эффект, который в ряде случаев может приводить к катастрофическим отказам СБИС. Поэтому для всех СБИС, изготовленных по объемной КМОП или БиКМОП технологиям и предназначенных для применения в электронной аппаратуре космических аппаратов, необходимо провести оценку стойкости к воздействию ТЗЧ по одиночным тиристорным эффектам (ТЭ).

Общепринятая практика оценки стойкости СБИС при воздействии ТЗЧ по ТЭ основана на контроле усредненного тока, протекающего через цепь питания при помощи измерителей токов, встроенных в источники питания, которые могут обеспечить отслеживание динамики в диапазоне единиц и десятков мс [4], [5]. При регистрации ТЭ происходит его парирование путем отключения питания СБИС с последующим его включением. При такой методике регистрации ТЭ достаточно сложно отследить возможные нестабильные ТЭ, длительность которых может составлять единицы мкс. Возможная причина возникновения подобных нестабильных ТЭ может быть связана с эффектами «просадки» питания, т.е. к падению напряжению на внутренних элементах СБИС и внешних элементах оснастки [6]-[10]. При этом следует отметить, что величина «просадки» питания в сильной степени зависит как от характеристик самой паразитной п-р-п-р структуры, так и от условий проведения эксперимента, в частности, напряжения

питания, температуры окружающей среды, режима функционирования СБИС и ряда других.

В настоящей работе представлены результаты исследований нестабильных ТЭ в трех типах СБИС.

## II. УПРОЩЕННАЯ МОДЕЛЬ «ПРОСАДКИ» ПИТАНИЯ

Схемотехническое моделирование тиристорного эффекта осуществляется, как правило, с помощью относительно простой двухтранзисторной эквивалентной схемы (рис. 1) [2], [3], [6]. По сравнению с классической в эту схему добавлен резистор  $R_{uc}$ , отражающий влияние омического падения напряжения, как при протекании ионизационного тока  $I_{in}$  внутри схемы, так и на элементах внешней оснастки. Дополнительно в эквивалентную схему введена емкость всей СБИС ( $C_{uc}$ ), которая может влиять на динамические характеристики включения/выключения паразитной тиристорной структуры. Величина этой емкости достаточно большая и для современных СБИС может достигать 1...10 нФ.

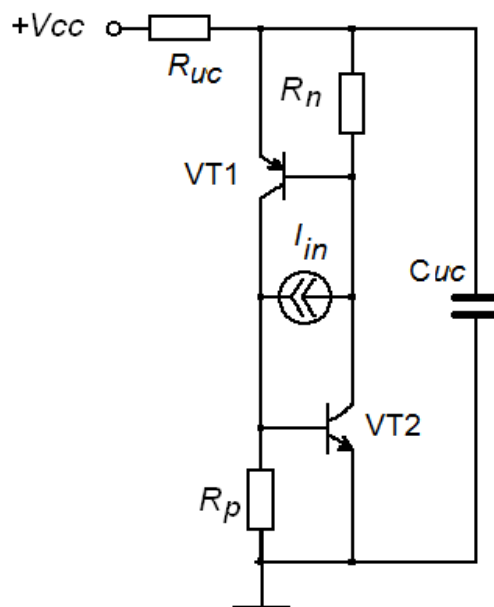


Рис. 1. Упрощенная эквивалентная схема для моделирования ОТЭ

В большинстве случаев элементы  $R_{uc}$  и  $C_{uc}$  неизвестны, что не позволяет оценить возможность возникновения нестабильных ТЭ. В классическом

варианте вольтамперная характеристика тиристорного эффекта описывается S-образной кривой (рис. 2). При этом, до возникновения ТЭ схема находится в состоянии 1, а при возникновении ТЭ за счет включения паразитной обратной связи переходит в состояние 3. Только кратковременное отключение питания ниже величины удержания (состояние 4) позволяет перевести схему обратно в состояние 1.

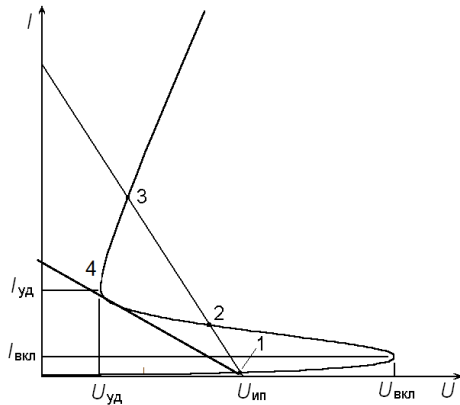


Рис. 2. Вольтамперная характеристика тиристорного эффекта

Введение резистора в эквивалентную схему позволяет, в первом приближении, учесть эффект «просадки» питания. Очевидно, что в реальной СБИС этот резистор распределен по всей площади кристалла и оказывает разное влияние для различных паразитных p-p-p структур. Тем не менее, во многих случаях он позволяет учесть влияние эффекта «просадки» питания на чувствительность к ТЭ.

В момент возникновения ТЭ, как правило, возникает значительный скачок импульса тока в цепи питания, который за времена порядка десятков нс уменьшается до своего стационарного значения (рис. 3). Выброс тока в начальный момент времени обусловлен как влиянием емкости, так и возможным разогревом кристалла ИС при протекании значительного тока, приводящего к росту эквивалентного резистора. Очевидно, что при определенных условиях это падение напряжение на резисторе  $R_{ic}$  может привести к тому, что напряжение на самой схеме окажется меньше напряжения удержания (рис. 2, состояние 4), и ТЭ сорвется с типовой осциллограммой, приведенной на рис. 4.

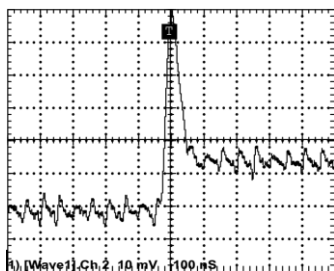


Рис. 3. Типовая осциллограмма тока в цепи питания при возникновении стабильного тиристорного эффекта

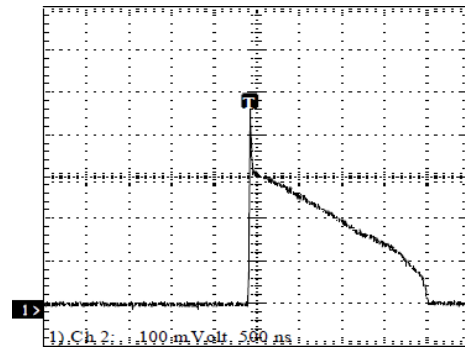


Рис. 4. Типовая осциллограмма тока в цепи питания при возникновении нестабильного ТЭ

### III. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Экспериментальные исследования нестабильного одиночного тиристорного эффекта проводились в трех типах КМОП СБИС: ОЗУ и ПЛИС на ускорителях ионов, протонов и лазерной установке со сфокусированным излучением пикосекундной длительности.

В схеме ОЗУ в качестве варьируемого параметра использовалось напряжение питания, изменение которого позволяло передвигать нагрузочную кривую около состояния 4 (рис. 2). В ПЛИС исследовалось влияние режима функционирования (статический и динамический) на оценку ее чувствительности к ОТЭ. В данном случае проводилась оценка, на сколько собственное потребление тока в статическом и динамическом режимах может оказать влияние на порог возникновения ТЭ.

Наиболее неожиданные экспериментальные результаты были получены для ПЛИС. Оказалось, что чувствительность микросхемы по тиристорному эффекту в динамическом режиме с загруженной «прошивкой» значительно ниже, чем в статическом режиме без загруженной «прошивки».

Более подробные исследования ПЛИС на лазерной установке выявили, что в статическом режиме в ней имеет место много различных тиристорных структур с различными значениями токов в установившемся состоянии (рис. 5). При проведении исследований в динамическом режиме с загруженной «прошивкой» ряд тиристорных структур не включались. Дополнительные исследования показали, что имеют место тиристорные структуры с напряжением удержания около 2,4 В, что очень близко к напряжению питания микросхемы. На рис. 6 и 7 приведены вольт-амперные характеристики стабильной и нестабильной тиристорной структуры. Видно, что в динамическом режиме при напряжении питания 2,5 В тиристорный эффект не развивается, однако при повышении напряжения до 2,7 В фиксируется тиристорный эффект с напряжением удержания 2,6 В.

В статическом режиме напряжение удержания составляет около 2,4 В, что позволяет зафиксировать

ТЭ в процессе облучения. Такое поведение может быть обусловлено значительной величиной тока потребления ПЛИС (около 60 мА) в динамическом режиме, из-за чего нагрузочная кривая сразу располагается ниже состояния 4 на рис. 2. Но если перейти в статический режим работы, ток потребления в котором составляет около 1 мА, то этого тока оказывается недостаточно для срыва ТЭ.

В ПЛИС также присутствуют стабильные ТЭ с порогом удержания около 1,2 В, проявляющиеся как в статическом, так и в динамическом режимах. ВАХ одной из таких структур приведена на рис. 7.

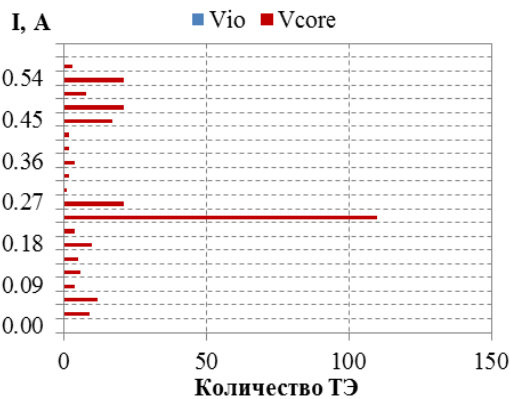


Рис. 5. Распределение токов в состоянии тиристорного эффекта в статическом режиме в ПЛИС

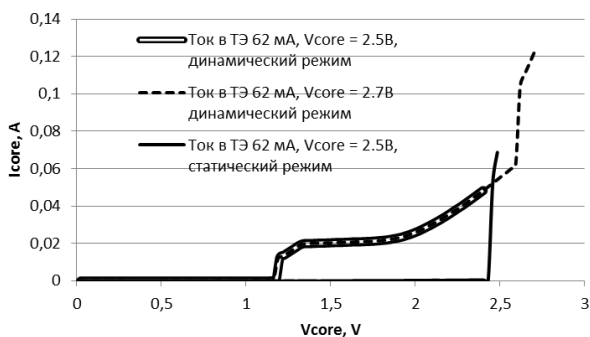


Рис. 6. Вольт-амперные характеристики нестабильной тиристорной структуры в ПЛИС

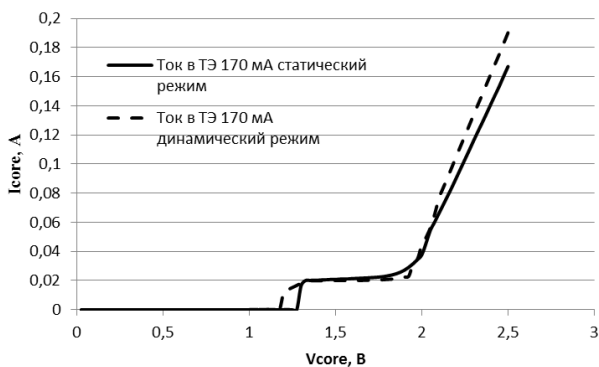


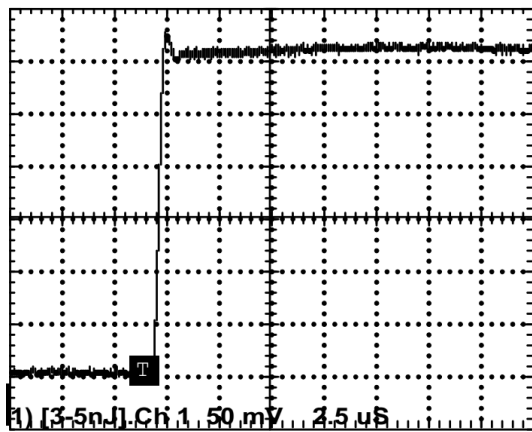
Рис. 7. Вольт-амперные характеристики стабильной тиристорной структуры в ПЛИС

В ОЗУ имеют место как стабильные, так и нестабильные ТЭ в зависимости от напряжения питания. На рис. 8 в качестве примера представлены осциллограммы для трех типовых случаев. На рис. 8.а представлена осциллограмма стабильного ТЭ. Однако, при уменьшении напряжения питания можно наблюдать сначала периодическое возникновение и срыв ТЭ (рис. 8.б), а затем нестабильный ТЭ (рис 8.в).

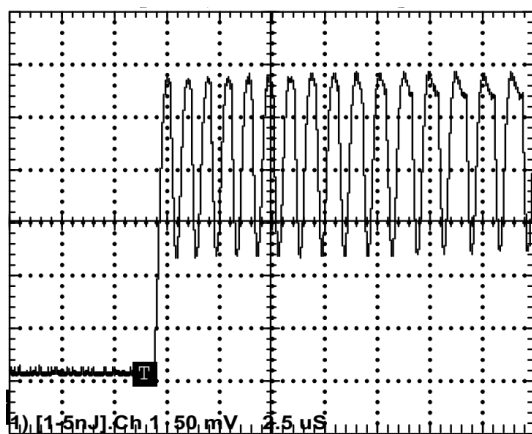
В рамках упрощенной эквивалентной схемы все представленные осциллограммы могут быть объяснены. В первом случае нагрузочная кривая расположена выше точки 4, поэтому срыва ТЭ нет. По мере уменьшения напряжения питания за счет первоначального большего значения тока в ТЭ происходит его срыв. Однако он не успевает полностью сорваться, так как ток ТЭ падает и паразитная структура вновь включается. Процесс повторяется. Обращает на себя внимание, что чем дальше находится очередной срыв от своего начального значения, тем больше оказывается длительность нахождения в состоянии нестабильного ТЭ. Такое поведение обусловлено внутренним разогревом кристалла СБИС, за счет чего увеличивается его чувствительность к ТЭ. Дальнейшее снижение напряжения питания приводит к однократному нестабильному ТЭ (рис 8.в).

Представленные экспериментальные результаты свидетельствуют о том, что контроль ТЭ в рамках классической процедуры измерения усредненного тока потребления оказывается не всегда корректным. Наличие нестабильного ТЭ может приводить к массовым сбоям в работе СБИС, которые по внешним признакам могут классифицироваться как функциональный сбой. Кроме того, в данной ситуации не будут работать алгоритмические методы повышения сбоеустойчивости системы, заложенные разработчиком аппаратуры, например детектирования и исправление однократных и двукратных ошибок в слове данных и другие.

Такой эффект наблюдался при испытаниях ПЛИС и проявлялся не в классическом плавном росте тока потребления из-за накопления сбоев в ячейках конфигурационной памяти, а в резком снижении тока потребления, сопровождающимся нарушением функционирования.



а)



б)

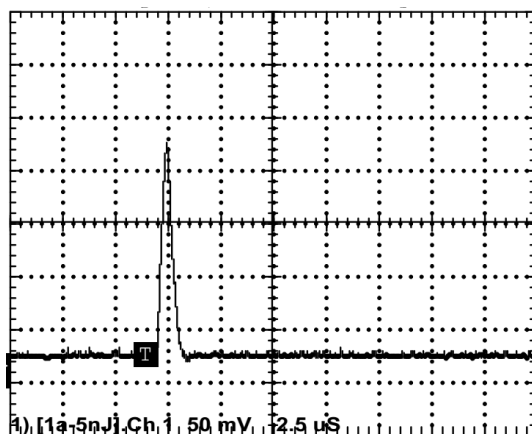


Рис. 8. Осциллограммы токов в цепи питания при возникновении тиристорного эффекта в ОЗУ для различных питаний:  
а)  $U_{cc}=5.5$  В б)  $U_{cc}=5.0$  В в)  $U_{cc}=4.9$  В

#### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные результаты расчетно-экспериментального моделирования свидетельствуют

о возможности возникновения в КМОП СБИС нестабильных одиночных тиристорных эффектов при воздействии ТЗЧ. Причина возникновения нестабильного ТЭ связана с эффектом «просадки» питания из-за чего возможен как полный, так и частичный срыв ТЭ. Актуальность проблемы возрастает с уменьшением напряжения питания микросхем и ростом тока потребления.

Классические методики регистрации ТЭ по усредненному току в цепи питания в ряде случаев не гарантируют регистрацию нестабильных ТЭ. Вместе с тем возникновение нестабильного ТЭ способно привести к массовым изменениям хранящейся информации в регистрах, триггерах и ячейках памяти.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Методология обеспечения стойкости бортовой аппаратуры космических аппаратов к воздействию ионизирующего излучения космического пространства. Монография под общ. ред. М.В Яковлева. М.: МИФИ, 2017. 380 с.
- [2] Чумаков А.И. Действие космической радиации на интегральные схемы. М.: Радио и связь, 2004. 320 с.
- [3] Радиационная стойкость изделий ЭКБ: Научное издание / Под ред. Чумакова А.И. М.: НИЯУ МИФИ, 2015. 512 с.
- [4] А.И. Чумаков, А.А. Печенкин, А.Н. Егоров, О.Б. Маврицкий, С.В. Баранов, А.Л. Васильев, А.В. Яненко Методика оценки параметров чувствительности ИС к тиристорному эффекту при воздействии отдельных ядерных частиц Микроэлектроника, 2008, том 37, № 1, с. 45-51
- [5] А. А. Печенкин, Д. В. Савченков, О. Б. Маврицкий, А. И. Чумаков, Д. В. Бобровский Оценка параметров чувствительности КМОП БИС по одиночным тиристорным эффектам при лазерном воздействии со стороны подложки Микроэлектроника. Т.44, - 2015. - №1. - С.41-48.
- [6] Никифоров А.Ю., Телец В.А., Чумаков А.И. Радиационные эффекты в КМОП ИС. М.: Радио и связь, 1994, 180 с.
- [7] Massengil T.L., Diehl S.E. Transient Radiation Upset Simulation of CMOS Memory Circuits. IEEE Trans. On Nuclear Science. 1984. V. 31. < 6. P. 1337–1343.
- [8] Woodruff R.L., Nelson D.A., Scherr S. Predicting Transient Upset in Gate Arrays. IEEE Trans. on Nuclear Science. 1987. V. 34. < 6. P. 1426–1430.
- [9] Чумаков АИ Моделирование эффекта «просадки» питания в ИС при воздействии импульса ионизирующего излучения Микроэлектроника, 2006, т.35, вып.3, с.184-190
- [10] D. V. Savchenkov, A. I. Chumakov, A.G. Petrov, A. A. Pechenkin, A.N. Egorov, O. B. Mavritskii, A. V. Yanenko, Study of SEL and SEU in SRAM using different laser techniques // Proceedings of 13th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS). 2013. Oxford. P.1-4.

# Non-Stable Single Event Latch-up

A.I. Chumakov, D.V. Bobrovsky, A.A. Pechenkin, D.V. Savchenkov, G.S. Sorokoumov

National Research Nuclear University “MEPhI”

Specialized Electronic Systems, aichum@spels.ru

**Abstract** - The most critical single event effect is a single event latch-up (SEL) in bulk CMOS or BiCMOS VLSI, which sometimes can cause catastrophic failures in them. Therefore, it is necessary to estimate SEL sensitivity of VLSI intended for use in electronic equipment of spacecrafts.

A common practice to estimate SEL sensitivity of VLSI is based on measurement of stationary current in power supply circuit. When its value exceeds the critical meaning we can conclude about SEL in VLSI under ion irradiation. Only stable SELs can be observed with help of this technique.

Meanwhile, we can obtain non-stable (non-stationary) SELs, namely SELs, which exist for a certain relatively short period of time. Experimental results show that this time period does not exceeded several microseconds.

The main reason of SEL instability is the rail span collapse. Indeed, when SEL appears, current in power supply circuit increases. Thus voltage drop in substrate, wells, metal strip connections and so on increases and finally effective supply voltage can drop below holding voltage of latch-up. So we can observe latch-up effect measuring transient current in power circuit and we can miss such latch-up effect with help of traditional technique. It should be noted that the value of the “internal” voltage drop depends both on the characteristics of the parasitic n-p-n-n structure and on the conditions of the experiment, in particular, the supply voltage, temperature and functional mode of VLSI.

Experimental investigation of nonstable SEL was carried out in two types of CMOS VLSI: RAM and FPGA using different facilities: proton and ion accelerators and picosecond focused laser setup.

Nonstable SELs were observed in the both VLSI. The influence of power supply voltage was carried out in RAM. The evaluation of the functional mode (static and dynamic) influence on SEL was studied in FPGA.

We obtained unusual results for FPGA. Sometimes, there were no SELs in FPGA in dynamic mode, while it had very high sensitivity in static mode. There was no SEL in FPGA in dynamic mode using a traditional technique of measure of stationary current in power supply circuit, but we could see a lot of functional upsets. FPGA had high SEL sensitivity with SEL threshold below 7 MeV·cm<sup>2</sup>/mg in the static mode. We proposed in this case that there were nonstable SELs due to high value of power supply current in dynamic mode.

We observed stable and non-stable SELs in RAM depending on the value of supply voltage. For large voltage we could see stable SEL. In the middle range of voltage there were

periodic oscillatory SELs. At last the only peak of current occurred for relatively small voltage.

The obtained experimental results show possibility of non-stable SELs under ion irradiation. In our opinion the reason of such behavior is determined by the effect of rail span collapse. Additional voltage drop can occur because of both transient latch-up current and large value of power supply current in dynamic mode.

**Keywords** – ion irradiation, single event latch-up (SEL), rail span collapse, VLSI.

## REFERENCES

- [1] Methodology of radiation hardness assurance of spacecraft electronic equipment under space radiation Ed by Yakovlev M.V. NRNU MEPhI, 2017. 380 p. (in Russian).
- [2] Chumakov A.I., Space Radiation Effects in ICs. Moscow, Radio I Svyaz. 2004. 320 p. (in Russian).
- [3] Radiation Hardness of electronic components. Ed. by Chumakov A. I. NRNU MEPhI, 2015. 512 p. (in Russian).
- [4] Chumakov A. I., Pechenkin A. A., Egorov A. N., Mavritskiy O. B., Baranov S. V. Vasil'ev A. L., Yanenko A. V. Estimating IC susceptibility to single-event latchup Russian Microelectronics, 2008, 37 (1) , pp. 41-46.
- [5] Pechenkin, A.A., Savchenkov, D.V., Mavritskii, O.B., Chumakov, A.I., Bobrovskii, D.V. Evaluation of sensitivity parameters for single event latchup effect in CMOS LSI ICs by pulsed laser backside irradiation tests Russian Microelectronics, 44 (1), pp. 33-39.
- [6] Nikiforov A.Y., Telets V.A., Chumakov A. I. Radiation effects in CMOS ICs. Moscow, Radio I Svyaz. 1994. 180 p. (in Russian).
- [7] Massengil T.L., Diehl S.E. Transient Radiation Upset Simulation of CMOS Memory Circuits. IEEE Trans. On Nuclear Science. 1984. V. 31. < 6. P. 1337–1343.
- [8] Woodruff R.L., Nelson D.A., Scherr S. Predicting Transient Upset in Gate Arrays. IEEE Trans. on Nuclear Science. 1987. V. 34. < 6. P. 1426–1430.
- [9] A. I. Chumakov Modeling rail-span collapse in ICs exposed to a single radiation pulse Russian Microelectronics, vol. 35, no. 3, pp. 156-161, 2006.
- [10] D. V. Savchenkov, A. I. Chumakov, A.G. Petrov, A. A. Pechenkin, A.N. Egorov, O. B. Mavritskii, A. V. Yanenko, Study of SEL and SEU in SRAM using different laser techniques // Proceedings of 13th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS). 2013. Oxford. P.1-4.