

Особенности проявления и регистрации тиристорного эффекта в КМОП СБИС при воздействии однородного импульсного лазерного излучения

И.И. Швецов-Шиловский

Национальный Исследовательский Ядерный Университет «МИФИ»
(Московский Инженерно-Физический Институт), г. Москва, iish@spels.ru

Аннотация — В статье рассматривается влияние температуры и напряжения питания на характеристики тиристорного эффекта в КМОП СБИС при воздействии однородного импульсного лазерного излучения. Анализируются и предлагаются способы регистрации наличия в микросхемах нестабильного тиристорного эффекта.

Ключевые слова — КМОП СБИС, нестабильный тиристорный эффект, однородное импульсное лазерное излучение.

однородности большей части топологии их кристаллов (накопителя). Это позволяет простым образом исследовать НТЭ, так как при увеличении площади воздействия увеличивается количество активируемых тиристорных структур и вызванная ими просадка напряжения питания. При определенных условиях за счет эффекта просадки питания ТЭ срывается и/или может переходить в нестабильное состояние.

Таблица 1

Основные параметры объектов исследований

Объект	Напряжение питания, В	Размер кристалла, мм	Проектные нормы, нм
СОЗУ1	4,5..5,5	3,6×2,6	65
СОЗУ2	3,0..3,6	8,0×4,0	180
СОЗУ3	3,0..3,6	6,7×6,7	65

I. ВВЕДЕНИЕ

Тиристорный эффект (ТЭ) в КМОП СБИС является предметом тщательных исследований при анализе радиационного поведения микросхем [1], [2], так как зачастую именно он является критерием стойкости микросхемы и аппаратуры в целом, определяя как уровень катастрофического отказа, так и время потери работоспособности [3], [4]. Для выбора критичного режима функционирования микросхемы при исследованиях важной задачей является определение зависимости проявления ТЭ от внешних условий функционирования, в первую очередь, от напряжения питания и температуры окружающей среды [5]-[7].

В случае, если значение напряжения удержания тиристорной структуры близко к приложенному напряжению питания микросхемы, возможна ситуация, в которой ТЭ самопроизвольно сбрасывается без отключения питания, то есть наблюдается нестабильный тиристорный эффект (НТЭ) [8]-[10]. НТЭ может быть особенно чувствителен к изменению условий функционирования микросхемы и при их изменении переходить в стабильное состояние, то есть приводить к необратимому возрастанию тока потребления, которое устраняется только при помощи сброса и повторной подачи питания. Таким образом, целесообразным является исследование влияния внешних условий на проявление НТЭ.

II. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

В качестве объектов исследований выступали микросхемы КМОП СОЗУ, основные параметры которых приведены в табл. 1. Микросхемы СОЗУ выбраны в качестве объектов исследования по причине

Во время воздействия объекты исследований находились в статическом режиме, то есть управляющие сигналы находились в неактивном состоянии, что для всех объектов означало, что они были соединены с выводами питания. К этому же потенциалу были подключены двунаправленные линии данных. В цепи земли между объединенными выводами земли микросхем и общим потенциалом оснастки, к которому подключались конденсаторы, присутствовал резистор номиналом 0,1 Ом для контроля импульсной реакции тока потребления (рис. 1).

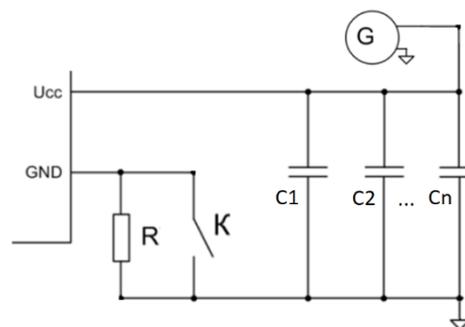


Рис. 1. Схема включения объектов исследований

Для всех экспериментов применялся типовой состав конденсаторов, который представлял собой один общий конденсатор номиналом 100 мкФ и один конденсатор 10 мкФ в цепи питания, по одному конденсатору 1 мкФ на каждую сторону корпуса микросхемы или на каждую группу выводов питания, а также по одному конденсатору 0,1 мкФ на каждый вывод питания микросхемы.

Экспериментальные исследования проводились в следующей последовательности: при заданных напряжении питания и интенсивности лазерного излучения проводилось 16 импульсов лазерного излучения (ЛИ). После этого вычислялась вероятность возникновения тиристорного эффекта $p(TЭ)$ как отношение числа воздействий, после которых в схеме возникает ТЭ, к общему числу воздействий. Интервал между воздействиями составлял 0,5 с, саморазогрев микросхем в ТЭ не учитывался. Диапазон интенсивностей, в которых проводились исследования составлял 2,5 порядка с учетом возможности наличия ограниченного диапазона эффекта [3]. Минимальная интенсивность воздействия выбиралась по появлению отличной от нуля импульсной реакции тока потребления, а максимальная ограничивалась доступной на используемой испытательной установке.

III. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Экспериментальные результаты, полученные для СОЗУ1, представлены на рис. 2. С одной стороны, результаты демонстрируют типичную зависимость пороговой интенсивности ТЭ от температуры: при повышении температуры окружающей среды минимальная интенсивность, необходимая для возникновения ТЭ, снижается во всем диапазоне исследуемых напряжений питания. Также при увеличении температуры незначительно снижается минимальное напряжение, при котором начинает возникать ТЭ, однако указанное снижение (на 0,2 В) находится в пределах одного шага по напряжению и может иметь статистическую природу.

Следует отметить, что на полученных зависимостях в диапазоне рабочих напряжений микросхемы пороговая интенсивность возникновения ТЭ при минимальном рабочем напряжении (4,5 В) не больше, чем при максимальном. Также на приведенных графиках видно, что ТЭ наблюдается в ограниченном диапазоне не только по интенсивности воздействия, но и по напряжению питания. Хотя напряжение 6,0 В находится за границами диапазона напряжений питания микросхемы, оно является максимально допустимым для данной микросхемы. Таким образом, для данного объекта исследований отсутствия ТЭ можно добиться путем повышения напряжения питания до максимально допустимого. Такое поведение может быть объяснено тем, что при большем напряжении питания в микросхеме активируется большее число тиристорных структур, что приводит к большей просадке питания и, как следствие, срыву стабильного ТЭ.

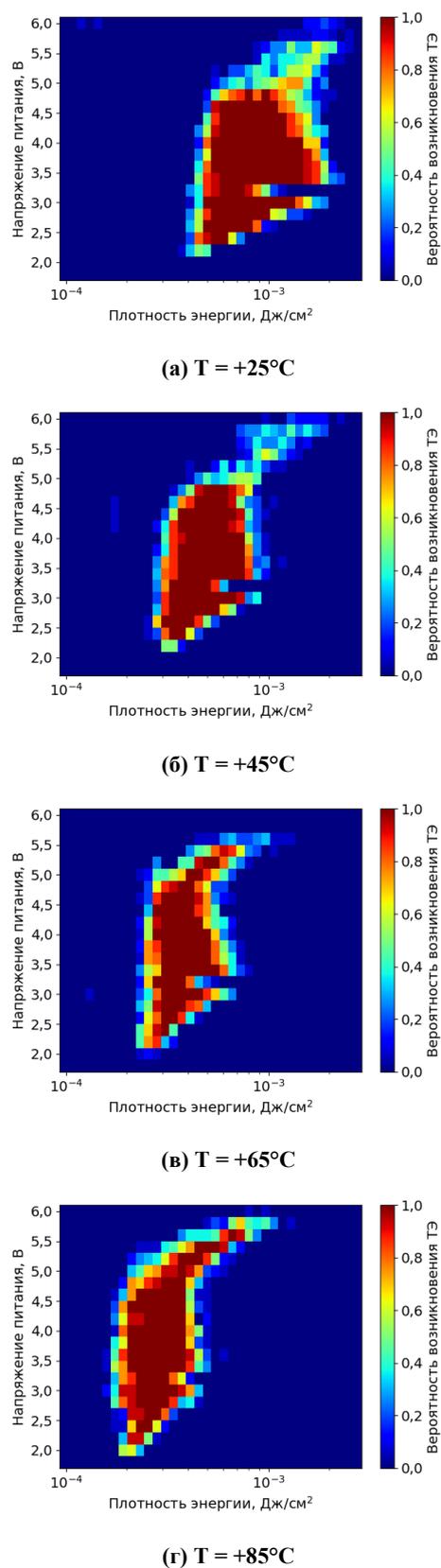


Рис. 2. Зависимость вероятности возникновения ТЭ от плотности энергии ЛИ и напряжения питания при разных температурах окружающей среды для СОЗУ1

На первый взгляд ТЭ в микросхеме, который устраняется сам без сброса питания, представляет сравнительно небольшую опасность: он не приводит к необратимому росту тока потребления и долговременной просадке шины питания аппаратуры. В случае его наличия не требуется предпринимать специальных мер, таких, например, как установка монитора питания или коррекция схемы включения путем добавления в нее резистора. Однако опасность НТЭ, связана, во-первых, с возможностью катастрофического отказа при его возникновении, вызванного протеканием через микросхему токов большой амплитуды. Во-вторых, при изменении условий функционирования микросхемы, например, температуры окружающей среды или состава конденсаторов в цепи питания, НТЭ может переходить в стабильное состояние. Это подчеркивает, что результаты экспериментального исследования микросхем неотделимы от условий проведения исследований.

Таким образом, в ситуации, когда в микросхеме при однородном импульсном воздействии может наблюдаться НТЭ, требуются инструменты и методы, с помощью которых в ходе исследований можно определить наличие НТЭ в схеме.

Неуправляемый источник питания не подходит для контроля наличия НТЭ в микросхеме, так как не может обеспечить контроль и отображение тока потребления с достаточно высокой скоростью и точностью. Непрерывный контроль тока потребления при помощи программируемого источника питания также не является приемлемым решением, так как быстродействие типовых управляемых источников питания составляет около 1 мс, в то время как типичное время развития НТЭ может быть от долей до сотен мкс [10].

Возможным способом контроля наличия НТЭ в схеме при однородном импульсном воздействии может выступать измерение импульсной реакции тока потребления на резисторе в цепи питания или земли. При наличии скачкообразного роста амплитуды или длительности импульсной реакции тока от интенсивности воздействия можно сделать вывод о наличии в схеме НТЭ.

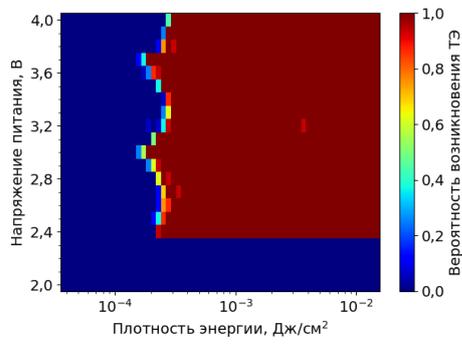
Простым способом проверки наличия тиристорной структуры в микросхеме могут служить результаты экспериментальных исследований при воздействии ТЗЧ, в том числе с использованием сфокусированных лазерных источников. Так как в этом случае воздействие имеет локальный характер, и не должен иметь место срыв тиристора, вызванный просадкой питания.

Сходным образом определить наличие в схеме тиристорной структуры можно с помощью исключительно источника равномерного импульсного лазерного воздействия. В этом случае обеспечить неравномерное воздействие можно либо путем облучения со стороны приборного слоя, когда

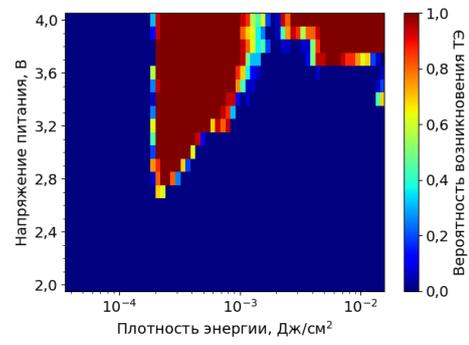
неравномерность вызывается металлизацией самой микросхемы, либо путем облучения со стороны подложки через диафрагму малого диаметра.

Экспериментальные результаты зависимостей вероятности возникновения ТЭ в СОЗУ2 от интенсивности воздействия и напряжения питания при разных диаметрах пятна приведены на рис. 3. Во всех случаях центр пятна совпадал с центром кристалла. При диаметре пятна более 4,0 мм, что соответствует меньшей стороне прямоугольного кристалла микросхемы, стабильного ТЭ не наблюдалось. Видно, что до диаметра воздействия 0,8 мм область возникновения ТЭ остается примерно одинаковой, а зависимость наличия ТЭ от интенсивности воздействия имеет пороговый характер. При увеличении диаметра воздействия область возникновения ТЭ раздваивается, а минимальное напряжение, при котором возникает стабильный ТЭ, увеличивается до полного исчезновения стабильного ТЭ в исследуемых диапазонах параметров. Таким образом, в данном случае изменения диаметра воздействия ЛИ может использоваться для определения наличия в схеме тиристорной структуры, которая не защелкивается при равномерном импульсном лазерном воздействии.

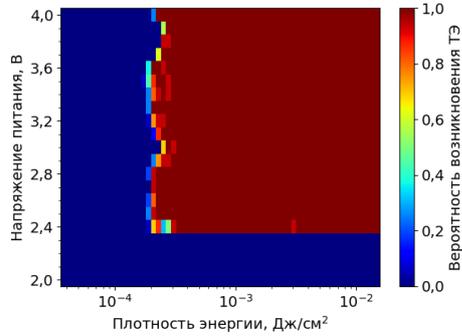
При анализе поведения схемы при равномерном импульсном лазерном воздействии полезной может быть информация о локализации места возникновения ТЭ. При исследовании микросхемы СОЗУ3 на источнике сфокусированного лазерного воздействия ТЭ с минимальной энергией возникновения был обнаружен в накопителе, при этом минимальная энергия возникновения ТЭ наблюдалась в структурах, расположенных в центре кристалла (рис 4). Тем не менее, при воздействии равномерного импульсного лазерного излучения источник разогрева находился в периферии в районе контактной площадки питания, как видно на тепловизионной съемке кристалла со стороны подложки после воздействия ЛИ (рис 5а). При воздействии на накопитель с закрытой от воздействия периферией стабильный ТЭ наблюдался только при воздействии пятном ЛИ менее 0,5 мм, при этом источник наибольшего разогрева совпадал с местом воздействия (рис. 5б). При дальнейшем увеличении диаметра воздействия ТЭ не наблюдалось до того момента, когда внутрь пятна попадала периферийная область, а именно окрестность контактной площадки питания. Тепловая картина при воздействии только на площадку питания (рис. 5в) совпадала таковой при воздействии на весь кристалл. Повторное исследование объекта на источнике сфокусированного лазерного излучения подтвердило наличие в площадке питания тиристорной структуры с большей пороговой энергией, чем в области накопителя.



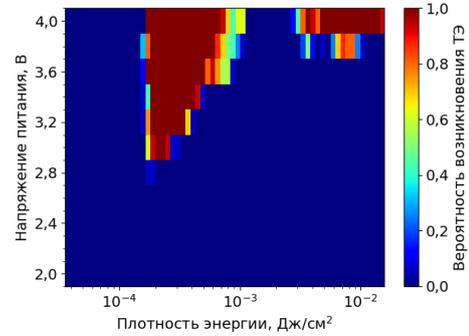
(а) $D = 0,3$ мм



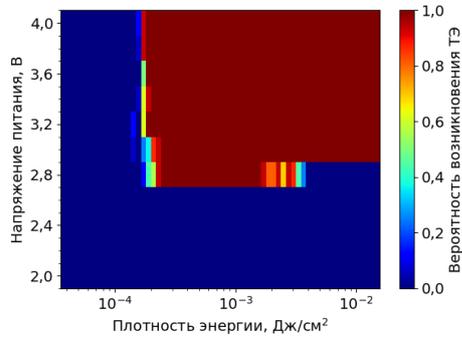
(д) $D = 1,5$ мм



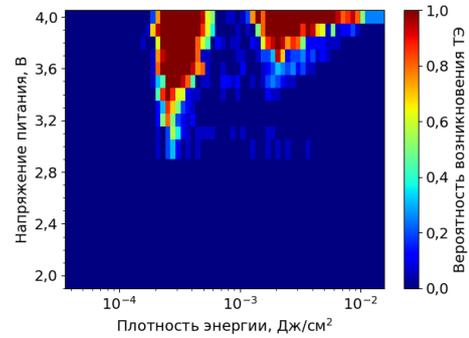
(б) $D = 0,8$ мм



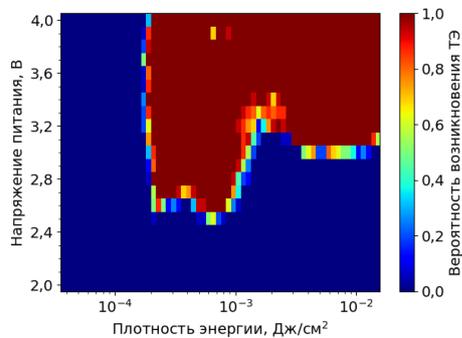
(е) $D = 2,0$ мм



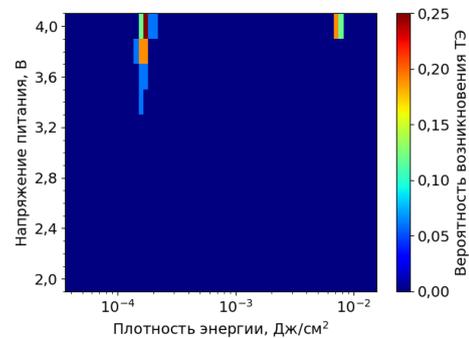
(в) $D = 1,0$ мм



(ж) $D = 2,4$ мм



(г) $D = 1,2$ мм



(з) $D = 3,2$ мм

Рис. 3. Зависимость вероятности возникновения ТЭ от плотности энергии ЛИ и напряжения питания при разных диаметрах воздействия ЛИ для СОЗУ2

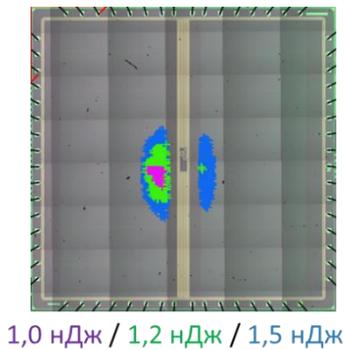
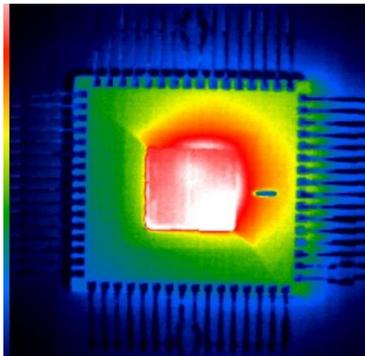
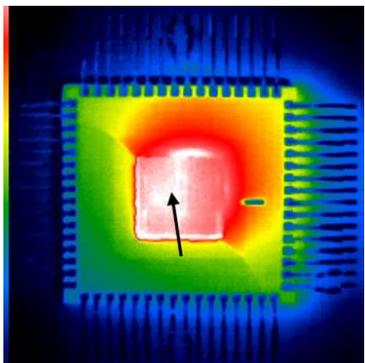


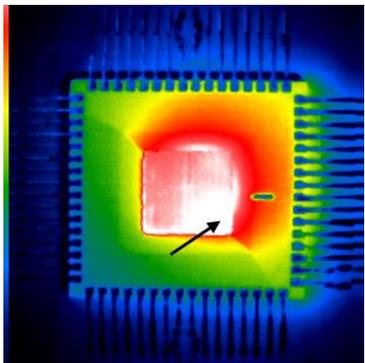
Рис. 4. Координаты и энергия возникновения ТЭ в СОУЗ при воздействии сфокусированного ЛИ



(а) Воздействие на весь кристалл



(б) $D = 0,5$ мм, воздействие на накопитель



(в) $D = 0,5$ мм, воздействие на периферию

Рис. 5. Тепловизионные фотографии кристалла СОУЗ при воздействии ЛИ пятном разного диаметра

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, показано влияние условий функционирования микросхемы, таких как напряжение питания и температура на возникновение и проявление тиристорного эффекта в КМОП СБИС при воздействии однорядного импульсного лазерного излучения. Показана возможность наличия стабильного тиристорного эффекта в ограниченном диапазоне как интенсивностей лазерного излучения, так и напряжения питания микросхемы. Приведены возможные способы контроля наличия нестабильного тиристорного эффекта в микросхеме.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает благодарность А.И. Чумакову и А.А. Печенкину за поддержку и научные консультации.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] P. Fernández-Martínez *et al.*, "SEE Tests with Ultra Energetic Xe Ion Beam in the CHARM Facility at CERN," in *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 66, no. 7, pp. 1523-1531, July 2019, doi: 10.1109/TNS.2019.2907112.
- [2] R. García Alía *et al.*, "Simplified SEE Sensitivity Screening for COTS Components in Space," in *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 64, no. 2, pp. 882-890, Feb. 2017, doi: 10.1109/TNS.2017.2653863.
- [3] A. Y. Nikiforov, V. V. Bykov, V. S. Figurov, A. I. Chumakov, P. K. Skorobogatov and V. A. Telets, "Latch-up windows tests in high temperature range," RADECS 97. Fourth European Conference on Radiation and its Effects on Components and Systems (Cat. No.97TH8294), Cannes, France, Sep. 1997, pp. 366-370. doi: 10.1109/RADECS.1997.698940.
- [4] A. A. Pechenkin, D. V. Savchenkov, O. B. Mavritskii, A. I. Chumakov, and D. V. Bobrovskii, "Evaluation of sensitivity parameters for single event latchup effect in CMOS LSI ICs by pulsed laser backside irradiation tests," *Russian Microelectronics*, vol. 44, pp. 33-39, Jan. 2015. doi: 10.1134/S1063739715010072.
- [5] C. J. Marshall *et al.*, "Mechanisms and Temperature Dependence of Single Event Latchup Observed in a CMOS Readout Integrated Circuit From 16–300 K," in *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 57, no. 6, pp. 3078-3086, Dec. 2010, doi: 10.1109/TNS.2010.2085018.
- [6] A. H. Johnston, B. W. Hughlock, M. P. Baze and R. E. Plaag, "The effect of temperature on single-particle latchup," in *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 38, no. 6, pp. 1435-1441, Dec. 1991, doi: 10.1109/23.124129.
- [7] W. A. Kolasinski, R. Koga, E. Schnauss and J. Duffey, "The Effect of Elevated Temperature on Latchup and Bit Errors in CMOS Devices," in *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 33, no. 6, pp. 1605-1609, Dec. 1986, doi: 10.1109/TNS.1986.4334649
- [8] А.И. Чумаков, Д.В. Бобровский, А.А. Печенкин, Д.В. Савченков, Г.С. Сорокоумов, И.И. Швецов-Шиловский «Механизмы возникновения нестабильных тиристорных эффектов в КМОП ИС» // *Микроэлектроника*. – 2019. – Т. 48. – № 4. – С. 295-299. – DOI 10.1134/S0544126919040033.
- [9] А.И. Чумаков, Д.В. Бобровский, А.А. Печенкин Д.В. Савченков, Г.С. Сорокоумов «Нестабильные одиночные тиристорные эффекты в КМОП ИС» // *Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС)*. 2018. Вып.4. С. 177-181. – DOI 10.31114/2078-7707-2018-4-177-181.
- [10] I. I. Shvetsov-Shilovskiy, A. I. Chumakov, A. A. Pechenkin and D. V. Bobrovskiy, "Nonstable Latchups in CMOS ICs Under Pulsed Laser Irradiation," in *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 67, no. 7, pp. 1540-1546, July 2020, doi: 10.1109/TNS.2020.3001169.

Peculiarities of Appearance and Registration of the Latchup in CMOS VLSI under Uniform Pulsed Laser Irradiation

I.I. Shvetsov-Shilovskiy

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow,
iish@spels.ru

Abstract — The paper concerns the influence of the temperature and the supply voltage on peculiarities of the latchup appearance in CMOS VLSI under uniform pulsed laser irradiation. Nonstable latchup registration methods are proposed and discussed.

The latchup in CMOS VLSI is the subject of careful research in the analysis of the radiation behavior of ICs, since it is often the criterion for the radiation hardness of the single device and equipment. If the holding voltage of the latchup structure is close to the supply voltage of the IC, latchup can spontaneously disable itself without turning off the power supply, so the latchup appears to be unstable.

CMOS SRAMs were selected as devices under test as they feature uniform topology, i.e., the storage area. It allows a simple way to analyze the nonstable latchup effect, because the increase in laser beam size leads to increase in voltage drop and can cause the latchup to disable itself.

The experimental results are presented on the dependance of minimum laser intensity that is needed to initiate the latchup on the temperature and supply voltage. In the selected device under certain conditions the latchup arises only in the limited range of the laser intensity and supply voltage.

It is shown that providing non-uniform pulsed laser irradiation it is possible to observe stable latchup in CMOS IC even if there is no latchup registered under uniform laser irradiation. Moreover, the range of conditions where the stable latchup is observed decreases when increasing the laser beam size. Noticeable results on the localization of the latchup under uniform laser irradiation are presented.

Keywords — CMOS VLSI, nonstable latchup, uniform pulsed laser irradiation.

REFERENCES

- [1] P. Fernández-Martínez *et al.*, "SEE Tests with Ultra Energetic Xe Ion Beam in the CHARM Facility at CERN," in *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 66, no. 7, pp. 1523-1531, July 2019, doi: 10.1109/TNS.2019.2907112.
- [2] R. García Alía *et al.*, "Simplified SEE Sensitivity Screening for COTS Components in Space," in *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 64, no. 2, pp. 882-890, Feb. 2017, doi: 10.1109/TNS.2017.2653863.
- [3] A. Y. Nikiforov, V. V. Bykov, V. S. Figurov, A. I. Chumakov, P. K. Skorobogatov and V. A. Telets, "Latch-up windows tests in high temperature range," RADECS 97. Fourth European Conference on Radiation and its Effects on Components and Systems (Cat. No.97TH8294), Cannes, France, Sep. 1997, pp. 366-370. doi: 10.1109/RADECS.1997.698940.
- [4] A. A. Pechenkin, D. V. Savchenkov, O. B. Mavritskii, A. I. Chumakov, and D. V. Bobrovskii, "Evaluation of sensitivity parameters for single event latchup effect in CMOS LSI ICs by pulsed laser backside irradiation tests," *Russian Microelectronics*, vol. 44, pp. 33-39, Jan. 2015. doi: 10.1134/S1063739715010072.
- [5] C. J. Marshall *et al.*, "Mechanisms and Temperature Dependence of Single Event Latchup Observed in a CMOS Readout Integrated Circuit From 16–300 K," in *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 57, no. 6, pp. 3078-3086, Dec. 2010, doi: 10.1109/TNS.2010.2085018.
- [6] A. H. Johnston, B. W. Hughlock, M. P. Baze and R. E. Plaag, "The effect of temperature on single-particle latchup," in *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 38, no. 6, pp. 1435-1441, Dec. 1991, doi: 10.1109/23.124129.
- [7] W. A. Kolasinski, R. Koga, E. Schnauss and J. Duffey, "The Effect of Elevated Temperature on Latchup and Bit Errors in CMOS Devices," in *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 33, no. 6, pp. 1605-1609, Dec. 1986, doi: 10.1109/TNS.1986.4334649
- [8] A.I. Chumakov, D.V. Bobrovsky, A.A. Pechenkin, D.V. Savchenkov, G.S. Sorokoumov, and I.I. Shvetsov-Shilovskiy "Mechanisms of Initiation of Unstable Latchup Effects in CMOS ICs" // *Russian Microelectronics*. 2019. V. 48. № 4. P. 250-254. DOI 10.1134/S0544126919040033.
- [9] A.I. Chumakov, D.V. Bobrovsky, A.A. Pechenkin, D.V. Savchenkov, and G.S. Sorokoumov «Non-Stable Single Event Latch-up» // *Problems of Perspective Micro- and Nanoelectronic Systems Development - 2018*. Issue 4. P. 177-181. doi:10.31114/2078-7707-2018-4-177-181.
- [10] I. I. Shvetsov-Shilovskiy, A. I. Chumakov, A. A. Pechenkin and D. V. Bobrovsky, "Nonstable Latchups in CMOS ICs Under Pulsed Laser Irradiation," in *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 67, no. 7, pp. 1540-1546, July 2020, doi: 10.1109/TNS.2020.3001169.