

Рациональный состав типовой оценочной схемы для контроля радиационной стойкости партий пластин базовых матричных кристаллов

Ю.М. Московская^{1,2}, Г.С. Сорокоумов¹, Д.В. Бобровский^{1,3}, А.Ю. Никифоров¹, А.В. Уланова^{1,3},
А.Н. Денисов², В.Г. Сницар², А.А. Жуков²

¹АО «ЭНПО СПЭЛС», г. Москва, ummos@spels.ru

²НПК «Технологический центр», г. Зеленоград

³НИЯУ МИФИ, г. Москва

Аннотация — Предложен и обоснован выбор состава типовых оценочных схем для проведения испытаний партий пластин на радиационную стойкость в целях контроля стабильности технологического процесса. Предложен вариант состава типовых оценочных схем на основе БМК.

Ключевые слова — типовая оценочная схема, базовый матричный кристалл, радиационная стойкость.

I. ВВЕДЕНИЕ

Действующими нормативными документами (НД) [1-2] предусмотрено проведение контроля каждой производственной партии пластин на радиационную стойкость. Для СБИС на основе базовых матричных кристаллов (БМК) испытания производственных партий выполняются в рамках освоения и поставки конкретных типов БИС.

В целях проведения испытаний производственных партий пластин с микросхемами на БМК, применяют тестовую интегральную схему (ИС) с так называемой «нулевой» зашивкой, используемой для аттестации библиотеки элементов и конструкции БМК. По сути, тестовая ИС является типовой оценочной схемой (ТОС) для партии пластин [3].

ТОС, применяемые для контроля технологического процесса в части обеспечения радиационной стойкости, должны решать следующие задачи:

- 1) Обеспечение оперативной и достоверной оценки радиационной стойкости готовых изделий в процессе изготовления микросхем, на основе непрерывного и периодического контроля показателей стойкости ТОС.
- 2) Обеспечение и контроль сохранности показателей стойкости изделий при внесении контролируемых изменений в технологический процесс при производстве.
- 3) Подтверждение отсутствия влияния разброса электрофизических и электрических параметров кристаллов по пластине в пределах партии, а

также, от партии к партии, на стабильность показателей радиационной стойкости.

II. РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ ПАРТИЙ БМК

Известно, что температурные режимы изготовления микросхем оказывают существенное влияние на стойкость микросхем к дозовым воздействиям [4-5]. Отжиги, проведенные при температурах выше 950°C, значительно ухудшают радиационную стойкость [5]. Влияние температуры отжигов на радиационные процессы в окисле и в приповерхностных слоях кремния связывают с наличием тех или иных примесей, а также их перераспределением в процессе термического окисления. Эффекты деградации также связывают с нарушением структуры связи Si-SiO₂ или ее разрывом [4-7].

Контроль производственных партий микросхем БМК серий 5503БЦ и 5507БЦ производства НПК «Технологический центр», на соответствие требованиям технических условий (ТУ) по подгруппам E в соответствии с ОСТ В 11 0998-99 проводится регулярно, начиная с момента освоения микросхем в производстве в 2005 году. Серии КМОП БМК 5503БЦ и 5507БЦ (проектные нормы 1,6 мкм) различаются напряжением питания [8].

В состав ТОС для контроля производственных партий микросхем БМК серий 5503БЦ и 5507БЦ включены следующие блоки: набор цепочек инверторов (количество элементов в цепочке инверторов и количество цепочек варьируется в зависимости от емкости БМК), а также простейший логический блок, выполненный в виде счетчика на 8 состояний. Выбранный состав ТОС позволяет покрыть до 90% логической емкости БМК и 70% трассировочных межсоединений.

Технологические маршруты изготовления БМК серии 5503БЦ и 5507БЦ на этапе ОКР имели различия, существенно влияющие на радиационную стойкость, на нескольких операциях (см. табл. 1).

В ходе ОКР в 2005 году были проведены квалификационные испытания на радиационную стойкость, в результате которых было определено, что стойкость ТОС серии 5503БЦ составила $1,2 \cdot 10^5$ ед., стойкость ТОС серии 5507БЦ составила $6,0 \cdot 10^4$ ед. (см. рис. 1). Отказ определялся выходом уровня тока потребления ТОС I_{ccs} за пределы норм, установленных в ТУ (см. рис. 1).

В 2012 году для микросхем БМК серии 5507БЦ, были снижены температуры ключевых термических операций, влияющих на качество подзатворного диэлектрика на величину от 50°C до 100°C (см. табл. 1).

В ходе испытаний производственных партий серии 5507БЦ за период с 2012 года по 2015 год стойкость

ТОС к накопленной дозе определялась максимально достигнутыми дозами излучения (более $3,0 \cdot 10^5$ ед.). Параметрических и функциональных отказов не было обнаружено. Таким образом, снижение температурных режимов в блоке формирования подзатворного диэлектрика с 950°C до 850°C привело к увеличению стойкости ТОС серии 5507БЦ не менее чем в 5 раз, по сравнению результатами, полученными при проведении испытаний на этапе ОКР (см. рис. 1).

Существенных изменений в стойкости производственных партий серии 5503БЦ за период с 2012 года по 2015 год отмечено не было (см. рис. 1).

Таблица 1

Температурные режимы отдельных технологических процессов на этапе ОКР и серийного производства и достигнутые уровни стойкости.

№	Наименование операции	БМК серии 5507 в 2005 г. (этап ОКР)	БМК серии 5507 с 2012г. по 2015 г.	БМК серии 5503 с 2005г. по 2015 г.
Фотолитография 5		ПОДЛЕГИРОВАНИЕ КАНАЛА		
124	Окисление под затвор	900°C , HCl, 180 А	850°C , HCl, (180±25) А	1000°C , HCl, (325±25) А
126	Диффузия Р	900°C , 15-30 Ом/кв	850°C, $R_s = <30$ Ом/кв	950°C , $R_s = <30$ Ом/кв
Фотолитография 6		ПОЛИКРЕМНИЙ (SI*)		
146	Окисление поликремния	950°C , 10 мин, O_2	850°C , 15 мин, O_2	950°C , 10 мин, O_2
Фотолитография 7		Р+ СТОК-ИСТОК		
157	Отжиг	900°C , 30 мин, N_2	850°C , 30 мин, N_2	900°C , 30 мин, N_2

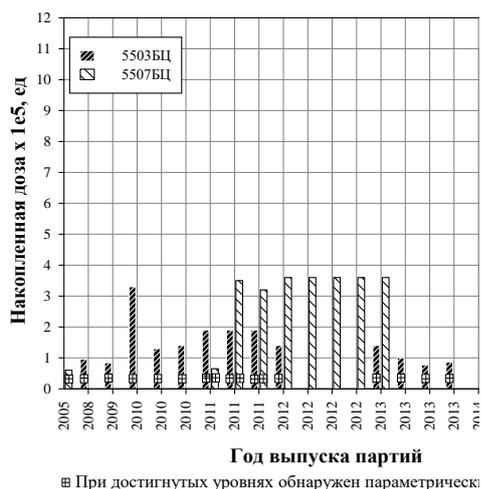


Рис. 1. Результаты испытаний ТОС микросхем БМК серий 5503БЦ и 5507БЦ на стойкость к накопленной дозе ионизирующего излучения

Сравнительные результаты испытаний ТОС на стойкость к воздействию мощности дозы для серий

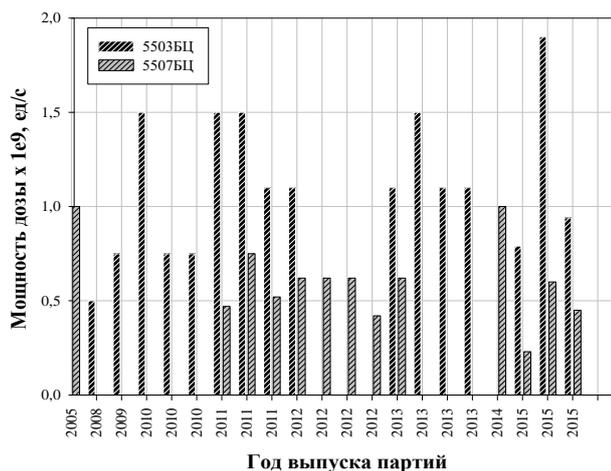


Рис. 2. Уровень бессбойной работы по эффектам мощности дозы ионизирующего излучения, для ТОС микросхем БМК серий 5503БЦ и 5507БЦ

5507БЦ и 5503БЦ за период с 2005 года по декабрь 2015 г. представлены на рис. 2.

Все испытанные партии микросхем соответствовали требованиям (ТУ) на БМК. Разбросы радиационной стойкости от партии к партии определялись неконтролируемыми изменениями технологического процесса при изготовлении партий микросхем.

Наличие несовершенств в полупроводниковых материалах, наличие дефектов, привнесенных технологическим процессом, сказывается на величине разброса электрофизических и электрических параметров кристаллов по пластине в пределах партии, что сказывается на стабильности показателей радиационной стойкости [9-10]. На рис. 3 показано распределение значений радиационной стойкости к накопленной дозе по пластине на разных партиях БМК серии 5503БЦ7.

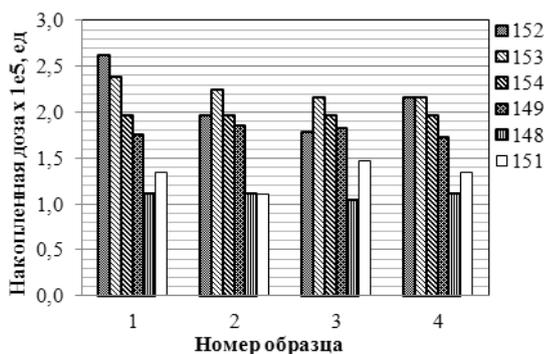


Рис. 3. Распределение значений радиационной стойкости к накопленной дозе по пластине на разных партиях серии 5503БЦ7

Разброс значений накопленной дозы по пластине в пределах партии составил от 0% до 19%.

ТОС размещались на отдельной пластине, поэтому разброс от пластины к пластине в производственной партии микросхем БМК оценить не удалось.

Такое размещение ТОС в партии приводит к снижению достоверности оценки стабильности показателей радиационной стойкости и может привести к неправильной оценке радиационной стойкости производственной партии в целом.

Достоверное подтверждение отсутствия влияния разброса электрофизических и электрических параметров кристаллов по пластине и от пластины к пластине в пределах партии на стабильность показателей радиационной стойкости возможно в случае, если:

- 1) ТОС размещены равномерно по поверхности пластины (например, в центре пластины и в каждом квадрате на расстоянии 2/3 радиуса от центра пластины).
- 2) ТОС размещены не на отдельной пластине, которая предназначена для проведения испытаний производственной партии на радиационную стойкость, а на тех же пластинах, на которых размещаются рабочие зашивки БМК.

Таким образом, состав типовых оценочных схем, применяемых для испытаний производственных партий микросхем БМК серий 5503БЦ и 5507БЦ, позволяет:

- 1) оценить стабильность показателей радиационной стойкости ТОС от партии к партии;
- 2) оценить радиационную стойкость ТОС в процессе изготовления;
- 3) оценить сохранность показателей стойкости ТОС при внесении контролируемых изменений в технологический процесс при производстве.

Однако радиационная стойкость ТОС не всегда достоверно отражает стойкость готового изделия – рабочей зашивки БМК.

На рис. 4 представлена структурная схема микросхемы 5503БЦ7У зашивка 337 [8].

Блоки этой зашивки включают в себя триггеры и регистры. В процессе испытаний, радиационная стойкость этой зашивки оценивалась с помощью описанной выше ТОС, содержащей простейший набор цепочек инверторов и простейших логических схем. Такой набор ТОС не позволяет оценить сбоеустойчивость рабочей зашивки к воздействию мощности дозы и тяжелых заряженных частиц.

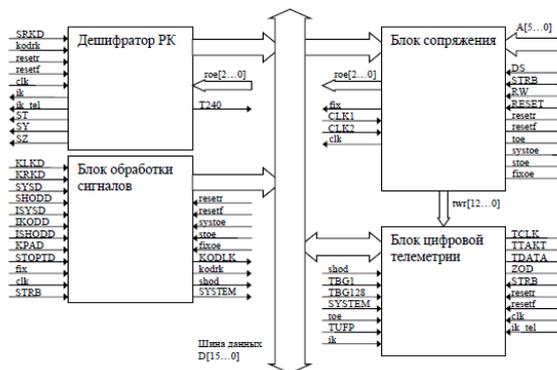


Рис. 4. Структурная схема рабочей зашивки микросхемы серии 5503 - 5503БЦ7 – 337. Назначение микросхемы – дешифратор регистров команд

Результаты определительных испытаний на радиационную стойкость для разных зашивок БМК серии 5503ХМ приведены в табл. 2. Видно, что состав зашивки БМК оказывает существенное влияние на радиационную стойкость микросхемы.

Таким образом, ТОС, предназначенные для процесса, ориентированного на изготовление радиационно-стойких микросхем, должны обеспечивать возможность оценки устойчивости всех использованных вариантов конструктивно-технологических решений к заданному минимальному уровню радиационных воздействий, при этом топология ТОС должна включать в себя все стандартные библиотечные элементы, использованные

при проектировании микросхем, выпускаемых в технологическом процессе [3].

Таблица 2

Влияние зашивки микросхем H5503XM5 на стойкость к накопленной дозе

Описание зашивки	Уровень стойкости к накопленной дозе ¹⁾ , ед.	Уровень бессбойной работы по эффектам мощности дозы, ед/с
Зашивка 240: кварцевый генератор; генераторы на основе RC цепочки	$1,2 \cdot 10^5$	$1,7 \cdot 10^8$
Зашивка 239: кварцевые генераторы на основе выходных инверторов; линии задержки; триггеры Шмидта	$1,1 \cdot 10^5$	$1,4 \cdot 10^8$
Зашивка 241: компаратор аналоговый быстродействующий; компаратор аналоговый малопотребляющий	$1,6 \cdot 10^5$ ²⁾	$1,4 \cdot 10^8$
Зашивка 242: генератор, управляемый напряжением; операционные усилители; периферийные элементы	$2,4 \cdot 10^5$	$9,3 \cdot 10^8$
Зашивка 120: декодер; блок преобразования информации; кодер; блоки синхронизации; блок управления; блок интерфейса	$1,2 \cdot 10^5$	$3,0 \cdot 10^9$

1) уровень, при котором был зафиксирован параметрический отказ по току потребления Iсс;

2) ток потребления Iсс не выходил за нормы ТЗ.

В целях достоверной оценки радиационной стойкости производственных партий в рамках испытаний по группе Е [1], требовалось разработать ТОС для изделий, изготовленных по КМОП технологии 1,6 мкм производства НПК «Технологический центр», учитывающую доминирующие радиационные эффекты.

Предлагается следующий рациональный (необходимый и достаточный) состав типовых оценочных схем для задач характеристики радиационной стойкости микросхем на основе БМК:

- 1) Тестовые логические схемы.
- 2) Тестовые элементы схем ввода/вывода (из состава ячеек ввода/вывода, I/O).
- 3) Тесты для исследования динамических параметров.

4) Различные варианты матриц памяти, счётчиков, регистров различных конфигураций, в случае наличия аналоговых блоков – с обязательным их включением (компаратор, операционный усилитель, а также цифро-аналоговый и аналого-цифровые блоки).

5) Типовые сложно-функциональные блоки (IP-блоки), в том числе аналоговые.

С учетом особенностей библиотеки элементов можно рекомендовать проводить контроль серий 5503БЦ и 5507БЦ на радиационную стойкость с помощью ТОС, состоящей из следующих элементов:

- 1) Кольцевые генераторы или линии задержки.
- 2) Блоки СОЗУ в различных конфигурациях (емкостью не менее 512 бит).
- 3) Тестовые схемы, использующие набор latch и flip-flop триггеров: обычные, со сбросом, с установкой, со сбросом и установкой, а также их инверсные и одно-выходные варианты.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Несмотря на то, что состав ТОС, в настоящее время применяемой для аттестации библиотеки ячеек и конструкции БМК серий 5507БЦ и 5503БЦ на радиационную стойкость, отвечает требованиям заполняемости элементами, невыполнение требований к сложности ТОС не позволяет информативно и достоверно оценить радиационную стойкость готового изделия.

Предложен рациональный состав ТОС для контроля производственных партий микросхем серии 5503БЦ и 5507БЦ, обеспечивающий необходимую информативность испытаний.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] ОСТ 11 0998-99. Микросхемы интегральные. Общие технические условия. Изд-во Минобороны, 1999.
- [2] ОСТ В 11 1010-2001. Микросхемы интегральные бескорпусные. Общие технические условия. Изд-во Минобороны, 1999.
- [3] ОСТ 11 0999-99. Обеспечение качества в процессе разработки. Требования к системе качества разработки. Изд-во Минобороны, 1999.
- [4] B.L. Gregory Process controls for radiation hardened aluminum gate bulk silicon CMOS // IEEE Trans, Nucl. Sci. 1975. NS-22(6), 2295.
- [5] W.R. Dawes, Jr., G.F. Dervenwick, and B.L. Gregory Process technology for radiation-hardened CMOS integrated circuits // IEEE J Solid-State Circuits. 1976. SC-11, 4.
- [6] A.Y. Nikiforov, P.K. Skorobogatov, A.N. Egorov, and D.V. Gromov Selection of optimal parameters of laser radiation for simulating ionization effects in silicon bulk-technology microcircuits // Russian Microelectronics. 2014. V. 43, № 2, P. 133-138.
- [7] A.V. Sogoyan, and V.A. Polunin Modeling of recombination in SiO₂ under the effect of ionizing radiation by the Monte Carlo method // Russian Microelectronics, 2011. V. 40, № 3, P. 176-184.

- [8] С.В. Гаврилов, А.Н.Денисов, В.В. Коняхин, Н.И. Малашевич, Р.А. Федоров Семейство серий базовых матричных // Известия высших учебных заведений. МИЭТ. 2015. №5. Том 20. С.497-504.
- [9] A.A. Chistilin, A.A. Romanov, Y.M. Moskovskaya, and A.V. Ulanova Influence of implantation of silicon and oxygen ions into a heteroepitaxial silicon layer on a sapphire substrate on the leakage currents of n-channel transistors of CMOS IC SOS technology // Russian Microelectronics, 2011.V. 40, №3, P. 209-214.
- [10] P.K. Skorobogatov, A.Y. Nikiforov, and A.N. Egorov Optimization of laser irradiation parameters for simulation of a transient radiation response in thin-film silicon-based microcircuits // Russian Microelectronics, 2015.V. 44, №. 1, P. 8-21.

Rational composition of typical grading system for ASIC's radiation hardness testing

Y.M. Moskovskaya^{1,2}, G.S. Sorokoumov¹, D.V. Bobrovskiy^{1,3}, A.Y. Nikiforov¹, A.V. Ulanova^{1,3}

A.N. Denisov², V.G. Snicar², A.A. Zhukov²

¹Specialized Electronic Systems (SPELS), Russia, ymmos@spels.ru

²SPC «Technological center», Russia

³National Research Nuclear University "MEPHI", Russia

Keywords — typical grading system, ASIC, radiation hardness

ABSTRACT

Current normative documents establish control of each production batch of wafers for resistance to special factors by the subgroup E. For VLSI on the basis of the base matrix crystals (BMC), production batches are carried out in the framework of the development and delivery of specific types of BIS.

In order to test a production batch of plates with chips on BMC, the test integrated circuit (IC) with the so-called "zero" lining used for the validation of the library elements and structures of BMC is applied. In fact, the test IC is the standard grading scheme for party plates.

For the radiation hardness, standard evaluation schemes must perform the following tasks:

1) Providing timely and reliable evaluation of radiation resistance of finished products in the manufacturing process of the chips on the basis of continuous and periodic monitoring of resistance factors of TOS.

2) Ensuring and monitoring the safety indices of resistance of products when making controlled changes in the technological process during production.

3) Confirm the lack of influence of variation of electrophysical and electric parameters of the crystals on the plate within the party, and also from batch to batch, on the stability of parameters of radiation resistance.

REFERENCES

- [1] OST 11 0998-99. Mikroskhemy integralnye. Obshchie tekhnicheskie usloviya. (in Russian).
- [2] OST V 11 1010-2001. Mikroskhemy integralnye beskorpusnye. Obshchie tekhnicheskie usloviya. (in Russian).
- [3] OST 11 0999-99. Obespechenie kachestva v processe razrabotki. Trebovaniya k sisteme kachestva razrabotki (in Russian).
- [4] B.L. Gregory Process controls for radiation hardened aluminum gate bulk silicon CMOS // IEEE Trans, Nucl. Sci. NS-22(6), 2295 (1975).
- [5] W.R.Dawes, Jr., G.F. Derbenwick, and B.L. Gregory, "Process technology for radiation- hardened CMOS integrated circuits.
- [6] A.Y. Nikiforov, P.K. Skorobogatov, A.N. Egorov, and D.V. Gromov Selection of optimal parameters of laser radiation for simulating ionization effects in silicon bulk-technology microcircuits // Russian Microelectronics, vol. 43, no. 2, pp. 133-138, 2014.
- [7] A.V. Sogoyan, and V.A. Polunin Modeling of recombination in SiO₂ under the effect of ionizing radiation by the Monte Carlo method // Russian Microelectronics. 2011. vol. 40, no. 3, pp. 176-184.
- [8] S.V. Gavrilov, A.N. Denisov, V.B. Konyahin, N.I. Malashevich, R.A. Fedorov. Semejstvo serij bazovykh matrichnykh kristallov // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. MIEHT. 2015. No. 5. Vol. 20. pp. 497-504 (in Russian).
- [9] A.A. Chistilin, A.A. Romanov, Y.M. Moskovskaya, and A.V. Ulanova Influence of implantation of silicon and oxygen ions into a heteroepitaxial silicon layer on a sapphire substrate on the leakage currents of n-channel transistors of CMOS IC SOS technology // Russian Microelectronics, 2011. V. 40, No. 3, P. 209-214.
- [10] P.K. Skorobogatov, A. Y. Nikiforov, and A.N. Egorov Optimization of laser irradiation parameters for simulation of a transient radiation response in thin-film silicon-based microcircuits // Russian Microelectronics, 2015. V. 44, No. 1, P. 8-21.