



СОСТАВ И ПРИНЦИП ФОРМИРОВАНИЯ ТИПОВОЙ ОЦЕНОЧНОЙ СХЕМЫ КАК ИМИТАТОРА БМК И ПОЛУЗАКАЗНЫХ БИС НА ИХ ОСНОВЕ ДЛЯ ЗАДАЧ РАДИАЦИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ

COMPOSITION AND PRINCIPLE OF FORMATION OF STANDARD EVALUATION CIRCUIT AS SIMULATOR OF GATE ARRAYS AND SEMICUSTOM VERY LARGE SCALE IC BASED ON THEM FOR RADIATION TESTS

УДК 621.382, ВАК 05.27.01, DOI:10.22184/1993-8578.2017.71.1.60.69

Ю.Московская^{1,2}, Р.Федоров¹, А.Денисов¹, Д.Бобровский^{2,3}, А.Уланова^{2,3}, А.Никифоров³
Yu.Moskovskaya^{1,2}, R.Fedorov¹, A.Denisov¹, D.Bobrovskiy^{2,3}, A.Ulanova^{2,3}, A.Nikiforov³

Проанализированы основные особенности и недостатки существующей системы обеспечения требований радиационной стойкости для полузаказных БИС на основе БМК путем разработки и испытаний типовой оценочной схемы (ТОС). Предложено включать в состав ТОС все базовые библиотечные элементы. Предлагается максимально унифицировать ТОС для задач характеристики БМК и контроля партий пластин, анализа особенностей контроля стабильности техпроцесса и оценки радиационной стойкости рабочих зашивок по результатам испытаний ТОС.

The paper analyzes the main features and shortcomings of the existing system for ensuring radiation resistance of very large scale ICs based on gate arrays through the development and testing of the standard evaluation circuit (SEC). It is proposed to include all of the basic library elements into the structure of SEC. It is also proposed to maximally unify the SEC for characterization of gate arrays and control of batches of wafers, analysis of features of control of technology stability and estimation of radiation resistance of the working firmware based on test results of SEC.

Базовые матричные кристаллы (БМК) представляют собой матрицу базовых элементов (как правило – КМОП-вентилей) со стандартной библиотекой базовых функциональных элементов, реализованных путем коммутации вентилей слоями металлизации и контактов. Полузаказные большие интегральные схемы (БИС) на основе БМК реализованы в виде так называемых "зашивок" путем внутренней коммутации базовых библиотечных элементов с использованием специализированного САПР. Данный подход по сравнению с созданием заказных

БИС позволяет существенно сократить сроки и стоимость проектирования и изготовления изделий, так как значительная часть работ переносится с этапа проектирования конкретной БИС на более ранний этап проектирования и аттестации БМК, а основные параметры приемки-поставки БИС отражены в ТУ на БМК и априори должны обеспечиваться ее технологией, конструкцией и правилами проектирования [1]. Такое решение особенно эффективно при широкой номенклатуре и малой тиражности комплектующих изделий, что характерно для

¹ НПК "Технологический центр" / SMC "Technological Centre".

² ЭНПО "Специализированные электронные системы" / ESPA "Specialized electronic systems".

³ Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ" / National research nuclear university "MEPhI".



бортовой аппаратуры космических и ядерных комплексов, которая эксплуатируется в жестких условиях и должна отвечать требованиям радиационной стойкости.

Общий методический подход к оценке радиационной стойкости БМК и полузаказных БИС на их основе представлен в [2].

Обеспечение требований радиационной стойкости для полузаказных БИС на основе БМК в сложившейся инженерной практике имеет ряд особенностей:

- уровни радиационной стойкости БИС определяются преимущественно конструктивно-технологическими параметрами БМК, при этом считается, что они "закладываются" в процессе разработки БМК, подтверждаются квалификационными испытаниями в ходе ОКР и гарантируются контролем партий пластин "базы" в соответствии с требованиями подгруппы "Е" "Общих технических условий на Микросхемы интегральные" (ОСТ В 11 0998, ОСТ В 11 1010);

Gate arrays (GA) are a matrix of basic elements (typically of CMOS gates) with a standard library of basic functional elements that are implemented by switching of gates by metallization layers and contacts. The semi-custom very large-scale integrated circuits (IC) based on GA are implemented by internally switching the underlying of library elements using specialized CAD software. This approach in comparison with creation of a custom IC allows to significantly reduce the time and cost of designing and manufacturing as a considerable part of works is transferred from a design stage of specific IC to an earlier stage of design and certifications of GA, and the key parameters of acceptance are specified in requirements to GA and shall be provided with its technology, design and design rules [1]. This solution is particularly effective in case of wide product range and small batches, which is typical for on-board equipment of space and nuclear complexes, which operated in harsh conditions and must meet the requirements of radiation resistance.

A common methodological approach to the evaluation of radiation resistance of GA and semi-custom IC based on them is presented in [2].

Ensuring the requirements of radiation resistance for

semi-custom IC on the basis of GA in the current engineering practice has a number of features:

- levels of radiation resistance of IC are determined primarily by design and technological parameters of GA, it is assumed that they are "laid" during developing of GA, confirmed by the qualification tests during R&D and guaranteed by the controlling of "base" wafers batch in accordance with the requirements of the subgroup "E" of OСТ В 11 0998 and OСТ В 11 1010;
- for confirmation of radiation resistance of GA the special test "lining" (so-called "zero") is developed, which compiles and simulates standard lining of GA for her certification and qualification, and in most cases – for control of wafers batch [3, 4]. Such test lining is a standard evaluation circuit (SEC) for GA;
- the SEC includes some simple (to facilitate monitoring of performance in tests) functional blocks on the basis of a standard library elements, while it is considered that all library elements of GA have the same or at least similar levels of radiation resistance;
- within the same batch (group of batches) of a "base" various working linings for semicustom ICs on GA can be produced, and it is assumed that the control of resistance of "base" according to "E"

subgroup (OСТ В 11 0998) guarantees a given level of resistance for all working linings realized on it, regardless of their functional complexity and fabrication time, therefore, there is no need to carry out radiation tests of working linings [3, 5].

The above approach to ensuring radiation resistance for ICs on GA has a number of disadvantages, which limit the accuracy and informativeness of test results of SEC and possibility of their unconditional use for the working linings:

- during the R&D of GA, as a rule, there are no data of comparative studies of radiation resistance of all the basic library elements of GA taking into account their possible mutual influence in a joint application;
- there is no clear separation according to the levels of radiation resistance of the digital, analog-to-digital (digital-to-analog) and analog basic library elements of GA, which even at proximity of design and technological implementation have a completely different systems of parameters-criteria of validity, and, therefore, different levels of radiation resistance;
- the structure of the test "zero" SEC lining, as a rule, does not contain all of the basic library elements and is formed using only a few types, which are selected



- для подтверждения радиационной стойкости БМК разрабатывают специальную тестовую "зашивку" (так называемую "нулевую"), которая обобщает и имитирует типовую зашивку БМК для ее аттестации и квалификации, а в большинстве случаев – и для контроля партий пластин [3, 4]. Такая тестовая зашивка является типовой оценочной схемой (ТОС) для БМК;
 - в состав ТОС входит несколько несложных (с целью упрощения контроля работоспособности при испытаниях) функциональных блоков на основе стандартных библиотечных элементов, при этом принято считать, что все библиотечные элементы БМК имеют одинаковые или, по крайней мере, близкие уровни радиационной стойкости;
 - в рамках одной производственной партии (группы партий) "базы" могут быть изготовлены различные рабочие зашивки полузаказных БИС на БМК, при этом считается, что проведенный контроль стойкости "базы" по подгруппе "Е" (ОСТ В 11 0998) гарантирует заданный уровень стойкости всех реализованных на ней рабочих зашивок, независимо от их функциональной сложности и сроков изготовления, поэтому проводить радиационные испытания рабочих зашивок нет необходимости [3, 5].
- Представленный выше подход к обеспечению радиационной стойкости БИС на БМК имеет ряд существенных недостатков, которые ограничивают достоверность и информативность результатов испытаний ТОС и возможность их безусловного распространения на рабочие зашивки:
- в ходе ОКР по созданию БМК, как правило, отсутствуют данные сравнительных исследований радиационной стойкости всех базовых библиотечных элементов БМК с учетом их возможного взаимного влияния при совместном применении;
 - отсутствует четкое разделение по уровням радиационной стойкости цифровых, аналого-цифровых (цифро-аналоговых) и аналоговых базовых библиотечных элементов БМК, которые даже при близости конструктивно-технологической реализации имеют совершенно разные системы параметров-критериев годности, и, следовательно, разные уровни радиационной стойкости;
 - состав тестовой "нулевой" зашивки ТОС, как правило, не содержит все базовые библиотечные элементы и сформирован лишь из нескольких их типов, отобранных, в основном, по критерию простоты и оперативности измерений [4];
 - в результате радиационных испытаний выявлено различие уровней радиационной стойкости как между разными рабочими зашивками БМК, так и между рабочими зашивками и ТОС, хотя полноценный статистический анализ значимости этих различий до настоящего времени не выполнен;
 - принятый подход к оценке стабильности показателей стойкости на основе контроля партий пластин недостаточно эффективен при эпизодическом изготовлении больших партий (групп партий) пластин с последующей длительной (не ограниченной по времени) реализацией на их основе широкой номенклатуры рабочих зашивок – заказных БИС.

generally by the criterion of simplicity and efficiency of measurements [4];

- as a result of radiation test, the differences of the levels of radiation resistance both between different working linings of GA, and between working linings and SEC are revealed, although a full statistical analysis of the significance of these differences isn't made so far;
- the accepted approach to assessing the stability of parameters of resistance on the basis of the control of the batches of the wafers is not effective enough for occasional production of large batches

of the wafers with subsequent long-term (not time-limited) realization on their basis of a wide range of working linings, a custom ICs.

In view of the foregoing, at the request of customers, in the most critical cases the qualification radiation testing of each working lining of GA is carried out with the control of all important for the functioning of the product parameters-criteria of validity, in all informative modes and conditions of operation, which ensures unconditional compliance of its radiation resistance level with the specified requirements. This radical approach definitely reduces

the risks of the consumer, but significantly increases the cost of small batches of products, which reduces technical and economic performance and overall competitiveness.

The objectives of the present work are the study of the criteria for the choice of a method of assessment of radiation resistance of semicustom circuits on GA (according to test results of SEC or working linings), as well as development of requirements for structure, principle of formation and testing procedure of SEC to ensure rational combination of the reliability and informativeness of the obtained forecast of the level of resistance of working



С учетом изложенного, по требованию потребителей в наиболее ответственных случаях проводят квалификационные радиационные испытания каждой рабочей зашивки БМК с контролем всех значимых для функционирования изделия параметров-критериев годности во всех информативных режимах и условиях работы, что гарантирует безусловное соответствие ее уровня радиационной стойкости заданным требованиям. Этот радикальный подход, безусловно, уменьшает риски потребителя, но существенно увеличивает стоимость малых партий изделий, что снижает технико-экономические показатели и в целом конкурентоспособность продукции.

Целями настоящей работы является обоснование критериев для выбора способа оценки радиационной стойкости полузаказных схем на БМК (по результатам испытаний ТОС или рабочих зашивок), а также разработка требований к составу, принципу формирования и порядку испытаний ТОС с целью обеспечения рационального сочетания достоверности и информативности полученного прогноза уровня стойкости рабочих зашивок при снижении затрат на испытания.

Рациональный состав и характеристики ТОС определяются используемым элементно-технологическим базисом и уровнем функциональной сложности создаваемых на его основе изделий.

Типовая оценочная схема должна удовлетворять следующим требованиям (с учетом положений ОСТ 11 0999-99):

- количество вентиляей на кристалле ТОС должно быть не менее половины максимального числа вентиляей на кристаллах полузаказных БИС на основе БМК;
- в состав ТОС должны входить все стандартные библиотечные элементы, использованные при проектировании полузаказных БИС на основе БМК. Возможно объединение библиотечных элементов близкого назначения (функциональных классов) в функциональные блоки;
- архитектура ТОС должна обеспечивать возможность диагностирования отказов всех функциональных классов библиотечных элементов, а в идеале – каждого их типа;
- конструктивно-технические решения ТОС должны соответствовать базовым значениям проектных норм для полузаказных БИС на основе БМК;
- состав и структура ТОС должны быть максимально унифицированы для решения всех задач оценки радиационной стойкости в ходе квалификационных испытаний БМК, а также для контроля партий пластин и мониторинга процесса их изготовления;
- электрические режимы при испытаниях ТОС должны быть установлены, исходя из соображений наихудших сочетаний проектных норм и нагрузок на применяемые элементы;
- для изготовления ТОС следует использовать стандартные (аттестованные) материалы, технологические системы и корпуса (при необходимости). ТОС для оценки радиационной стойкости БМК должна обеспечивать возможность определения (кон-

linings while reducing the cost of testing.

Rational structure and features of SEC are defined by used element-technological basis and the level of functional complexity of created on its basis products.

The standard evaluation circuit must meet the following requirements (according to OСТ 11 0999-99):

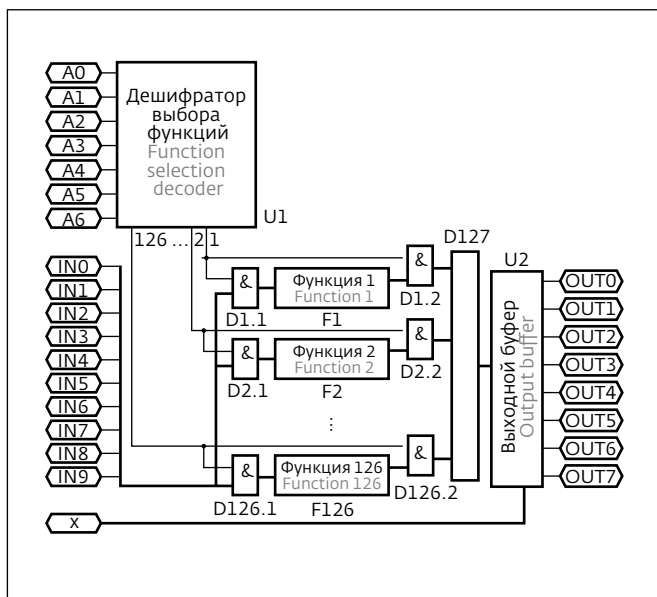
- the number of gates on a SEC chip must be at least half the maximum number of gates on a chips semicustom IC based on GA;
- structure of SEC should include all the standard library elements used in the design of semicustom IC based on GA. The

association of library elements of similar assignment (functional classes) in the functional blocks is possible;

- architecture of SEC should provide the possibility of diagnosing failures in all functional classes of library elements (ideally, each type);
- design and technical solutions of SEC must comply with the basic values of design rules for semicustom IC based on GA;
- the structure of the SEC must be uniform for all tasks of evaluation of radiation resistance during qualification tests of GA, and also for control of wafers batches

and monitor the process of their manufacture;

- electric modes at the testing of SEC shall be established based on considerations of the worst combinations of design standards and loads of construction elements;
- for manufacturing of the SEC it is necessary to use the standard (certified) materials, technology systems, and cases (if necessary). SEC for the evaluation of radiation resistance of GA should provide the possibility to determine (control) the following parameters [6-10]:
- the degree of degradation of characteristics under the impact of



Типовая структура ТОС

Typical structure of SEC

троля) по результатам испытаний следующих параметров [6-10]:

- степень деградации характеристик в условиях воздействия накопленной дозы ионизирующего излучения (ИИ) с особым вниманием радиационно-индуцированным утечкам по питанию;
- пороги возникновения катастрофических отказов (КО) и тиристорного эффекта (ТЭ) при воздействиях импульсного ИИ и отдельных ядерных частиц (ОЯЧ);

accumulated dose of ionizing radiation with special attention to radiation-induced leakage in power supply;

- thresholds of occurrence of catastrophic failures and latch-up under the influence of pulse ionizing radiation and individual nuclear particles;
- the nature of the response of parameters, malfunction-free operation level and time of loss of operability in the conditions of pulse ionizing radiation;
- sensitivity to single effects (including crashes) under the influence of individual nuclear particles - heavy charged

particles, high energy protons and single neutrons;

- the degree of degradation of parameters in conditions of radiation-induced structural damages from the influence of neutrons and protons (for bipolar elements of GA).

The main problem in the development of the SEC is to provide depth diagnostics of the types and mechanisms of failure of different library elements at the limited number of outputs in the package of SEC. To construct rational SEC it is recommended to combine library elements with close functional purposes into the functional

- характер откликов параметров, значения уровня бессбойной работы и времени потери работоспособности в условиях импульсного воздействия ИИ;
- чувствительность к одиночным эффектам (в том числе сбоям) при воздействии ОЯЧ - тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ), высокоэнергетических протонов (ВЭП), а также одиночных нейтронов;
- степень деградации параметров в условиях радиационно-индуцированных структурных повреждений от воздействия нейтронов и протонов (для биполярных элементов БМК).

Основной проблемой при разработке ТОС является обеспечиваемая глубина диагностики видов и механизмов отказов библиотечных элементов в условиях разнообразия их номенклатуры и ограниченности числа выводов корпуса ТОС. При построении рациональной ТОС рекомендуется объединять библиотечные элементы близкого функционального назначения в функциональные блоки с дешифрацией доступа и буферированием выходной информации (см. рисунок).

Трудности усугубляются наличием в составе библиотек современных БМК аналого-цифровых (цифро-аналоговых) и аналоговых элементов, к которым желательно по возможности обеспечить доступ, минуя цифровые буферные элементы или минимизируя влияние последних.

В целях получения достоверной оценки, состав ТОС для характеристики радиационной стойкости микросхем на основе БМК (по доминирующим

blocks with the decoding of access and buffering of output information (Fig.).

Difficulties are compounded by the presence in the libraries of modern GA of analog-to-digital (digital-to-analog) and analog elements, to which it is desirable to provide access, bypassing the digital buffer elements or minimizing the impact of the latter.

In order to obtain reliable estimates, the structure of the SEC for the characterization of radiation resistance of microchips based on GA (at the dominant radiation effects) should contain the following functional units:



Информативный набор параметров-критериев годности цифровых и аналоговых узлов ТОС для оценки радиационной стойкости БМК НПК "Технологический центр"

Informative set of parameters of validity of digital and analog components of SEC for evaluation of radiation resistance of gate arrays developed by SMC "Technological Centre"

Параметр Parameter	Цифровые функциональные узлы Digital functional units	Аналоговые функциональные узлы Analog functional units	
		Операционный усилитель Operational amplifier	Интегральный компаратор Integral comparator
Ток потребления Current consumption	+	+	+
Порог срабатывания Operating threshold	-	-	+
Входной ток Input current	+	+	+
Входной ток смещения Input offset current	-	+	+
Разность входных токов Difference of input currents	-	+	+
Максимальный выходной ток Maximum output current	-	+	+
Выходная мощность Output power	-	+	-
Напряжение смещения нуля Bias voltage of zero	-	+	+
Выходное напряжение Output voltage	+	-	+
Размах выходного напряжения Output voltage swing	-	+	+
Нестабильность по напряжению Instability of voltage	-	-	+
Нестабильность по току Instability of current	-	-	+
Коэффициент усиления Gain	-	+	+
Динамический диапазон Dynamic range	-	+	+
Шумовые параметры Noise parameters	-	+	-
Время распространения сигнала Propagation time of signal	-	-	+
Время срабатывания (переключения) Response time (switching time)	-	-	+
Верхняя граничная частота Upper frequency limit	+	+	-
Время нарастания выходного сигнала Rise time of output signal	-	+	-



радиационным эффектам) должен содержать следующие функциональные узлы:

- базовые цифровые элементы (комбинационные и последовательностные) логики, дешифраторов, мультиплексоров, АЛУ, триггеров, регистров, счетчиков;
- ячейки ввода-вывода;
- матрицы памяти;
- аналоговые, аналого-цифровые (цифро-аналоговые) элементы;
- библиотечные макроэлементы и IP-блоки.

В ходе разработки ТОС необходимо убедиться в функциональной значимости каждого библиотечного элемента и узла, то есть в том, что радиационный отказ любого библиотечного элемента при испытаниях проявится (будет выявлен) вследствие отказа соответствующего функционального блока или ТОС в целом.

Считаем целесообразным, кроме набора типовых функциональных блоков на основе библиотечных элементов близкого назначения, включить в состав ТОС один или несколько функциональных узлов с максимально-возможными уровнями функциональной сложности и быстродействия, которые обеспечиваются данным БМК и характеризуют его предельные возможности.

С целью корректной оценки уровня радиационной стойкости изделий необходимо выбирать информативные параметры-критерии годности (ПКГ), которые отражают основные функциональные особенности изделия и изменяются вследствие радиационного воздействия. При этом следует учитывать, что

если состав ПКГ цифровых узлов БМК довольно ограничен (функциональный контроль, уровни логических нуля и единицы, ток потребления, входной ток), то для аналоговых узлов БМК состав ПКГ весьма разнообразен (см. таблицу) [11-14].

В ходе производства БИС на БМК нормативные документы (ОСТ 11 0998) требуют проводить контроль производственных партий пластин-полуфабрикатов "базы". Радиационные испытания ТОС на этапе контроля производственных партий пластин должны решать следующие задачи:

- обеспечение и контроль сохранности показателей стойкости БМК при внесении контролируемых изменений в производственный процесс, в том числе 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;
- обеспечение оперативной и достоверной оценки радиационной стойкости готовых изделий (рабочих зашивок) в процессе изготовления микросхем на основе непрерывного и периодического контроля показателей стойкости ТОС [4].

ТОС, предназначенные для контроля технологического процесса изготовления пластин в части радиационной стойкости, должны обеспечивать возможность оценки устойчивости всех использованных вариантов конструктивно-технологических решений к заданному минимальному уровню радиационных воздействий, при этом топология ТОС должна

- basic digital elements (combinational and serial) of logic, decoders, multiplexers, ALU, triggers, registers, counters;
- input/output cells;
- memory matrix;
- analog, analog-to-digital (digital-to-analog) elements;
- library macroelements and IP blocks.

During the development of SEC it is necessary to verify the functional significance of each of the library elements and node, that is, that the radiation failure of any library element during the test leads to the failure of a functional unit or SEC in general.

We consider it appropriate, in addition to a set of standard functional blocks on the basis of library elements of similar functionality, to include in the structure of SEC one or more functional units with the highest possible levels of functional complexity and performance, which are provided by this GA and characterize its limiting capabilities.

With the aim of correctly assessing the level of radiation resistance of products it is necessary to choose informative parameters of validity, which reflect the main functional features of the product and changes due to radiation exposure.

At the same time it is necessary to consider that if the range of parameters of digital components of GA is rather limited (functional control, the levels of logic zero and one, current consumption, input current), then for analog components it is very wide (table). [11-14].

During the production of IC on GA the regulatory documents (OCT 11 0998) require to control production batches of wafers for "base". Radiation testing of the SEC at the stage of control of a production batches of wafers should meet the following objectives:

- Ensuring and monitoring the safety of resistance factors of GA



включать в себя все стандартные библиотечные элементы, использованные при проектировании микросхем, выпускаемых в данном технологическом процессе. В целом, на наш взгляд, следует обеспечить максимальную унификацию ТОС для характеристики БМК и для контроля партий пластин.

Следует отметить, что задача оценки (гарантирования) радиационной стойкости полузаказных БИС на БМК по существу допускает контроль в ходе радиационных испытаний лишь той части библиотечных элементов и блоков в составе ТОС, которые используются в рабочей зашивке, поэтому фактически определенный уровень стойкости может быть существенно выше указанного в ТУ на БМК, например, если рабочая зашивка не включает аналоговые элементы. Однако на практике такое сокращение состава контролируемых функциональных блоков крайне нежелательно, так как ограниченность "урезанного" набора данных по результатам радиационных испытаний ТОС не позволит обеспечить информативный контроль технологического процесса и стабильности уровня радиационной стойкости по результатам статистического анализа и регулирования. Поэтому следует проводить полноценные радиационные испытания ТОС в ходе контроля партий пластин, а для оценки фактического уровня стойкости рабочих зашивок использовать лишь те данные испытаний, которые относятся к библиотечным элементам, задействованным в рабочей зашивке. Если испытания ТОС показали отсутствие запаса

по уровню стойкости конкретной рабочей зашивки относительно типового уровня стойкости БМК, указанного в ТУ, то для обеспечения гарантий потребителям считаем целесообразным проводить контрольные радиационные испытания рабочих зашивок.

В завершение отметим, что с целью гарантирования уровня радиационной стойкости рабочих зашивок БМК, изготавливаемых на общей "базе" в течение длительного времени, целесообразно включать радиационные испытания ТОС в состав периодических испытаний, что предусмотрено предположениями по развитию ОТУ на микросхемы интегральные.

ВЫВОДЫ

В результате анализа сложившейся инженерной практики установлены основные особенности обеспечения требований радиационной стойкости для полузаказных БИС на основе БМК путем разработки и испытаний типовой оценочной схемы – имитатора БИС. Проанализированы связанные с принятым подходом недостатки, ограничивающие достоверность и информативность результатов испытаний ТОС и возможность их безусловного распространения на рабочие зашивки:

- отсутствие в составе ТОС всех базовых библиотечных элементов БМК;
- отсутствие в составе ТОС возможностей отдельно определить уровни радиационной стойкости цифровых, аналого-цифровых (цифро-аналоговых)

during controlled changes in the production process, including confirmation of the absence of the influence of the variation of electro-physical and electrical parameters of a chips on a wafer within a batch, and also from batch to batch, on the stability of parameters of radiation resistance;

- Ensuring prompt and accurate evaluation of radiation resistance of finished products (working linings) in the process of manufacturing of chips on the basis of continuous and periodical monitoring of resistance factors of SEC [4].

SEC, intended for control of process of manufacturing of wafers in the part of radiation resistance, should provide the possibility of assessing the sustainability of all used variants of constructive-technological solutions to a given minimum level of radiation exposure, at the same time the topology of the SEC should include all the standard library elements used in the design of the chips, which are produced in this process. In general, in our opinion, it is necessary to provide the maximum unification of SEC for characterization of GA and for control of batches of wafers.

It should be noted that the objective of the evaluation (assurance) of radiation resistance of IC on GA basically allows the monitoring during a radiation test of only that part of the library elements and blocks in the SEC, which are used in the working lining, so a level of resistance can be significantly higher than specified, for example, if the lining does not include analog elements. In practice, however, such a reduction of the range of controlled functional units is highly undesirable, as the limitations of the "cut-down" set of data will not allow to provide reliable control



и аналоговых базовых библиотечных элементов БМК с учетом их систем ПКГ;

- отсутствие достоверной статистической информации о соотношении уровней радиационной стойкости различных рабочих зашивок БМК, а также рабочих зашивок и ТОС;
- неэффективность контроля при эпизодическом изготовлении больших партий (групп партий) пластин с последующей длительной (не ограниченной по времени) реализацией на их основе широкой номенклатуры рабочих зашивок – заказных БИС.

Предложены принцип формирования и состав ТОС для оценки контроля радиационной стойкости БМК и полузаказных БИС на их основе, позволяющие преодолеть отмеченные недостатки. В состав ТОС предлагается включать все базовые библиотечные элементы. С целью обеспечения необходимой глубины диагностики видов и механизмов отказов широкой номенклатуры библиотечных элементов в условиях ограниченности числа выводов корпуса при построении рациональной ТОС рекомендуется объединять библиотечные элементы близкого функционального назначения в функциональные блоки с дешифрацией доступа и буферированием выходной информации.

Предлагается максимально унифицировать ТОС для задач характеристики БМК и контроля партий пластин, анализа особенностей контроля стабильности техпроцесса и оценки радиационной стойкости рабочих зашивок по результатам испытаний ТОС.

Если испытания ТОС показали отсутствие запаса по уровню стойкости конкретной рабочей зашивки относительно типового уровня стойкости БМК, указанного в ТУ, то для обеспечения гарантий потребителям рекомендовано проводить контрольные радиационные испытания рабочих зашивок.

Статья подготовлена при финансовой поддержке Минобрнауки России. Уникальный идентификатор ПНИЭР RFMEFI58015X0005.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гаврилов С.В., Денисов А.Н., Коняхин В.В., Малашевич Н.И., Федоров Р.А. Семейство серий базовых матричных // Известия высших учебных заведений. МИЭТ. 2015. Т. 20. №5. С. 497–504.
2. Московская Ю.М. Общий методический подход к оценке радиационной стойкости базовых матричных кристаллов и полузаказных БИС на их основе // Наноиндустрия. 2017. № 1(71). С. 50–59.
3. Денисов А.Н., Коняхин В.В. Семейство серий БМК НПК "Технологический центр" // Сб. докладов Международной конференции "Микроэлектроника-2015. Интегральные схемы и микроэлектронные модули: проектирование, производство и применение" / г. Алушта, Крым, 28 сентября – 3 октября 2015 г. – М.: ТЕХНОСФЕРА, 2016. С. 192–195.
4. Московская Ю.М., Сорокоумов Г.С., Бобровский Д.В., Никифоров А.Ю., Уланова А.В., Денисов А.Н., Сницар В.Г., Жуков А.А. Рациональный состав типовой оценочной схемы для

of technological process and stability of radiation resistance level according to the results of the statistical analysis and regulation. Therefore it is necessary to carry out a comprehensive radiation testing of SEC in the process of control of batches of wafers, and to use for assessment of the actual level of resistance of worked lining only those test data that are related to library elements involved in the working lining. If the testing of SEC showed no reserve by the level of resistance of the particular working lining regarding the specified level of resistance of GA, then

for providing guarantees to consumers it is expedient to carry out radiation tests of working linings.

In conclusion, we will note that to guarantee the level of radiation resistance of working linings of GA that are manufactured on a common "base" for a long time, it is advisable to include the radiation tests of SEC in periodic testing that is provided by assumptions on development of OTV.

INSIGHTS

As a result of the analysis of the current engineering practice the basic features of providing the requirements of radiation

resistance for IC on GA by developing and testing of standard evaluation circuit that simulates IC are defined. The shortcomings that limit the accuracy and informativeness of test results of SEC and a possibility of their unconditional use for the working linings are analysed:

- absence in structure of SEC of all basic library elements of GA;
- absence in structure of SEC of possibilities to separately determine the levels of radiation resistance of the digital, analog-to-digital (digital-to-analog) and analog basic library elements of GA with regard to their controlled parameters;

- контроля радиационной стойкости партий пластин базовых матричных кристаллов // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем - 2016 : Сб.тр. / Под общ. ред. акад. А.Л.Стемпковского. - М.: ИППМ, 2016. Ч. IV. С. 153-157.
5. Микросхемы для аппаратуры космического назначения : Практ. пос. / Под общ. ред. А.Н. Саурова. - М.: ТЕХНОСФЕРА, 2016. 388 с.
 6. **Belykov V.V., Pershenkov V.S., Zebrev G.I., Sogoyan A.V., Chumakov A.I., Nikiforov A.Y., Skorobogatov P.K.** Methods for the prediction of total-dose effects on modern integrated semiconductor devices in space: a review // Russian Microelectronics. 2003. Vol. 32. No. 1. P. 25-38.
 7. **Belykov V.V., Chumakov A.I., Nikiforov A.Y., Pershenkov V.S., Skorobogatov P.K., Sogoyan A.V.** Prediction of local and global ionization effects on ICs: The synergy between numerical and physical simulation // Russian Microelectronics. 2003. Vol. 32. No. 2. P. 105-118.
 8. **Калашников О.А., Уланова А.В.** Радиационные эффекты в цифровых микросхемах. Доминирующие радиационные эффекты в элементах ИС. Радиационная стойкость изделий ЭКБ : Научн. изд. / Под ред. А.И. Чумакова. - М.: НИЯУ "МИФИ", 2015. С. 315-360.
 9. **Loskutov I.O., Karakozov A.B., Nekrasov P.V., Nikiforov A.Y.** Automated radiation test setup for functional and parametrical control of 8-bit microcontrollers. International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON 2015), Omsk, Russian Federation, May 21-23, 2015. Article number 7147128.
 10. **Boruzdina A.B., Ulanova A.V., Grigor'ev N.G., Nikiforov A.Y.** Radiation-induced degradation in the dynamic parameters of memory chips // Russian Microelectronics. 2012. Vol. 41. No. 4. P. 259-265.
 11. **Бойченко Д.В., Кессаринский Л.Н., Давыдов Г.Г.** Радиационные эффекты космического пространства в аналоговых ИС. Радиационная стойкость изделий ЭКБ : Научн. изд. / Под ред. А.И. Чумакова. - М.: НИЯУ "МИФИ", 2015. С. 370.
 12. **Shvetsov-Shilovskiy I.I., Nekrasov P.V., Ulanova A.V., Nikiforov A.Y.** Advanced system for CMOS SOI test structures measurements. 2016 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON 2016), Moscow, Russian Federation, May 12-14, 2016. Article number 7491817.
 13. **Kalashnikov O.A., Nekrasov P.V., Nikiforov A.Y., Telets V.A., Chukov G.V., Elesin V.V.** System-on-chip: Specifics of radiation behavior and estimation of radiation hardness // Russian Microelectronics. 2016. Vol. 45. No. 1. P. 33-40.
 14. **Boychenko D.V., Kalashnikov O.A., Karakozov A.B., Nikiforov A.Y.** Rational methodological approach to evaluation of dose resistance of CMOS microcircuits with respect to low intensity effects // Russian Microelectronics. 2015. Vol. 44. No. 1. P. 1-7.

- lack of reliable statistical information about the ratio of the levels of radiation resistance of various working linings of GA and also of working linings and SEC;

- ineffective control at occasional production of large batches (groups of batches) of the wafers with subsequent long-term (not time-limited) realization on their basis of a wide range of working linings (custom ICs).

The principle of formation and structure of SEC to assess the control of radiation resistance of GA and semicustom ICs based on them allowing to overcome

the above mentioned disadvantages are proposed. It is proposed to include in structure of SEC of all basic library elements. To ensure the required depth of diagnostics of the types and mechanisms of failures of a wide range of library elements in terms of a limited number of outputs in the package, it is recommended to combine library elements with similar functionality into functional blocks with the decoding of access and buffering of output information.

It is offered to unify the SEC as much as possible for characterization of GA, control of batches of

wafers, analysis of features of control of stability of technology and estimation of radiation resistance of working linings using results of tests of SEC.

If the testing of SEC showed no reserve by the level of resistance of the particular working lining regarding the specified level of resistance of GA, then for providing guarantees to consumers it is expedient to carry out radiation tests of working linings. ■

This paper was created with the financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation. Unique identifier RFMEFI58015X0005.