



ОБЩИЙ МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ БМК И ПОЛУЗАКАЗНЫХ БИС НА ИХ ОСНОВЕ

COMMON METHODOLOGICAL APPROACH TO EVALUATION OF RADIATION RESISTANCE OF GATE ARRAYS AND SEMICUSTOM VERY LARGE SCALE IC BASED ON THEM

УДК 621.382, ВАК 05.27.01, DOI:10.22184/1993-8578.2017.71.1.50.5

Ю.Московская^{1,2,3} / Y.Moskovskaya@tcen.ru
Yu.Moskovskaya^{1,2,3}

Разработан и обоснован общий методический подход к оценке радиационной стойкости БМК и полузаказных БИС на их основе. Проанализированы основные особенности БИС на БМК в части задач обеспечения и оценки их радиационной стойкости, обобщены доминирующие радиационные эффекты в БИС на БМК. Представлены основные элементы общей методики оценки радиационной стойкости БМК и полузаказных БИС на их основе, описан порядок выбора объектов испытаний, рассмотрено испытательное оборудование, отмечены особенности дозиметрического сопровождения. Отмечены содержание и основные этапы работ по оценке радиационной стойкости БИС на БМК на этапах проектирования и изготовления.

The common methodological approach to the evaluation of radiation resistance of gate arrays and semicustom very large scale ICs based on them is developed and substantiated. The main features of very large scale ICs based on the gate arrays in relation to the objectives of ensuring and evaluation of their radiation resistance are analyzed, the dominant radiation effects in very large scale ICs are summarized. The main elements of a common methodology for the evaluation of radiation resistance of gate arrays and semicustom very large scale ICs based on them are presented, the order of the choice of test items, the test equipment and the peculiarities of dosimetric support are described. The contents and milestones for the evaluation of radiation resistance of very large scale ICs based on the gate arrays at the stages of design and manufacture are considered.

Базовые матричные кристаллы (БМК) представляют собой универсальные кристаллы-заготовки, расположенные на полупроводниковой пластине. Базовые элементы (КМОП) располагаются на кристалле в узлах прямоугольной матрицы. При изготовлении рабочих микросхем используют единый набор фотошаблонов для всех структурных элементов, за исключением слоев коммутации. Изготовление конкретной БИС на БМК осуществляется путем

коммутации КМОП-транзисторов с помощью однослойной или многослойной разводки.

Основным преимуществом полузаказных БИС на БМК по сравнению с эквивалентными заказными микросхемами является значительное сокращение сроков проектирования и изготовления изделий, прежде всего за счет использования специализированных САПР и относительно малого числа дополнительных технологических операций, обеспечиваю-

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".



щих реализацию конкретной микросхемы на готовой полупроводниковой "базе".

БИС на БМК характеризуются следующими особенностями:

- фиксированной геометрической структурой полупроводниковых областей, существенно упрощающей автоматическое размещение и трассировку элементов;
- малым числом дополнительных фотошаблонов, значительно сокращающим затраты при производстве БИС;
- развитой библиотекой логических элементов и типовых схемотехнических решений, что заметно упрощает процесс разработки логического

проекта, уменьшает время и повышает качество проектирования;

- наличием в составе некоторых БМК как цифровых, так и цифро-аналоговых и аналоговых элементов.

Применение полузаказных БИС на БМК в аппаратуре космических и ядерных комплексов требует обеспечения и оценки радиационной стойкости изделий в ходе их проектирования и изготовления. Оценка радиационной стойкости БИС основана на рациональном (необходимом и достаточном) объеме испытаний с обеспечением необходимой информативности путем учета доминирующих радиационных эффектов, а

Gate arrays (GA) are a work-pieces of chips located on a semiconductor wafer. The basic elements (CMOS) are arranged on the chip at the nodes of a rectangular matrix. In the production of ICs the single set of photomasks for all structural elements, except for switching layers, is used. The manufacturing of a specific IC on GA is carried out by switching of CMOS transistors using the single layer or multi-layer wiring.

The main advantage of semicustom ICs on GA compared to equivalent custom-made circuits is the significant reduction of time of designing and manufacture, primarily through the use of specialized CAD and the relatively small number of additional operations that ensure the implementation of the specific chips on the prepared semiconductor base.

IC on GA have the following features:

- fixed geometric structure of semiconductor areas, which significantly simplifies the automatic placement and routing of elements;
- small number of additional masks, significantly reducing costs in the production of ICs;
- large library of logic elements and typical circuit designs,

which significantly simplifies the process of the development of logical project, reduces time and improves design quality;

- presence in the design of some GA of digital, digital-to-analog and analog elements.

The use of IC on GA in equipment for space and nuclear facilities requires the provision and evaluation of radiation resistance of products during their design and manufacture. Evaluation of radiation resistance of ICs is based on a rational (necessary and sufficient) amount of tests with obtaining of a needed information by taking into account the dominant radiation effects, and parameters-criteria of validity, modes and conditions of operation of ICs.

DOMINANT RADIATION EFFECTS IN GA AND SEMICUSTOM IC ON THEIR BASIS

In GA and semicustom ICs on their basis the following types of radiation effects are dominated:

- dose ionization effects at influences of gamma particles, electrons and protons;
- ionization effects of dose rate at influence of gamma-ray pulse;
- effects of structural damages at influence of neutrons and protons;

- local ionization effects at influence of individual nuclear particles.

In ICs implemented using nanoscale CMOS processes, in case of dose ionizing radiation [1-4] the appearance of radiation-induced current leakages in the power supply circuit due to the accumulation of charges in thick insulating oxide, the shifts of threshold voltages of the MOSFETs (this effect is less significant for modern chips), the degradation of slope (mobility) and subthreshold swing of the transfer characteristic are observed. Thus, with the decreasing design rule a dominant mechanism of degradation of the CMOS elements are radiation-induced leakage currents.

The characteristic feature of bulk CMOS technologies is the presence of two components of radiation-induced leakage current - inter-transistor and inside-transistor due to thick dielectric layers (usually, Shallow-Tranch-Isolation). Under impulse influences, the ionization effects of dose rate occur including latch-up, catastrophic failure, the voltage drop in the power supply circuit due to leakage of high-power pulsed radiation-induced currents.

CMOS structures have low sensitivity to the effects of structural



также параметров-критериев годности, режимов и условий работы БИС.

ДОМИНИРУЮЩИЕ РАДИАЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ В БМК И ПОЛУЗАКАЗНЫХ БИС НА ИХ ОСНОВЕ

В БМК и полужаказных БИС на их основе доминируют следующие виды радиационных эффектов:

- дозовые ионизационные эффекты при воздействиях гамма-частиц, электронов и протонов;
- ионизационные эффекты мощности дозы при воздействии гамма-импульса;
- эффекты структурных повреждений при воздействии нейтронов и протонов;
- локальные ионизационные эффекты при воздействии отдельных ядерных частиц (ОЯЧ).

В БИС, реализованных в рамках наноразмерных КМОП-процессов, при дозовом воздействии ионизирующего излучения наблюдается [1-4] возникновение радиационно-индуцированных токовых утечек по цепи питания вследствие накопления зарядов в "толстом" изолирующем окисле, сдвиги пороговых напряжений МОП-транзисторов (этот эффект менее значим для современных микросхем), деградация крутизны (подвижности) и подпорогового размаха передаточной характеристики. При этом с уменьшением проектных норм доминирующим механизмом деградации КМОП-элементов становятся радиационно-индуцированные токи утечки.

Характерной особенностью объемных КМОП-технологий является наличие двух составляющих радиационно-индуцированного

тока утечки – межтранзисторной и внутритранзисторной, которые обусловлены наличием "толстых" диэлектрических слоев (как правило, Shallow-Tranch-Isolation). При импульсных воздействиях возникают эффекты мощности дозы: тиристорный эффект, катастрофический отказ, "просадка" – падение напряжения в цепи питания вследствие протекания мощных импульсных радиационно-индуцированных токов.

КМОП-структуры имеют низкую чувствительность к эффектам структурных повреждений вследствие того, что активные элементы используют основные носители заряда [5].

Воздействие ОЯЧ может приводить к эффектам катастрофических отказов и тиристорным эффектам, а также к одиночным сбоям [6, 7], возникающим в регистрах ячеек памяти и других последовательностных устройствах. Специфичным классом радиационных эффектов, имеющим важное значение для БИС на БМК с уменьшением проектных норм и, как следствие, ростом предельных частот функционирования, являются цифровые "иголки" (Digital SET) – кратковременные помехи на линиях, которые приводят к ложным переключениям триггера или пропускам тактового сигнала [8-10]. Такие "иголки" могут быть внешними и внутренними. Внешние "иголки" представляют опасность для микросхем, подключенных непосредственно к выводам БМК, и могут нарушить работу устройства в целом. Внутренние "иголки" в асинхронных схемах могут изменить логику работы устройства в БМК и повлиять на работоспо-

damages due to the fact that the active elements use main charge carriers [5].

The impact of individual nuclear particles can lead to catastrophic failures, latch-up, and also to single failures [6, 7] arising in registers of memory cells and other serial devices. A specific class of radiation effects, which is important for IC on GA with decreasing design rules and, consequently, increasing limit frequencies of operation, are digital "needles" (Digital SET) – short-term interferences that lead to false switching of the trigger or omissions of the clock signal [8-10]. These "needles"

can be external and internal. External "needles" are dangerous for circuits connected directly to the contacts of GA, and may interfere the operation of the device as a whole. Internal "needles" in asynchronous circuits can change logic of operation of the device in the GA and to affect the operability. If the combinational circuit, in which there was "needle", ends with the storage element, it is possible false switching of the trigger. "Needles" are characterized by the amplitude and pulse duration. The standard durations for the 90-130 nm CMOS process are from 100 to 2000 ps.

COMMON METHODOLOGY FOR EVALUATION OF RADIATION RESISTANCE OF GA AND IC BASED ON THEM

The purposes of assessing the radiation resistance may be certification of designing and technological platform of GA (the process and means of IC design based on it) for forecasting (guaranteeing) of the typical (expected) and maximum levels of resistance of finished products and for the qualification of IC on GA (lining) to ensure the specified levels of radiation resistance or the assessment of their stability. The main objective in organizing of the evaluation of radiation resistance for IC



способность. Если комбинационная схема, в которой возникла "иголка", оканчивается запоминающим элементом, то возможно "ложное" переключение триггера. "Иголки" характеризуются амплитудой и длительностью импульса. Типовые длительности для КМОП-процессов 90–130 нм составляют от 100 до 2000 пс.

ОБЩАЯ МЕТОДИКА ОЦЕНКИ РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ БМК И БИС НА ИХ ОСНОВЕ

Целями оценки радиационной стойкости могут являться как аттестация конструктивно-технологической платформы БМК (технологического процесса и средств проектирования БИС на его основе) для прогнозирования (гарантирования) типовых (ожидаемых) и предельных уровней стойкости готовых изделий, так и квалификация готовых БИС на БМК (зашивок) в части обеспечения заданных уровней радиационной стойкости или оценки их стабильности и запаса. Основной задачей при организации оценки радиационной стойкости БИС на БМК является обеспечение рационального сочетания информативности и технико-экономической эффективности испытаний с целью гарантирования эксплуатационных характеристик при приемлемых временных и финансовых затратах.

Объектами испытаний и оценки радиационной стойкости могут являться следующие элементы:

- совокупность базовой конструкции и библиотеки элементов БМК в форме специальной тестовой зашивки, наиболее информативно-

характеризующей свойства и характеристики БМК (по сути, имитатор БМК для испытаний) и называемой типовой оценочной схемой (ТОС) (жаргонное название – "нулевая зашивка"). Требования к составу и принципы формирования ТОС описаны в [11, 12];

- конкретная полузаказная БИС на БМК (жаргонное название – "рабочая зашивка"), выполняющая лишь заданную функцию и использующая, как правило, только часть библиотечных элементов БМК.

Следует отметить, что в современной инженерной практике, как правило, проводят квалификационные испытания ТОС при завершении ОКР на создание БМК, после чего выполняют контроль каждой партии пластин с "базой" в объеме требований подгруппы "Е" ОСТ В 11 0998 (ОСТ В 11 1010) по результатам испытаний той же ТОС. Результаты контроля распространяют на все зашивки БМК, изготовленные в рамках контролируемой производственной партии "базы".

Радиационную стойкость цифровых БМК определяют следующие основные критериальные параметры:

- функционирование;
- статические электрические параметры, включая выходные напряжения (при соответствующей нагрузке), токи утечки и токи потребления (статические и динамические);
- динамические параметры, включая задержки распространения, времена выборки,

on GA is providing a rational combination of informational content and technical-economic efficiency of tests to guarantee the operational performance at an acceptable time and costs.

The following elements can be subjects to tests and evaluation of radiation resistance:

- The set of a basic design and library of elements of GA in the form of a special test lining, which is the most informative for characterizing the properties and characteristics of GA (in fact, the simulator of GA for testing) and is called the "standard evaluation circuit" (SEC) (slang name – "zero

lining"). Requirements to structure and principles of formation of SEC are described in [11, 12].

- Specific semicustom IC on GA (slang name – "working lining"), performing a predetermined function with use, as a rule, of only a part of the elements library of GA.

It should be noted that in the engineering practice the qualification tests of SEC are conducted as a rule at the conclusion of the development of the GA, and then the control of each batch of wafers is carried out with the "base" in the volume of requirements of the sub-group "E" of OСТ В 11 0998 (ОСТ В 11 1010) and

using the results of tests of the same SEC. The results of control spread on all linings of GA manufactured under a controlled production batch of the "base".

The following basic criteria parameters define the radiation resistance of digital GA:

- functioning;
- static electrical parameters, including output voltage (with appropriate load), leakage currents and current consumption (static and dynamic);
- dynamic parameters, including propagation delays, access times, maximum operating frequencies, dependencies of type of



Основные подходы к функциональному контролю БИС на БМК в процессе радиационных испытаний

Main approaches to functional control of very large scale IC based on gate array in process of radiation tests

Подход Approach	Достоинства Advantages	Недостатки Disadvantages
Контроль полного или рационально-сокращенного набора тестовых векторов (карты заказа) рабочей зашивки Control of full or rationally-reduced set of test vectors (order card) of working lining	Определение фактического уровня стойкости рабочей зашивки в целом, который может быть равен или выше нормативного для данного БМК Determining the actual level of resistance of the working lining in general, which can be equal to or above the standard for this gate array	Отсутствие корреляции тестового вектора с работоспособностью отдельных блоков и узлов БИС на БМК The lack of correlation of test vector with the functions of the individual units of very large scale ICs based on the gate arrays
Контроль функционирования всех основных или наиболее радиационно-критичных блоков и узлов БИС с использованием специально созданной тестовой программы Monitoring of all the main or most radiation-critical units of very large scale IC using a specially created test program	Возможность выявления наиболее радиационно-критичных блоков и узлов в составе рабочей зашивки БИС, определение однородности изделия по уровням радиационной стойкости элементов The possibility of identifying the most radiation-critical units in the working lining of very large scale IC, the definition of homogeneity of the product according to the levels of radiation resistance of elements	Затраты значительных ресурсов на создание и отработку специализированной тестовой программы для функционального контроля основных узлов и блоков в составе рабочей зашивки The high cost of creating and testing specialized test program for functional control of main units in the working lining

предельные рабочие частоты, зависимости типа минимального напряжения питания от частоты и пр.;

- наличие и пороги тиристорных эффектов (ТЭ) и катастрофических отказов (КО).

В ходе разработки методики радиационных испытаний проводят выбор наиболее радиационно-чувствительных критериальных параметров с целью

уменьшения объемов измерений и контроля работоспособности без потери информативности.

Наиболее ресурсоемкие процедуры проектирования, производства и аттестации выполняются на этапе освоения БМК и распространяются на полузаказные БИС на их основе. Эксплуатационные параметры БИС определяются параметрами БМК и подтверждаются квалифи-

minimum supply voltage on frequency, etc.;

- availability and thresholds of the latch-ups (LU) and catastrophic failures (CF).

During the development of methods of radiation tests the selection of the most radiation-sensitive criteria parameters is performed with the aim of reducing the volume of measurements and monitoring of performance without information loss.

The most demanding procedures of design, production and certification are performed on the stage of development of the GA and are applied to semicustom ICs based

on them. Performance parameters of IC are determined by the parameters of GA and are confirmed by the qualification tests. In order to confirm the parameters specified in technical documentation an inspection of experimental batch of certificated IC is carried out and group specifications are issued [13].

If the specified (desired) level of radiation resistance of the IC on GA corresponds with no reserve to the normative level of resistance, then, generally, to ensure the necessary level of assurance it is necessary to carry out the radiation tests of each working lining of GA. Main approaches to functional control

of very large scale IC based on gate array in process of radiation tests are given in table.

Both of the presented approaches to the functional control IC on GA are quite resource-consuming, as for each working lining is required to perform a complete cycle of radiation tests.

However, if during the radiation tests of the SEC made within the framework of a general production batch of GA at the control of batches of wafers (subgroup E according to OTY) or, in the future, during periodic testing (radiation testing as a part of periodic that are not provided in the current



кационными испытаниями. В целях подтверждения указанных в технической документации параметров проводится проверка опытной партии аттестационной БИС и выпускаются групповые технические условия [13].

Если заданный (требуемый) уровень радиационной стойкости БИС на БМК соответствует без запаса нормативному уровню стойкости, указанному в ТУ, то в общем случае для обеспечения необходимого уровня гарантий следует проводить контрольные радиационные испытания каждой рабочей зашивки БМК. Основные подходы к функциональному контролю БИС на БМК в процессе радиационных испытаний приведены в таблице.

Оба представленных подхода к функциональному контролю БИС на БМК являются довольно ресурсоемкими, так как для каждой рабочей зашивки БИС требуется выполнить полный цикл подготовки и проведения радиационных испытаний.

Вместе с тем, если в ходе радиационных испытаний ТОС, изготовленных в рамках общей производственной партии БМК, при контроле партий пластин (подгруппа Е по ОТУ) или, в будущем, периодических испытаниях (радиационные испытания в составе периодических не предусмотрены действующими ОТУ на микросхемы интегральные, но предполагаются к введению в их новых редакциях) обеспечивается достаточный запас фактически определенного уровня радиационной стойкости ТОС относительно нормативного уровня БМК, и при этом ТОС задействует все библиотечные элементы, используемые в составе рабочей зашивки,

при необходимых полноте и информативности их контроля, то допустимо распространить результаты радиационных испытаний ТОС на соответствующую рабочую зашивку БИС. Это позволит существенно сократить расходы на производство и обеспечить повышение технико-экономических показателей продукции. Следует отметить, что такой подход применим для всех типов полузаказных БИС, изготовленных в рамках данной производственной партии пластин, а после введения радиационных испытаний в состав периодических – для всех партий пластин, изготовленных в подконтрольный период, на которые допустимо распространить полученные результаты испытаний ТОС.

Радиационные испытания БИС на БМК проводятся методами, установленными ГОСТ РВ 5962-004.10-2012, в радиационно-испытательных центрах на аттестованных установках по программе-методике, оформленной в установленном порядке. Целесообразно обеспечить рациональное сочетание использования имитирующих и моделирующих установок, при котором основной объем радиационных испытаний проводится на имитаторах (рентгеновских, лазерных), а дозиметрическое обеспечение осуществляют на основе калибровки на моделирующих установках (изотопных гамма-источниках, установках тормозного гамма-излучения, ускорителях заряженных частиц). При этом регулярный характер полупроводниковых областей в составе кристалла БМК, единые нормы плотности металлизации и, главное, единство испытываемой ТОС значительно упрощают калибровку и допускают распростра-

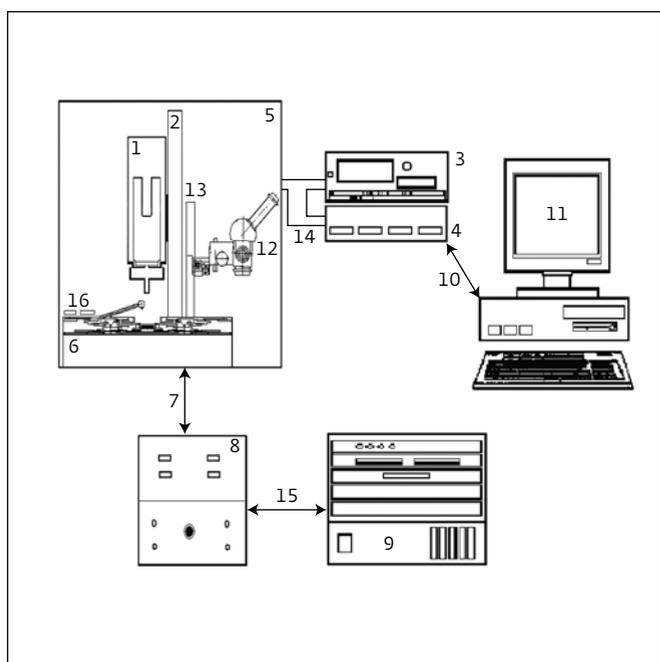
OTU, but are assumed to introduction in their new editions) a sufficient reserve of a level of radiation resistance of SEC relative to the standard level of GA is provided, and the SEC involves all library elements used in the working lining, with the necessary completeness and informativeness of their control, then it is permissible to extend the results of radiation tests of SEC for the corresponding working lining of IC. This will allow to significantly reduce production costs and to improve technical and economic indicators of production. It should be noted that this approach is applicable for all types

of semicustom ICs, manufactured within a given production batch of wafers, and after the introduction of radiation tests in the structure of the periodic – for all batches of wafers produced in the controlled period, to which it is admissible to extend the test results of SEC.

Radiation tests of IC on GA are conducted according to methods of GOST РВ 5962-004.10-2012 in radiation testing centers using certified systems and methods that are issued in the prescribed manner. It is advisable to provide a rational combination of simulating and modeling facilities, at which the main volume of the radiation tests

is performed on simulators (x-ray, laser), and radiation support is carried out on the basis of the calibration on the modeling devices (isotopic gamma sources, brake gamma radiation systems, charged particle accelerators). At the same time the regular character of semiconductor regions in the structure of GA chip, uniform density of metallization and, most importantly, the unity of tested SEC, greatly simplify the calibration and allow the dissemination of its results on a wider set of test products [14, 15].

The most promising methods for rapid assessment and forecasting of radiation resistance of IC on GA



Структура автоматизированного комплекса для контроля радиационной стойкости тестовых структур на пластине по дозовым эффектам: 1 – рентгеновский источник; 2 – устройство перемещения; 3 – пульт управления рентгеновского источника; 4 – контрольно-измерительное оборудование; 5 – защитный бокс; 6 – координатная система зонда с контактным фиксированным устройством и столиком для установки пластины; 7 – канал связи между блоком управления зондовым устройством и зондами; 8 – блок управления зондовым устройством; 9 – зондовый автомат без координатной системы; 10 – канал связи между контрольно-измерительным оборудованием и компьютером; 11 – компьютер; 12 – оптический микроскоп, смонтированный в защитном боксе; 13 – система перемещения оптического микроскопа; 14 – канал связи между блоками 3, 4 и зондовым (контактирующим) устройством; 15 – канал связи между блоками 8 и 9; 16 – контактирующие устройства для подключения выводов микросхем

Structure of automated complex for control of radiation resistance of test structures on wafer according to dose effects: 1 – x-ray source; 2 – displacement device; 3 – remote control for x-ray source; 4 – measuring equipment; 5 – protective box; 6 – coordinate system of probe with contact fixed device and table for mounting of wafer; 7 – communication link between control unit of probe device and probes; 8 – control unit of probe device; 9 – probe machine without coordinate system; 10 – communication link between measuring equipment and computer; 11 – computer; 12 – optical microscope, mounted in protective box; 13 – displacement system of optical microscope; 14 – communication link between units 3 and 4 and probe (contact) device; 15 – communication link between units 8 and 9; 16 – contact devices for connecting of chips

нение ее результатов на более широкий набор испытываемых изделий [14, 15].

Наиболее перспективным для оперативных оценки и прогнозирования радиационной стойкости БМК и БИС на их основе в условиях разработки и производства представляется проведение радиационных испытаний и исследований кристаллов ТОС, а в необходимых случаях и рабочих зашивок, без их корпусирования с использованием автоматизированных рабочих мест на основе лазерных и рентгеновских имитаторов, зондовых станций и комплектов универсального автоматизированного измерительного оборудования [16]. Структура автоматизированного зондового комплекса, широко используемого автором в практике испытаний, представлена на рисунке.

На этапе разработки БМК осуществляются разработка или адаптация технологии изготовления, обеспечивающей требования ТЗ, в том числе по радиационной стойкости, разработка функциональных ячеек, разработка (в качестве типового представителя) аттестационной ИС, включающей все базовые ячейки и позволяющей подтвердить в результате квалификационных испытаний заданные в ТЗ параметры [17].

Обеспечение и оценка радиационной стойкости в ходе проектирования БМК требуют проведения моделирования, экспериментальных исследований и, при необходимости, доработки библиотек стандартных элементов с учетом данных о радиационной стойкости. В качестве элементов, дополняющих стандартные компоненты набора средств проектирования, необходимы SPICE-модели с радиационными параметрами, правила проектирования для обеспечения сохранения показателей стойкости и достоверности используемых для прогнозирования моделей, библиотеки радиационно-стойких элементов, а также радиационно-стойкие параметризованные ячейки [18, 19].

Таким образом, создание ТОС для оценки и прогнозирования радиационной стойкости всех узлов и блоков БМК, а также ее радиационные испытания и исследования с обеспечением необходимых информативности и достоверности являются обязательными элементами базового маршрута проектирования БМК и БИС на их основе.

В процессе изготовления БМК и БИС на их основе необходимо поддерживать уровень качества, установленный при квалификации изделия с соблюдением порядка мероприятий по кон-



тролю стабильности технологических процессов в части обеспечения радиационной стойкости [11]. Последний включает следующие основные мероприятия:

- контроль РС изделий на непрерывной или периодической основе по результатам испытаний ТОС;
- статистический контроль технологического процесса и встроенный в процесс контроля показателей радиационной стойкости с использованием ТОС и параметрических мониторов.

Контроль качества и радиационной стойкости изделий может проводиться на периодической основе при следующих условиях:

- реализован непрерывный встроенный в процесс контроль обеспечения радиационной стойкости на основе испытаний параметрических мониторов на пластине с использованием зондовых установок или испытаний корпусированных тестовых структур;
- установлены корреляционные показатели для тестовых элементов, ТОС и готовых изделий;
- имеется достаточный запас по фактическому уровню стойкости изделий, определенный по результатам радиационных испытаний и исследований ТОС, относительно нормативного уровня стойкости БМК;
- реализуется ритмичный график выпуска партий изделий, и объем партий достаточен для статистически точной оценки результатов испытаний.

В случае невыполнения перечисленных выше условий следует осуществлять непрерывный контроль производственных партий, то есть контро-

лировать каждую партию пластин по подгруппам E1, E2, E3 в соответствии с ОСТ В 11.0998-99 или ОСТ В 11 1010-2001.

Выводы

Разработан и обоснован общий методический подход к оценке радиационной стойкости БМК и полужаказных БИС на их основе, который заключается в обеспечении необходимого состава контрольно-испытательных мероприятий, включая создание и радиационные испытания типовой оценочной схемы, проводимых на этапах проектирования и изготовления БМК и БИС на их основе. Благодаря этому обеспечивается рациональное сочетание достоверности и информативности оценки (гарантий) радиационной стойкости с технико-экономической эффективностью производства изделий.

Проанализированы основные особенности БИС на БМК в части обеспечения и оценки их радиационной стойкости, кратко обобщены доминирующие радиационные эффекты в БИС на БМК.

Представлены основные элементы общей методики оценки радиационной стойкости БМК и полужаказных БИС на их основе, описан порядок выбора объектов испытаний (ТОС или рабочие зашивки), кратко рассмотрено испытательное оборудование с акцентом на возможности радиационных испытаний кристаллов БИС без их корпусирования, отмечены особенности дозиметрического сопровождения, в частности, относительная простота калибровки для БИС на БМК.

in conditions of development and production are the radiation tests and studies of the SEC chips, and in necessary cases of the working linings, without their packaging with the use of workstations based on laser and x-ray simulators, probe stations and kits of universal automated measuring equipment [16]. The structure of the automated probe, widely used by the author in the practice, is shown in Fig.

At a stage of development of GA the development or adaptation of manufacturing techniques providing the requirements of specification, including radiation resistance, development of functional

cells, the development of (as a typical representative) IC for certification with all the basic cells that allow to confirm as a result of qualification tests, the specified parameters, are carried out [17].

Provision and evaluation of radiation resistance in the design of GA require modeling, experimental studies and, if necessary, revision of the libraries of standard cells based on the data about radiation resistance. As complementary elements to the standard components of a set of design tools, the SPICE models with radiation parameters, design rules to ensure the conservation of indicators of durability and

reliability that are used for prediction of models, libraries of radiation-resistant elements, and also radiation-resistant parameterized cells are required [18, 19].

Thus, the creation of SEC for the assessment and forecasting of radiation resistance of all components and blocks of the GA and its radiation tests and studies with the provision of needed accuracy are mandatory elements of the base design route of GA and IC based on them.

In the process of manufacturing GA and IC based on them it is necessary to support the level of quality established during the qualification of products in



Отмечены содержание и основные этапы работ по оценке радиационной стойкости БИС на БМК на этапах проектирования и изготовления.

Реализация предлагаемых общеметодических подходов и комплекса мероприятий позволяет обеспечить востребованность и конкурентоспособность БИС на БМК для применения в аппаратуре с повышенными требованиями к радиационной стойкости.

Автор выражает свою признательность А.Ю.Никифорову, А.Н.Денисову, А.В.Улановой, В.В.Коняхину за ценные консультации и помощь в подготовке статьи.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. Никифоров А.Ю., Телец В.А., Чумаков А.И. Радиационные эффекты в КМОП ИС. – М.: Радио и связь, 1994. 164 с.
2. Таперо К.И., Улимов В.Н., Членов А.М. Радиационные эффекты в кремниевых интегральных схемах космического применения. – М., 2009. 246 с.
3. 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. проф. А.И. Чумакова. – М.: НИЯУ "МИФИ", 2015. С. 315–360.
4. Nikiforov A.Y., Skorobogatov P.K., Egorov A.N., Gromov D.V. Selection of optimal parameters of laser radiation for simulating ionization effects in silicon bulk-technology microcircuits // Russian Microelectronics. 2014. Vol. 43. № 2. P. 133–138.
5. Kalashnikov O.A. Statistical variations of integrated circuits radiation hardness // 12th European Conf. on Radiation and its Effects on Components and Systems, RADECS-2011, Sevilla, Spain, Sept. 19–23. 2011. P. 661–664.
6. Чумаков А.И., Печенкин А.А., Егоров А.Н., Маврицкий О.Б., Баранов С.В., Васильев А.Л., Яненко А.В. Методика оценки параметров чувствительности ИС к тиристорному эффекту при воздействии отдельных ядерных частиц // Микроэлектроника. 2008. Т. 37. С. 45–51.
7. Чумаков А.И., Васильев А.Л., Козлов А.А., Кольцов Д.О., Криницкий А.В., Печенкин А.А., Тарараксин А.С., Яненко А.В. Прогнозирование локальных радиационных эффектов в ИС при воздействии факторов космического пространства // Микроэлектроника, 2010. Т. 39. № 2. С. 85–90.
8. Chumakov A.I., Pechenkin A.A., Egorov A.N., Mavritsky O.B., Baranov S.V., Vasil'ev A.L., Yanenko A.V. Estimating IC susceptibility to single-event latchup // Russian Microelectronics. 2008. Vol. 37, № 1. P. 41–46.
9. Chumakov A.A., Pechenkin D.V., Savchenkov A.G., Yanenko A.V., Kessarinskiy L.N., Nekrasov P.V., Sogoyan A.V., Tararaksin A.I., Vasil'ev A.L., Anashin V.S., Chubunov P.A. Compendium of SEE comparative results under ion and laser

compliance with the order of measures for the control of stability of technological processes in terms of radiation resistance [11]. The latter includes the following main measures:

- control the radiation resistance of products on a continuous or periodic basis using the results of tests of SEC;
- statistical process control and a built-in monitoring of indicators of radiation resistance, using SEC and parametric monitors.

Quality control and radiation resistance control of products can be conducted on a periodic basis under the following conditions:

- continuous built-in control of the radiation resistance on the basis of tests of parametric monitors on wafer using the probe systems or testing of packaged test structures are implemented;
- correlation parameters for the test items, SEC and finished products are defined;
- there is a sufficient margin at the actual level of resistance of products, determined using results of the radiation tests and studies of SEC, relative to a normative level of resistance of GA;
- rhythmic release of batches of products is implemented and the batches volume is sufficient for a

statistically accurate evaluation of test results.

In case of nonfulfilment of the above conditions it is necessary to carry out continuous monitoring of production batches, that is, to control every batch of wafers by subgroups E1, E2, E3 in accordance with OCT B 11.0998-99 or OCT B 11 1010-2001.

INSIGHTS

The common methodological approach to the evaluation of radiation resistance of gate arrays and semicustom very large scale ICs based on them, which ensures the necessary list of the control

- irradiation // 14th European Conf. on Radiation and its Effects on Components and Systems, RADECS-2013, Oxford, United Kingdom, Sept. 23–27. Article number 6937390.
10. **Savchenkov D.V., Chumakov A.I., Petrov A.G., Pechenkin A.A., Egorov A.N., Mavritskii O.B., Yanenko A.V.** Study of SEL and SEU in SRAM using different laser techniques // 14th European Conf. on Radiation and its Effects on Components and Systems, RADECS-2013, Oxford, United Kingdom. Sept. 23–27. Article number 6937411.
 11. **Московская Ю.М., Денисов А.Н., Федоров Р.А., Никифоров А.Ю., Уланова А.В., Бобровский Д.В.** Состав и принцип формирования типовой оценочной схемы для оценки радиационной стойкости базовых матричных кристаллов и полупроводниковых бис на их основе // Наноиндустрия. 2017. №1(71). С. 60–69.
 12. **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 контроля радиационной стойкости партий пластин базовых матричных кристаллов // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем – 2016 : Сб. тр. / Под общ. ред. акад. А.Л.Стемпковского. – М.: ИППМ, 2016. Ч. IV. С. 153–157.
 13. **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. №5. Т. 20. С. 497–504.
 14. **Artamonov A.S., Sangalov A.A., Nikiforov A.Y., Telets V.A., Boychenko D.V.** The new gamma irradiation facility at the National Research Nuclear University MEPhI. 2014 IEEE Radiation Effects Data Workshop (REDW 2014), Paris, France, Jul. 14–18, 2014. P. 258–261. Article number 7004600.
 15. **Nikiforov A.Y., Skorobogatov P.K.** Physical principles of laser simulation for the transient radiation response of semiconductor structures, active circuit elements, and circuits: A nonlinear model // Russian Microelectronics. 2006. Vol. 35. No. 3. P. 138–149.
 16. **Елесин В.В., Никифоров А.Ю., Телец В.А., Чуков Г.В.** Комплекс методических, аппаратных и программных средств для автоматизированных исследований параметров полупроводниковых СВЧ ИС в условиях испытаний на радиационную стойкость // Спецтехника и связь. 2011. №4–5. С. 28–32.
 17. Микросхемы для аппаратуры космического назначения : Практ. пос. / Под общ. ред. А.Н. Саурова. – М.: ТЕХНОСФЕРА, 2016. 388 с.
 18. **Nikiforov A.Y., Sogoyan A.V.** Modeling of high-dose-rate pulsed radiation effects in the parasitic MOS structures of CMOS LSI circuits // Russian Microelectronics. 2004. Vol. 33. No. 2. P. 80–91.
 19. **Chumakov A.I.** Modeling rail-span collapse in ICs exposed to a single radiation pulse // Russian Microelectronics. 2006. Vol. 35. № 3. P. 156–161.

and test activities, including creation and radiation tests of generic evaluation circuit at the stages of design and manufacture of GA and IC based on them, is developed and substantiated. This ensures the rational combination of reliability and informational content of the assessment (guarantees) of radiation resistance with a techno-economic efficiency of production.

The main features of very large scale ICs based on the gate arrays in relation to the objectives of ensuring and evaluation of their radiation resistance are analyzed, the dominant radiation effects in very large scale ICs are summarized.

The main elements of a common methodology for the evaluation of radiation resistance of gate arrays and semicustom very large scale ICs based on them are presented, the order of the choice of test items, the test equipment with emphasis on radiation tests of ICs without their packaging are described, the peculiarities of dosimetric support, in particular, relative simplicity of calibration for IC on GA are noted.

The contents and milestones for the evaluation of radiation resistance of very large scale ICs based on the gate arrays at the stages of design and manufacture are considered.

Implementation of the proposed methodological approaches and of set of measures helps to ensure the relevance and competitiveness of ICs on GA for application in equipment with increased requirements for radiation resistance.

The author expresses his gratitude to A.Nikiforov, A.Denisov, A.Ulanova, V.Koniakhin for the valuable advices and assistance in the preparation of this paper.

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