

УДК 004.312.24

DOI: 10.22213/2413-1172-2019-4-73-82

ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ МИКРОСХЕМ СЕРИИ ADG4XX К ВОЗДЕЙСТВИЮ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПО ЭФФЕКТАМ ПОГЛОЩЕННОЙ ДОЗЫ**П. А. Ушаков**, доктор технических наук, профессор, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия**К. О. Максимов**, кандидат технических наук, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия**А. А. Дедюхин**, Удмуртский государственный университет, Ижевск, Россия

Современные требования к бортовой радиоэлектронной аппаратуре авиакосмического назначения в значительной степени актуализировали задачу оценки и прогнозирования уровней стойкости электронных компонентов и узлов к радиационным воздействиям. Особый интерес направлен на исследование воздействий полей ионизирующих излучений естественного и искусственного происхождения на интегральные КМОП-микросхемы (комплиментарные микросхемы на транзисторах металл – диэлектрик – полупроводник).

Представлена последовательность подготовки и проведения радиационного эксперимента на аппарате «АГАТ-С» с закрытым радионуклидным источником гамма-излучения Co^{60} , а также проанализированы результаты испытаний интегральных микросхем серии ADG4XX (компания Analog Devices) к воздействию ионизирующего излучения в части дозовых эффектов. Исследовано влияние гамма-излучения на функционирование и электрические параметры многоканальных аналоговых коммутаторов/мультиплексоров с учетом топологии кристаллов. В частности получены зависимости наиболее чувствительных параметров объектов исследования относительно фактического уровня накопленной дозы, а также проанализированы причины деградации контролируемых параметров: токов потреблений, токов утечек, пороговых логических напряжений и др.

Кроме того, проведен разрушающий физический анализ образцов микросхем с целью установления наиболее чувствительных областей и локализации радиационных эффектов по топологии полупроводниковых кристаллов.

Даны результаты расчетной оценки стойкости интегральных микросхем серии ADG4XX: по критериям параметрического отказа минимальный уровень стойкости к дозовым эффектам варьируется от 721 до 1057 рад, а по критериям функционального отказа – от 1088 до 7212 рад для различных микросхем. Полученные данные имеют прикладное значение в случае применения исследуемых изделий в радиационно-стойкой аппаратуре военного, космического и специального назначения.

Ключевые слова: гамма-излучение, радиационная стойкость, ионизирующее излучение, аналоговый коммутатор, аналоговый мультиплексор, общая накопленная доза.

Введение

В настоящее время обеспечение радиационной стойкости интегральных микросхем (ИМС), а также оценка надежности электронных компонентов при изготовлении радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) высокого качества являются первостепенной задачей для таких ключевых отраслей, как ракетно-космическая, атомная, оборонная, авиационная и др. [1–11]. Данная задача особенно актуальна в последние годы, когда остро стоит вопрос комплектования высоконадежной РЭА в условиях дефицита современной отечественной радиационно-стойкой электронной компонентной

базы (ЭКБ) [12]. Один из вариантов решения проблемы – анализ и адекватная оценка фактического уровня стойкости ИМС иностранного производства.

Целью данной работы является исследование радиационной стойкости ИМС зарубежного производства серии ADG4XX (компания Analog Devices) к воздействию ионизирующего излучения (ИИ) в части дозовых эффектов.

Объекты исследования (табл. 1) широко используются в отечественной бортовой аппаратуре космического применения в качестве многоканальных аналоговых коммутаторов/мультиплексоров.

Таблица 1. Общие сведения об исследуемых ИМС

Table 1. General information about IC's

Обозначение	Наименование	Корпус	Диапазон рабочих температур, °С	Кол-во
ADG408BRUZ	Восьмиканальный аналоговый мультиплексор	TSSOP-16	-40...+85	5
ADG452BRUZ	Четырехканальный однополюсный коммутатор	TSSOP-16	-40...+85	5
ADG419BRZ	Одноканальный двухполюсный коммутатор	SOIC-8	-40...+125	5

Согласно нормативно-технической документации производителя данные ИМС изготовлены по КМОП-технологии и не имеют уровня квалификации по стандарту MIL-PRF-38535 [Performance specification. Integrated circuits (microcircuits) manufacturing, general specification for. USA Department of defense], следовательно, испытаний на радиационную стойкость предприятием-изготовителем не проводилось.

Методика экспериментов

Поверхностные радиационные эффекты (дозовые эффекты) современных КМОП ИМС обусловлены процессами накопления, генерации/рекомбинации и отжига электрических зарядов в диэлектрических областях КМОП-структур и на границе раздела «диэлектрик – полупроводник» (Si – SiO₂ в случае ИМС серии ADG4XX) [13–15]. При поглощении ИИ прояв-

ляется деградация электрических параметров МОП-транзисторов: изменение крутизны стокзатворных характеристик и, как следствие, сдвиг пороговых напряжений в сторону нулевых значений для *n*-канальных транзисторов и в сторону более отрицательных значений для *p*-канальных транзисторов [16–19]. Данные процессы приводят к возникновению и росту радиационно-индуцированных токов утечки между областями стока и истока транзисторов, находящихся в закрытом состоянии в КМОП-структурах [20–24]. Поверхностные радиационные эффекты активно проявляются при воздействии протонного, электронного и гамма-излучения.

С целью подтверждения технологии изготовления был проведен разрушающий физический анализ (РФА) исследуемых ИМС, внешний вид которых приведен на рис. 1.

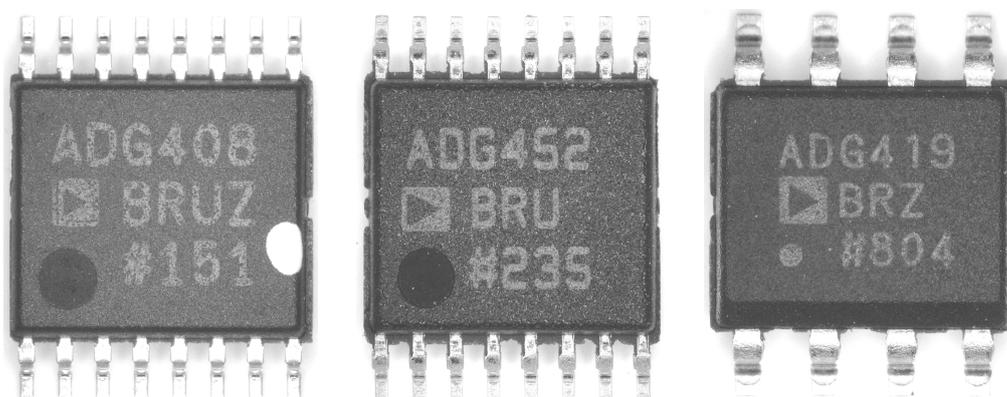


Рис. 1. Общий вид микросхем ADG408BRUZ, ADG452BRUZ, ADG419BRZ

Fig. 1. Principal view of ADG408BRUZ, ADG452BRUZ, ADG419BRZ microcircuits

Декорпусирование образцов проводилось методами жидкого травления. Совместно с РФА осуществлен анализ топологии поверхностных слоев и исследовано расположение чувствительных областей кристаллов ИМС (рис. 2 и 3). Микрофотографии получены с помощью оптического микроскопа высокого разрешения VHX-2000 Keyence.

Топология всех переключателей/мультиплексоров серии ADG4XX имеет характерные МОП-конструкции ключей, занимающие значительные части кристаллов, и топологические эле-

менты схемы питания/управления/защиты, также представленные МОП-транзисторами.

На рис. 2 и 3 по периметру кристалла указаны буквенные обозначения выводов ИМС, соответствующие близлежащим контактным площадкам, а рамками выделены различные структурно-топологические элементы кристаллов:

ADG408BRUZ: 1–8 – транзисторные ключи; 9 – логическая схема управления (декодер); 10, 11 – входные каскады двухполюсного питания ИМС; 12 – общий выход стоков ключевых МОП-транзисторов.

ADG452BRUZ: 1–4 – транзисторные ключи; 5, 6 – логические схемы управления; 7 – входные цепи общего двухполюсного питания и питания логической части ИМС; 8, 9 – входные цепи управления затворами МОП-транзисторов;

ADG419BRZ: 1, 2 – транзисторные ключи; 3 – логическая схема управления; 4, 5 – входные цепи общего двухполюсного питания, питания логической части и управления затворами МОП-транзисторов; 6 – общий выход стоков ключевых МОП-транзисторов.

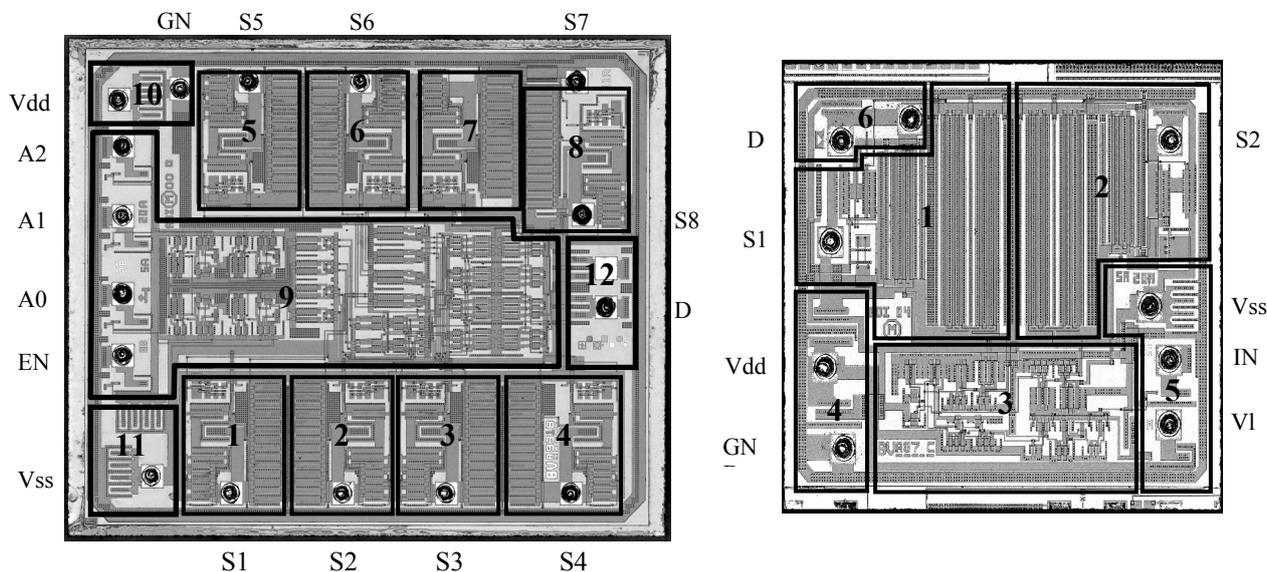


Рис. 2. Общий вид кристаллов ADG408BRUZ (слева) и ADG419BRZ (справа) после декорпусирования
 Fig. 2. Principal view of chips ADG408BRUZ (left view) and ADG419BRZ (right view) after demounting

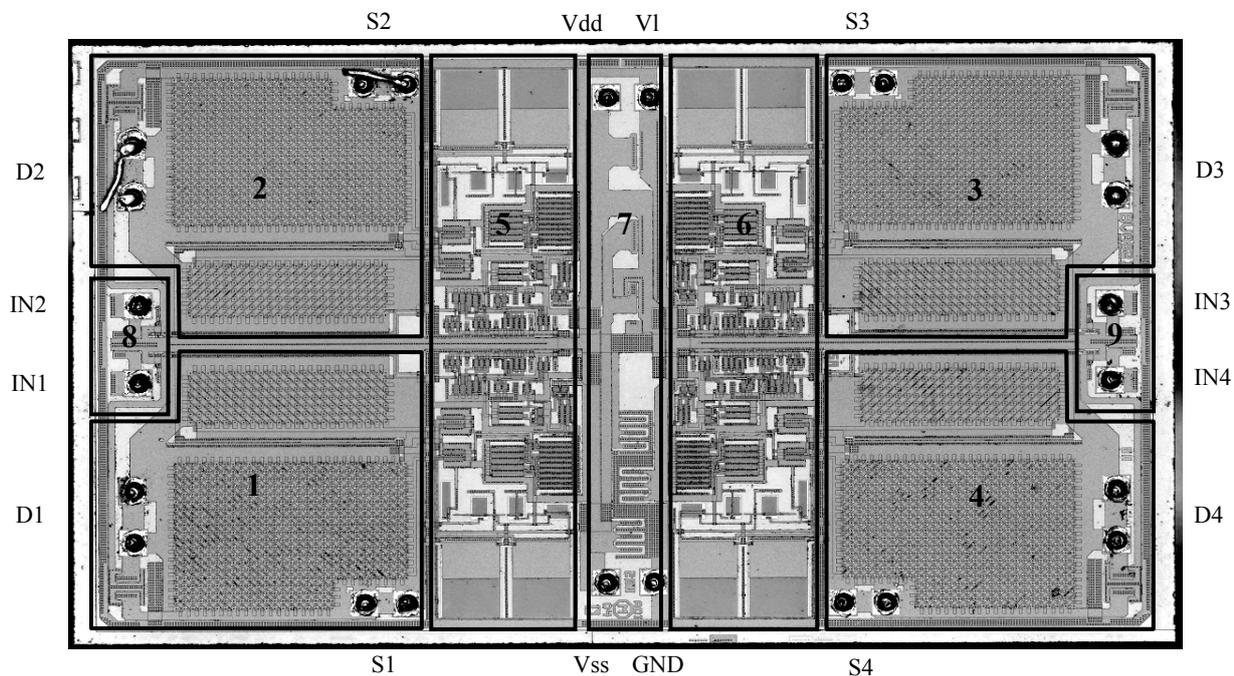


Рис. 3. Общий вид кристалла ADG452BRUZ после декорпусирования
 Fig. 3. Principal view of ADG452BRUZ chip after demounting

Облучение ИМС серии ADG4XX проводилось гамма-квантами на моделирующей установке «АГАТ-С» с радиоизотопом Co^{60} ($E_\gamma = 1,25$ МэВ) при температуре среды $(+25 \pm 10)$ °С. Значение

мощности поглощенной дозы гамма-излучения составило 2 рад(Si)/с. Дозиметрия испытаний на аппарате «АГАТ-С» проводилась дозиметром ДКС-АТ5350/1, состоящим из блока измери-

тельного электрометрического и ионизационной камеры ТМ30010-10. Погрешность дозиметрии при испытаниях – не более 3 % ($\Delta_{\text{доз}} = 0,03$). Для корректного определения поглощенной дозы ИИ в чувствительном объеме ИМС и обеспечения условия электронного равновесия (УЭР) испытания проводились в специальном двухслойном контейнере из Al (внутренний слой толщиной 1 мм) и Pb (наружный слой толщиной 1,5 мм).

Фактический уровень стойкости ИМС серии ADG4XX определялся по формуле с учетом ОСТ 134-1034–2012 (Аппаратура, приборы, устройства и оборудование космических аппаратов. Методы испытаний и оценки стойкости бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов к воздействию электронного и протонного излучений космического пространства по дозовым эффектам. 2012. 37 с.):

$$D_{\text{тр}} = \frac{D_{\text{отк}} K (1 - \Delta_{\text{доз}})}{K_n}, \quad (1)$$

где $K_n = 1,56$ (при $n = 5$ – количество испытанных ИМС из партии) – коэффициент увеличения дозовой нагрузки для вероятности сохранения работоспособности изделий $P = 0,95$ и доверительной вероятности $g = 0,9$ в предположении нормального закона распределения предельной радиационной нагрузки и значения коэффициента вариации 0,25; $\Delta_{\text{доз}}$ – относительная погрешность дозиметрии ($\Delta_{\text{доз}} = 0,03$); K – коэффициент пересчета от поглощенной дозы в кремнии к экспозиционной дозе ($K = 0,88 \text{ рад[Si]/P}$); $D_{\text{тр}}$ – подтвержденный уровень предельной накопленной дозы (рад[Si]); $D_{\text{отк}}$ – минимальное значение предельной экспозиционной дозы (дозы отказа) по выборке испытанных ЭРИ (рентген).

Во время облучения проводились замеры электрических параметров и критериев работоспособности образцов в соответствии с табл. 2–4 в контрольных точках по величине накопленной дозы с шагом не более 1 крад. До, после и во время облучения ИМС находились в активном электрическом режиме.

Таблица 2. ADG408BRUZ: контролируемые параметры и критерии работоспособности при испытаниях до, во время и после облучения

Table 2. ADG408BRUZ: controlled parameters and reliability criteria before, during and after irradiation test

Контролируемые параметры	Условия измерения	Критерии разбраковки		
		мин	тип	макс
Ток потребления I _{dd} , мкА	V _{dd} = +15 В; V _{ss} = –15В; V _{en} = 0 В; V _{in} = 0 В	–	1	5
Ток потребления I _{ss} , мкА	V _{dd} = +15 В; V _{ss} = –15В; V _{en} = 0 В; V _{in} = 0 В	–	1	5
Входное пороговое напряжение цифровых выводов, В	V _{dd} = +15 В; V _{ss} = –15 В	0,8	–	2,4
Ток утечки истока в закрытом состоянии, нА	V _{dd} = +15 В; V _{ss} = –15 В; V _s = ±10 В; V _d = ±10В	–	–	±50
Ток утечки стока в закрытом состоянии, нА	V _{dd} = +15 В; V _{ss} = –15 В; V _s = ±10 В; V _d = ±10 В	–	–	±100
Функциональный контроль	V _{dd} = 16,5 В; V _{ss} = –16,5 В; I _s = 0 А	Отсутствие сбоев и отказов		

Таблица 3. ADG419BRZ: контролируемые параметры и критерии работоспособности при испытаниях до, во время и после облучения

Table 3. ADG419BRZ: controlled parameters and reliability criteria before, during and after irradiation test

Контролируемые параметры	Условия измерения	Критерии разбраковки		
		мин	тип	макс
Ток потребления I _{dd} , мкА	V _{ss} = –16,5 В; V _{dd} = +16,5 В; V _I = 5 В	–	–	2,5
Ток потребления I _{ss} , мкА	V _{ss} = –16,5 В; V _{dd} = +16,5 В; V _I = 5 В	–	–	2,5
Ток потребления I _I , мкА	V _{ss} = –16,5 В; V _{dd} = +16,5 В; V _I = 5 В	–	–	2,5
Ток утечки стока в закрытом состоянии, нА	V _{ss} = –16,5 В; V _{dd} = +16,5 В; V _I = 5 В; V _s = –15,5 В; V _d = 15,5 В	–	±0,75	±30
Ток утечки истока в закрытом состоянии, нА	V _{ss} = –16,5 В; V _{dd} = +16,5 В; V _I = 5 В; V _s = 15,5 В; V _d = –15,5 В	–	±0,25	±15
Пороговое напряжение по входу I _N , В	V _{ss} = –16,5 В; V _{dd} = +16,5 В; V _I = 5 В	0,8	–	2,4
Сопротивление открытого ключа, Ом	V _{ss} = –16,5 В; V _{dd} = +16,5 В; V _I = 5 В	–	–	45
Входной ток V _{in} , мкА	V _{ss} = –16,5 В; V _{dd} = +16,5 В; V _I = 5 В	–	±0,005	±0,5
Функциональный контроль	V _{dd} = 16,5 В; V _{ss} = –16,5 В; I _s = 0 А	Отсутствие сбоев и отказов		

Таблица 4. ADG452BRUZ: контролируемые параметры и критерии работоспособности при испытаниях до, во время и после облучения

Table 4. ADG452BRUZ: controlled parameters and reliability criteria before, during and after irradiation test

Контролируемые параметры	Условия измерения	Критерии разбраковки		
		мин	тип	макс
Ток потребления Idd, мкА	Vdd = 16,5 В; Vss = -16,5В; VI = 5 В	-	-	5
Ток потребления Iss, мкА	Vdd = 16,5 В; Vss = -6,5 В; VI = 5 В	-	-	5
Пороговое напряжение по входу, В	Vss = -15 В; Vdd = +15 В; VI = 5 В	0,8	-	2,4
Ток утечки стока в закрытом состоянии, нА	Vdd = 15 В; Vss = -15 В; VI = 5 В; Vd = 10 В	-	-	±2,5
Ток утечки истока в закрытом состоянии, нА	Vdd = 15 В; Vss = -15 В; VI = 5 В; Vd = 10 В	-	-	±2,5
Сопротивление открытого ключа, Ом	Vdd = 15 В; Vss = -15 В; VI = 5 В; Vd = 10 В; Is = -10 мА	-	-	7
Функциональный контроль	Vdd = 15 В; Vss = -15 В; Is = 0 А	Отсутствие сбоев и отказов		

Результаты исследований

Результат деградации критериальных параметров представлен на рис. 4–6. Дрейф данных параметров под воздействием ИИ соответствует теоретическим ожиданиям, а повторяемость результатов внутри каждой партии испытуемых образцов ИМС исключает случайный характер возникновения отказов. Рост токов потребления и токов утечек для наблюдаемых микросхем серии ADG4XX носит преимущественно экспоненциальный характер, что дает

возможность экстраполировать результирующую кривую в случае прогнозирования дальнейших процессов в КМОП-структурах. Следует отметить, что скорость деградации тока потребления по выводу питания положительной полярности (Vdd) незначительно выше, чем по выводу отрицательной полярности (Vss). Наблюдаемая на рис. 5, а стагнация роста токов утечки на уровне 0,1 мкА связана с ограничением диапазона измерения тока электронного амперметра.

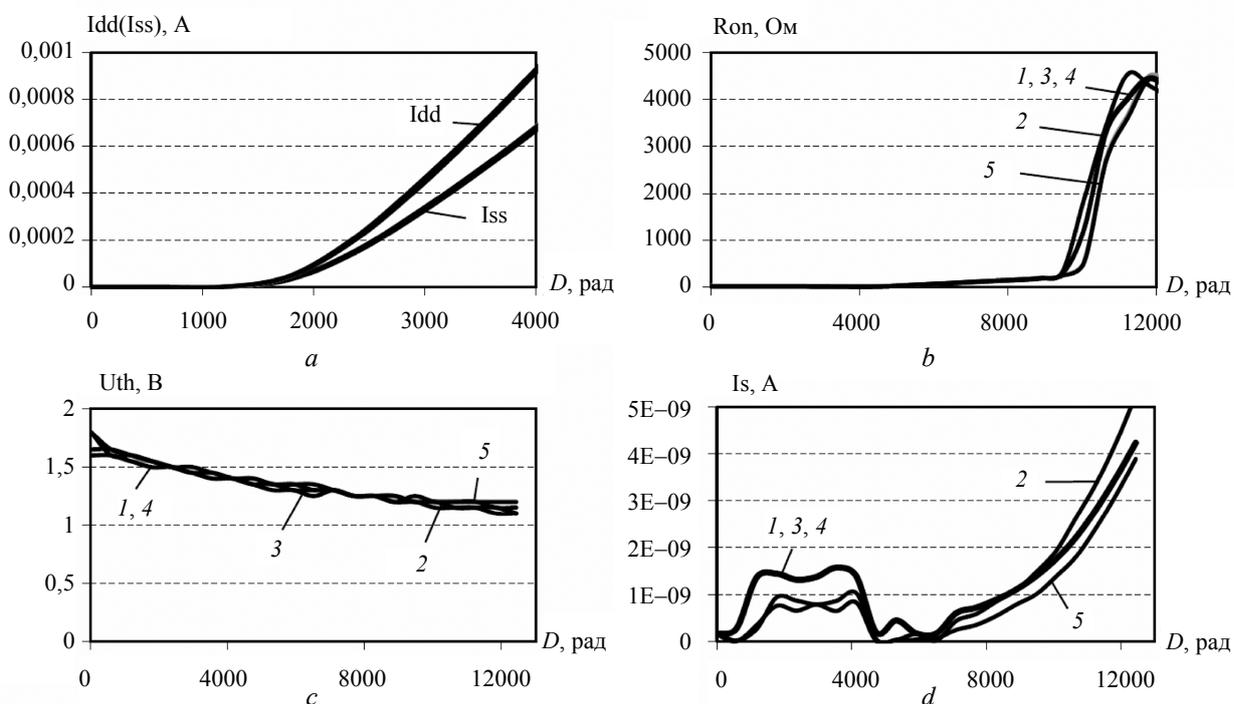


Рис. 4. Деградация параметров ИМС ADG419BRZ относительно накопленной дозы D: а – ток потребления Idd и Iss по выборке ИМС из 5 шт.; б – сопротивление Ron открытого ключа; в – пороговое напряжение Uth по логическому входу; д – ток утечки Is истока в закрытом состоянии. Для всех графиков 1–5 – порядковые номера испытанных ИМС в выборке из 5 шт.

Fig. 4. ADG419BRZ IC parameters degradation relatively total ionizing dose D: a – current consumption Idd and Iss for 5 pieces IC sample; b – resistance Ron of open channel; c – threshold voltage Uth of digital input; d – source off leakage current Is. For all curves 1-5 - test order numbers of 5 pieces IC sample

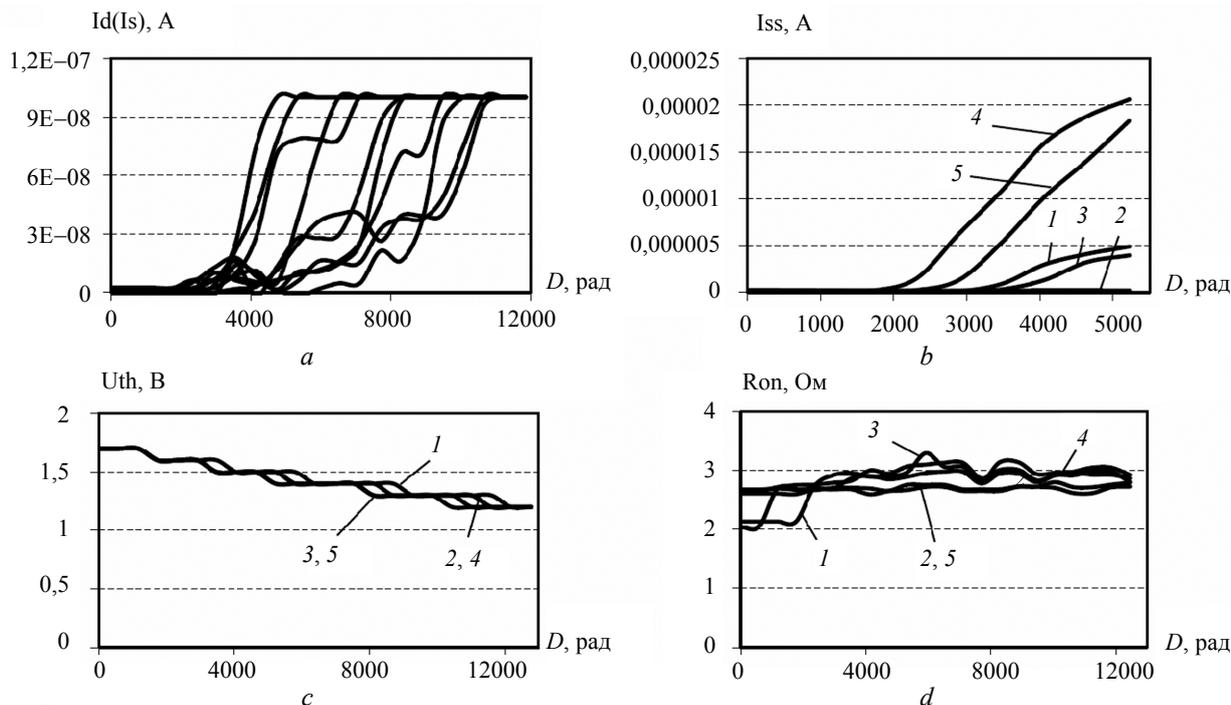


Рис. 5. Дegradация параметров ИМС ADG452BRUZ относительно накопленной дозы D : a – токи утечки стока (I_d) и истока (I_s) в закрытом состоянии; b – ток потребления I_{ss} ; c – пороговое напряжение U_{th} по логическому входу; d – сопротивление R_{on} открытого ключа. Для всех графиков 1–5 – порядковые номера испытанных ИМС в выборке из 5 шт.

Fig. 5. ADG452BRUZ IC parameters degradation relatively total ionizing dose D : a – source (I_s) and drain (I_d) off leakage currents; b – current consumption I_{ss} ; c – threshold voltage U_{th} of digital input; d – resistance R_{on} of open channel. For all curves 1–5 - test order numbers of 5 pieces IC sample

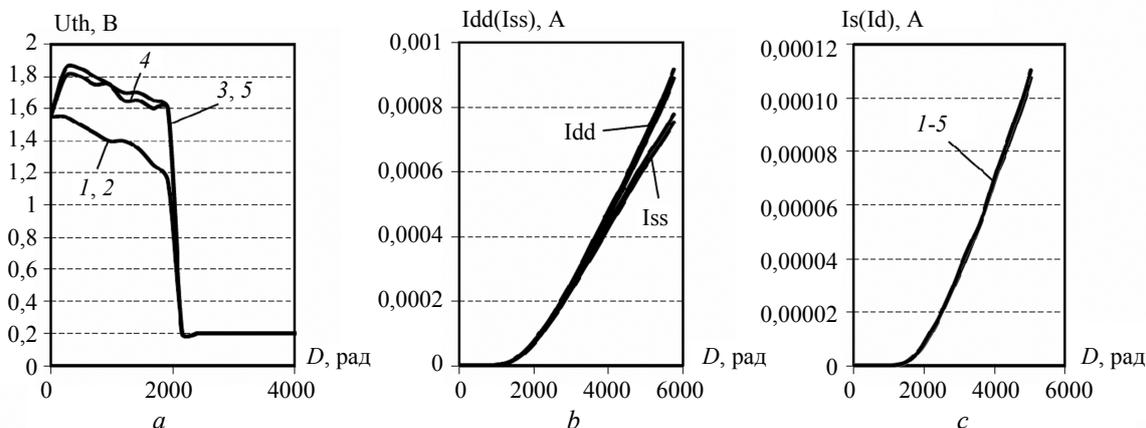


Рис. 6. Дegradация параметров ИМС ADG408BRUZ относительно накопленной дозы D : a – входное пороговое напряжение U_{th} цифровых выводов; b – ток потребления I_{dd} и I_{ss} по выборке ИМС из 5 шт.; c – токи утечки стока (I_d) и истока (I_s) в закрытом состоянии. Для всех графиков 1–5 – порядковые номера испытанных ИМС в выборке из 5 шт.

Fig. 6. ADG408BRUZ IC parameters degradation relatively total ionizing dose D : a – threshold voltage U_{th} of digital input; b – current consumption I_{dd} and I_{ss} for 5 pieces IC sample; c – source (I_s) and drain (I_d) off leakage currents. For all curves 1–5 - test order numbers of 5 pieces IC sample

Пороговые уровни входных напряжений для микросхем AD419BRZ и AD452BRUZ изменяются фактически линейно, исключением является поведение входного напряжения ADG408BRUZ – наблюдается функциональный отказ на уровне накопленной дозы 2 крад. Обратим внимание на

большую разницу в реакции сопротивления открытого ключа для микросхем AD419BRZ и AD452BRUZ – в случае с AD419BRZ данный параметр является критичным (при накопленной дозе свыше 10 крад наблюдается увеличение сопротивления открытого канала транзи-

сторного ключа более чем на 2 порядка, что связано со смещением пороговых напряжений на затворах МОП-транзисторов).

Наиболее чувствительными областями кристаллов ИМС с точки зрения целостности электрических параметров являются структурно-топологические элементы: 1) 1–8 и 10–12 (см. рис. 2), занимающие приблизительно 67 % площади кристалла ADG408BRUZ; 2) 1, 2, 4–6 (см. рис. 2), занимающие около 79 % площади кристалла ADG419BRZ; 3) 1–4 и 7–9 (см. рис. 3), занимающие приблизительно 63 % площади кристалла ADG452BRUZ. По критерию пара-

метрического отказа доминирующие радиационные эффекты можно локализовать по топологии ключевых МОП-транзисторов, занимающих преобладающую часть площади чувствительных областей кристаллов.

Во время проведения испытаний использовались контрольные образцы с целью исключения влияния нерадиационных факторов на результаты испытаний.

Подтвержденные уровни накопленной дозы микросхем серии ADG4XX по критериям параметрического отказа (ПО) и функционального отказа (ФО) с учетом (1) приведены в табл. 5.

Таблица 5. Фактическая стойкость ИМС серии ADG4XX

Table 5. Radiation hardness of IC's ADG4XX series

Обозначение	Критичные ПКГ ПО	$D_{тр}$ (ПО), рад	Критичные ПКГ ФО	$D_{тр}$ (ФО), рад
ADG408BRUZ	Токи потребления I_{ss} и I_{dd} ; Токи утечки стока (I_d) и истока (I_s) в закрытом состоянии	746	Входное пороговое напряжение U_{th} цифровых выводов	1088
ADG452BRUZ	Токи потребления I_{ss} и I_{dd}	1803	Входное пороговое напряжение U_{th} цифровых выводов	более 7212
	Токи утечки стока (I_d) и истока (I_s) в закрытом состоянии	721		
ADG419BRZ	Токи потребления I_{ss} и I_{dd}	1057	Спротивление R_{on} открытого ключа	5889
	Ток потребления I	4414		

Выводы

1. Стойкость ИМС серии ADG4XX ограничена величиной порядка 0,7...10 крад, что дает возможность прогнозирования стойкости всех микросхем этой серии и принятия решения по выбору комплектующих ИМС для высоконадежной аппаратуры космического применения с различными сроками активного существования.

2. Стойкость к дозовым эффектам микросхем серии ADG4XX связана с деградацией электрофизических параметров ключевых элементов (ключевых МОП-транзисторов), что позволяет локализовать наиболее чувствительные области кристаллов, используя микрофотографии топологий поверхностных слоев (см. рис. 2 и 3). Площади чувствительных областей ИМС ADG408BRUZ, ADG419BRZ, ADG452BRUZ составляют, соответственно, 67, 79 и 63 % от общей площади кристалла. Схемы управления, питания и защиты в меньшей степени подвержены влиянию дозовых радиационных эффектов в связи с чем наблюдается длительное стабильное функционирование ИМС при уже возникшем параметрическом отказе во время набора дозы.

3. Исходя из результатов испытаний можно утверждать, что характер отказов зависит не только от технологии изготовления, но и от схемотехнических факторов и режимов нагруз-

ки. Имеющиеся данные по испытаниям аналогичных микросхем (например, Отраслевая информационно-справочная система по стойкости электронной компонентной базы к естественным ионизирующим излучениям космического пространства KOSRAD) подтверждают полученные результаты, хотя интерпретация и оценка стойкости может отличаться в зависимости от требований, предъявляемых при проведении радиационных испытаний.

Библиографические ссылки

1. Гамзатов Н. Г., Руднев Г. П., Литвицкий К. В. К вопросу об оптимизации обеспечения радиационной стойкости космической аппаратуры по ионизационным дозовым эффектам // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2018. Вып. 3. С. 51–55.
2. Танеро К. И., Улимов В. Н., Членов А. М. Радиационные эффекты в кремниевых интегральных схемах космического применения. М.: Бином. Лаборатория знаний, 2012. 304 с.
3. Радиационная стойкость изделий ЭКБ: монография / А. Ю. Никифоров, В. А. Телец, В. С. Першенков [и др.]; под ред. д-ра техн. наук, проф. А. И. Чумакова. М.: МИФИ, 2015. 512 с.
4. Рациональный методический подход к оценке дозовой стойкости КМОП-микросхем с учетом эффектов низкой интенсивности / Д. В. Бойченко, О. А. Ка-

лашников, А. Б. Каракозов, А. Ю. Никифоров // Микроэлектроника. 2015. Т. 44, № 1. С. 4–11.

5. Беляева Е. А., Муравьев В. В. Управление качеством танталовых конденсаторов на основе анализа дефектов, возникающих на этапах технологического процесса и обнаруживаемых при эксплуатации // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2018. Т. 21, № 1. С. 74–81. DOI: 10.22213/2413-1172-2018-1-74-81.

6. Сибгатуллин Б. И., Барсуков В. К. Математическое моделирование переходных процессов при заряде конденсатора с распределенными параметрами методом конечных элементов // Интеллектуальные системы в производстве. 2018. Т. 16, № 3. С. 58–65. DOI: 10.22213/2410-9304-2018-3-58-65.

7. Кузнецова В. А., Муравьев В. В. Ускоренные испытания сохраняемости танталовых конденсаторов с использованием теплового метода // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2018. Т. 21, № 1. С. 82–88. DOI: 10.22213/2413-1172-2018-1-82-88.

8. Анализ влияния кинетики фототоков телевизионного мультискана на погрешность измерения координат и размеров световых зон / Ю. К. Шелковников, Н. И. Осипов, С. Р. Кизнерцев, А. А. Метелева // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2019. Т. 22, № 1. С. 89–99. DOI: 10.22213/2413-1172-2019-1-89-99.

9. Мельников Р. В., Щенятский А. В., Трутнев Г. А. Подходы к расчету технических характеристик твердотельного волнового гироскопа // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2018. Т. 21, № 1. С. 7–11. DOI: 10.22213/2413-1172-2018-1-7-11.

10. Соболев В. В. Оптические свойства и электронная структура неметаллов. В 2 т. Ижевск : Регулярная и хаотическая динамика, Институт компьютерных исследований, 2012. Т. 2. Моделирование интегральных спектров элементарными полосами. 416 с.

11. Sobolev V.V., Sobolev V.V. Optical spectra of arsenic chalcogenides in a wide energy range of fundamental absorption. *Semiconductors and Semimetals*, 2004, vol. 79, no. C, pp. 201-228.

12. Испытания электронных компонентов из летных партий к дозовым эффектам для гарантии стойкости бортовой аппаратуры космических аппаратов / В. М. Зыков, Ю. В. Максимов, И. А. Максимов [и др.] // Вестник СибГАУ. 2015. Т. 16, № 4. С. 881–890.

13. Fleetwood D.A. First-principles approach to total-dose hardness assurance. 1995 IEEE NSREC IEEE Nuclear and Space Radiation Conference. Short Course: “Advanced Qualification Techniques; a Practical Guide for Radiation Testing of Electronics”. Madison, Wisconsin, 1995, pp. III-1-III-69.

14. Barnaby H. Total-ionizing-dose effects in modern CMOS technologies. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* Dec, 2006, vol. 53, no. 6, pp. 3103-3121.

15. Dodd P.E., Shaneyfelt M.R., Schwank J.R., Felix J.A. Current and future challenges in radiation effects on CMOS electronics. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 2010, vol. 57, no. 4, pp. 1747-1763.

16. Никифоров А. Ю., Телец В. А., Чумаков А. И. Радиационные эффекты в КМОП интегральных схемах. М.: Радио и связь, 1994. 164 с.

17. Якунин М. А. Решение задач контроля радиационного баланса подстилающей поверхности на основе спектрального подхода // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2015. Т. 18, № 1. С. 83–84.

18. Oldham T.R., McLean F.B. Total Ionizing Dose Effects on Nuclear Science and Devices. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, June 2003, vol. 50, no. 3, pp. 483-499.

19. Schwank J. Total Dose Effects in MOS Devices. *IEEE NSREC Short Course Notes*, 2002, pp. III-1 - III-123.

20. Чубруков Ф. В. Определение запаса стойкости КМОП ИМС при воздействии ионизирующего излучения // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2017. Вып. 1. С. 31–35.

21. Chatterjee I., Zhang E.X., Bhuvu B.L., Alles M.A., Schrimpf R.D., Fleetwood D.M., Fang Y.-P., Oates A. Bias Dependence of Total-dose Effects in Bulk FinFETs. *Nuclear Science, IEEE Transactions on*. Dec., 2013, vol. 60, no. 6, pp. 4476-4482.

22. Dodd P.E., Paillet P., Ferlet-Cavrois V. Radiation Effects in MOS Oxides. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 2008, vol. 55, no. 4, pp. 1833-1852.

23. Катеринич И. И., Понов В. Д., Вин Чжо Ко. Анализ изменения плотности поверхностных состояний в МОП-приборах при воздействии гамма-излучения в широком диапазоне мощностей дозы // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика радиационного взаимодействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2012. Вып. 1. С. 43–45.

24. Бутин В. И., Чубруков Ф. В. Диагностирование запаса стойкости КМОП-микросхем в условиях воздействия ионизирующего излучения // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2018. Вып. 2. С. 16–20.

References

1. Gamzatov N.G., Rudnev G.P., Litvitskii K.V. [On the issue of optimizing the provision of radiation resistance of space equipment for ionization dose effects]. *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki. Seriya Fizika radiatsionnogo vozdeistviya na radioelektronnyu apparaturu*, 2018, vol. 3, pp. 51-55 (in Russ.).

2. Tapero K.I., Ulimov V.N., Chlenov A.M. *Radiatsionnye efekty v kremnievykh integral'nykh skhemakh kosmicheskogo primeneniya* [Radiation effects in silicon integrated circuits for space application]. Moscow, Binom. Laboratoriya znaniy Publ., 2012, 304 p. (in Russ.).

3. Nikiforov A.Yu., Telets V.A., Pershenkov B.C. *Radiatsionnaya stoikost' izdelii EKB* [Radiation resistance of ECB products]. Moscow, MIFI Publ., 2015, 512 p. (in Russ.).

4. Boichenko D.V., Kalashnikov O.A., Karakozov A.B., Nikiforov A.Yu. [A rational methodological approach to assessing the dose resistance of CMOS microcircuits taking into account low-intensity effects].

Mikroelektronika, 2015, vol. 44, no. 1, pp. 4-11 (in Russ.).

5. Belyaeva E.A., Murav'ev V.V. [Upravlenie kachestvom tantalovykh kondensatorov na osnove analiza defektov, vznikayushchikh na etapakh tekhnologicheskogo protsessa i obnaruzhivaemykh pri ekspluatatsii]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2018, vol. 21, no. 1, pp. 74-81 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2018-1-74-81.

6. Sibgatullin B.I., Barsukov V.K. [Mathematical modeling of transient processes when charging a capacitor with distributed parameters by the finite element method]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*, 2018, vol. 16, no. 3, pp. 58-65 (in Russ.).

7. Kuznetsova V.A., Murav'ev V.V. [Accelerated Tantalum Capacitance Test Using Thermal Method]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2018, vol. 21, no. 1, pp. 82-88 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2018-1-82-88.

8. Shelkovnikov Yu.K., Osipov N.I., Kiznertsev S.R., Meteleva A.A. [Analysis of the effect of the kinetics of photocurrents of a television multiscan on the error in measuring coordinates and sizes of light zones]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2019, vol. 22, no. 1, pp. 89-99 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2019-1-89-99.

9. Mel'nikov R.V., Shchenyatskii A.V., Trutnev G.A. [Approaches to the calculation of the technical characteristics of a solid-state wave gyroscope]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova* [Bulletin of Kalashnikov ISTU], 2018, vol. 21, no. 1, pp. 7-11 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2018-1-7-11.

10. Sobolev V.V. *Modelirovanie integral'nykh spektrov elementarnymi polosami* [Modeling integrated spectra by elementary bands]. Izhevsk, Regul'yarnaya i khaoticheskaya dinamika, Institut komp'yuternykh issledovaniy Publ., 2012, 416 p. (in Russ.).

11. Sobolev V.V., Sobolev V.V. Optical spectra of arsenic chalcogenides in a wide energy range of fundamental absorption. *Semiconductors and Semimetals*, 2004, vol. 79, no. C, pp. 201-228.

12. Zykov V.M., Maksimov Yu.V., Maksimov I.A. [Tests of electronic components from the summer batch to dose effects to guarantee the stability of spacecraft onboard equipment]. *Vestnik SibGAU*, 2015, vol. 16, no. 4, pp. 881-890 (in Russ.).

13. Fleetwood D.A. First-principles approach to total-dose hardness assurance. IEEE Nuclear and Space Radiation Conference. Short Course "Advanced Quali-

fication Techniques; a Practical Guide for Radiation Testing of Electronics". Madison, Winconsin, 1995, pp. III-1 - III-69.

14. Barnaby H. Total-ionizing-dose effects in modern CMOS technologies. *IEEE Trans. Nucl. Sci. Dec*, 2006, vol. 53, no. 6, pp. 3103-3121.

15. Dodd P.E., Shaneyfelt M.R., Schwank J.R., Felix J.A. Current and future challenges in radiation effects on CMOS electronics. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 2010, vol. 57, no. 4, pp. 1747-1763.

16. Nikiforov A.Yu., Telets V.A., Chumakov A.I. *Radiatsionnye efekty v KMOP integral'nykh skhemakh* [Radiation effects in CMOS integrated circuits]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1994, 164 p. (in Russ.).

17. Yakunin M.A. [Solving the problems of monitoring the radiation balance of the underlying surface based on the spectral approach]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikov*, 2015, vol. 18, no. 1, pp. 83-84 (in Russ.).

18. Oldham T.R., McLean F.B. Total Ionizing Dose Effects in MOS Oxides and Devices. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, June 2003, vol. 50, no. 3, pp. 483-499.

19. Schwank J. Total Dose Effects in MOS Devices. *IEEE NSREC Short Course Notes*, 2002, pp. III-1 - III-123.

20. Chubrukov F.V. [Determination of the safety margin of CMOS IMS under the influence of ionizing radiation]. *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki. Seriya Fizika radiatsionnogo vozdeistviya na radioelektronnyuyu apparaturu*, 2017, vol. 1, pp. 31-35 (in Russ.).

21. Chatterjee I., Zhang E.X., Bhuvu B.L., Alles M.A., Schrimpf R.D., Fleetwood D.M., Fang Y.-P., Oates A. Bias Dependence of Total-dose Effects in Bulk FinFETs. *Nuclear Science, IEEE Transactions on*. Dec., 2013, vol. 60, no. 6, pp. 4476-4482.

22. Dodd P.E., Paillet P., Ferlet-Cavrois V. Radiation Effects in MOS Oxides. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 2008, vol. 55, no. 4, pp. 1833-1852.

23. Katerinich I.I., Popov V.D., Chzho Ko Vin [Analysis of changes in the density of surface states in MOS devices under the influence of gamma radiation in a wide range of dose rates]. *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki. Seriya Fizika radiatsionnogo vozdeistviya na radioelektronnyuyu apparaturu*, 2012, vol. 1, pp. 43-45 (in Russ.).

24. Butin V.I., Chubrukov F.V. [Diagnostics of the margin of safety of CMOS chips under the influence of ionizing radiation]. *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki. Seriya Fizika radiatsionnogo vozdeistviya na radioelektronnyuyu apparaturu*, 2018, vol. 2, pp. 16-20 (in Russ.).

Research of ADG4XX Series Integrated Microcircuits Radiation Hardness Regarding Total Ionizing Dose Effects

P.A. Ushakov, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

K.O. Maksimov, PhD in Engineering, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

A.A. Dedyukhin, Udmurt State University, Izhevsk, Russia

Modern requirements to aerospace onboard radio-electronic equipment substantially updated the estimation and prediction tasks for electronic components radiation hardness levels. The particular interest is directed on researching the influence of natural and artificial ionizing radiation fields on integrated microcircuits CMOS.

The paper presents the technique for radiation experiment using AGAT-S equipment with the sealed radioactive source of Co60 gamma radiation, and also the results of ADG4XX series (Analog Devices company) integrated mi-

microcircuits total ionizing dose test. Gamma radiation influence on functioning and electric parameters of multichannel analog switches/multiplexers taking into account topology of chips are researched. In particular, the dependences of the most sensitive parameters of the researched objects on the actual radiation hardness level were received; and also the reasons of the controlled parameters degradation were analyzed: consumption currents, leakage currents, threshold logic voltages, etc.

Besides, the destructive physical analysis of chip samples was carried out to determine the most sensitive topology areas and radiation effects localization of semiconductor dies.

The results are given for the ADG4XX series IC's dose rates calculation: the minimum dose rate sensitivity varies from 721rad to 1057rad by parametrical failure criteria and from 1088rad to 7212rad by functional failure criteria for different microcircuits. These information have the practical value when the researched objects are applied in military, space and special radiation resistant equipment.

Keywords: gamma radiation, radiation hardness, ionizing radiation, analog switch, analog multiplexer, total ionizing dose.

Получено 17.10.2019

Образец цитирования

Ушаков П. А., Максимов К. О., Дедюхин А. А. Исследование радиационной стойкости микросхем серии ADG4XX к воздействию ионизирующего излучения по эффектам поглощенной дозы // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2019. Т. 22, № 4. С. 73–82. DOI: 10.22213/2413-1172-2019-4-73-82.

For Citation

Ushakov P.A., Maksimov K.O., Dedyukhin A.A. [Research of ADG4XX Series Integrated Microcircuits Radiation Hardness Regarding Total Ionizing Dose Effects]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2019, vol. 22, no, 4, pp. 73-82 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2019-4-73-82.