

Д. т. н. В. Г. ВЕРБИЦКИЙ, к. т. н. В. И. ЗОЛОТАРЕВСКИЙ,
Л. И. САМОТОВКА, Б. А. БАЛАЙ, А. Ф. ВОЦИНКИН,
В. Л. КОБА, Е. С. ТОВМАЧ, А. А. ЯВЕЦКИЙ

Украина, г. Киев, Институт микроприборов
E-mail: ut4ui@yandex.ru

Дата поступления в редакцию
20.10.2004 г.

Оппонент к. ф.-м. н. В. М. ПОПОВ
(Институт микроприборов, г. Киев)

КМОП БИС 16-РАЗРЯДНОГО МИКРОПРОЦЕССОРА, УСТОЙЧИВОГО К ВОЗДЕЙСТВИЮ γ -РАДИАЦИИ

Приводятся результаты проектирования и испытаний КМОП БИС 16-разрядного микропроцессора, аналога 1810ВМ86, при воздействии накопленной дозы γ -радиации до 10^6 рад.

Фактором, сдерживающим широкое применение МДП-приборов (в частности КМОП ИС) в аппаратуре, эксплуатируемой в условиях воздействия ионизирующего излучения, является их относительно невысокая радиационная стойкость, которая в большинстве случаев характеризуется дозой γ -излучения порядка 10^4 рад. В связи с этим широко ведутся исследования влияния ионизирующего излучения на характеристики КМОП ИС с целью разработки рекомендаций по обеспечению их работоспособности в аппаратуре с заданными требованиями по радиационной стойкости [1].

Институт микроприборов разработал конструкцию и технологию изготовления КМОП БИС 1834ВМ86, функционирующую в условиях радиационного воздействия с общей накопительной дозой γ -излучения вплоть до 10^6 рад.

БИС 1834ВМ86 является полным функциональным аналогом БИС 1810ВМ86 [2], представляет собой однокристалльный высокопроизводительный 16-разрядный микропроцессор, выполнен по КМОП-технологии с n -карманом, самосовмещенным поликремниевым затвором и двумя уровнями алюминиевых токопроводящих шин.

В отличие от аналога, имеющего нижнюю границу по частоте следования тактовых сигналов, БИС 1834ВМ86 может работать при любой малой частоте, что обусловлено микросхемотехникой конструкций узлов БИС, работающих в квазистатическом электрическом режиме. Прекращение подачи тактового сигнала в любой момент работы не приводит к потере информации, т. к. микропроцессор сохраняет ее во внутренних регистрах. При возобновлении подачи тактового сигнала процессор продолжает работать, как будто никаких остановок и не было. Таким образом, пользователь получает удобное средство отладки программно-аппаратных решений, используя пошаговый режим с остановкой микропроцессора в любом состоянии на сколь угодно длительное время.

Полная функциональная идентичность выводов с микропроцессором 1810ВМ86 позволяет использовать 1834ВМ86 в качестве центрального процессор-

ного устройства при построении средств вычислительной техники АСУТП и, кроме того, для использования в робототехнических и космических системах, устойчивых к накопленной дозе γ -радиации.

Проектирование топологической конструкции элементов КМОП ИС 1834ВМ86, в том числе и элементов защиты функциональной схемы от статического электричества, тиристорного эффекта, выполнено на объемном монокристаллическом кремнии КДБ12(100). Конструкторско-технологические ограничения (КТО) разработаны с учетом максимально допустимых (не превышающих $\pm 0,15$ мкм) отклонений линейных размеров элементов КМОП ИС, изготовленных на пластинах монокристаллического кремния, от размеров, заданных в проектной документации в виде исходной информации, представляющей координаты точек топологических конструкций элементов в декартовой системе координат. При этом учитывалось, что фотолитографические процессы производства КМОП ИС будут выполняться методом проекционной фотолитографии с использованием позитивного фоторезиста, а также с учетом полной адаптации технологического маршрута и всех технологических режимов к применяемым в массовом, серийном производстве интегральных схем по типовой КМОП ИС-технологии с n -карманной изоляцией p -канальных от n -канальных МОП-транзисторов.

Минимальные значения КТО рассчитаны и обоснованы исходя из требований обеспечения необходимых уровней пробивных напряжений стоковых p - n -переходов, напряжений смыкания между стоками-истоками не менее 10 В, приемлемых величин сопротивлений токоведущих шин, затворов. Учтена необходимость исключения взаимных влияний пассивных "паразитных" элементов на активные и между активными элементами МОП-транзисторов, обеспечения напряжения питания U_{CC} КМОП БИС не более 6,0 вольт, а также обеспечения достаточного уровня процента выхода годных в производстве и эксплуатации электрических параметров в условиях функционирования КМОП ИС 1834ВМ86 на частоте тактовых сигналов не менее 10 МГц в диапазоне температур $-60...+85^\circ\text{C}$.

Минимально допустимые линейные размеры элементов КМОП ИС представлены в табл. 1. В условных обозначениях (например АВ12) первая буква — наименование элемента А, вторая буква — элемента В, цифры — нумерация элементов или размеров, затворов между элементами. Обозначения, использован-

ИНТЕГРАЛЬНЫЕ СХЕМЫ И ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ

ные в табл. 1: ИЛ — ионное легирование; P, p^+, N, n^+, p, n — тип проводимости области полупроводника.

Указанные в таблице КТО рассчитаны исходя из того, что технологические режимы создания в объемном монокристаллическом кремнии активных областей и элементов должны обеспечивать:

— поверхностное сопротивление N -кармана в пределах $2000 \pm 300 \text{ Ом}/\square$ при глубине залегания p - n -перехода $5 \pm 0,5 \text{ мкм}$;

— поверхностное сопротивление областей p^+ -типа проводимости в пределах $90 \pm 10 \text{ Ом}/\square$ при глубине залегания p - n -переходов $0,5 \pm 0,1 \text{ мкм}$;

— поверхностное сопротивление областей n^+ -типа проводимости в пределах $50 \pm 10 \text{ Ом}/\square$ при глубине залегания p - n -переходов $0,5 \pm 0,1 \text{ мкм}$;

— поверхностное сопротивление областей n -типа проводимости поликремниевых токоведущих шин не более $30 \text{ Ом}/\square$;

Таблица 1

Конструктивно-технологические ограничения для проектирования топологии элементов микросхемы 1834VM86 (10 МГц)

Области элементов	Параметры (характеристики) областей. Комбинация областей в топологии	Минимальный размер, мкм
A11 A21	Слой 1. А Области карманов, легированных фосфором Ширина N -кармана Расстояние между N -карманами	4,8 9,6
B11 B12 B13 B21 B22 AB11 AB12 AB21 AB22	Слой 2. В Активные области Ширина p^+ -областей Ширина n^+ -областей внутри кармана Ширина n^+ -областей вне кармана Расстояние между смежными активными областями одного типа проводимости Расстояние между смежными активными областями разного типа проводимости Перекрывание N -карманом p^+ -активной области Перекрывание N -карманом n^+ -активной области Расстояние p^+ -активных областей в P -подложке от N -кармана Расстояние n^+ -активных областей в P -подложке от N -кармана	3,2 3,2 6,4 1,6 2,4 2,0 0 2,4 6,4
AC1	Слой 3. С Пассивные области, легированные бором Перекрывание маской под пассивные области p -типа N -кармана	2,4
D11 D21 D31 DB1 DB2 DB3	Слой 4. Д Затворы и проводники из поликремния Ширина поликремниевых затворов Расстояние между поликремниевыми затворами Расстояние между поликремниевой шиной и смежной активной областью Перекрывание поликремниевым затвором полевого окисла в направлении ширины канала МОП-транзистора (МОПТ) Ширина истоковой, стоковой области n^+ -типа Ширина истоковой, стоковой области p^+ -типа	2,4 2,0 0,4 2,0 4,4 3,2
BE1 BE2 BE3 E11	Слой 5. Е Области ИЛ фосфором Расстояние от края окна под ИЛ фосфором истоков и стоков n^+ -канальных транзисторов до края активной области Перекрывание окном под ИЛ фосфором n^+ -активных областей Перекрывание окном под ИЛ фосфором p^+ -активных областей Расстояние между окнами под ИЛ фосфором	2,0 0,8 1,6 2,4
F11 FB1 FE1 FB2	Слой 6. F Области ИЛ бором Расстояние между окнами под ИЛ бором Перекрывание окном под ИЛ бором p^+ -активных областей Расстояние между окнами под ИЛ бором и окнами под ИЛ фосфором в контактах к N -карману и P -подложке Расстояние между окнами под ИЛ бором и n^+ -активными областями	2,4 0,8 0 1,6
G11 G21 GB1 GE1 GD1 GD2	Слой 7. G Контактные окна 1 Размер контактного окна 1 Расстояние между контактными окнами Перекрывание активной областью p -типа контактного окна Перекрывание окном под ИЛ фосфором контактного окна Перекрывание поликремниевой шиной контактного окна Расстояние между контактным окном и затвором транзистора	1,6×1,6 2,4 1,6 1,6 1,6 2,0
H11 H21 HG1	Слой 8. H Контактные площадки и проводники первого уровня Ширина шины металлизации Расстояние между шинами Перекрывание металлизированной шиной контактного окна 1	5,0 2,0 2,0
J11 J21 JG1 JH1 JB1 JD1 JB2 JD2	Слой 9. J Контактные окна 2 Размер контактного окна 2 Расстояние между контактными окнами 2 Расстояние между контактными окнами 1 и контактными окнами 2 Перекрывание контактного окна 2 металлизированной шиной первого уровня Расстояние между контактным окном 2 и краем активной области Расстояние между контактным окном 2 и краем поликремния Перекрывание активной областью контактного окна 2 Перекрывание поликремниевой шиной контактного окна 2	2,4×2,4 3,2 3,2 2,0 1,6 1,6 2,0 2,0
I11 I21 IJ1	Слой 10. I Контактные площадки и проводники второго уровня Ширина шины металлизации Расстояние между шинами Перекрывание металлизированной шиной 2 уровня контактного окна 2	5,6 2,0 2,0
K11	Слой 11. K Окна в пассивирующем покрытии Перекрывание окна в пассивирующем покрытии контактной площадкой 2 уровня	9,6

— двухуровневые металлические токоведущие шины на основе материала Al+1%Si ;

— подзатворный диэлектрик — двуокись кремния толщиной 400–500 Å с относительной диэлектрической проницаемостью 3,85—3,95.

Радиационная стойкость КМОП ИС к накопленной дозе γ -радиации во многом определяется как конструкцией ее элементов, так и технологией изготовления. Воздействие γ -радиации на МОП-структуры приводит к заметному изменению их электрических характеристик, что в основном обусловлено накоплением пространственного заряда как на границе раздела "диэлектрик—полупроводник", так и в объеме двуокиси кремния, а также уменьшением подвижности носителей заряда в приповерхностной области полупроводника [3, с. 97, 120—123].

Одной из основных характеристик МОП-структуры, наиболее подверженной изменениям от воздействия γ -радиации, является пороговое напряжение: в КМОП-транзисторах на тонком подзатворном диэлектрике — пороговое напряжение активного n - или p -канального МОП-транзистора, а на толстом защитно-разделительном диэлектрике — пороговое напряжение транзистора, образующегося между элементами КМОП ИС (так называемый "паразитный" МОП-транзистор).

При воздействии радиации на КМОП ИС в тонком слое подзатворного диэлектрика (чаще всего на границе раздела SiO_2 —Si) образуется положительный заряд, который приводит к понижению пороговых напряжений n -МОПТ и повышению пороговых напряжений p -МОП-транзисторов. Поэтому для КМОП ИС с напряжением питания $5,0 \pm 10\% \text{ В}$, стойких к радиационному воздействию, пороговые напряжения n -МОП-транзисторов должны быть в пределах 0,8—1,0 В, а p -МОП-транзисторов — в пределах 0,5—0,7 В.

Управление пороговым напряжением достигается с помощью подлегирования каналов МОП-транзисторов, т. е. изменением поверхностной концентрации примесей в подложке p -типа на границе раздела "подзатворный диэлектрик—подложка МОП-транзистора" или в кармане n -типа проводимости. Для устранения дополнительной концентрации дефектов, возникающих в диэлектрических пленках на границе раздела "диэлектрик—полупроводник", подлегирование каналов МОП-транзисторов выполняется до создания подзатворной двуокиси кремния.

Повысить пороговое напряжение n -канального паразитного МОП-транзистора можно путем увеличения концентрации примесей бора под защитно-разделительным слоем двуокиси кремния (LOCOS) до $(3...5) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ (см. обл. p^+ на рис. 1).

При этом необходимые пробивные напряжения стокowych p - n -переходов обеспечиваются уровнем легирования подложки p -типа проводимости, а также величиной расстояния (l) от внешнего контура стокового p - n -перехода до сильнолегированной области p^+ -типа проводимости. Расстояние $l \geq 2 \text{ мкм}$ обеспечивает величину пробивных напряжений p - n -переходов не менее 10 В при концентрации примесей в подложке p -проводимости не более 10^{16} см^{-3} .

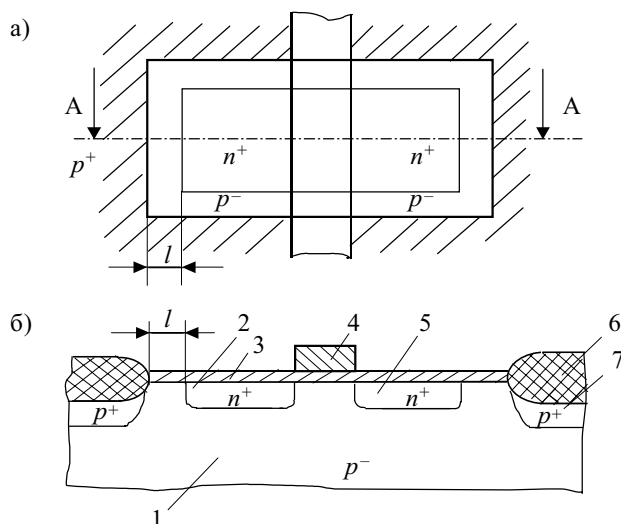


Рис. 1. Топологическая схема (а) и разрез (б) радиационно стойкого активного n -МОП-транзистора:

1 — подложка монокристаллического кремния p -типа проводимости КДБ12 (100); 2 — сток МОПТ; 3 — подзатворный диэлектрик; 4 — поликремниевый затвор n -типа проводимости; 5 — исток МОПТ; 6 — двуокись кремния (LOCOS); 7 — область подлегирования с целью повышения значений "паразитного" порогового напряжения

Уменьшение толщины подзатворного окисла до 400—450 Å приводит к существенному снижению чувствительности порогового напряжения к воздействию радиации. Так, доза γ -излучения 10^4 рад для подзатворного диэлектрика толщиной 1500 Å изменяет пороговое напряжение МОПТ на такую же величину, что и доза 10^6 рад для подзатворного диэлектрика толщиной 450 Å. Температурные, плазмохимические режимы обработки и создания элементов КМОП ИС после изготовления подзатворного диэлектрика существенно влияют на радиационную стойкость МОП-структуры. Последующие температурные воздействия в технологическом процессе производства КМОП ИС не должны превышать 850°C с целью снижения степени накопления дефектов на границе раздела Si— SiO_2 .

Результаты проведенных исследований влияния радиационно-термических обработок на величины пороговых напряжений тестовых n -канальных МОП-транзисторов БИС 1834ВМ86 представлены в табл. 2. Радиационное воздействие, в том числе и повторное, проводилось от источника γ -излучения ^{60}Co мощностью 90 рад/с до набора общей дозы $1,26 \cdot 10^6$ рад, а последующий отжиг проводился при $T=400^\circ\text{C}$ в течение

Таблица 2
Влияние радиационно-термических обработок на пороговое напряжение

Номер образца	Исходное пороговое напряжение, В (толщина окисла 400—450 Å)	Пороговое напряжение после облучения, В	Пороговое напряжение после облучения, последующего отжига и повторного облучения, В
1	0,85	0,50	0,6
2	0,83	0,50	0,61
3	0,80	0,52	0,67
4	0,87	0,60	0,68

ИНТЕГРАЛЬНЫЕ СХЕМЫ И ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ

20 мин. Как видно из таблицы, после облучения МОП-транзисторов γ -квантами дозой $1,26 \cdot 10^6$ рад и низкотемпературного отжига последующее γ -облучение с такой же дозой приводит к меньшему сдвигу порогового напряжения n -канальных транзисторов относительно исходных значений.

Для p -канальных МОП-транзисторов эффект уменьшения сдвига порогового напряжения после радиационно-термического воздействия менее выражен.

Такие параметры МОП-транзисторов как удельная крутизна, активное сопротивление области стока, пороговое напряжение определялись методом, представленным в работе [4].

Последовательное применение двух радиационно-термических обработок приводит к дальнейшему повышению стойкости МОП-транзисторов и БИС в целом к воздействию γ -радиации. Это повышение радиационной стойкости объясняется разрывом напряженных связей в структурах $\text{SiO}_x\text{—Si}$ на границе раздела "подзатворный диэлектрик—полупроводник" с восстановлением валентных связей и снижением концентрации напряженных связей после термических обработок [3, с. 200].

Испытания КМОП БИС 1834ВМ86, подвергнутых двум радиационно-термическим воздействиям в ус-

ловиях накопления дозы γ -радиации, проводились на установке "Гамма МРХ-25М". Схема динамической электрической нагрузки приведена на **рис. 2** (см. также **табл. 3**). Параметры электрического режима показаны в **табл. 4**.

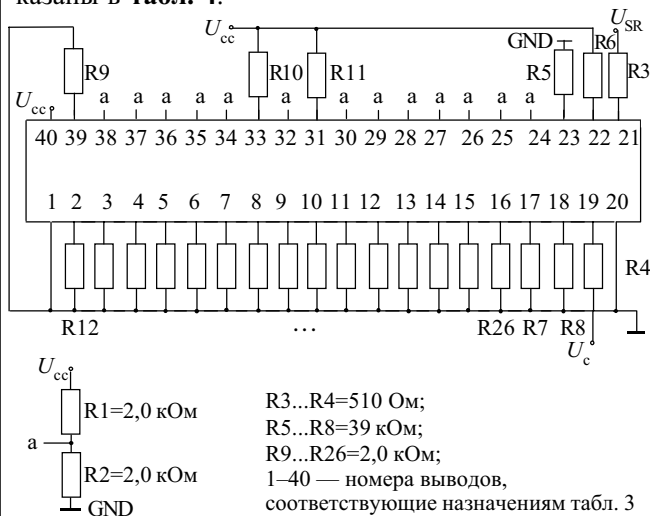


Рис. 2. Электрическая схема включения КМОП ИС 1834ВМ86 при радиационном воздействии

Таблица 3

Назначения выводов схемы рис. 2

Номер вывода	Назначение вывода		Обозначение		Тип вывода	
	Минимальный режим	Максимальный режим	Минимальный режим	Максимальный режим	Минимальный режим	Максимальный режим
1, 20	Общий вывод		0V		—	
2—16	Канал адреса/данных		A/D14 — A/D0		Вход/выход с тремя состояниями	
17	Немаскируемый запрос прерывания		NM1		Вход	
18	Маскируемый запрос прерывания		INT			
19	Тактовый сигнал		C			
21	Сброс		SR			
22	Готовность		RDY			
23	Проверка		TEST			
24	Подтверждение прерывания	Состояние очереди команд 1	INTA	QS1	Выход	
25	Разрешение фиксации адреса	Состояние очереди команд 0	ALE	QS0		
26	Разрешение передачи данных	Состояние цикла канала 0	DEN	SA0	Выход с тремя состояниями	
27	Выдача/прием данных	Состояние цикла канала 1	DT/R	SA1		
28	Признак обращения к ЗУ или УВВ	Состояние цикла канала 2	M/I0	SA2		
29	Запись	Программная блокировка	WR	LOCK		
30	Подтверждение захвата	Запрос/разрешение доступа к магистрали 1	HLDA	RQ/GT1	Выход	Вход/ выход
31	Захват	Запрос/разрешение доступа к магистрали 0	HOLD	RQ/GT0	Выход	Вход/ выход
32	Чтение		RD		Выход с тремя состояниями	
33	Режим управления минимальный/ максимальный		MN/MX		Вход	
34	Разрешение передачи по старшей половине канала A/D/состояние		BHE/SA7		Выход с тремя состояниями	
35 36—38	Канал адреса/состояния		A19/SA6 — A16/SA3			
39	Канал адреса/данных		A/D15		Вход/выход с тремя состояниями	
40	Напряжение питания		Ucc		5V	

Таблица 4
 Параметры электрического режима схемы рис. 2

Параметр	Значение параметра	Погрешность поддержания
Напряжение питания (U_{CC}), В	5,5	$\pm 5\%$
Напряжение тактовых сигналов верхнего уровня (U_{CH}), В	5,0	$\pm 10\%$
Напряжение тактовых сигналов нижнего уровня (U_{CL}), В	0,2	$\pm(10\% U_{CL} + 0,2 \text{ В})$
Напряжение сигнала "Reset" верхнего уровня (U_{SRH}), В	5,0	$\pm 10\%$
Напряжение сигнала "Reset" нижнего уровня (U_{SRL}), В	0,2	$\pm(10\% U_{CL} + 0,2 \text{ В})$
Период следования тактовых импульсов T_c , мкс	0,5	$\pm 10\%$
Длительность тактовых импульсов высокого уровня t_{CH} , мкс	0,2	$\pm 10\%$
Период следования сигнала "Reset" T_{SR} , мс	40	$\pm 10\%$
Длительность импульсов "Reset" t_{SR} , мс	0,1	$\pm 10\%$

Таблица 5
 Параметры БИС до и после радиационного воздействия

Параметры	До воздействия		После воздействия	
	min	max	min	max
Ток потребления в статическом режиме I_{CC} , мкА	40	310	80	330
Выходное напряжение низкого уровня U_{OL} , В	0,174	0,226	0,170	0,194
Выходное напряжение высокого уровня U_{OH} , В	4,22	4,3	4,3	4,31
Входной ток низкого уровня I_{IL} , мкА	220	250	200	220
Входной ток высокого уровня I_{IH} , мкА	-150	-160	-120	-130
Ток утечки на входе I_L , выходной ток в состоянии "выключено" I_{OZ} , мкА	Единицы нА		Единицы нА	

Значения основных параметров БИС 1834ВМ86 до и после радиационного воздействия γ -излучения дозой $1,26 \cdot 10^6$ рад приведены в табл. 5, а эксплуатационные параметры радиационно стойкого КМОП-микрпроцессора приведены в табл. 6.

Контроль функционирования и временных параметров БИС проводился на частоте 8 МГц как до, так и после воздействия накопленной дозы $1,26 \cdot 10^6$ рад. Отказов в работе БИС, в том числе и кратковременных, в температурном диапазоне $-60...+125^\circ\text{C}$ не наблюдалось.

Таким образом, разработка радиационно стойких БИС с напряжением питания не более 6,0 В на основе подложек объемного монокристаллического кремния p -типа проводимости связано с выбором оптимальной конструкции МОП-элементов БИС, а также с применением радиационно-термических обработок в процессе изготовления кристаллов КМОП БИС. Применение двух радиационно-термических обработок с уровнем накопленной дозы γ -радиации $1,26 \cdot 10^6$ рад и температурой отжига 400°C в течение 20 мин стабилизирует электрические параметры КМОП БИС.

Таблица 6
 Эксплуатационные параметры и основные характеристики радиационно стойкого КМОП-микрпроцессора 1834ВМ86

Количество элементов, шт.	35000
Количество регистров общего назначения	8
Разрядность регистров общего назначения	16
Количество каналов обмена информацией	2
Разрядность адреса	20
Разрядность данных	16
Формат команд, байт	1—6
Количество базовых команд	135
Объем адресуемой памяти, Мбайт	1
Количество уровней прерывания	256
Число режимов адресации	24
Частота импульсов тактовых сигналов, МГц	0—10
Мощность потребления на частоте 10 МГц, мВт	250
Наличие средств мультипроцессорирования	Имеются
Выходное напряжение низкого уровня $ U_{OL} $, В	$\leq 0,4$
Выходное напряжение высокого уровня $ U_{OH} $, В	$\geq 3,5$
Входной ток высокого уровня $ I_{IH} $, мкА	$-40...-400$
Входной ток низкого уровня $ I_{IL} $, мкА	$40...400$
Ток утечки высокого (низкого) уровня на входах $ I_{LH}(I_{LL}) $, мкА	$\leq \pm 1,0$
Выходной ток низкого уровня в состоянии "выключено" I_{OZ} , мкА	≤ -10
Ток потребления I_{CC} , мкА	≤ 500
Динамический ток потребления, мА/МГц	≤ 10
Емкость входа/выхода микросхемы, пФ	≤ 20
Напряжение питания U_{CC} , В	4,5—5,5

Как показали испытания КМОП БИС 1834ВМ86 (см. табл. 4), уход основных электрических параметров незначителен.

Выбранные конструктивно-технологические ограничения и некоторые особенности технологического процесса изготовления позволили спроектировать и изготовить образцы КМОП БИС 16-разрядного микрпроцессора 1834ВМ86 с предельно допустимой тактовой частотой до 10 МГц и устойчивого к радиационному воздействию с общей накопленной дозой γ -излучения до $1,0 \cdot 10^6$ рад.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Лавренцов В. Д., Хорохина Л. Н., Юсов Ю. П. Работоспособность МДП приборов при воздействии ионизирующих излучений в реальных условиях эксплуатации // Зарубежная электронная техника. (М: ЦНИИ «Электроника».)— 1991.— № 1—2.
2. Хвощ С. Т., Варлинский Н. Н., Попов Е. А. Микропроцессоры и микроЭВМ в системах автоматического управления. Справочник.— Л.: Машиностроение, 1987.
3. Коршунов Ф. П., Богатырев Ю. В., Вавилов В. А. Воздействие радиации на интегральные микросхемы.— Мн.: Наука и техника, 1986.
4. А. с. 1716896 СССР. Способ определения электрофизических параметров МДП-транзистора / Л. И. Самотовка, В. И. Золотаревский, Г. Б. Сердюк.— 01.11 91 г.