

Проектирование компараторов напряжений на базе элементов радиационно-стойкого низкотемпературного BiJFET базового матричного кристалла MН2ХА030

О.В. Дворников¹, В.А. Чеховский², В.Л. Дятлов², Н.Н. Прокопенко^{3,4}, П.С. Будяков^{3,5},

¹ОАО “Минский научно-исследовательский приборостроительный институт”
oleg_dvornikov@tut.by

²“Институт ядерных проблем” Белорусского государственного университета

³Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, prokopenko@sssu.ru

⁴Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН, г. Зеленоград

⁵АО “Научно-производственное предприятие “Пульсар”, г. Москва

Аннотация—Представлена краткая информация о новом биполярно-полевом (BiJFET) базовом матричном кристалле (БМК) MН2ХА030 , предназначенном для ускоренного создания аналоговых интегральных схем (ИС), сохраняющих свою работоспособность при воздействии проникающей радиации и предельно низких температур (до минус 197°C). Рассмотрены средства схемотехнического проектирования низкотемпературных аналоговых ИС на основе САПР LTSpice и встроенных типовых моделей полевых и биполярных транзисторов БМК. Разработаны рекомендации по выбору статических режимов с учетом зависимости коэффициента усиления по току базы транзисторов БМК от тока эмиттера при разных температурах и потоках нейтронов. Приведена топология макроячейки компаратора напряжения (КН). Рассмотрены особенности схемы КН, в которой предусмотрены меры для исключения насыщения транзисторов, уменьшения энергопотребления и задержки сигнала, улучшения температурной стабильности каскада сдвига уровня постоянного напряжения. Приводятся результаты моделирования переходных процессов в КН, который при высокой радиационной стойкости обеспечивает: время задержки при включении от 4,12 нс до 8,74 нс и при выключении – от 2,53 нс до 9,61 нс, максимальный выходной ток - 3,55 мА, входной ток - 0,37 мкА. Напряжение питания КН – ± 5 В, ток потребления – 1,69 мА.

Микросхема БМК MН2ХА030 рекомендуется для решения задач космического приборостроения и физики высоких энергий.

Ключевые слова — аналоговые интегральные схемы, базовый матричный кристалл, радиационная стойкость, криогенная электроника, компаратор напряжения.

I. ВВЕДЕНИЕ

Компаратор напряжений относится к числу наиболее востребованных функциональных блоков современных систем аналого-цифровой обработки информации [1-2]. Для задач космического приборостроения

и физики высоких энергий актуальным является создание КН, работающих в тяжелых условиях эксплуатации. В тех случаях, когда производство КН является малосерийным, их реализация целесообразна на БМК.

Ранее КН были разработаны для микросхем базового структурного кристалла (БСК) [3] MН2ХА010 [4-6] и БМК АБМК-2.1 [4,7], обеспечивающих высокий уровень электрических параметров полупроводниковых ИС [8,9]. Исследования [10-17] позволили установить, что учет особенностей радиационного изменения параметров биполярных транзисторов (БТ) позволяет создавать на БСК MН2ХА010 и БМК АБМК-2.1 аналоговые устройства, у которых при воздействии гамма-квантов ^{60}Co с поглощенной дозой до 3 Мрад и потока быстрых электронов до 3×10^{14} эл./ cm^2 с энергией 4 МэВ изменение параметров не превышает норм для диапазона рабочих температур. Как следствие, такие изделия являются радиационно-стойкими. Более того, созданные на MН2ХА010 и АБМК-2.1 специализированные ИС устойчивы ко всем видам одиночных эффектов от тяжелых заряженных частиц при линейных потерях энергии не менее $68 \text{ МэВ} \cdot \text{cm}^2/\text{mg}$ (Si).

Выявление температурных и функциональных особенностей разработанных ранее БСК и БМК, получение новых результатов по схемотехническому синтезу и моделированию позволили создать БМК MН2ХА030 , в котором устранены ограничения присущие микросхемам MН2ХА010 и АБМК-2.1.

Целью статьи является краткое рассмотрение конструкции БМК MН2ХА030 , макроячейки КН, а также средств и правил схемотехнического проектирования аналоговых ИС, в том числе КН, на БМК.

II. ПРОЕКТИРОВАНИЕ МИКРОСХЕМ НА БМК MН2ХА030

Концепция БМК предполагает не только разработку топологии кристалла, но и создание необходимых

средств проектирования, а именно: Spice-моделей расположенных на БМК активных и пассивных элементов, рекомендаций по схемотехническому проектированию, схемно-топологических библиотек компонентов.

БМК МН2ХА030 содержит восемь макроячеек (рис. 1). По периметру БМК расположены сложнотехнологические контактные площадки (122 шт.), которые используются для соединения кристалла проводниками с трассами корпуса или в качестве следующих активных элементов: PADN – два многоэмиттерных мощных p-n-транзистора; PADP – два многоэмиттерных мощных p-n-транзистора; PADJ – малошумящий полевой транзистор с p-n- переходом и каналом p-типа (p-ПТП). Всего на кристалле БМК размещено 64 мощных p-n-п транзистора, 60 мощных p-n-п транзисторов и 60 малошумящих p-ПТП.

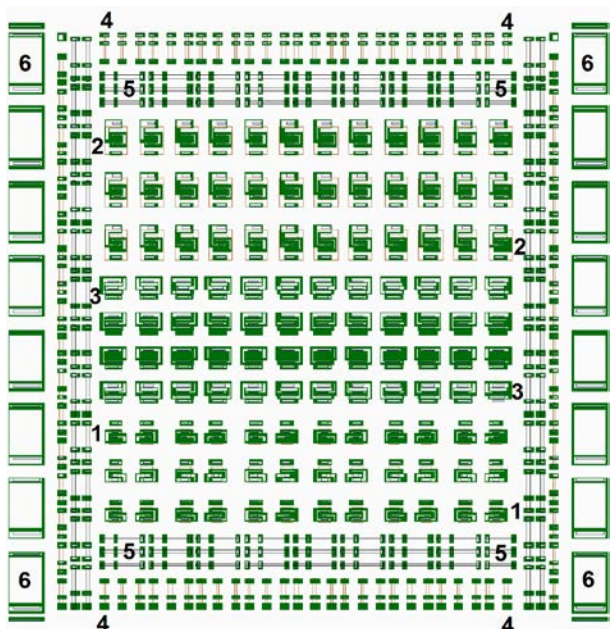


Рис. 1. Упрощенная топология макроячейки БМК МН2ХА030

Каждая макроячейка (рис. 1) включает:

- 36 маломощных p-n-п транзисторов (1 на рис. 1) с топологическим размером эмиттера $7\text{ мкм} \cdot 1,5\text{ мкм}$, расположенных в виде матрицы из 3 строк и 12 столбцов;
- 36 маломощных вертикальных p-n-п транзисторов (2 на рис. 1) с размером эмиттера $7\text{ мкм} \cdot 1,5\text{ мкм}$ (матрица из 3 строк и 12 столбцов);
- 48 маломощных p-ПТП (3 на рис. 1) с размером затвора $16,5\text{ мкм}/1,5\text{ мкм}$ (матрица из 4 строк и 12 столбцов);
- 84 резистора типа 2R4um (4 на рис. 1), каждый из которых путем выполнения различных межсоединений позволяет получить сопротивление $0,735\text{ кОм}$, $1,05\text{ кОм}$, $2,45\text{ кОм}$, $3,5\text{ кОм}$;

- 96 резисторов типа 2RR4um (5 на рис. 1), каждый из которых позволяет получить сопротивление $3,51\text{ кОм}$, $5,2\text{ кОм}$, $10,8\text{ кОм}$, 16 кОм ;
- 16 МОП-конденсаторов (6 на рис. 1), каждый из которых обладает емкостью $1,07\text{ пФ}$.

Суммарное сопротивление всех резисторов БМК составляет $14,64\text{ МОм}$, а суммарная емкость всех конденсаторов - $136,96\text{ пФ}$. Макроячейка (рис. 1) окружена экранирующим контактом к подложке p- типа, позволяющим устранить паразитное взаимодействие через подложку. На одной макроячейке можно реализовать компаратор или операционный усилитель, поэтому на кристалле МН2ХА030 может быть создано аналоговое устройство сложностью до 8 компараторов.

Средства схемотехнического проектирования. Известно [12], что не все коммерческие САПР и фирменные библиотеки Spice-параметров моделей транзисторов пригодны для схемотехнического моделирования влияния проникающей радиации и криогенной температуры на параметры аналоговых микросхем. Для одновременного учета влияния радиации и низких температур предложено применение САПР LTSpice, встроенных в LTSpice типовых моделей с усредненными температурными коэффициентами, а также разработанные математические выражения [12], устанавливающие взаимосвязь параметров моделей, полупроводника и радиационного облучения и описывающие немонокотное изменение параметра β p-ПТП [12]. Разработанные модели позволяют также описать существующий технологический разброс напряжения отсечки V_{TH} путем изменения параметра $V_{TOValue}$, разброс β – изменением параметра $\beta Fscale$, влияние поглощенной дозы гамма-излучения и потока нейтронов – параметрами модели D_G и F_N , соответственно. Применение указанных средств обеспечило удовлетворительное совпадение результатов измерений и моделирования вольтамперных характеристик (ВАХ) БТ и p-ПТП.

На рис. 2-3 приведены результаты моделирования в программе LTSpice ВАХ p-n-п транзисторов БМК МН2ХА030 при воздействии температуры T и потока нейтронов F_N .

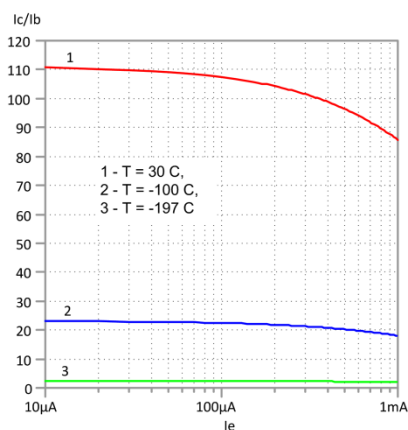


Рис. 2. Зависимость β маломощного p-n-п транзистора БМК от эмиттерного тока при разных температурах

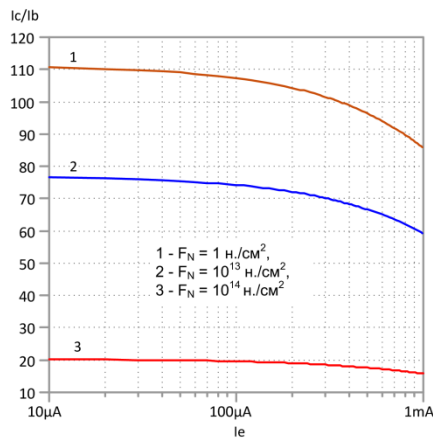


Рис. 3. Зависимость β малоомощного п-р-п-транзистора БМК от эмиттерного тока при $T = 30\text{ }^\circ\text{C}$ и разных F_N

На рис. 2,3 и далее по тексту применены следующие обозначения: $\beta = I_C/I_B$; I_E , I_C , I_B , I_D - ток эмиттера, коллектора, базы, стока; V_{GS} , V_{SD} , V_{CB} , V_{BE} - напряжения затвор-исток, исток-сток, коллектор-база, база-эмиттер; V_{TH} - напряжение отсечки.

III. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО СХЕМОТЕХНИЧЕСКОМУ ПРОЕКТИРОВАНИЮ АНАЛОГОВЫХ ИС НА ОСНОВЕ БМК

При разработке радиационно-стойких и криогенных аналоговых ИС на основе БМК целесообразно учитывать особенности работы транзисторов при данных внешних воздействиях.

Прежде всего, для схем, содержащих полевые и биполярные транзисторы, рекомендуется выполнить моделирование и анализ зависимостей: $I_D = f(V_{GS})$ при $V_{SD} = \text{Const} \geq V_{TH}$; $\beta = f(I_E)$ при $V_{CB} = 1\text{ В}$; напряжения на прямосмещенном эмиттерном переходе V_{BE} от I_E , т.е. $V_{BE} = f(I_E)$ при $V_{CB} = 1\text{ В}$. Моделирование зависимостей следует провести при следующих условиях:

- допустимом технологическом разбросе напряжения отсечки за счет измерения параметра $V_{TOValue} = 1,3; 1,44; 1,925$, что соответствует $V_{TH} = 1,35\text{ В}; 1,5\text{ В}; 2\text{ В}$;
- допустимом технологическом разбросе β ($BFscale = 0,75; 1; 1,25$);
- в диапазоне температур вплоть до $-197\text{ }^\circ\text{C}$;
- при поглощенной дозе гамма излучения $D_G = 1$ рад (нормальные условия), 100 крад, 1 Мрад, 2 Мрад, 3 Мрад;
- при потоке нейтронов $F_N = 1\text{ н./см}^2$ (нормальные условия); 10^{13} н./см^2 ; 10^{14} н./см^2 .

Изучение результатов моделирования ВАХ транзисторов позволяет выявить проблемы, которые могут возникнуть при схемотехническом синтезе. Так:

- напряжение отсечки V_{TH} значительно уменьшается при $T = -197\text{ }^\circ\text{C}$. Если в нормальных условиях напряжение отсечки соответствует минимально допустимому по техническим требованиям значе-

нию $V_{TH} = 1,35\text{ В}$, то при $T = -197\text{ }^\circ\text{C}$ уменьшается до $V_{TH} = 0,9\text{ В}$;

- абсолютное значение напряжения на прямосмещенном эмиттерном переходе при $T = -197\text{ }^\circ\text{C}$ возрастает и может превысить величину V_{TH} , а β существенно падает. Например, при $I_E = 50\text{ мкА}$ для п-р-п транзистора $|V_{BE}|$ возрастает от $0,688\text{ В}$ в нормальных условиях до $1,057\text{ В}$ при $T = -197\text{ }^\circ\text{C}$, а β падает от 110 до 2,39, для р-п-п транзистора $|V_{BE}|$ возрастает от $0,704\text{ В}$ в нормальных условиях до $1,066\text{ В}$ при $T = -197\text{ }^\circ\text{C}$, а β падает от 54 до 2,83. Следовательно для обеспечения работоспособности схем при допустимом технологическом разбросе напряжения отсечки не следует применять включение р-п- переходов БТ между истоком и затвором р-ПТП. Альтернативным решением данной проблемы является увеличение нормы V_{TH} в нормальных условиях, учитывающее спад напряжения отсечки при предельно низких температурах;
- БТ сохраняют минимальную работоспособность ($\beta > 2$) при одновременном воздействии низких температур $T = -197\text{ }^\circ\text{C}$ и невысоком уровне проникающей радиации $F_N \leq 10^{12}\text{ н./см}^2$, $D_G \leq 200$ крад;
- гамма-излучение практически не влияет на параметры р-ПТП, а влияние потока нейтронов проявляется, в основном, при $F_N > 10^{14}\text{ н./см}^2$. Так, напряжение отсечки, равное $1,5\text{ В}$ при $T = 30\text{ }^\circ\text{C}$, уменьшается до $0,88\text{ В}$ при $F_N = 10^{15}\text{ н./см}^2$ и $T = 30\text{ }^\circ\text{C}$ и составляет $0,43\text{ В}$ при $F_N = 10^{15}\text{ н./см}^2$ и $T = -197\text{ }^\circ\text{C}$.

IV. РАДИАЦИОННО-СТОЙКИЙ КОМПАРАТОР COMPI В СТРУКТУРЕ БМК

Топология компаратора напряжений на макроячейке БМК и его схема приведена на рис. 4-5.

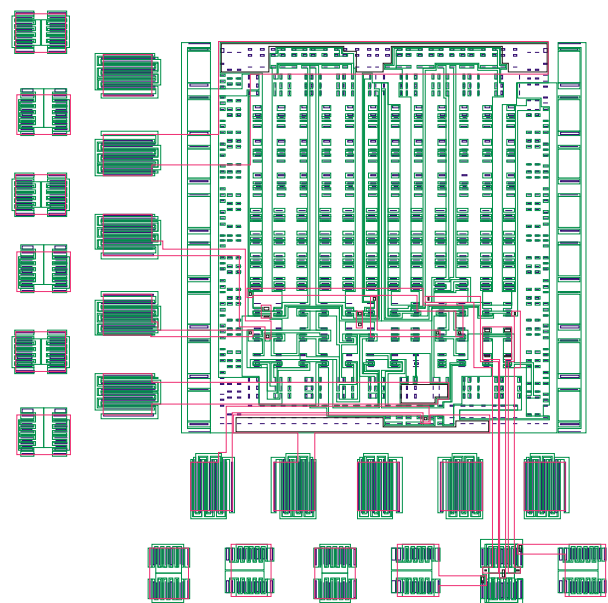


Рис. 4. Упрощенная топология компаратора Comp1

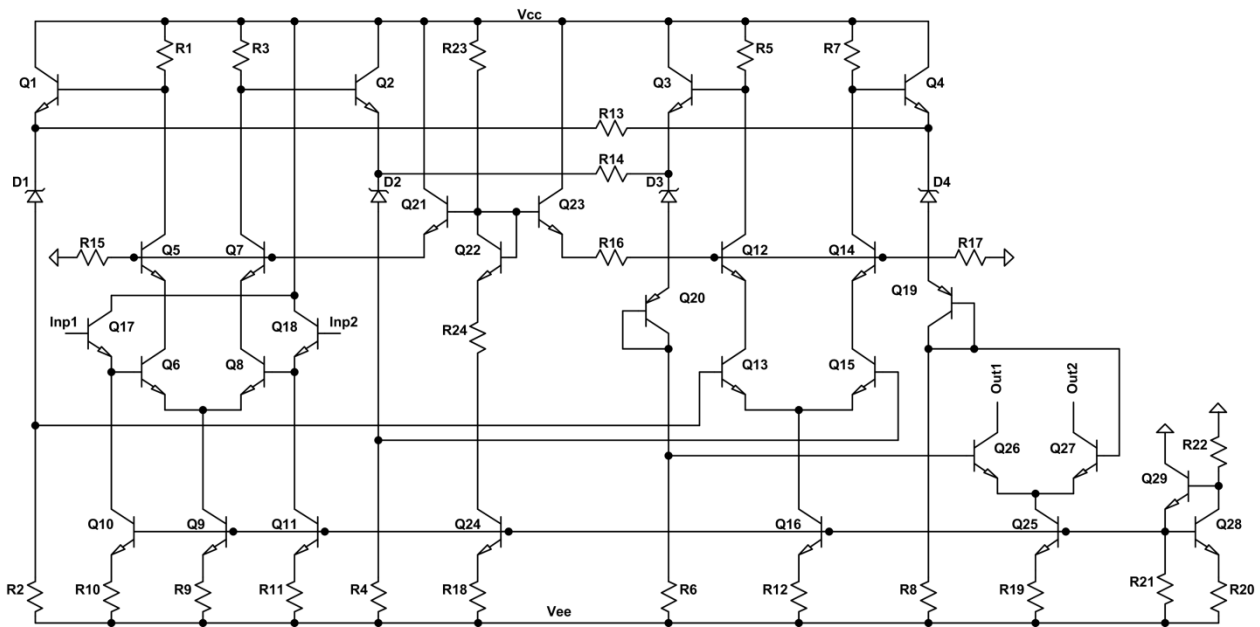


Рис. 5. Электрическая схема компаратора Comp1

Электрическая схема компаратора показана на рис. 5. Она содержит входной (Q1, Q2, Q5-Q8, Q17, Q18), промежуточный (Q3, Q4, Q12-Q15) и выходной (Q26, Q27) каскады. Статический режим КН устанавливается транзисторами Q9-Q11, Q16, Q21-Q25, Q28-Q29.

Входной и промежуточный каскады КН представляют собой дифференциальные каскады (ДК) с резистивной нагрузкой, а выходной – ДК с “открытым” коллектором. Для уменьшения эффекта Миллера используется каскодное включение транзисторов, а соединение ДК между собой выполняется через эмиттерные повторители, обеспечивающие сдвиг уровня постоянного напряжения.

Для обеспечения радиационной стойкости в компараторе применяются только p-p-n транзисторы с высокой граничной частотой, работающие при большой плотности эмиттерного тока.

Как показывают экспериментальные исследования и моделирование, проникающая радиация вызывает уменьшение величины максимального тока по каждому выходу КН, но слабо влияет на форму импульса напряжения между выходами компаратора, т.е. на задержку и фронт.

Отличия электрической схемы компаратора Comp1 от других известных решений [6,11] заключаются в следующем:

- для уменьшения задержки удалены диоды между коллекторами транзисторов Q12, Q14;
- улучшена температурная стабильность каскада сдвига уровня постоянного напряжения за счет последовательного включения стабилитронов D3, D4 с положительным температурным коэффици-

ентом напряжения и транзисторов в диодном включении Q19, Q20 с отрицательным;

- уменьшены коллекторные токи транзисторов (за исключением выходных Q25-Q27);
- сопротивления резисторов R1, R3, R5, R7 выбраны для исключения насыщения транзисторов Q5, Q7, Q12, Q14.

Результаты моделирования переходной характеристики КН при соединении выхода Out1 через сопротивление нагрузки $R_L=100$ Ом с шиной нулевого напряжения и разном превышении порога показаны на рис. 6.

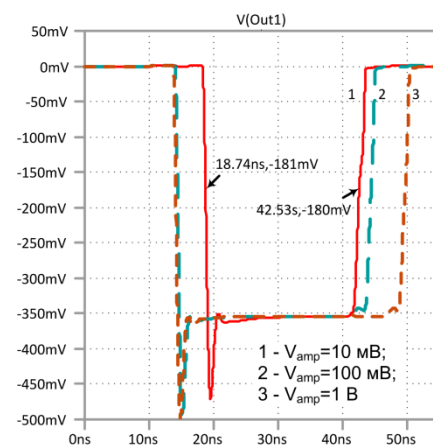


Рис. 6. Выходное напряжение V(Out1) Comp1 при обработке прямоугольного импульса разной амплитуды

Анализ графиков рис. 6 показывает, что время задержки при включении КН лежит в пределах $4,12 \div 8,74$ нс, а при выключении – $2,53 \div 9,61$ нс (в зависимости от амплитуды сравниваемых напряжений).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для проектирования ползуказных радиационно-стойких и криогенных аналоговых ИС разработан комплекс средств, включающий: BiJFET БМК МН2ХА030, Spice-модели активных и пассивных элементов, а также рекомендации по схемотехническому проектированию аналоговых ИС, в том числе, КН.

Микросхема БМК МН2ХА030 рекомендуется для решения задач космического приборостроения и физики высоких энергий. Значительное количество активных и пассивных элементов в БМК позволяют реализовать на его основе различные аналоговые ИС, в том числе компараторы, дифференциальные и мультидифференциальные операционные усилители, зарядочувствительные усилители, стабилизаторы напряжения и тока, перемножители и смесители сигналов, новые подклассы активных элементов для RC-фильтров и т.п.

Компаратор Comp1 в структуре БМК характеризуется следующими параметрами: время задержки при включении – 8,74 нс/ 4,41 нс/ 4,12 нс (для превышения порога на 10 мВ/100 мВ/1 В) и при выключении – 2,53 нс/ 4,34 нс/ 9,61 нс (для превышения порога на 10 мВ/100 мВ/ 1 В), максимальный выходной ток - 3,55 мА, входной ток - 0,37 мкА. Напряжение питания КН – ±5 В, ток потребления – 1,69 мА.

ПОДДЕРЖКА

При разработке компаратора напряжений Comp1 и моделей транзисторов БМК МН2ХА030 использованы результаты научных исследований, проводимых за счет гранта Российского научного фонда (проект № 16-19-00122).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] He X., He J., Cai M. and Jing Z. A low power switching method with variable comparator reference voltage and split capacitor array for SAR ADC // 2016 IEEE EDSSC, Hong Kong, 2016, pp. 379-382. DOI: 10.1109/EDSSC.2016.7785287
- [2] Liu S., Rabuske T., Paramesh J., Pileggi L. and Fernandes J. Analysis and Background Self-Calibration of Comparator Offset in Loop-Unrolled SAR ADCs // IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, vol. 65, no. 2, pp. 458-470, Feb. 2018. DOI: 10.1109/TCSI.2017.2723799
- [3] Дворников О., Чеховский В., Дятлов В., Прокопенко Н. Применение структурных кристаллов для создания интерфейсов датчиков // Современная электроника. 2014. № 1. С. 32–37.
- [4] Дворников О.В., Прокопенко Н.Н., Бутырлагин Н.В., Бугакова А.В. Перспективы применения новых микросхем базового матричного и базового структурного кристаллов в датчиковых системах // Труды СПИИРАН. 2016. Вып. 2(45). С. 157–171.
- [5] Дворников О.В., Прокопенко Н.Н., Пахомов И.В., Бутырлагин Н.В., Бугакова А.В. Проектирование радиационно-стойких аналоговых процессоров и преобразователей сигналов датчиков на основе базового структурного кристалла МН2ХА010 // Радиотехника. 2016. № 2. С. 107–113.
- [6] Dvornikov O.V., Dyatlov V.L., Prokopenko N.N. and Chekhovskii V.A. Configurable Structured Array for Fabrication of Radiation-Hardened Analog Interfaces //

Journal of Communications Technology and Electronics, 2017, Vol. 62, No. 10, pp. 1193–1199.

- [7] Дворников О.В., Чеховский В.А., Дятлов В.Л., Прокопенко Н.Н. Новая микросхема базового матричного кристалла АБМК-2.1 для проектирования радиационно-стойких аналоговых и аналого-цифровых интерфейсов датчиковых систем // Радиотехника. 2016. № 6. С. 163–168.
- [8] Dvornikov O.V., Bugakova A.V., Prokopenko N.N., Dziatlau V.P., Pakhomov I.V. The microcircuits МН2ХА010-02/03 for signal processing of optoelectronic sensors // Proceedings 18th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM 2017), 29 June - 3 July 2017, pp. 396-402. DOI: 10.1109/EDM.2017.7981781.
- [9] Dvornikov O.V., Tchekhovskii V.A., Prokopenko N.N., Bugakova A.V. The Design of the Circuits of Radiation-Hardened Charge-Sensitive Amplifiers Based on the Structured Array (МН2ХА010) and Array Chip (AC-2.1) // 2016 13th International Scientific-Technical Conference on Actual problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE) Proceedings. APEIE – 2016. In 12 Volumes. Volume 1. Part 1. Novosibirsk, 2016. Pp. 253-258.
- [10] Dvornikov O.V., Tchekhovskii V.A., Dziatlau V.L., Prokopenko N.N. Influence of Ionizing Radiation on the Parameters of an Operational Amplifier Based on Complementary Bipolar Transistors // Russian Microelectronics. 2016. Vol. 45, No. 1. Pp. 54-62. DOI: 10.1134/S1063739716010030.
- [11] Дворников О.В., Дятлов В.Л., Прокопенко Н.Н., Чеховский В.А., Пахомов И.В., Бугакова А.В. Статические параметры компараторов и зарядочувствительных усилителей базового структурного кристалла МН2ХА010 при воздействии гамма-излучения //Глобальная ядерная безопасность, НИЯУ "МИФИ".2017. № 2(23). С. 38-46.
- [12] Dvornikov O.V., Dziatlau V.L., Prokopenko N.N., Petrosiants K.O., Kozhukhov N.V., Tchekhovskii V.A. The Accounting of the Simultaneous Exposure of the Low Temperatures and the Penetrating Radiation at the Circuit Simulation of the BiJFET Analog Interfaces of the Sensors // 2017 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), Astana, 29-30.06.17. DOI: 0.1109/SIBCON.2017.7998507.
- [13] Petrosyants K.O., Ismail-zade M.R., Sambursky L.M., Dvornikov O.V., Lvov B.G., Kharitonov I. A. Automation of Parameter Extraction Procedure for Si JFET SPICE Model in the –200...+110°C Temperature Range // 2018 Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT), Moscow, Russia, March 14–16, 2018, Pp.1-5.
- [14] Дворников О.В., Гришков В.Н. Комплексный подход к проектированию радиационно-стойких аналоговых микросхем. Часть 1. Учет влияния проникающей радиации в “Spice-подобных” программах // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем – 2010. Сборник трудов IV Всероссийской научно-технической конференции / под общ. ред. академика РАН А.Л. Стемпковского. – М.: ИПИМ РАН, 2010. С. 301-306.
- [15] Дворников О.В. Комплексный подход к проектированию радиационно-стойких аналоговых микросхем. Часть 2. Базовые схемотехнические решения АБМК 1-3 // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем – 2010. Сборник трудов IV Всероссийской научно-технической конференции / под общ. ред. академика

РАН А.Л. Стемповского. – М.: ИППМ РАН, 2010. С. 283-288.

[16] Дворников О.В., Чеховский В.А., Дятлов В.Л., Богатырев Ю.В., Ластовский С.Б. Влияние быстрых электронов на аналоговые интегральные элементы и схемы // Вопросы атомной науки и техники. Серия: физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2012. Выпуск 3. С. 54-59.

[17] Дворников О.В., Чеховский В.А., Дятлов В.Л., Богатырев Ю.В., Ластовский С.Б. Радиационно-стойкие аналоговые интегральные схемы // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем – 2012. Сборник трудов / под общ. ред. академика РАН А.Л. Стемповского. – М.: ИППМ РАН, 2012. С. 280-283

Design of Voltage Comparators Based on the Elements of the Radiation-Hardened Low-Temperature BiJFET Array Chip MH2XA030

O.V. Dvornikov¹, V.A. Chekhovsky², V.L. Dzyatlau², N.N. Prokopenko^{3,4}, P.S. Budyakov^{3,5},

¹JSC "Minsk Research Instrument-Making Institute" oleg_dvornikov@tut.by

²"Institute of Nuclear Problems" of the Belarusian State University

³Don State Technical University, Rostov-on-Don, prokopenko@sssu.ru

⁴Institute for design problems in microelectronics RAS, Zelenograd

⁵JSC "Scientific and Production Enterprise" Pulsar", Moscow

Abstract — Brief information about the new array chip (AC) MH2XA030 intended for accelerated creation of analog integrated circuits (ICs), which retain their performance under the influence of penetrating radiation and extremely low temperatures (up to minus 1970C) is presented. The tools of the circuit design of low-temperature ICs based on LTSpice CAD and built-in standard models of field-effect and bipolar transistors are considered. The dependences of the base current gain of n-p-n transistors of AC on the emitter current at different temperatures and neutron fluxes are shown. Recommendations on the circuit design of radiation-hardened and low-temperature ICs based on the AC are developed. The layout of the macrocells of the voltage comparator (VC), which is part of the AC structure, is shown. The features of the circuit design of VC are considered, its electrical circuit is shown, which includes measures for eliminating the saturation of transistors, reducing power consumption and signal delay, improving the temperature stability of the stage of the level shift of DC voltage. The results of simulation of transient processes in VC are presented, which provides: the delay time at switching-on is 8.74 ns / 4.41 ns / 4.12 ns (for exceeding the threshold by 10 mV / 100 mV / 1 V) and at shutdown - 2, 53 ns / 4.34 ns / 9.61 ns (for exceeding the threshold by 10 mV / 100 mV / 1 V), the maximum output current is 3.55 mA, the input current is 0.37 μ A. The supply voltage of the VC is \pm 5 V; the current consumption is 1.69 mA.

Keywords— analog integrated circuits, array chip, radiation hardness, cryogenic electronics, voltage comparator

SUPPORT

During the development of the Compl voltage comparator and the models field-effect and bipolar transistors of array chip MH2XA030, the results of scientific research were used, which were carried out through a grant from the Russian Science Foundation (project No. 16-19-00122).

REFERENCES

- [1] He X., He J., Cai M. and Jing Z. A low power switching method with variable comparator reference voltage and split capacitor array for SAR ADC // 2016 IEEE EDSSC, Hong Kong, 2016, pp. 379-382. DOI: 10.1109/EDSSC.2016.7785287
- [2] Liu S., Rabuske T., Paramesh J., Pileggi L. and Fernandes J. Analysis and Background Self-Calibration of Comparator Offset in Loop-Unrolled SAR ADCs // IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, vol. 65, no. 2, pp. 458-470, Feb. 2018. DOI: 10.1109/TCSI.2017.2723799
- [3] Dvornikov O., Chehovskij V., Dyatlov V., Prokopenko N. Primenenie strukturnykh kristallov dlya sozdaniya interfeysov datchikov [The use of structural crystals to create a sensor interface] // Sovremennaja jelektronika. 2014. No. 1. S. 32–37. (in Russian)
- [4] Dvornikov O.V., Prokopenko N.N., Butyrlagin N.V., Bugakova A.V. Perspektivy primeneniya novykh mikroskhem bazovogo matrichnogo i bazovogo strukturnogo kristallov v datchikovykh sistemakh [Perspectives of application of new chips of analog master slice array and configurable structured array of crystals in the sensor systems] // Trudy SPIIRAN. 2016. Vyp. 2(45). S. 157–171. (in Russian)
- [5] Dvornikov O.V., Prokopenko N.N., Pakhomov I.V., Butyrlagin N.V., Bugakova A.V. Proektirovanie

- radiatsionno-stoykikh analogovykh protsessorov i preobrazovately signalov datchikov na osnove bazovogo strukturnogo kristalla MH2XA010 [Design of the radiation-hardened analog processors and signal converters of the sensors systems based on basic structural crystal MH2XA010] // Radiotekhnika. 2016. No. 2. S. 107–113. (in Russian)
- [6] Dvornikov O.V., Dyatlov V.L., Prokopenko N.N. and Chekhovskii V.A. Configurable Structured Array for Fabrication of Radiation-Hardened Analog Interfaces // Journal of Communications Technology and Electronics, 2017, Vol. 62, No. 10, pp. 1193–1199.
- [7] Dvornikov O.V., Chehovskij V.A., Dyatlov V.L., Prokopenko N.N. Novaya mikroskhema bazovogo matrichnogo kristalla ABMK-2.1 dlya proektirovaniya radiatsionno-stoykikh analogovykh i analogo-tsifrovyykh interfeysov datchikovyykh sistem [New microcircuit of the master slice array MSA-2.1 for the design of the radiation-hardened analog and analog-digital interfaces of the sensor systems] // Radiotekhnika. 2016. No. 6. S. 163–168. (in Russian)
- [8] Dvornikov O.V., Bugakova A.V., Prokopenko N.N., Dziatlau V.P., Pakhomov I.V. The microcircuits MH2XA010-02/03 for signal processing of optoelectronic sensors // Proceedings 18th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM 2017), 29 June - 3 July 2017, pp. 396-402. DOI: 10.1109/EDM.2017.7981781.
- [9] Dvornikov O.V., Tchekhovskii V.A., Prokopenko N.N., Bugakova A.V. The Design of the Circuits of Radiation-Hardened Charge-Sensitive Amplifiers Based on the Structured Array (MH2XA010) and Array Chip (AC-2.1) // 2016 13th International Scientific-Technical Conference on Actual problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE) Proceedings. APEIE – 2016. In 12 Volumes. Volume 1. Part 1. Novosibirsk, 2016. Pp. 253- 258.
- [10] Dvornikov O.V., Tchekhovskii V.A., Dziatlau V.L., Prokopenko N.N. Influence of Ionizing Radiation on the Parameters of an Operational Amplifier Based on Complementary Bipolar Transistors // Russian Microelectronics. 2016. Vol. 45, No. 1. Pp. 54-62. DOI: 0.1134/S10 63739716010030.
- [11] Dvornikov O.V., Dyatlov V.L., Prokopenko N.N., Chekhovskii V.A., Pakhomov I.V., Bugakova A.V. Sticheskie parametry komparatorov i zaryadochuvstvitel'nykh usiliteley bazovogo strukturnogo kristalla MH2XA010 pri vozdeystvii gamma-izlucheniya [The Static Parameters of the Comparators and the Charge-Sensitive Amplifiers of the MH2XA010 Structured Array at Gamma Emission Influence] // Global'naya yadernaya bezopasnost', NIYaU "MIFI". 2017. No. 2(23). S. 38-46.(in Russian)
- [12] Dvornikov O.V., Dziatlau V.L., Prokopenko N.N., Petrosiants K.O., Kozhukhov N.V., Tchekhovskii V.A. The Accounting of the Simultaneous Exposure of the Low Temperatures and the Penetrating Radiation at the Circuit Simulation of the BiJFET Analog Interfaces of the Sensors // 2017 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), Astana, 29-30.06.17. DOI: 0.1109/SIBCON.2017.7998507.
- [13] Petrosyants K.O., Ismail-zade M.R., Sambursky L.M., Dvornikov O.V., Lvov B.G., Kharitonov I. A. Automation of Parameter Extraction Procedure for Si JFET SPICE Model in the –200...+110°C Temperature Range // 2018 Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT), Moscow, Russia, March 14–16, 2018, Pp.1-5.
- [14] Dvornikov O.V., Grishkov V.N. Kompleksnyy podkhod k proektirovaniyu radiatsionno-stoykikh analogovykh mikroskhem. Chast' 1. Uchet vliyaniya pronikayushchey radiatsii v "Spice-podobnykh" programmakh [Radiation hardened analog IC design. Part 1. Radiation effects simulation in the "Spice-like" programs] // Problemy razrabotki perspektivnykh mikro- i nanoelektronnykh sistem – 2010. Sbornik trudov IV Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii / pod obshch. red. akademika RAN A.L. Stempkovskogo. – M.: IPPM RAN, 2010. S. 301-306.(in Russian)
- [15] Dvornikov O. V., Kompleksnyy podkhod k proektirovaniyu radiatsionno-stoykikh analogovykh mikroskhem. Chast' 2. Bazovye skhemotekhnicheskie resheniya ABMK 1-3 [Radiation hardened analog IC design. Part 2. The main analog circuits for the master slice array "ABMK 1-3"] // Problemy razrabotki perspektivnykh mikro- i nanoelektronnykh sistem – 2010. Sbornik trudov IV Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii / pod obshch. red. akademika RAN A.L. Stempkovskogo. – M.: IPPM RAN, 2010. S. 283-288.
- [16] Dvornikov O.V., Chekhovskiy V.A., Dyatlov V.L., Bogatyrev Yu.V., Lastovsky S.B. Vliyanie bystrykh elektronov na analogovye integral'nye elementy i skhemy [Influence of high-energy electrons on analog integrated elements and circuits] // Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Seriya: fizika radiatsionnogo vozdeystviya na radioelektronnyu apparaturu. 2012. Vypusk 3. S. 54-59. (in Russian)
- [17] Dvornikov O.V., Tchekhovskii V.A., Dyatlov V.L., Bogatyrev Yu.V., Lastovskii S.B. Radiatsionno-stoykie analogovye integral'nye skhemy [Radiation hardened analog IC] // Problemy razrabotki perspektivnykh mikro- i nanoelektronnykh sistem – 2012 . Sbornik trudov / pod obshch. red. akademika RAN A.L. Stempkovskogo. – M.: IPPM RAN, 2012. S. 280-283.(in Russian)