

Арсенид-галлиевый аналоговый базовый кристалл

О.В. Дворников¹, А.А. Павлючик², Н.Н. Прокопенко^{3,4}, В.А. Чеховский⁵, А.В. Куниц^{5,6},
В.Е. Чумаков³

¹ОАО «Минский научно-исследовательский приборостроительный институт», г. Минск

²ОАО «Минский НИИ радиоматериалов», г. Минск

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

⁴Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН, г. Зеленоград

⁵«Институт ядерных проблем» Белорусского государственного университета, г. Минск

⁶Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, г. Минск

Аннотация — Представлен арсенид-галлиевый базовый кристалл, предназначенный для создания аналоговых микросхем, работающих в экстремальных условиях эксплуатации. Рассмотрены особенности вольтамперных характеристик применяемых в базовом кристалле ДрНЕМТ и р-п-р-транзисторов с гетеропереходом. Приведены электрические схемы и основные результаты моделирования аналоговых устройств, реализуемых на базовом кристалле: трех типов операционных усилителей и зарядочувствительного усилителя

Ключевые слова — биполярный транзистор с гетеропереходом, транзистор с высокой подвижностью электронов, арсенид галлия, операционный усилитель, зарядочувствительный усилитель.

I. ВВЕДЕНИЕ

Аналоговые микросхемы для экстремальных условий эксплуатации, а именно, для работы при температуре менее минус 60 °С или более 125 °С, а также воздействию проникающей радиации (ПР), необходимы в различных областях науки и техники: экспериментальной физике, аэрокосмической электронике, военной технике, аппаратуре для нефтедобычи.

В последнее время появились новые области применения такой электроники, к которым можно отнести квантовые системы обработки информации на основе микроволновых сверхпроводниковых квантовых битов (кубитов), рабочая температура которых составляет десятки милликельвинов, маломощные криогенные усилители для масштабирования сигналов на выходе болометров в радиоастрономии и др.

Для эксплуатации в ограниченной области температур (ориентировочно, от минус 197 °С до 125 °С) и не высоких уровней воздействия ПР (поглощенная доза гамма-квантов до 3 Мрад, флюенс нейтронов до 10¹⁴ н/см²) допустимо проектирование

кремниевых аналоговых интегральных микросхем (ИМС) на основе биполярных и полевых транзисторов, управляемых р-п-переходом (junction field effect transistors, JFET) [1-3]. При этом рекомендуется применение биполярно-полевых базовых матричных кристаллов (БМК) [2].

Однако для работы при температуре ниже минус 200 °С и выше 200 °С, высоком уровне ПР рекомендуется применение аналоговых ИМС, изготовленных на широкозонных полупроводниковых материалах, например, на GaAs [4-6].

Так, радиационно-стойкие низкотемпературные усилители на арсениде галлия, с успехом применялись в ряде установок экспериментальной физики [7-10]. Причем в качестве активных элементов были использованы GaAs полевые транзисторы, управляемые переходом Шоттки (metal-semiconductor field-effect transistor, MESFET).

Обычно, схемотехнический синтез GaAs аналоговых ИМС значительно затруднен ограниченной номенклатурой допустимых к применению интегральных элементов (MESFET и резисторов), что приводит к необходимости применения нескольких источников питания, а в некоторых случаях - с не типовой или подстраиваемой величиной выходного напряжения [11, 12].

По указанной причине разными коллективами были выполнены работы по изготовлению на одной GaAs подложке FET и биполярных транзисторов с гетеропереходом (heterojunction bipolar transistor, HBT) [13, 14].

Заметим, что аналоговые микросхемы для экстремальных условий эксплуатации обычно представляют собой ИМС малой степени интеграции с ограниченной областью применения и поэтому их часто изготавливают в виде полузаказных микросхем на БМК или базовых кристаллах (БК).

Целью настоящей статьи является рассмотрение особенностей и возможностей разработанного нами GaAs БК, содержащего FET и НВТ, предназначенного для проектирования и производства аналоговых ИМС.

II. GAAS БАЗОВЫЙ КРИСТАЛЛ

Обычно, под базовым кристаллом понимают часть полупроводниковой пластины с определенным набором сформированных элементов, в том числе соединенных и (или) несоединенных между собой, использующихся для создания ИМС путем изготовления межэлементных соединений.

БК является более общим понятием по сравнению с БМК или базовым структурным кристаллом (БСК).

Так, БМК представляет собой БК с регулярным расположением сформированных, несоединенных между собой элементов, а в БСК большая часть межсоединений элементов уже выполнена для реализации конкретных аналоговых устройств (операционных усилителей (ОУ), компараторов, стабилизаторов напряжения и пр.) и проектирование ИМС на БСК осуществляется путем соединения аналоговых устройств между собой и подключения цепей обратной связи.

Таким образом, проектирование ИМС на БМК осуществляется на уровне элементов, а на БСК – на уровне аналоговых устройств.

Обычно БМК предназначен для изготовления различных по выполняемым функциям ИМС, многие из которых не известны на этапе создания БМК. Поэтому БМК содержит достаточное большое количество активных и пассивных элементов, в том числе, избыточных при реализации ИМС малой степени интеграции.

При разработке БСК имеется ясное представление об ИМС, реализуемых на его основе, поэтому избыточность элементов минимальна при проектировании сложно-функциональных устройств, включающих все или большую часть доступных на БСК аналоговых устройств. Применение БСК для изготовления ИМС малой степени интеграции также экономически не оправдано.

С нашей точки зрения, для производства ИМС малой степени интеграции целесообразно применение БК с несоединенными элементами, количество и номенклатура которых выбраны для реализации конкретных аналоговых устройств с унифицированными каскадами, причем специализация ИМС осуществляется путем формирования межсоединений элементов с помощью разных комплектов шаблонов.

Для изготовления БК планируется использование технологического маршрута изготовления GaAs DpHEMT (double channel pseudomorphic high electron mobility transistor), имеющегося в ОАО «МНИИРМ» [15], с дополнительным блоком операций формирования p-n-p НВТ.

Совместное применение при схемотехническом синтезе DpHEMT, который представляет собой FET с каналом n-типа и большой граничной частотой, и p-n-p НВТ позволит значительно улучшить характеристики аналоговых ИМС, а именно:

- увеличить усиление напряжения входных каскадов и уменьшить уровень шумов, отнесенных к входу, за счет большой крутизны g_m при относительно малом токе стока I_D ,
- реализовать простые каскады сдвига уровня постоянного напряжения на p-n-p НВТ,
- увеличить диапазон рабочего напряжения усилительных каскадов и сделать возможным выполнение двухтактных выходных каскадов при одновременном использовании DpHEMT и p-n-p НВТ,
- обеспечить проектирование малошумящих зарядочувствительных усилителей (ЗЧУ) благодаря применению головного DpHEMT с высоким отношением g_m к входной емкости C_{INP} .

Разработанный БК содержит: DpHEMT с шириной затвора (W) 1000 мкм и длиной (L) – 0,2 мкм – 2 шт.; DpHEMT с $W/L = 10$ мкм/1 мкм - 20 шт.; p-n-p НВТ – 8 шт.; два магазина резисторов по 5 кОм; магазин конденсаторов по 1 пФ.

Количество и номенклатура элементов БК выбраны из условия реализации схем, приведенных в разделе III.

Техмаршрут изготовления DpHEMT хорошо отработан, параметры моделей идентифицированы и для транзистора с $W/L = 10$ мкм/1 мкм обеспечивают основные вольтамперные характеристики (ВАХ), показанные на рис. 1, 2.

При разработке p-n-p НВТ за основу взят технологический маршрут, описанный в [16, 17]. По измеренным ВАХ p-n-p НВТ, приведенным в [16, 17], идентифицированы Spice-параметры. Результаты моделирования ВАХ p-n-p НВТ показаны на рис. 3-5.

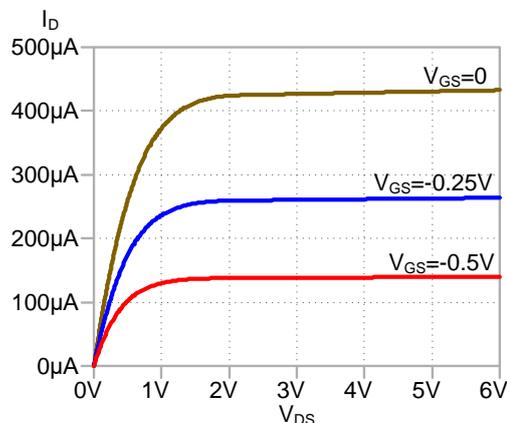


Рис. 1. Выходная ВАХ DpHEMT ($W/L = 10$ мкм/1 мкм) в схеме с общим истоком

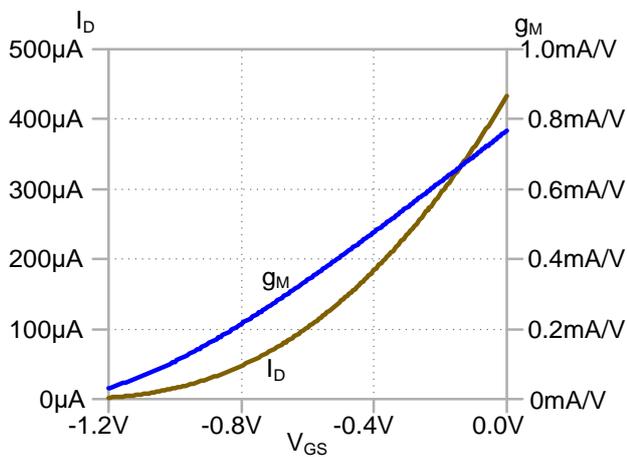


Рис. 2. Зависимость тока стока I_D и крутизны g_m ДрНЕМТ ($W/L = 10 \text{ мкм}/1 \text{ мкм}$) от напряжения затвористок V_{GS}

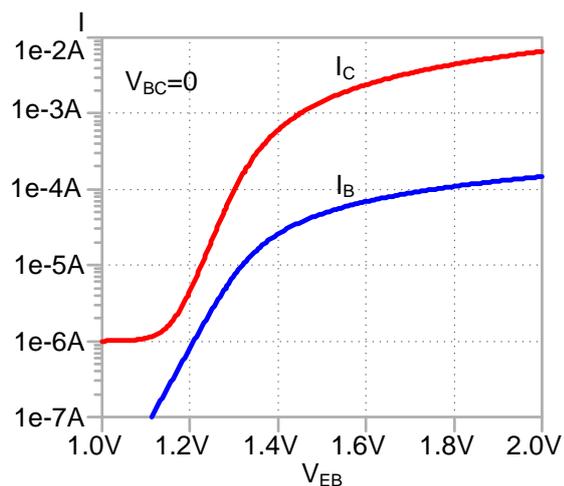


Рис. 3. Зависимость тока коллектора I_C и базы I_B p-n-p НВТ от напряжения эмиттер-база V_{EB} при $V_{CB}=0$

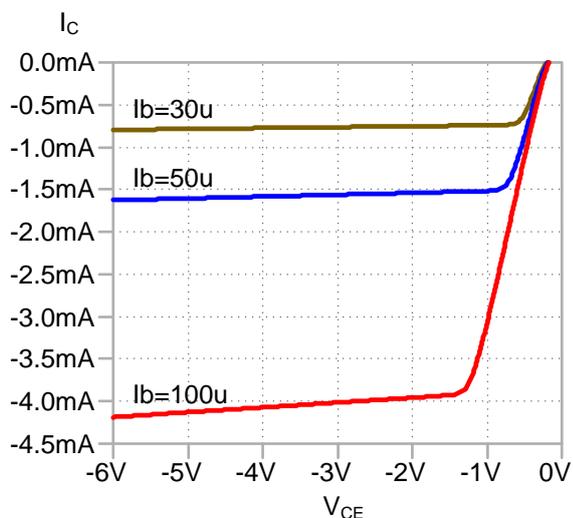


Рис. 4. Выходная ВАХ p-n-p НВТ в схеме с общим эмиттером

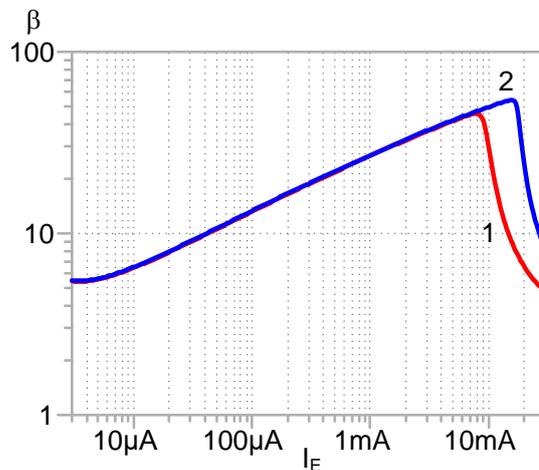


Рис. 5. Зависимость коэффициента усиления β базового тока p-n-p НВТ от эмиттерного тока: 1 — $V_{CB}=0$; 2 — $V_{CB}=-1 \text{ В}$

К особенностям ВАХ p-n-p НВТ можно отнести:

- относительно большое падение напряжения V_{EB} на прямосмещенном эмиттерном переходе ($V_{EB} > 1,2 \text{ В}$ при $I_C = 10 \text{ мкА}$),
- наличие тока утечки коллектор-эмиттер при малом V_{EB} ,
- малое значение коэффициента усиления базового тока β при $I_E < 100 \text{ мкА}$ и резкий спад при больших токах и $V_{CB} = 0$,
- большое сопротивление коллектора, т.е. падение напряжения эмиттер-коллектор в насыщении $V_{ECSAT} > 1 \text{ В}$ при $I_C \approx 3 \text{ мА}$.

Несмотря на то, что идентифицированные Spice-параметры приблизительно описывают характеристики разрабатываемого p-n-p НВТ, на наш взгляд, на самых начальных этапах обработки технологического маршрута целесообразно применение БК вместе с набором тестов, содержащих несколько конструкций p-n-p НВТ и ДрНЕМТ с разным отношением W/L . Из результатов измерений тестов будут идентифицированы Spice-параметры транзисторов, которые уточнят при совпадении результатов измерений и моделирования аналоговых устройств.

III. РАЗРАБОТАННЫЕ АНАЛОГОВЫЕ УСТРОЙСТВА

БК предназначен для изготовления: ОУ GaAs_OAmp1, GaAs_OAmp2, GaAs_OAmp3 с различным уровнем параметров; компаратора GaAs_Comp1; ЗЧУ - GaAs_CSP.

Электрические схемы аналоговых устройств показаны на рис. 6-9. Компаратор GaAs_Comp1 отличается от GaAs_OAmp1 на рис. 6 только включением нагрузки в цепь стока B4 и реализацией встроенной положительной обратной связи [18].

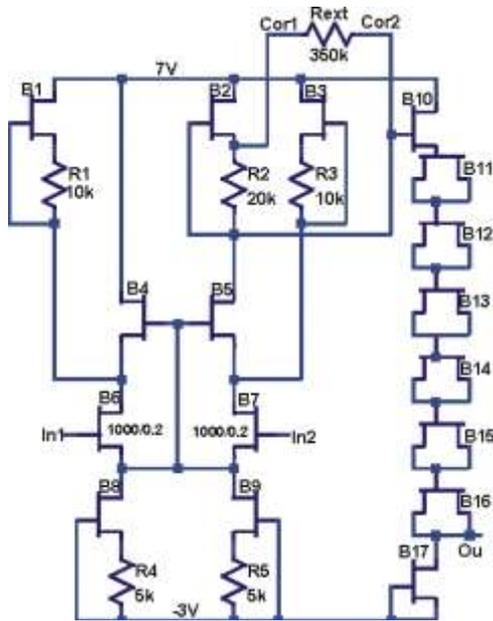


Рис. 6. Электрическая схема GaAs_OAmp1

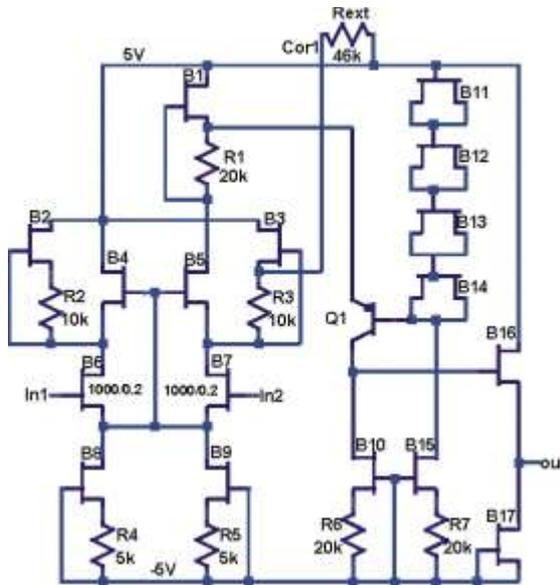


Рис. 7. Электрическая схема GaAs_OAmp2

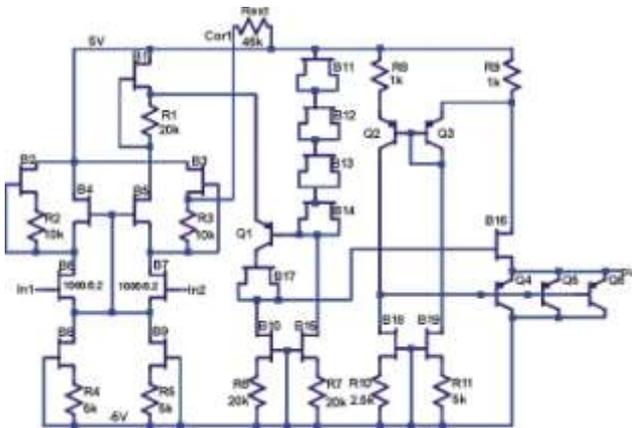


Рис. 8. Электрическая схема GaAs_OAmp3

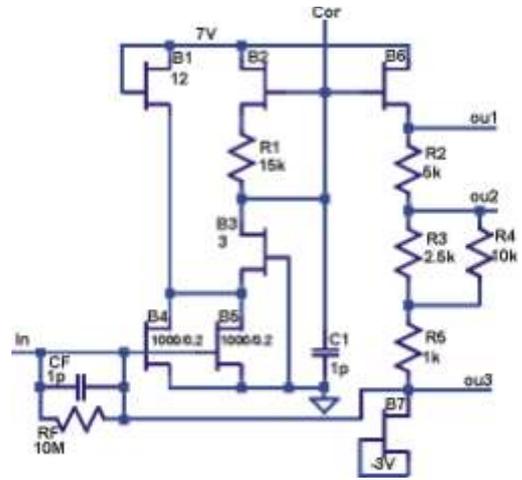


Рис. 9. Электрическая схема GaAs_CSP

Все ДрНЕМТ на электрических схемах имеют размер затвора $W/L = 10 \text{ мкм}/1 \text{ мкм}$, который на рисунках не указан. Размер затвора приведен только для ДрНЕМТ с $W/L = 1000 \text{ мкм}/0,2 \text{ мкм}$. При необходимости увеличения крутизны применяется параллельное соединение транзисторов с $W/L = 10 \text{ мкм}/1 \text{ мкм}$, количество которых в соединении указано около порядкового номера элемента. Так, B1 на рис. 9 состоит из 12-ти параллельно соединенных транзисторов. Требуемое значение сопротивления получено параллельно-последовательным соединением резисторов (R5 на рис.9 состоит из 5-ти параллельно соединенных резисторов величиной 5 кОм).

Во всех ОУ применен одинаковый дифференциальный каскад, состоящий из входных транзисторов с большой крутизной B6, B7 на рис. 6, каскодных транзисторов B4, B5, источников тока B8, R4, B9, R5, нагрузки входных транзисторов B1, R1, B3, R3 и нагрузки каскодного транзистора на B2, R2.

Такое схемотехническое решение обычно применяется в каскодных JFET для обеспечения большого усиления напряжения [19]. Так, большая крутизна B6, B7 обеспечивается благодаря большому отношению W/L и значительной величине тока стока. В то же время, преобладающая часть постоянного тока стока транзисторов B6, B7 протекает через их нагрузки в источник положительного напряжения, а меньшая часть – через B4, B5, что позволяет включить в сток B5 большое нагрузочное сопротивление и увеличить усиление напряжения. Заметим, что параметры элементов выбраны таким образом, что практически вся переменная составляющая тока стока B6, B7 протекает по низкому сопротивлению истоков B4, B5, а не высокому сопротивлению нагрузок B1, R1 и B3, R3. На транзисторах B10, B17 с цепочкой последовательно соединенных диодов B11-B16 реализован выходной истоковый повторитель. Включение внешнего резистора REXT между выводами Cor1 и Cor2 позволяет минимизировать напряжение смещения нуля ОУ.

Так как в ОУ GaAs_OAmp1 в качестве активных элементов применены только ДрНЕМТ, типовое значение напряжения отсечки которых составляет 1,2 В, то для обеспечения симметричного биполярного выходного напряжения необходимо применение несимметричного биполярного напряжения питания минус 3 В и плюс 7 В.

Последний недостаток устранен в ОУ GaAs_OAmp2, GaAs_OAmp3, в которых для сдвига постоянного уровня напряжения и одновременного увеличения коэффициента усиления напряжения применен р-п-р НВТ Q1, включенный по схеме с общей базой, с нагрузкой на В10. Кроме того, в GaAs_OAmp3 предусмотрен двухтактный выходной каскад для работы с малым сопротивлением нагрузки R_{LOAD} . Подключение внешнего резистора между положительным напряжением питания и выводом Сог1 позволяет минимизировать напряжение смещения нуля. Результаты моделирования ОУ показаны в табл. 1.

Таблица 1

Результаты схемотехнического моделирования ОУ

Наименование параметра	Наименование ОУ		
	GaAs_OAmp1	GaAs_OAmp2	GaAs_OAmp3
Напряжение питания, В	-3/7	-5/5	-5/5
Ток потребления, мА	0,66	0,74	0,68
Напряжение смещения нуля, мкВ	15,0	45,0	45,0
Коэффициент усиления напряжения	$6 \cdot 10^4$	$24 \cdot 10^4$	$23 \cdot 10^4$
Максимальное выходное напряжение, В	-1,92/2,22 ¹	-4,63/4,05 ¹	-3,80/4,24 ¹
	-1,67/2,0 ²	-3,85/3,67 ²	-3,04/3,66 ³
Примечание: ¹ – $R_{LOAD}=100$ кОм; ² – $R_{LOAD}=10$ кОм; ³ – $R_{LOAD}=5$ кОм;			

Как следует из табл.1 GaAs_OAmp1 имеет хуже параметры по сравнению с остальными ОУ. Однако его изготовление на БК целесообразно в том случае, когда уровень параметров GaAs_OAmp1 вполне удовлетворяет потребителей. В этом случае отказ от выполнения операций по изготовлению р-п-р НВТ позволит упростить технологический маршрут и, таким образом, уменьшить стоимость изготовления полупроводникового кристалла ИМС.

Зарядочувствительный усилитель, показанный на рис. 9, идентичен по схемотехнике, разработанному ранее [19]. Отличия заключаются только в сопротивлениях резисторов, размерах W/L транзисторов и наличии трех выходов ou1, ou2, ou3. Последнее предназначено для увеличения

динамического диапазона при обработке входных токовых импульсов разной полярности, так как при отсутствии входного сигнала выходное напряжение составит по выводу ou1 - плюс 2,171 В, ou2 – плюс 29,6 мВ, ou3– минус 1,255 В.

Преимущества GaAs_CSP (по сравнению с кремниевым ЗЧУ с головным р-JFET [19] при близких по величине рабочих токах в основных цепях) иллюстрируют рис. 10, 11. Заметим, что ток стока входного FET составил 5,613 мА для Si ЗЧУ, 5,145 мА для GaAs ЗЧУ, ток активной нагрузки в высокоимпедансном узле – 52,65 мкА для Si ЗЧУ, 51,79 мкА для GaAs ЗЧУ.

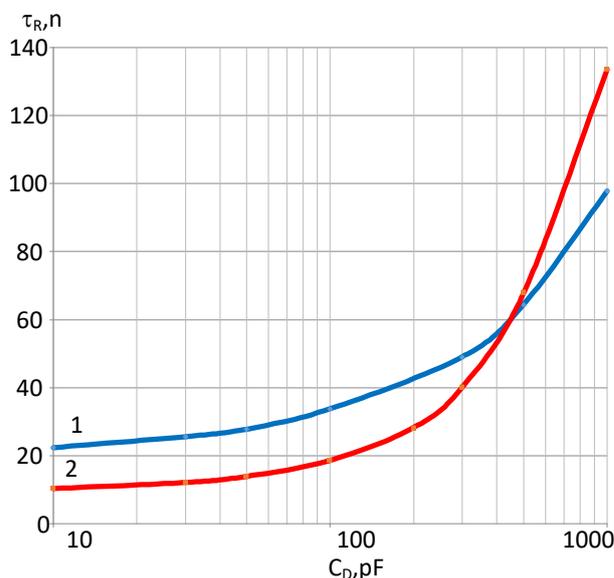


Рис. 10. Зависимость длительности фронта нарастания ЗЧУ τ_R от емкости датчика C_D : 1- Si ЗЧУ, 2- GaAs ЗЧУ

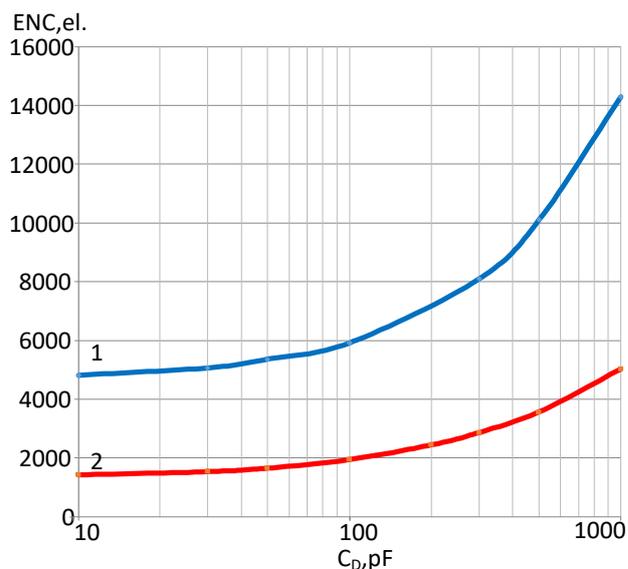


Рис. 11. Зависимость эквивалентного шумового заряда ENC (в электронах) от емкости датчика C_D : 1- Si ЗЧУ, 2- GaAs ЗЧУ

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для производства ИМС малой степени интеграции, предназначенных для экстремальных условий эксплуатации, разработан арсенид-галлиевый базовый кристалл, содержащий ДрНЕМТ с разными размерами затворов, р-п-р НВТ, два магазина резисторов и магазин конденсаторов.

Количество и номенклатура элементов БК выбраны для реализации ряда аналоговых устройств с унифицированными каскадами: трех типов ОУ, компаратора, ЗЧУ, причем специализация ИМС осуществляется путем формирования межсоединений элементов с помощью разных комплектов шаблонов.

ПОДДЕРЖКА

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект 18-79-10109-П).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Дворников О.В., Чеховский В.А., Прокопенко Н.Н., Галкин Я.Д., Кунц А.В. Учет одновременного воздействия низких температур и проникающей радиации на характеристики биполярных и JFET транзисторов при схемотехническом моделировании // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем (МЭС). 2020. Вып. 1. С. 46-55. doi:10.31114/2078-7707-2020-1-46-55.
- [2] Проектирование низкотемпературных и радиационно-стойких аналоговых микросхем для обработки сигналов датчиков: монография / Авторы: Н.Н. Прокопенко, О.В. Дворников, А.В. Бугакова. – М.: СОЛОН-Пресс, 2021. – 200 с.
- [3] Дворников О.В., Чеховский В.А., Дятлов В.Л., Прокопенко Н.Н., Будяков П.С. Проектирование компараторов напряжений на базе элементов радиационно-стойкого низкотемпературного BiJFET базового матричного кристалла МН2ХА030 // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем (МЭС). 2018. Вып. 4. С. 10-16. doi:10.31114/2078-7707-2018-4-10-16.
- [4] M. Citterio, S. Rescia and V. Radeka, "Radiation effects at cryogenic temperatures in Si-JFET, GaAs MESFET, and MOSFET devices," in *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 42, no. 6, pp. 2266-2270, Dec. 1995, doi: 10.1109/23.489425.
- [5] J. Wurfl, B. Janke, E. Nebauer, S. Thierbach and P. Wolter, "High temperature MESFET based integrated circuits operating up to 300/spl deg/C," *International Electron Devices Meeting. Technical Digest*, 1996, pp. 219-222, doi: 10.1109/IEDM.1996.553572.
- [6] Yasunori Hibi, Hiroshi Matsuo, Hirokazu Ikeda, Mikio Fujiwara, Lin Kang, Jian Chen, Peiheng Wu. Cryogenic ultra-low power dissipation operational amplifiers with GaAs JFETs. *Cryogenics*, Volume 73, 2016, Pages 8-13, <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2015.10.006>.
- [7] D. V. Camin, N. Fedyakin, G. Pessina and A. E. Previtali, "Monolithic cryogenic preamplifiers based on large gate-area GaAs MESFETs," *Proceedings of 1994 IEEE Nuclear Science Symposium - NSS'94*, 1994, pp. 266-269 vol.1, doi: 10.1109/NSSMIC.1994.474414.
- [8] G. Battistoni, D.V. Camin, N. Fedyakin, G. Pessina, P. Sala. Monolithic GaAs current-sensitive cryogenic preamplifier for calorimetry applications. *Nuclear Physics B - Proceedings Supplements*, Volume 61, Issue 3, 1998, Pages 511-519, [https://doi.org/10.1016/S0920-5632\(97\)00611-7](https://doi.org/10.1016/S0920-5632(97)00611-7).
- [9] G. Battistoni, D.V. Camin, N. Fedyakin, G. Pessina, M. Sironi. Cryogenic performance of monolithic MESFET preamplifiers for LAr calorimetry. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Volume 395, Issue 1, 1997, Pages 134-140, [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(97\)00627-X](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(97)00627-X).
- [10] D. Camin, G. Pessina. Cryogenic ASICs in GaAs for Applications with Particle Detectors. *Journal de Physique IV Colloque*, 1996, 06 (C3), pp.C3-225-C3-230. 10.1051/jp4:1996334. jpa-00254252.
- [11] Yasunori Hibi, Hiroshi Matsuo, Hirokazu Ikeda, Mikio Fujiwara, Lin Kang, Jian Chen, Peiheng Wu. Cryogenic ultra-low power dissipation operational amplifiers with GaAs JFETs, *Cryogenics*, Volume 73, 2016, Pages 8-13, <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2015.10.006>.
- [12] Nagata, H., Kobayashi, J., Matsuo, H. *et al.* Fabrication of Cryogenic Readout Circuits with n-type GaAs-JFETs for Low Temperature Detectors. *J Low Temp Phys* **151**, 1022–1027 (2008). <https://doi.org/10.1007/s10909-008-9776-8>.
- [13] M. Fresina, "Trends in GaAs HBTs for wireless and RF," *2011 IEEE Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting*, 2011, pp. 150-153, doi: 10.1109/BCTM.2011.6082769.
- [14] P. J. Zampardi, M. Sun, C. Cismaru and J. Li, "Prospects for a BiCFET III-V HBT Process," *2012 IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium (CSICS)*, 2012, pp. 1-3, doi: 10.1109/CSICS.2012.6340116. <https://mniirm.by/>
- [15] W. Liu, D. Hill, D. Costa and J. S. Harris, "High-performance microwave AlGaAs-InGaAs Pnp HBT with high-DC current gain," in *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*, vol. 2, no. 8, pp. 331-333, Aug. 1992, doi: 10.1109/75.153604.
- [16] K. W. Kobayashi, D. K. Umemoto, J. R. Velebir, D. C. Streit and A. K. Oki, "Integrated complementary HBT microwave push-pull and Darlington amplifiers with PNP active loads," *GaAs IC Symposium Technical Digest 1992*, 1992, pp. 313-316, doi: 10.1109/GAAS.1992.247281.
- [17] D. Lan, Y. Ning, J. Wang and H. Jiang, "High performance two-stage bootstrapped GaAs comparator with gain enhancement," *2015 IEEE 16th Annual Wireless and Microwave Technology Conference (WAMICON)*, 2015, pp. 1-4, doi: 10.1109/WAMICON.2015.7120379.
- [18] O. V. Dvornikov, V. A. Tchekhovski, N. N. Prokopenko and A. E. Titov, "Comparison of Fast Response and Noise of Charge-Sensitive Amplifiers with Various Types of Input Fets," *2020 International Symposium on Industrial Electronics and Applications (INDEL)*, Banja Luka, Bosnia and Herzegovina, 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/INDEL50386.2020.9266185.

GaAs analog master slice

O.V. Dvornikov¹, A.A. Paulyuchyk², N.N. Prokopenko^{3,4}, V.A. Tchekhovskiy⁵,
A.V. Kunts^{5,6}, V.E. Chumakov³

¹Minsk Research Instrument-Making Institute JSC (MNIPI JSC) (Minsk, Republic of Belarus)

²JSC “Minsk research institute of radiomaterials” (Minsk, Republic of Belarus)

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

⁴Institute for Design Problems in Microelectronics RAS (Zelenograd, Russia)

⁵Institute for Nuclear Problems of Belarusian State University (Minsk, Republic of Belarus)

⁶Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract — For production of circuits with low level of integration meant for extreme operation conditions, we designed GaAs master slice which contains: two DpHEMT with gate width (W) 1000 μm and gate length (L) – 0,2 μm , 20 units of DpHEMT with W/L = 10 $\mu\text{m}/1 \mu\text{m}$, 8 units of p-n-p HBT, two sets of 5 k Ω m resistors, set of 1pF capacitors. Amount and list of elements of master slice were chosen for realization of analog devices with unified cascades: tree types of operational amplifiers, comparator, charge sensitive amplifier. Implementation of this analog device is carried out by forming interconnections of integral elements using different masks. Features of transistors volt-ampere characteristics, electrical circuits and main results of master slice analog devices modeling are considered. So, operational amplifier, which uses only DpHEMT, provides gain more than $6 \cdot 10^4$ and range of maximum output voltage around from minus 2 V to plus 2 V with using nonsymmetrical bipolar source voltage minus 3 V/ plus 7 V, and amplifier using DpHEMT and p-n-p HBT – gain greater than $2 \cdot 10^5$ and diapason of maximum output voltage around from minus 4 V to plus 4 V with bipolar source voltage minus 5 V/ plus 5 V.

Keywords — MESFET, HEMT, HBT, GaAs, operational amplifier, charge-sensitive amplifier

REFERENCES

- [1] Dvornikov O.V., Tchekhovskiy V.A., Prokopenko N.N., Galkin Ya.D., Kunts A.V. Taking into Account the Simultaneous Effect of Low Temperatures and Penetrating Radiation on the Characteristics of the Bipolar and JFETs in the Circuit Simulation // Problems of Perspective Micro- and Nanoelectronic Systems Development - 2020. Issue 1. P. 46-55. doi:10.31114/2078-7707-2020-1-46-55
- [2] Proektirovanie nizkotemperaturnykh i radiacionno-stojkikh analogovykh mikroskhem dlya obrabotki signalov datchikov: monografiya (Design of low temperature and radiation-resistant analog ICs for sensor signal processing)/ Avtory: N.N. Prokopenko, O.V. Dvornikov, A.V. Bugakova. – M.: SOLON-Press, 2021. – 200 s.
- [3] Dvornikov O.V., Tchekhovskiy V.A., Diatlov V.L., Prokopenko N.N., Budyakov P.S. Design of Voltage Comparators Based on the Elements of the Radiation-Hardened Low-Temperature BiJFET Array Chip MH2XA030 // Problems of Perspective Micro- and Nanoelectronic Systems Development - 2018. Issue 4. P. 10-16. doi:10.31114/2078-7707-2018-4-10-16.
- [4] M. Citterio, S. Rescia and V. Radeka, "Radiation effects at cryogenic temperatures in Si-JFET, GaAs MESFET, and MOSFET devices," in *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 42, no. 6, pp. 2266-2270, Dec. 1995, doi: 10.1109/23.489425.
- [5] J. Wurfl, B. Janke, E. Nebauer, S. Thierbach and P. Wolter, "High temperature MESFET based integrated circuits operating up to 300/spl deg/C," *International Electron Devices Meeting. Technical Digest*, 1996, pp. 219-222, doi: 10.1109/IEDM.1996.553572.
- [6] Yasunori Hibi, Hiroshi Matsuo, Hirokazu Ikeda, Mikio Fujiwara, Lin Kang, Jian Chen, Peiheng Wu. Cryogenic ultra-low power dissipation operational amplifiers with GaAs JFETs. *Cryogenics*, Volume 73,2016,Pages 8-13, <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2015.10.006>.
- [7] D. V. Camin, N. Fedyakin, G. Pessina and A. E. Previtali, "Monolithic cryogenic preamplifiers based on large gate-area GaAs MESFETs," *Proceedings of 1994 IEEE Nuclear Science Symposium - NSS'94*, 1994, pp. 266-269 vol.1, doi: 10.1109/NSSMIC.1994.474414.
- [8] G. Battistoni, D.V. Camin, N. Fedyakin, G. Pessina, P. Sala. Monolithic GaAs current-sensitive cryogenic preamplifier for calorimetry applications. *Nuclear Physics B - Proceedings Supplements*, Volume 61, Issue 3, 1998, Pages 511-519, [https://doi.org/10.1016/S0920-5632\(97\)00611-7](https://doi.org/10.1016/S0920-5632(97)00611-7).
- [9] G. Battistoni, D.V. Camin, N. Fedyakin, G. Pessina, M. Sironi. Cryogenic performance of monolithic MESFET preamplifiers for LAr calorimetry. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Volume 395, Issue 1, 1997, Pages 134-140, [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(97\)00627-X](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(97)00627-X).
- [10] D. Camin, G. Pessina. Cryogenic ASICs in GaAs for Applications with Particle Detectors. *Journal de Physique IV Colloque*, 1996, 06 (C3), pp.C3-225-C3-230. 10.1051/jp4:1996334. jpa-00254252.
- [11] Yasunori Hibi, Hiroshi Matsuo, Hirokazu Ikeda, Mikio Fujiwara, Lin Kang, Jian Chen, Peiheng Wu. Cryogenic ultra-low power dissipation operational amplifiers with GaAs JFETs, *Cryogenics*, Volume 73, 2016, Pages 8-13, <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2015.10.006>.
- [12] Nagata, H., Kobayashi, J., Matsuo, H. *et al.* Fabrication of Cryogenic Readout Circuits with *n*-type GaAs-JFETs for Low Temperature Detectors. *J Low Temp Phys***151**, 1022–1027 (2008). <https://doi.org/10.1007/s10909-008-9776-8>.

- [13] M. Fresina, "Trends in GaAs HBTs for wireless and RF," *2011 IEEE Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting*, 2011, pp. 150-153, doi: 10.1109/BCTM.2011.6082769.
- [14] P. J. Zampardi, M. Sun, C. Cismaru and J. Li, "Prospects for a BiCFET III-V HBT Process," *2012 IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium (CSICS)*, 2012, pp. 1-3, doi: 10.1109/CSICS.2012.6340116.
- [15] <https://mniirm.by/>
- [16] W. Liu, D. Hill, D. Costa and J. S. Harris, "High-performance microwave AlGaAs-InGaAs Pnp HBT with high-DC current gain," in *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*, vol. 2, no. 8, pp. 331-333, Aug. 1992, doi: 10.1109/75.153604.
- [17] K. W. Kobayashi, D. K. Umemoto, J. R. Velebir, D. C. Streit and A. K. Oki, "Integrated complementary HBT microwave push-pull and Darlington amplifiers with PNP active loads," *GaAs IC Symposium Technical Digest 1992*, 1992, pp. 313-316, doi: 10.1109/GAAS.1992.247281.
- [18] D. Lan, Y. Ning, J. Wang and H. Jiang, "High performance two-stage bootstrapped GaAs comparator with gain enhancement," *2015 IEEE 16th Annual Wireless and Microwave Technology Conference (WAMICON)*, 2015, pp. 1-4, doi: 10.1109/WAMICON.2015.7120379.
- [19] O. V. Dvornikov, V. A. Tchekhovski, N. N. Prokopenko and A. E. Titov, "Comparison of Fast Response and Noise of Charge-Sensitive Amplifiers with Various Types of Input Fets," *2020 International Symposium on Industrial Electronics and Applications (INDEL)*, Banja Luka, Bosnia and Herzegovina, 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/INDEL50386.2020.9266185.