

Лекция № 1 «Перспективная схемотехника и технологии для нового поколения радиационно-стойких IP модулей и СФ блоков систем связи, телекоммуникаций, технической диагностики»

Основное направление в решении проблемы радиационной и температурной стойкости радиоэлектронных изделий – совершенствование и удешевление соответствующих технологических процессов создания электронной компонентной базы (ЭКБ) для экстремальной электроники.

Однако, в рамках выбранных технологий значительная роль в повышении надежности ЭКБ, работающей при спецвоздействиях, отводится архитектурным и схемотехническим решениям.

В настоящем разделе приводится анализ основных технологий производства базовых функциональных узлов и IP-модулей для РЭА, работающей при воздействии радиации и температуры.

1.1 Основные технологические процессы экстремальной электроники (SiGe, КНИ, xFab, КНС, SiC)

В современной микроэлектронике к числу радиационно-стойких относят, прежде всего, технологические процессы на основе карбида кремния и арсенида галлия, а также других широкозонных материалов. Для изделий, работающих в экстремальных условиях – это основное направление развития электронной компонентной базы. Однако стоимость таких микросхем оказывается достаточно высокой. В этой связи представляет большой интерес дальнейшее исследование микросхемотехники для более дешёвых SiGe технологических процессов, а также технологического процесса АБМК_1_4 (НПО «Интеграл», г. Минск), отличающегося высокой стойкостью к спецвоздействиям.

1.1.1 Краткая информация о радиационной стойкости кремниевых транзисторов

Одним из основных факторов, способных повреждать космическую РЭА, является ионизирующее излучение, которое включает в себя потоки заряженных электронов, протонов и тяжелых частиц [5].

Испытания полупроводниковых приборов на радиационную стойкость к воздействию электронов проводятся на линейных ускорителях электронов с применением сложных экспериментальных методик, требующих больших энергетических и экономических затрат. Поэтому на практике используются методики, в которых воздействие электронов заменяется на эквивалентное ему по дозе воздействие гамма-излучения [6-8]. В частности, в работах [6, 9, 10] показано, что деградация статических характеристик маломощных при биполярных транзисторов (БТ) происходит сильнее при облучении электронами, чем при воздействии гамма-квантами с одинаковыми дозами. Эти результаты можно объяснить различными механизмами взаимодействия электронов и гамма-квантов с веществом [5]. При облучении электронами наблюдается образование дефектов в объеме вещества, тогда как при воздействии гамма-квантов в основном происходит образование зарядов в пассивирующей окисле и на поверхности полупроводника, а дефекты смещения образуются только за счет комптоновских электронов [10]. В данном случае, после облучения электронами наблюдается более сильная деградация коэффициента усиления по току (β), обусловленная в основном образованием объемных дефектов. В работе [11] отмечена обратная ситуация, когда деградация характеристик при транзистора типа 2N2222 с параметрами $\beta = 75 - 100$ и $f_T = 250$ МГц больше после облучения гамма-квантами, чем после облучения электронами, и обусловлена в основном действием радиационно-индуцированного заряда на поверхности полупроводникового материала и в окисле [5].

Таким образом, для при кремниевых транзисторов, граничная частота f_T которых не превышает 0,3 ГГц, нельзя однозначно говорить об эквивалентности действия электронов и гамма-квантов с одинаковой дозой. Деграция их характеристик сильно зависит от технологии изготовления и конструкции прибора [5].

1.1.2 Кремний-германиевые технологии

Конец XX века ознаменовался созданием нового технологического процесса - БиКМОП кремний-германиевой (SiGe) технологии – позволившего дать реальную базу для создания сложных «систем на кристалле», для сотовой и спутниковой связи, систем навигации, ближней беспроводной связи (Bluetooth, WLAN), современных радиолокационных систем, приборов автоэлектроники и многих других изделий [12].

Новая технология, созданная специалистами IBM [12], широко распространилась по всему миру благодаря сочетанию высокого уровня параметров элементов с высокой надежной надежностью, аналогичной обычным кремневым приборам, при не значительном увеличении себестоимости по сравнению с кремневыми приборами и меньшей ценой по сравнению с приборами на основе соединений АШВV. Технология с применением SiGe позволяет снизить мощность рассеивания высокочастотных трактов при сохранении частотных и усилительных свойств, что особенно перспективно для создания микросхем приемников. Появилась возможность выполнения на одном кристалле блоков, для которых ранее требовались отдельные корпуса, что ведет к дальнейшему удешевлению и увеличения надежности изделий микроэлектроники [12].

В настоящее время значительная часть современных микросхем, работающих в диапазоне частот 1–20 ГГц разрабатывается с применением SiGe технологии, и в ряде случаев заменяет микросхемы на основе GaAs. Особенно перспективны SiGe БиКМОП «системы на кристалле», включающие как СВЧ

SiGe биполярные узлы, так и КМОП процессоры и другие цифровые устройства [12].

Основой SiGe процесса служит биполярный n-p-n транзистор с гетеропереходом, в котором область базы легируется материалом SiGe, что позволяет получать при минимальной ширине эмиттера 0.4 мкм такие предельные частоты, которые раньше считались недостижимыми для кремневых приборов (100–200 ГГц). Данный процесс обеспечивает также высокие параметры пассивных элементов, позволяя получать высокую добротность индуктивных и емкостных элементов и широкий диапазон сопротивлений резисторов, используемых в высокочастотных трактах.

Основные преимущества SiGe технологии заключается в способности выборочно изменять ширину запрещенной зоны обычного кремния, т.е. менять параметры материала в области биполярного транзистора, таким образом, увеличивая его граничные частоты [13, 14].

Комбинация Si и Ge приводит к увеличению более, чем в два раза электронной подвижности сравнению с Si и, соответственно, снижает время пролета базы [12].

SiGe биполярные компоненты по сравнению с обычными биполярными структурами со значениями частоты единичного усиления по току f_T до 20 ГГц обладают и существенно меньшим уровнем шумов (1-2 дБ в диапазоне частот до 5 ГГц), что определяет их явное преимущество при построении малозумящих СВЧ ИМС в приёмных трактах [12].

Кремний-германиевая (SiGe) биполярная комплементарная металл-оксид-полупроводник (БиКМОП) технология [13] представляет также существенный интерес как для применения в космических условиях, так и для экспериментов в физике высоких энергий из-за подтвержденного высокого уровня устойчивости к радиации [15,16,14,17].

Как описано в [14], SiGe технологии обладают рядом уникальных свойств, что делает их пригодными для экстремальных условий. Реализованные на кремнии КМОП технологическая последовательность обеспечивает

высокопроизводительные решения для радиочастотных монолитных интегральных схем (РЧ-МИС), цифровых и смешанных применений – специализированных интегральных схем (ASIC).

В последние годы было выполнено несколько тестов на радиационную стойкость 0,25 мкм SiGe БиКМОП технологии SGB25VD, не содержащей p-n-p транзисторов [13, 15-16].

Европейским координационным советом по космическим компонентам (ESCC) было принято решение о развитии отдельной радиационно-стойкой технологии SGB25RH для применения в космосе и физике высоких энергий. В этой технологии были специально разработаны радиационно-стойкие топологии и IP блоки [15,16]. Поскольку SGB25V и SGB25RH используют один и тот же производственный процесс, результаты научных исследований на SGB25V действительны для SGB25RH при условии использования стандартных компонентов. Все протестированные устройства [16] показали приемлемую производительность до уровня радиации около 10 Мрад.

Внедрение конкретных правил проектирования SiGe микросхем, связанных с радиацией, реализовано в специальном «дизайн ките» (ИНР, Германия) [15,16]. На основе последних достижений ИНР создана библиотека радиационно-стойких элементов [16]. В настоящее время модели активных и пассивных компонентов для учета радиационной деградации находятся в стадии подготовки. Особенно в диапазоне доз и плотности потока нейтронов, обычно наблюдаемых в космических применениях [16]. Результаты радиационных тестов получены для 250 нм SiGe БиКМОП технологии [16].

Эта технология хорошо подходит как для СВЧ монолитных интегральных схем (ИС), так и для смешанных (ASIC) специализированных интегральных схем, ориентированных на применение в космосе и физике высоких энергий до частот 20 ГГц [13].

Экспериментальные данные по исследованию влияния ионизирующих излучений (гамма, нейтроны и протоны) на SiGe транзисторы, входящих в состав SiGe БИС четырех поколений с проектными нормами 0,25; 0,18; 0,13 и

0,09 мкм, полученные К.О. Петросянцом, Л.М. Самбурским и И.А. Харитоновым, показывают, что по фактору суммарной поглощенной дозы SiGe ГБТ имеют уникальные показатели стойкости. Для приборов, изготовленных по последним уровням SiGe технологий, они составляют до 50-100 Мрад.

1.1.3 Технология «кремний на сапфире»

К началу 1990-х годов в НПП «Сапфир» было разработано семейство КМОП-микросхем на основе кремния на сапфире (КНС) - серии Б1825, Б1620, 1523, включающие микропроцессорный набор, схемы памяти и ряд аналого-цифровых микросхем [18]. Сегодня данное предприятие сконцентрировало все усилия исключительно на КНС - направлении и стало первым предприятием России, которое в течение более десяти последних лет ведет непрерывное серийное производство радиационно-стойких КНС-микросхем, обеспечивая поставками важнейшие оборонные системы страны [18].

Исторический опыт разработки и продвижения в производство российской КНС- технологии позволяет, сделать ряд общезначимых заключений-рекомендаций, полезных при развитии этого направления [18].

Выборы нового (особенно нетрадиционного) научно-технического направления, закрывающего конкретную потребительскую нишу, базируется на следующих основных положениях [18]. Это направление (обычно говорят - технология) должно обладать комплексом свойств физического плана, выделяющих его среди подобных направлений и обещающих достижение наилучших характеристик создаваемых микросхем. Для КНС- технологии это идеальные изоляционные параметры сапфировой подложки, радиационная стойкость будущих микросхем, наилучшее сочетание «быстродействие - потребляемая мощность», улучшенные характеристики ВЧ- и СВЧ-приборов, повышенная рабочая температура (вплоть до 250⁰С), удобство сочетания аналоговых и цифровых функций в едином чипе, возможность оптического возбуждения через прозрачную подложку [18]. Разумеется, важно мнение

зарубежных специалистов: «КНС - это наиболее успешный вариант КНИ-технологии», заявил в 2011 году вице-президент Peregrine, ведущей американской фирмы по КНС-микросхемам [19]. Еще значимей оценки авторитетных отечественных экспертов, знакомых с ситуацией в стране, - в разные годы КНС-проект НПП «Сапфир» одобрили и поддержали академики Ю.Б. Харитон, В.А. Мельников, Н.А. Семихатов, К.А. Валиев, Ю.В. Гуляев, А.С. Сигов, А.А. Орликовский, А.С. Бугаев [18]. Наконец, принципиально важна для нового направления его совместимость со стандартной КМОП-технологией, основой современной микроэлектроники [18].

Успех КНС-проекта в определяющей степени зависит от выполнения следующих основных условий [18]: выявление реальной и важной для страны сферы применения создаваемых микросхем, такой, в которой они обеспечивают внеконкурентно высокий уровень параметров аппаратуры, например, систем управления баллистических ракет стратегического назначения.

Таким образом, становление в России новой технологии может быть успешным лишь при ориентации на важнейшие оборонные системы, при этом формирование пула реальных потребителей микросхем (как основы постановки и развития их производства) должно рассматриваться в качестве главной составной части КНС-проекта [18].

1.1.4 Микросхемы на основе материалов с широкой запрещенной зоной

Одно из наиболее активно осваиваемых сегодня направлений СВЧ электроники - мощные твердотельные приборы на основе полупроводниковых материалов с широкой запрещенной зоной [19]. Ширина запрещенной зоны широкозонных полупроводниковых материалов в два-пять раз больше, чем у традиционных полупроводниковых материалов (кремния и арсенида галлия). Кроме того, у них выше поле пробоя (на порядок) и теплопроводность.

Дрейфовая скорость насыщения электронов широкозонных полупроводников (ШЗП) либо одинакова, либо несколько больше, чем у Si и GaAs. К тому же они отличаются высокой твердостью, стойкостью к воздействию агрессивных сред и радиационному излучению [19].

Нитрид галлия представляется наиболее перспективным широкозонным полупроводниковым материалом, как и вся группа III-нитридов [20]. С момента появления первого транзистора на GaN в полупроводниковой электронике произошли поистине революционные изменения. Эти приборы способны работать в значительно более широком диапазоне частот и при более высоких температурах, с большей выходной мощностью по сравнению с приборами на Si, GaAs, SiC или на любом другом освоенном в производстве полупроводниковом материале [19].

GaN транзисторы и микросхемы на их основе уже производятся серийно. Параметры таких приборов оказались столь впечатляющими, что в США, Европе и Японии в целях совершенствования будущих информационных систем и систем национальной безопасности сочли необходимым сформировать государственные программы создания высоконадежных полупроводниковых приборов и микросхем, которые проводятся под руководством Министерства обороны. В число исследуемых широкозонных материалов входят SiC, GaN и AlN [19].

Высокая химическая и температурная стабильность и низкая чувствительность к ионизирующему излучению делают широкозонные материалы особо привлекательными для оборонных и космических применений. Сейчас одно из главных направлений СВЧ полупроводниковой электроники, на котором сосредоточены основные силы разработчиков, - создание AlGaIn/GaN- гетеропереходных полевых транзисторов с затвором Шоттки [19].

Нитрид галлия широко используется для создания СВЧ транзисторов, голубых и ультрафиолетовых твердотельных лазеров, диодов, сенсоров, оптоэлектроники и связи, компьютеров, цифровых устройств, силовых

электрических сетей, плоских дисплеев, систем освещения и т.п. [19]. Совокупность свойств широкозонного материала и возможности формирования на основе GaN гетеропереходов позволяют добиться уникальных характеристик транзисторов - рабочего напряжения свыше 60 В, частот до 70 ГГц, мощности до 200 Вт [19]. В настоящее время продемонстрированы GaN НЕМТ с выходной мощностью свыше 176 Вт, рабочим напряжением 63 В, КПД 54 % при усилении 12,9 дБ на частоте 2,1 ГГц. Рекордное на сегодня значение удельной мощности GaN НЕМТ - 32,2 Вт/мм при КПД 54,8 %, рабочем напряжении 120 В и частоте 4 ГГц [19].

Карбид кремния как материал для СВЧ-приборов активно осваивается в последние годы. Его главный недостаток - невозможность создания на нем гетероструктур [19]. Вследствие низкой подвижности носителей ($370 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ для политипа 6Н) рабочие частоты SiC-приборов не превышают 4-7 ГГц [19]. Однако остальные достоинства, прежде всего, высокая плотность мощности и большая теплопроводность заставляют активно развивать их промышленные технологии. В качестве примера промышленного SiC MESFET можно привести транзистор CRF-24060 компании Cree, изготовленный на 4Н-SiC-подложке [19]. Его номинальная выходная мощность 60 Вт. Это уже представитель второго поколения MESFET-транзисторов компании. КПД прибора при выходной мощности около 80 Вт и линейном усилении 12 дБ в полосе частот 0,9-1,6 ГГц превышает 40 % (50 % на частоте 1 ГГц) [19].

Начат коммерческий выпуск приборов на основе GaN и SiC, что является показателем развития технического уровня материала и технологии приборов [19]. Так, фирма Nitronex (США) приступила к выпуску серийных GaN НЕМТ на кремниевой подложке с выходной мощностью $P_{\text{вых}} = 15 \text{ Вт}$ (NPT35015) и 50 Вт (NPT35050). НЕМТ работают в диапазоне частот 3,3-3,8 ГГц, их рабочее напряжение U_p - 28 В, КПД - 18-20%, рабочая температура T_p - 200°C. Приборы прошли полный цикл испытаний на надежность [21,22]. Фирма Eudyna Devices (Япония) поставляет на рынок высоковольтные GaN НЕМТ моделей EGN045МК и EGN21A180IV. При нелинейном искажении 3 дБ выходная

мощность транзистора EGN045МК составляет 47 дБмВт, КПД - 60%, напряжение $U_{си}$ - 50 В, рабочая частота - 2,2 ГГц. Мощность транзистора EGN21A180IV, предназначенного для усилителей базовых станций мобильной связи стандарта W-CDMA, равна 180 Вт, КПД - 32%, диапазон рабочих частот 2,11-2,17 ГГц [22].

Серийные GaN HEMT типа CGH35015 компании Cree с $P_{вых} = 15$ Вт в диапазоне 3,3-3,9 ГГц, $U_p = 28$ В и КПД 24% предназначены для систем широкополосного беспроводного доступа и WiMAX базовых станций [23].

Помимо мощных дискретных транзисторов компания Cree освоила процесс изготовления SiC МИС на 75-мм пластинах [24]. Их базовыми элементами служат MESFET-транзисторы с шириной затвора 0,5 мкм. Плотность мощности MESFET-транзисторов - 4 Вт/мм, КПД - 60 % (при комнатной температуре), рабочее напряжение - 50 В, рабочая частота достигает 6 ГГц. При выходной мощности 3,8 Вт на частоте 3,5 ГГц транзисторы демонстрируют КПД 68 % [24].

Но все достоинства SiC-структур, даже в частотном диапазоне менее 6 ГГц, разбиваются о чрезвычайно высокую стоимость SiC-пластин [19]. Действительно, большая плотность мощности означает малую площадь теплоотвода. Следовательно, необходимы подложки с высокой теплопроводностью. Один из широко применяемых материалов - карбид кремния. Практически все GaN-приборы с рекордными характеристиками выполнены именно на SiC-подложках. С ценой на GaN-подложки ситуация еще тяжелее. Этот материал хоть и уступает по теплопроводности SiC, но в качестве подложки для GaN-приборов предпочтителен [19].

Таким образом, можно констатировать [19], что ШЗП имеют существенные преимущества перед традиционными полупроводниками, что подтверждается рекордными параметрами приборов на основе GaN и SiC. Начало коммерческого выпуска приборов на этих материалах показывает, что главные технологические проблемы приборов на этих материалах уже решены. Но возможности приборов на гетероструктурах AlGaN/GaN в полной мере еще

не реализованы из-за отсутствия качественного подложечного материала с высокой теплопроводностью [19].

Десятки предприятий и научных центров в США, Японии, Франции, Великобритании, Германии и других странах мира занимаются прикладными исследованиями и промышленным выпуском изделий на основе синтетических алмазов [19]. Большой вклад внесли Исследовательская лаборатория ВМС США (Air Force Research Lab., AFRL), компании Appolo Diamond, General Electric, Group4 Labs. LLC, Sp3 Diamond Technologies (США), Sumitomo Namamatsu (Япония), LETY, BOLD (Франция) и др. Интерес в этой области связан с тем, что природный алмаз имеет удельную теплопроводность примерно в четыре раза большую, чем у меди, являясь при этом диэлектриком, имеет очень высокие значения суммарной подвижности носителей (около 4000 см²/В·с), дрейфовой скорости, электрической прочности. У алмаза очень высокая радиационная стойкость (более 10¹⁵ нейтрон/см² по потоку нейтронов), а также наилучшие параметры оптической, химической и механической прочности, рекордный диапазон оптической прозрачности (1 нм - 100 мкм), твердости и др. [19].

1.1.5 Нитрид-галлиевая электронная компонентная база

Анализ достижений нитрид-галлиевой технологии во всём мире [25, 26] показывает:

1. GaN-устройства на несколько порядков превосходят показатели по надёжности, линейности, удельной мощности и общей эффективности все существующие на сегодняшний день технологии, будь это GaAs, LDMOS или электровакуумные усилительные приборы.

2. GaN-технологии подтвердили в лётной эксплуатации стойкость к воздействию излучений космического пространства и, следовательно, могут быть использованы в аппаратуре различного назначения, таких как спутниковые системы зондирования Земли, связи и вещания, РЛС

различного базирования, системы широкополосной мобильной связи.

Кремниевые и арсенид-галлиевые мощные СВЧ транзисторы практически достигли своего предела ввиду ограничений электрофизических параметров исходных полупроводниковых материалов [25].

Для создания СВЧ ЭКБ и мощных выходных устройств особенно важны преимущества нитрид-галлиевой технологии [25]:

- высокие пробивные напряжения (до 120 - 180 В);
- высокое рабочее напряжение питания ($U_{си} = 28 - 50$ В);
- высокий КПД (до 80 %);
- высокая удельная выходная мощность (более 5 Вт/мм для серийных приборов и до 74 Вт/мм для экспериментальных);
- возможность работы в классах А, АВ и В;
- высокий коэффициент усиления (на 1,0 - 2,0 дБ больше, чем у традиционных технологий в соответствующем диапазоне частот);
- расширенный диапазон рабочих температур;
- высокая радиационная стойкость;
- относительно высокие входной и выходной импедансы транзисторов, что позволяет расширить полосу рабочих частот, а также увеличить рабочие напряжения и выходную мощность в импульсных режимах работы [25].

В связи с этим разработчики РЭА обращают всё большее внимание на успешно развивающуюся GaN технологию. Использование нитрид-галлиевых приборов позволяет значительно увеличить уровни выходной мощности готовых изделий при сохранении (или уменьшении) их массогабаритных параметров. И если в L-, S- и C-диапазонах использование GaN-транзисторов в широкополосных усилителях неоспоримо и подкреплено производственными возможностями многих фирм-изготовителей твердотельной ЭКБ, то в более высокочастотных диапазонах существуют единицы предприятий-производителей. В X-диапазоне наилучших результатов добились фирмы Toshiba (Япония), выпускающая внутрисогласованные (ВСТ) GaN/SiC НЕМТ с выходной мощностью до 130

Вт, фирмы TriQuint и CREE (США), выпускающие GaN/SiC HEMT с выходной мощностью до 90 Вт в диапазоне частот до 18 ГГц и НПП «Пульсар» (Россия), разработавшее GaN BCT с выходной мощностью до 80 Вт [25].

Появление в начале 2000-х годов первых транзисторов с высокой подвижностью электронов, изготовленных по нитрид-галлиевой технологии (GaN HEMT), оставило несомненный след в спутниковой индустрии [25,26].

Основным достоинством GaN является то, что этот материал имеет жёсткую кристаллическую структуру. Именно поэтому он чрезвычайно устойчив к механическим, тепловым и электромагнитным внешним воздействиям. На начальном этапе развития технологии кристаллическая структура нитрида галлия была очень сильным сдерживающим фактором, поскольку выращивание кристаллов GaN было длительным и дорогостоящим. Тем не менее, в процессе научных исследований и совершенствования производства GaN HEMT и МИС были разработаны более экономичные технологии выращивания гетероэпитаксиальных слоёв на основе нитрида галлия [25,26].

Начиная с начала XXI века разработка GaN HEMT прошла большой путь, и сегодня на рынке доступны транзисторы и МИС в разных частотных диапазонах для различных применений. GaN устройства начали активно применяться в радиоэлектронной аппаратуре, такой как спутниковые системы зондирования Земли, связи и вещания, РЛС различного базирования, системы широкополосной мобильной связи [25,26]. Стало возможным, впервые с момента появления микроволновой технологии твёрдых состояний, разрабатывать и производить СВЧ устройства, и в первую очередь усилители мощности, которые превосходят на несколько порядков показатели по надёжности, линейности, плотности энергии и общей эффективности все существующие на сегодняшний день технологии, будь это GaAs, LDMOS или электровакуумные усилительные приборы.

Разработка устройств на базе СВЧ GaN HEMT открывает новые перспективы и является очевидным прорывом в индустрии спутниковых систем [25,26].

Уникальные свойства нитрида галлия приводят к достижению качественно лучших результатов, нежели традиционные материалы. Это связано со следующими особенностями GaN [25,26]:

Высокое напряжение пробоя GaN устройств (до 150-200 В) делает их невероятно устойчивыми и позволяет транзистору работать при напряжениях питания до 50-80 В, за счёт чего значительно возрастает КПД. Более того, для каждого отдельно взятого значения выходной мощности и подаваемого напряжения, уровень тока может быть снижен в сравнении с другими технологиями. Это приводит к повышению надёжности системы электроснабжения, так как ток на выходе снижается в среднем на 75 %. Напряжение питания возрастает с $U_{си} = 10\text{В}$, требуемых для работы GaAs транзисторов, до $U_{си} = 20-80\text{ В}$, но не возникает угрозы, что при сбое предохранителя в системе электропитания усилителей, обслуживающий персонал будет поражён током, как это может быть при работе лампового усилителя вследствие высокого напряжения (~10 кВ), которое требуется для функционирования лампы бегущей волны.

Большие входное и выходное сопротивления транзистора способствуют существенному упрощению согласующих цепей. Таким образом, при создании твердотельного СВЧ усилителя возможно использование преимуществ GaN для улучшения комплексных показателей устройства в целом, к примеру, большего рабочего диапазона частот, большего коэффициента полезного действия, в зависимости от требований к усилителю [25,26].

Высокая удельная плотность мощности позволяет увеличить коэффициент усиления и выходную мощность транзистора [25,26]. В системе это приводит к снижению количества каскадов усилителя и, как следствие, уменьшению габаритов устройств. К примеру, GaN комплексированные

устройства С-диапазона имеют КПД до 48 %, в сравнении с показателями в 25-30 % для GaAs. В результате, кубический объём системы энергоснабжения может быть сокращён в два раза, или для данного значения объёма можно снизить мощность устройства. Так как сбои в энергоснабжении относятся к критическим, это приводит к повышению времени безотказной работы и сокращению затрат электроэнергии.

Высокая рабочая температура (более 200 °С) - это один из важнейших критериев GaN технологии, позволяющий добиться качественного скачка СВЧ устройств [25,26]. GaAs НЕМТ устойчиво функционируют при температурах не более 100 °С. Структура кристаллической решётки нитрида галлия и возможность работы GaN транзисторов при высоких температурах (более 200 °С) делает их невероятно устойчивой и надёжной частью СВЧ усилителя. Известно, что при температуре канала выше 175°С традиционный GaAs полевой транзистор прекращает работать или катастрофически теряет в коэффициенте усиления. GaN устройства при данной температуре могут эффективно работать ещё миллионы часов. С точки зрения надёжности, во всех твердотельных силовых и СВЧ устройствах транзисторы являются основным источником теплового излучения и до 90 % всех сбоев приходится именно на них [26]. Таким образом, использование GaN позволяет существенно упростить требования к теплоотводу, что особенно актуально для усилителей мощности.

Повышенная устойчивость к радиационным воздействиям, что особенно важно для применения в условиях космоса [25,26]. Благодаря повышенной устойчивости к радиации, GaN-усилители мощности уже сейчас готовы вытеснить электровакуумные приборы из сегмента усилителей мощности сигналов искусственных спутников земли (ИСЗ) - раньше подобное было просто невозможным! Это даст возможность улучшить энергетические параметры спутника на 5-10 дБ, что позволит работать абонентским терминалам с антеннами существенно меньшего диаметра и сделает качественный скачок в спутниковом широкополосном доступе в

Интернет. Более того, использование GaN даёт уникальную возможность перекрыть весь диапазон передачи ИСЗ одним устройством без разделения на транспондеры и без защитных интервалов, необходимых вследствие ограниченной линейности ламповых усилителей. GaN-усилители мощности - это идеальное решение для спутников нового поколения [26]. По устойчивости к радиационным воздействиям GaN превосходит и GaAs, а кроме того, может отлично противостоять электромагнитным импульсам:

- **лучшая линейность** в сравнении с GaAs и **очень низкие фазовые шумы**, что особенно важно для сложных видов модуляций. Опыт эксплуатации показал, что линейность GaN выше, чем GaAs, до 2 дБ при работе в одночастотном режиме и до 1,5 дБ в многочастотном режиме;

- **высокая устойчивость к воздействию входной мощности**, что позволяет использовать малозумящие усилители без традиционных для GaAs устройств защиты. Многочисленные исследования подтвердили, что устойчивость к входной мощности у GaN HEMT в 12-18 раз выше, чем у GaAs. Уровень устойчивости GaN МШУ к воздействию помех высокого уровня была доказана неоднократно [26].

Сегодня GaN-усилители не только вытесняют с рынка электровакуумные приборы, но также серьёзно конкурируют с GaAs за счёт меньших габаритов и веса, низкого энергопотребления, расширенного температурного диапазона, высокой надёжности и высокой линейности.

Космические программы требуют долгосрочных вложений, цикл создания продукта замедлен по сравнению с потребительским рынком. Финансовые кризисы существенно влияют на производственную структуру программы, в связи с чем необходим длительный диалог на всех уровнях цепи поставок для поддержания производственных возможностей.

Правительства ведущих держав финансировали исследования нитрида галлия в университетах и промышленных предприятиях в рамках специальных программ: в США - WBGSTI (Wide Bandgap Semiconductor Technology Initiative), WBGSRF (Wide Bandgap Semiconductor Radio

Frequency), NEXT (Nitride Electronic neXt-generation Technology) и NEXT2, в Европе - KORRIGAN (A Comprehensive Initiative for GaN HEMT Technology in Europe), WIDGAP (FP6 project on outlook for wide bandgap semiconductor technology), в Японии - NEDO (New Energy and Industrial Technology Development Organization), в России - в рамках Российского фонда фундаментальных исследований и Федеральных целевых программ по развитию электронной компонентной базы. Материалы и приборы разрабатывались для специальных и гражданских применений [25,26].

По результатам выполнения различных этапов программ были сформированы дополнительные подпрограммы развития технологий именно в направлении космического применения приборов и устройств.

В 2006 году стартовала программа European Space Agency (ESA) Европейского Космического Агентства, в которой основное внимание акцентировалось на разработке критически важных технологий в сфере электронных компонентов космического применения и, в частности, GaN - технологии [26]:

- GREAT2 (GaN Reliability Enhancement And Technology Transfer Initiative) нацелена на создание надёжного GaN-процесса, доступного для внедрения в промышленные проекты;

- EuSiC (High Quality European GaN-Wafer on Silicon Carbide Substrates for Space applications) направлена на разработку и освоение в производстве высококачественных GaN гетероэпитаксиальных структур, выращенных на подложках карбида кремния (SiC) европейского производства;

- Разработка высокопроизводительных процессов для широкозонной технологии, совместимой с кремниевой технологией, преследует цель создания GaN силовых транзисторов на кремниевых подложках;

- Разработка процессов эпитаксиального роста слоев на основе нитрида галлия необходима, в том числе, и для определения основного европейского производителя эпитаксиальных структур;

- AGAPAC (Advanced GaN Packaging) направлена на создание корпусов,

функционирующих при более высоких температурах, и сроки её выполнения согласованы с космической программой ESA;

– PROBA-V (X-band transponder) направлена на необходимость подтверждения лётной квалификации GaN-устройств в составе орбитальной группировки спутников ESA.

К настоящему времени в ряде стран уже получены практические результаты функционирования GaN ЭКБ в условиях космического пространства [25,26].

Еще в 2008 году Canadian Space Agency (CSA) - Канадское Космическое Агентство инициировало испытания надёжности GaN транзисторов, изготовленных NRC Lab (Оттава, Канада), в условиях космического пространства на Space Shuttle Endeavour [26]. Проведённые испытания подтвердили, что GaN, являясь чрезвычайно стабильным и химически инертным, становится «идеальным материалом» для космической электроники и электроники больших мощностей.

В США разработкой и производством GaN ЭКБ занимаются более 20 предприятий, среди которых основными следует считать CREE, TriQuint, Northrop Grumman, M/A-COM, Integra, между которыми существует разделение по диапазонам частот, уровню выходной мощности и специализации. «Новое поколение чипов на нитриде галлия произвело революцию на рынке военной и специальной электроники, - сказал Марк Роскер, заместитель директора DARPA по микроэлектронным технологиям, - ЭКБ на GaN достигла такой степени надёжности и объёмов производства, что позволит в значительной степени заменить их предшественников на арсениде галлия, особенно в мощных приложениях» [26]. Кроме того, Колин Уилан, инженер Raytheon, работающий на технологии GaN, отметил, что радары с синтезированной апертурой (PSA) на основе нитрида галлия могут иметь объём в пять раз меньше аналогичных на основе GaAs или обладать на 50 процентов большей дальностью. В настоящее время NASA направляет усилия инженеров на разработку устройств, объединяющих передовые

технологии КМОП с нитридом галлия, с целью создания полностью цифрового СВЧ усилителя мощности [25,26]. Эта уникальная архитектура устранил классический радиочастотно-интерфейсный подход путём объединения усилителя мощности со смесителями и иными устройствами с цифровым управлением. Успешное развитие этой преобразующей технологии позволит значительно уменьшить размер, вес и потребляемую мощность будущих передатчиков [26]. Кроме того, ведутся исследования реакции двумерного электронного газа (2DEG) на границе нитрида алюминия-галлия (AlGaN) и нитрида галлия (GaN) при высоких температурах и механической деформации. Эти исследования позволят создать платформу для зондирования механических напряжений (например, давления) в экстремальных условиях. Работоспособность GaN в агрессивных средах будет способствовать продвижению космической техники. Данное исследование способствует исследованиям атмосферы планет с профилем как у Венеры, анализу свойств материалов авиационных конструкций в условиях гиперзвукового полёта и позволит осуществлять зондирование непосредственно в двигателях ракетных систем [26].

Преимущества GaN позволяют улучшить комплексные характеристики приёмных устройств [25,26]. Возможность выдавать высокую мощность позволяет приёмнику выдерживать высокие показатели входной мощности без снижения усиления. Комбинация стойкости к высокой выходной мощности и низкого коэффициента шума позволяет оптимизировать характеристики МШУ и по минимизации коэффициента шума, и по уровню интермодуляционных искажений 3-его порядка. В [26] представлены результаты проектирования и сравнение характеристик трёх различных малозумящих усилителей (МШУ) для космического применения, которые функционируют в С-, Ки-, и Ка-диапазонах. МИС реализованы на 0.25 μm и 0.15 μm AlGaN/GaN- технологии. Измеренные значения коэффициентов шума составили 1.2, 1.9 и 4.0 дБ для С-, Ки-, Ка-частотных диапазонов соответственно. Устойчивость МШУ к входному СВЧ сигналу была

протестирована генераторами с уровнями 25 Вт, 6 Вт и 5 Вт для С-, Ки-, Ка-частотных диапазонов соответственно. Никакого уменьшения коэффициента усиления не наблюдалось [25,26].

Получены результаты [26] посвящённые развитию основанной на нитриде галлия ЭКБ для X-диапазонных приёмопередающих модулей будущих поколений радаров с синтезированной апертурой (РСА). В частности, МИС мощных и малошумящих усилителей были изготовлены с использованием процесса 0,25 μm GaN транзистора с высокой подвижностью электронов, предоставленного SELEX-SI (Италия) и обладающего удельной выходной мощностью 4 Вт/мм [25,26].

Первые европейские устройства на основе GaN были отправлены в космос в мае 2013 года в соответствии с проектом PROBA-V. Fraunhofer IAF - Институт прикладной физики твёрдого тела имени Фраунгофера (Фрайбург, Германия) разработал схему усилителя для диапазона частот 8-8.5 ГГц (X-диапазон), Tesat- SpaceCom в сотрудничестве с SCHOTT Electronic Packaging установили GaN усилитель вместе с другими компонентами в герметичный корпус подходящий для космических применений [25,26]. В связи с длительным сроком службы и радиационной стойкостью полупроводникового материала, такие электронные устройства идеально подходят для экстремальных условий, связанных с аэрокосмической отраслью. Перед космическими испытаниями нитрид-галлиевые МИС доказали свою устойчивость. Устройство было подвержено воздействию низких (до минус 100°C) и высоких (до +150 °C) температур, вибрации и ударов, а также воздействиям α -, β - и γ -излучения и тяжелых заряженных частиц. Ресурсные испытания, проведённые Fraunhofer IAF совместно с Tesat-Spacescom, показали, что разработанная МИС нитрид-галлиевого усилителя мощности обладает сроком безотказной работы не менее 20 лет [25,26]. GaN устройства более компактны, меньше и легче, чем другие решения. Они могут даже заменить электронные лампы, в настоящее время используемые для усиления. Это позволит существенно сократить вес и

транспортные расходы, которые могут составлять до 30 000 евро за килограмм полезной нагрузки [26].

Полученные МИС требуют гораздо меньше активных систем охлаждения для работы и имеют возможность работать в широком диапазоне частот, пригодны для связи, формирования радиолокационных изображений и других приложений в диапазоне частот 1 -100 ГГц [25,26]. Привлекательным для применения в космическом пространстве является то, что GaN полупроводники являются радиационно-стойкими и их срок службы измеряется десятилетиями. Понимая свой потенциал, а также преследуя цели технической независимости от американских компаний, ESA собрал консорциум европейских компаний и исследовательских институтов для разработки цепочки поставок нитрида галлия, называемый GREAT2 и включающий следующие основные организации [26]:

- SiCrystal AG - изготовитель SiC подложек;
- EpiGaN - эпитаксиальный рост GaN гетероструктур;
- Fraunhofer IAF - исследование GaN гетероструктур и проектирование МИС;
- UMS - производитель GaN МИС;
- TESAT Spacocom - корпуса для GaN МИС;
- Thales Alenia Space, Planeese, EGIDE - разработка корпусов с повышенным тепловым рассеянием, разработка и производство модулей и блоков на основе GaN ЭКБ.

ОАО «НПП «Пульсар» за последние годы разработало ряд GaN НЕМТ и устройств на их основе [26]. Подавляющее большинство устройств успешно выдержали испытания, в том числе, в составе аппаратуры заказчика. В настоящее время проходят определительные испытания GaN технологии ОАО «НПП «Пульсар» к воздействию протонного и гамма-излучений, а также тяжёлых заряженных частиц.

1.2 Радиационно-стойкая биполярно-полевая технология ОАО «Интеграл» и перспективные направления обеспечения конкурентоспособности и импортозамещения радиоэлектронной аппаратуры в интересах Союзного государства

В современной радиоэлектронной аппаратуре (РЭА) часто применяют цифровую обработку сигналов. В то же время информация, поступающая из окружающего нас мира, имеет непрерывную (аналоговую) природу, что обуславливает необходимость осуществления аналого-цифрового преобразования сигналов. В большинстве случаев непосредственное соединение датчика, преобразующего внешние физические воздействия в электрические сигналы, с серийно выпускаемым аналого-цифровым преобразователем (АЦП) приводит к потере части информации. Это связано с тем, что АЦП проектируются максимально универсальными и не учитывается специфика параметров реальных источников сигналов. Таким образом, высококачественная система обработки информации должна содержать прецизионный аналоговый интерфейс между датчиком и цифровыми устройствами. Аналоговый интерфейс осуществляет предварительную обработку поступающей информации, увеличивает отношение сигнал/шум, вырабатывает управляющие сигналы [27-29]. Реализация аналоговых интерфейсов на основе универсальных интегральных схем (ИС) малой степени интеграции: операционных (ОУ) и дифференциальных усилителей (ДУ), компараторов, источников опорного напряжения, фильтров и др., - увеличивает энергопотребление, массу, габариты, снижает надежность, требует сложной настройки и в конечном итоге может существенно повысить себестоимость аппаратуры. Кроме того, при применении универсальных ИС возможно несанкционированное повторение оригинальных конструктивно-схемотехнических решений, а некоторые высококачественные импортные ИС просто недоступны. Указанные причины приводят к тому, что разработчики

РЭА стремятся реализовать аналоговый интерфейс на одной полупроводниковой пластине с цифровой системой или в виде специализированной аналоговой ИС.

Целью настоящего раздела является анализ проблем проектирования аналоговых ИС и рассмотрение концепции развития специализированных аналоговых микросхем в ОАО «МНИПИ».

1.2.1 Проблемы реализации аналоговых микросхем

В настоящее время не существует метода проектирования, гарантирующего одновременно высокий уровень технических характеристик ИС, их малую себестоимость при серийном производстве и простоту, сжатые сроки, невысокие затраты на выполнение разработки. Каждый из методов проектирования имеет свои преимущества и недостатки, и конкретный выбор метода в значительной степени зависит от предполагаемых объемов производства ИС.

Можно выделить три основных направления реализации специализированных аналоговых ИС [30]:

- заказные ИС, разрабатываемые на уровне активных и пассивных элементов с привлечением, при необходимости, ранее апробированных узлов и блоков или функционально-завершенных блоков и макроблоков, так называемых IP-компонентов;

- полузаказные ИС (программируемые изготовителем) на базовых матричных кристаллах (БМК) и базовых структурных кристаллах (БСК);

- программируемые (потребителем) аналоговые ИС (ПАИС).

При создании заказных ИС проектируют полный комплект шаблонов, что позволяет наиболее полно использовать возможности полупроводниковой технологии с целью получения требуемых параметров и максимально плотной упаковки, обеспечивающей минимальную площадь и себестоимость кристалла при массовом производстве. Однако такой процесс проектирования требует значительных невозвратных затрат на разработку, которые окупаются только

при большой серийности продукции или при изготовлении высококачественных ИС для дорогостоящей РЭА.

Для уменьшения материальных затрат на подготовку производства и изготовление заказных микросхем часто применяют следующие методы [31]:

- размещение на одном фотошаблоне и одновременное изготовление нескольких ИС, включая изделия, предназначенные для разных потребителей (Multy Project Wafer, MPW- метод);

- размещение на одном фотошаблоне топологий нескольких слоев и поочередное использование разных участков фотошаблона при формировании разных слоев (Multy Layer Mask, MLM - метод).

К сожалению, применение MPW- и MLM- методов приводит к зависимости срока начала изготовления микросхем от наличия заказов других предприятий и недопустимо для ряда отраслей промышленности (ракетно-космической и военной техники, ядерной энергетики и др.).

Концепция БМК предполагает предварительное изготовление полупроводниковых пластин со сформированной матрицей несоединенных базовых ячеек, а также наличие библиотеки стандартных элементов и комплекса программ для схемотехнического и топологического проектирования полузаказных ИС [30, 32]. Каждая базовая ячейка состоит из несоединенных активных и пассивных элементов, соединения между которыми выполняют на предприятии-изготовителе ИС (в так называемой кремниевой мастерской). Программирование БМК осуществляется формированием дополнительных технологических слоев межсоединений (металлизации) и межслойных контактов. Для этого необходима разработка и изготовление дополнительных шаблонов, количество которых гораздо меньше, чем для заказных ИС. Библиотека элементов содержит всю необходимую для проектирования информацию, а именно: схему электрическую принципиальную, результаты измерений или моделирования параметров, топологические чертежи. В значительной степени состав библиотеки определяется экспертным путем и включает те элементы, которыми привыкли

оперировать разработчики аналоговых систем на основе ИС малой и средней степени интеграции. Элементы библиотеки спроектированы для конкретного БМК, поэтому топологические чертежи содержат только слои специализации, и применение элементов библиотеки возможно в БМК с одинаковой структурой ячейки. Библиотека элементов и комплекс программ проектирования доступны потребителям. В результате проектирование полузаказной ИС может осуществляться как в центре проектирования (дизайн-центре), так и на предприятии, разрабатывающем РЭА, на уровне элементов БМК и/или элементов библиотеки, но изготовление всегда происходит в кремниевой мастерской.

Универсальность БМК обуславливает их широкое распространение. К сожалению, существующие БМК не в полной степени удовлетворяют разработчиков аналоговых микросхем, так как:

- содержат большое количество КМОП-элементов, применение которых в аналоговых устройствах ограничено из-за высокого уровня низкочастотных шумов и вносимых статических погрешностей [30];
- используют избыточные для ряда применений конструктивные решения, увеличивающие стоимость изготовления полупроводниковых кристаллов;
- во многих БМК отсутствуют активные элементы для синтеза малошумящих аналоговых устройств;
- все БМК российского производства характеризуются относительно низкой граничной частотой биполярных транзисторов (БТ).

Основное отличие БСК от БМК заключается в том, что в БСК некоторые соединения элементов выполнены заранее [33]. Таким образом, структурные ИС представляют собой спроектированную и изготовленную полупроводниковую пластину, обычно содержащую блоки памяти, интерфейс ввода-вывода, функциональные аналоговые блоки и матрицу несоединенных элементов. Для специализации БСК также используются дополнительные шаблоны, но проектирование выполняется на уровне блоков. При этом часто

указывают, что БСК имеют архитектуру «море модулей» по сравнению с «морем вентиляей» многих БМК.

Использование в БСК и БМК ранее апробированных блоков уменьшает риск проектирования и снижает требования к квалификации разработчиков ИС, а наличие до начала этапа проектирования почти полностью сформированных полупроводниковых пластин сокращает время изготовления полузаказных ИС. Исходные пластины БМК и БСК изготавливаются массовым способом, что уменьшает их себестоимость.

Существенное улучшение качества полузаказных ИС возможно только при создании новых технологических маршрутов их изготовления. Следует заметить, что в настоящее время основными направлениями совершенствования технологий изготовления аналоговых ИС являются [34]:

- увеличение граничной частоты (f_T);
- уменьшение ширины эмиттера для уменьшения рабочего тока, соответствующего максимуму f_T ;
- формирование высококачественных пассивных элементов – конденсаторов с высокой удельной емкостью и малыми токами утечки, высокоомных резисторов с малой паразитной емкостью, индуктивностей с высокой добротностью;
- увеличение количества уровней межсоединений доступных при проектировании топологии;
- выработка новых критериев качества БТ вместо традиционных, включающих максимум f_T , величину пробивного напряжения коллектор-эмиттер V_{CEO} и коллектор-база V_{CBO} ;
- развитие, так называемого, «разумного производства», которое предполагает блочное построение технологического маршрута изготовления микросхем с возможностью выбора заказчиком определенного количества типовых блоков для реализации требуемого набора параметров ИС и исключения из маршрута избыточных блоков технологических операций.

Хотя в «дорожной карте» развития микроэлектронных технологий [34] запланировано увеличение граничной частоты транзисторов в 2014 г до сотен гигагерц при обеспечении рабочего напряжения коллектор-эмиттер около 1,5 В, в ряде устройств сотовой и беспроводной связи, операционных усилителях, датчиках, измерительных приборах целесообразно применение транзисторов с $f_T \leq 10$ ГГц при увеличенном до 10 В допустимом напряжении на промежутке коллектор-эмиттер.

Именно такие транзисторы рекомендуется применять в БМК, где фиксированное расположение на полупроводниковой пластине активных и пассивных элементов приводит к невозможности формирования соединений минимальной длины и согласующих высокочастотных LC-цепей и, таким образом, чрезвычайно затрудняет эффективное использование высокой граничной частоты транзисторов. Кроме того, применение в БМК транзисторов с очень высокой граничной частотой, но малым допустимым напряжением коллектор-эмиттер, ограничивает область применения, снижает универсальность БМК и значительно усложняет окупаемость затрат на разработку БМК и аналоговых ИС на нем.

ПАИС [35, 36] по способам специализации подобны широко известным программируемым логическим ИС (ПЛИС). В ПАИС задание требуемых аналоговых функций осуществляется потребителем программным путем без участия кремниевой мастерской и дизайн-центра. ПАИС при минимальных затратах обеспечивают максимальную гибкость проектирования, в частности быструю специализацию требуемых функций, программное изменение характеристик, возможность неоднократного перепрограммирования. Это уменьшает риск проектирования, позволяет экспериментально апробировать несколько вариантов одного изделия, предоставляет уникальную возможность получения отличающихся функций и/или параметров в различные моменты времени на одной и той же ИС путем изменения управляющей информации.

Недостатком всех программируемых ИС является низкая экономическая эффективность при средней и большой серийности выпуска, что связано с 3–5-

кратной избыточностью их элементов. Универсальность ПАИС затрудняет, а во многих случаях исключает реализацию прецизионных аналоговых характеристик. Даже основное преимущество (возможность многократного перепрограммирования) может ограничить их применение в жестких условиях эксплуатации, так как допускает появление дефектов самопроизвольного изменения внутренних связей.

Кроме того, необходимо учитывать, что стоимость зарубежных программируемых ИС для жестких условий эксплуатации в десятки-сотни раз превышает стоимость аналогичных ИС коммерческого исполнения, а их применение в ряде изделий специального назначения ограничено нормативными документами. Таким образом, на ПАИС можно быстро и эффективно провести макетирование аналогового интерфейса, пригодного только для обеспечения требуемого функционирования. В дальнейшем такое изделие рекомендуется оптимизировать и реализовать на отечественном БМК или в виде заказной ИС.

1.2.2 Концепция развития специализированных аналоговых микросхем ОАО «МНИПИ»

Проведенный специалистами ОАО «МНИПИ» анализ позволил выработать концепцию развития специализированных аналоговых ИС, в соответствии с которой необходимо:

I. Определить вид аналоговых микросхем, проектирование которых предполагается в рамках концепции, т.е. «рыночную нишу» создаваемой продукции.

С нашей точки зрения, наиболее экономически целесообразным для рынков России и Беларуси является разработка и поставка малых партий специализированных ИС для средств измерений и преобразователей физических величин, содержащих:

- радиационно-стойкие, малощумящие усилители;
- фотоприемники оптического излучения;

- детекторы частиц и ионизирующих излучений;
- чувствительные элементы датчиков.

II. На основе существующего технологического маршрута (БиППП) изготовления БТ и полевых транзисторов с р-n-переходом и каналом р-типа (р-ППП) разработать радиационно-стойкий БМК и библиотеку схемно-топологических решений основных аналоговых компонентов.

III. Исследовать изменение характеристик элементной базы при воздействии проникающей радиации, температуры, сформулировать подход к проектированию радиационно-стойких ИС и аналоговых микросхем, работающих при предельно низких температурах.

IV. Провести работы по созданию нового блочного технологического маршрута (КБТ), обеспечивающего формирование на одной пластине комплементарных высокочастотных БТ и р-ППП.

V. На основе КБТ- технологического маршрута разработать БСК, ориентированный на изготовление аналоговых интерфейсов датчиков, и новый радиационно-стойкий БМК.

1.2.3 Аналоговые ИС, разработанные в ОАО «МНИПИ»

В ходе реализации концепции за последние пять лет в ОАО «МНИПИ» разработан и изготовлен ряд аналоговых ИС [37-43]:

- одно и двухканальные трансимпедансные усилители (ТИУ) с различной полосой пропускания и отличающимся коэффициентом преобразования входного тока в выходное напряжение (МН1УП100, МН1УП110, МН1УП120, МН1УП130, МН1УП140);

- двухканальные компараторы (МН1СА100, МН1СА110);

- одно и двухканальные ТИУ с компараторами (МН1ХА100, МН1ХА110, МН1ХА120, МН1ХА130, МН1ХА140, МН1ХА150);

- сверхбыстродействующий компаратор, триггер Шмитта, коммутатор (МН1АФ011);

- сверхбыстродействующий компаратор, фильтр нижних частот (МН1АФ020);
- двухканальный суммирующий широкополосный коммутатор (МН1КН009);
- многофункциональная аналоговая ИС, содержащая два ОУ с компенсацией входного тока и инструментальный усилитель на трех ОУ (МН1ХА010);
- многофункциональная аналоговая ИС, содержащая два усилителя напряжения с головным р-ПТП и инструментальный усилитель на трех ОУ (МН1ХА020);
- многофункциональная аналоговая ИС, содержащая два усилителя напряжения с головным р-ПТП, два предварительных усилителя для работы с внешним п-ПТП и три ОУ с резистором 9,2 кОм в цепи отрицательной обратной связи (МН1ХА030);
- многофункциональная аналоговая ИС, содержащая четыре ОУ, один из которых - с компенсацией входного тока (МН1ХА051).

Высокую радиационную стойкость созданных микросхем подтвердили результаты испытаний, выполненные для некоторых из них (рис. 1.1 – 1.5) [44,45].

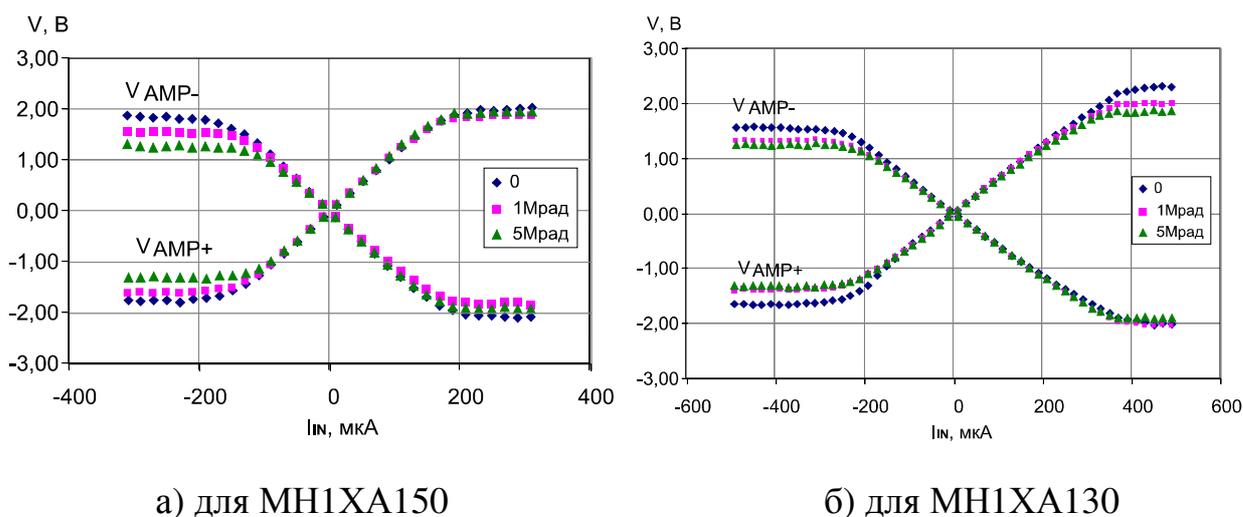


Рисунок 1.1 – Зависимость амплитуды напряжения на выходах (V_{AMP+} и V_{AMP-}) ТИУ от входного тока (I_{IN}) при различной величине поглощенной дозы

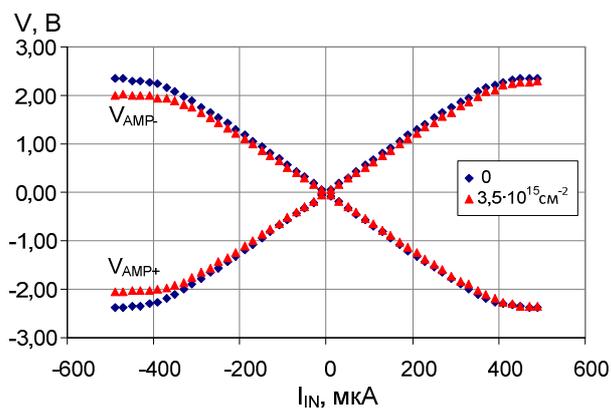


Рисунок 1.2 – Зависимость амплитуды напряжения на выходах (V_{AMP+} и V_{AMP-}) ТИУ MN1XA150 от входного тока (I_{IN}) при различной величине интегрального потока электронов с энергией 4МэВ

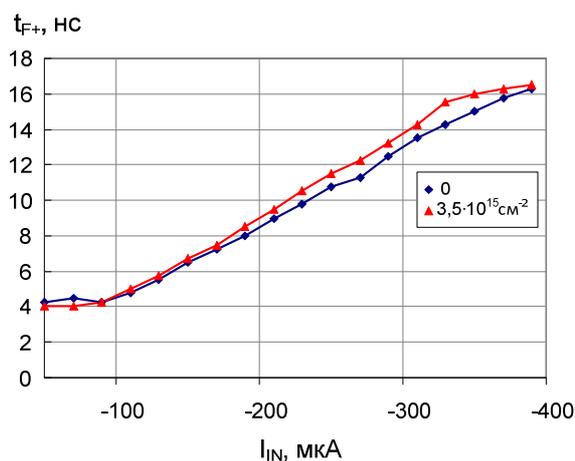
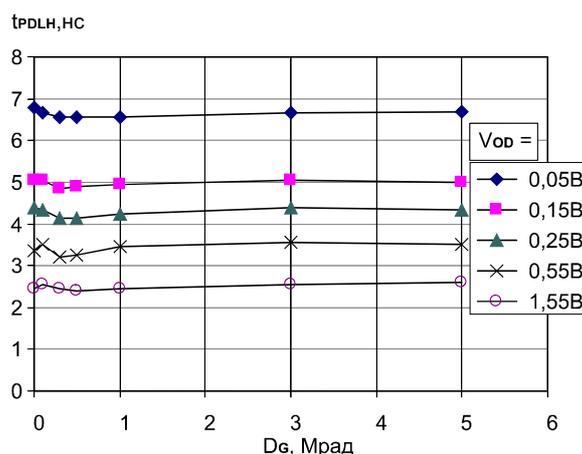
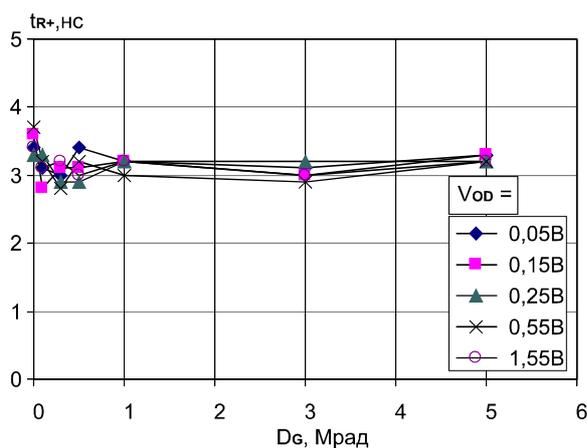


Рисунок 1.3 – Длительность фронта спада сигнала на неинвертирующем выходе ТИУ MN1XA150 (t_{F+}) в зависимости от входного тока (I_{IN}) при различной величине интегрального потока электронов с энергией 4МэВ

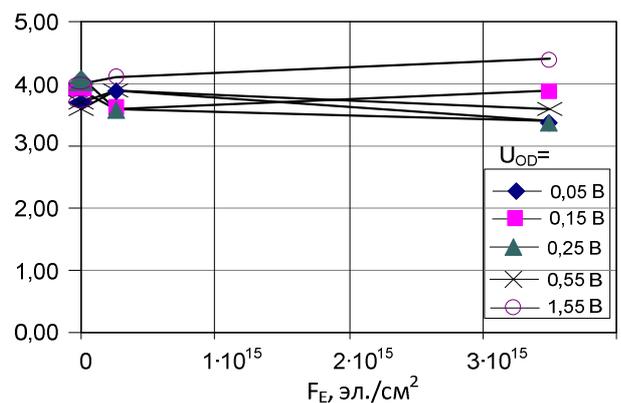
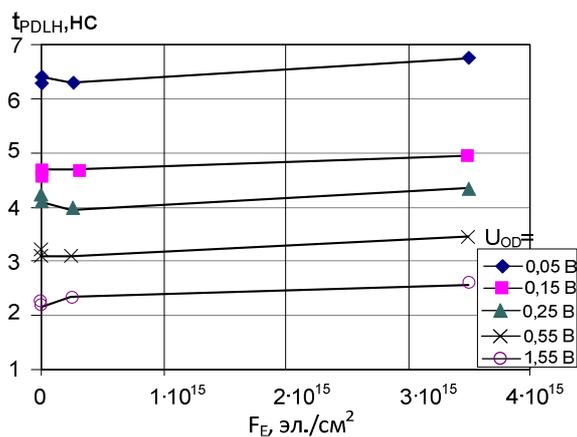


а) задержка переключения



б) длительность фронта нарастания

Рисунок 1.4 – Зависимость параметров компаратора MN1XA150 от поглощенной дозы гамма-излучения при различном превышении порога (V_{OD})



а) задержка переключения

б) длительность фронта нарастания

Рисунок 1.5 – Зависимость параметров компаратора МН1ХА150 от интегрального потока электронов с энергией 4МэВ при различном превышении порога (V_{OD})

1.2.4 Структура и основные характеристики «АБМК-1.3»

Создание радиационно-стойких интегральных схем (ИС) и сложно-функциональных блоков (СФ-блоков) как систем в корпусе (СвК) требует применения комплексных радиационно-стойких решений. Как с экономической, так и с технической точек зрения такие изделия целесообразно ориентировать на возможности аналоговых базовых матричных кристаллов (АБМК, г. Минск) [46]. Такая технология является наиболее распространенной на территории постсоветского пространства и позволяет проводить полный цикл по выпуску радиационно-стойких ИС (от схемотехнической реализации IP модулей на адекватных и доступных SPICE моделях – до циклов их измерений при воздействии гаммы дестабилизирующих факторов: высокоэнергетического потока нейтронов, дозы поглощенной радиации и температуры). Среди таких технологий детальную апробацию прошел биполярно-полевой АБМК_1_3 [46] и его дальнейшие модификации АБМК_1_4 и АБМК_1_5.

Как показывает практика [47], использование лишь радиационно-стойкой технологии АБМК не позволяет обеспечить надежную работу микроэлектронных устройств в условиях высокого радиационного воздействия из-за существенного изменения малосигнальных дифференциальных

параметров компонентов АБМК. В конечном итоге это влияет на основные метрологические характеристики радиоэлектронного оборудования.

Применение ИС и СФ-блоков на базе АБМК, согласно установленным требованиям [47], возможно:

- в нормальных условиях (доза радиации до $D=100$ рад, высокоэнергетический поток нейтронов F_n отсутствует, температура $T=27^{\circ}\text{C}$);
- при температурном воздействии (от -40°C до $+85^{\circ}\text{C}$);
- в областях воздействия повышенной радиации (на борту космических аппаратов, в устройствах на объектах ядерной энергетики и др.) – доза поглощенной радиации от 10крад и 100крад-300крад до 1Мрад (поверхность Земли, орбита Земли, открытый космос) при потоке нейтронов до $5 \cdot 10^{13}$ нейтрон/см².

В [48] представлен широкий спектр других ВАХ n-p-n и p-n-p транзисторов, а также их h-параметров с учетом одновременного влияния основных дестабилизирующих факторов: изменения температуры в диапазоне от -40°C до 60°C ; действия потока нейтронов до 10^{14} нейтрон/см² и накапливающей дозы радиации до 1Мрад.

Детальное исследование изменений параметров активных компонентов показывает, что большей стабильностью характеризуются биполярные n-p-n и полевые p-JFet (PADJFet) транзисторы, а наименьшей – биполярные p-n-p транзисторы. Изменение номиналов резистивных элементов на кристалле составляет $\sim 1,5\%$.

Разработанный радиационно-стойкий базовый матричный кристалл «АБМК-1.3» показан на рис. 1.6. Он содержит 8 макроячеек, показанных на рис. 1.7. По периметру БМК расположены многофункциональные контактные площадки, которые используются для соединения кристалла проводниками с траверсами корпуса или в качестве элементов ИС: PAD2Q – два многоэмиттерных малощумящих n-p-n-транзистора с сопротивлением базовой области менее 35 Ом; PADJ – малощумящий p-ПТП; PADJDG – два двухзатворных p-ПТП; PADC – МОП- конденсатор с номиналом 2,3 пФ,

допускающий использование в схеме паразитной емкости полупроводниковой обкладки.

Каждая макроячейка включает один изолированный карман, в котором размещены резисторы с номиналом от 650 Ом до 15,1 кОм, выполненные на слое р-базы, и низкоомные резисторы с сопротивлением 70 Ом, сформированные на слое n+-глубокого коллектора; маломощные n-p-n-транзисторы (NPNC) для источников стабильного тока; МОП- конденсаторы с емкостью 0,91 пФ; функционально-интегрированные элементы (PNPJF), представляющие собой каскодное соединение p-n-p-транзистора и p-ПТП; два n-p-n- транзистора с объединенными коллекторами (ячейки Джильберта – GC); 4-слойные полупроводниковые структуры (TW), позволяющие с помощью различного выполнения межсоединений областей получить двухэмиттерный n-p-n- или p-n-p-транзистор. Макроячейка окружена охранным кольцом для устранения взаимодействия через подложку разных блоков.

Количество активных элементов в макроячейке выбрано из условия получения четырех дифференциальных каскадов на n-p-n-транзисторах с активной нагрузкой на p-n-p-транзисторах или p-ПТП. Элементы TW двух макроячеек расположены на кристалле максимально близко, что позволяет их применять для получения источников напряжения и тока, устанавливающих рабочий режим ИС. Общие характеристики «АБМК-1.3» и входящих в него элементов приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Общие характеристики «АБМК-1.3»

Размер кристалла, мм		3,6x2,7
Технология изготовления		БиПТП
Корпус		H16.48-1B
Количество элементов	PNPJF (каскадное соединение p-n-p и p-ПТП)	128
	GC (два n-p-n с объединенными коллекторами)	128
	NPNC (n-p-n)	32
	TW (двухэмиттерный n-p-n- или p-n-p)	48
	PAD2Q (два маломощных n-p-n)	24
	PADJDG (два двухзатворных p-ПТП)	4
	PADJ (маломощный p-ПТП)	24
Суммарное сопротивление всех резисторов (БМК/макроячейка), МОм		5,264/0,658
Суммарная емкость всех конденсаторов (БМК/макроячейка), пФ		62,24/7,28

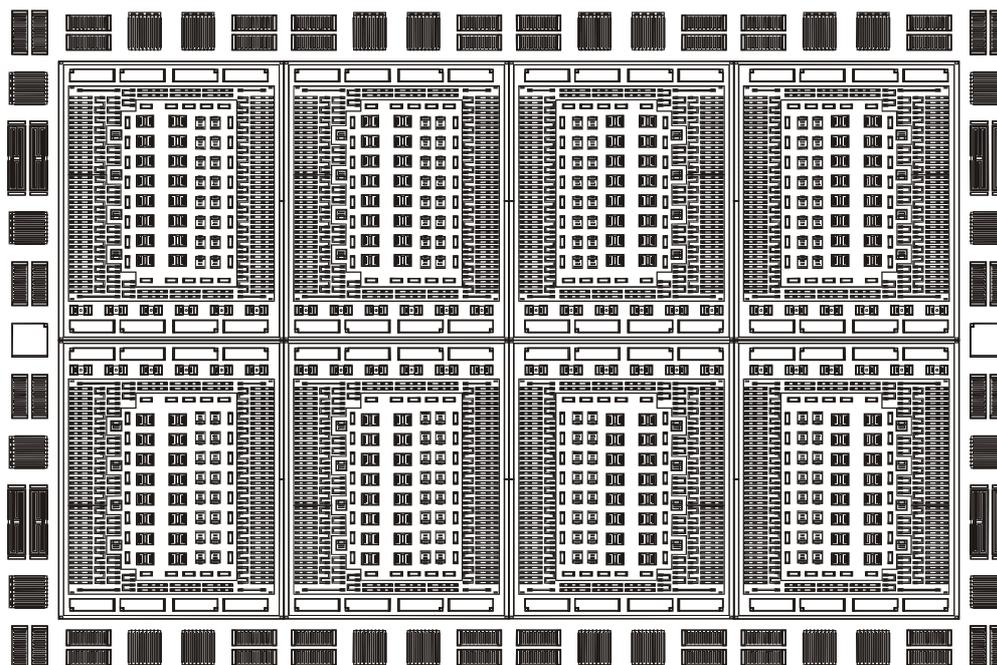


Рисунок 1.6 – Упрощенный чертеж топологии «АБМК-1.3»

Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования.

Рисунок 1.7 – Упрощенный чертеж макроячейки «АБМК-1.3»

1.2.5 Особенности проектирования радиационно-стойких и низкотемпературных аналоговых микросхем

С нашей точки зрения, «бездефектное» проектирование аналоговых ИС возможно только при наличии моделей активных и пассивных элементов, адекватно описывающих изменение вольтамперных характеристик (ВАХ) при воздействии проникающей радиации и температуры в требуемых диапазонах.

Такие модели были разработаны и апробированы при облучении транзисторов «АБМК-1.3» гамма- квантами ^{60}Co и «быстрыми» электронами с энергией 4 МэВ. Разработаны методики, позволяющие сопоставить изменение ВАХ при воздействиях «быстрых» электронов и нейтронов [44,45,49,50].

На рис. 1.8-1.11 приведены примеры моделирования зависимости статического коэффициента передачи тока в схеме с общим эмиттером (BETA) от эмиттерного тока (I_E) для транзисторов, изготовленных по разным технологиям.

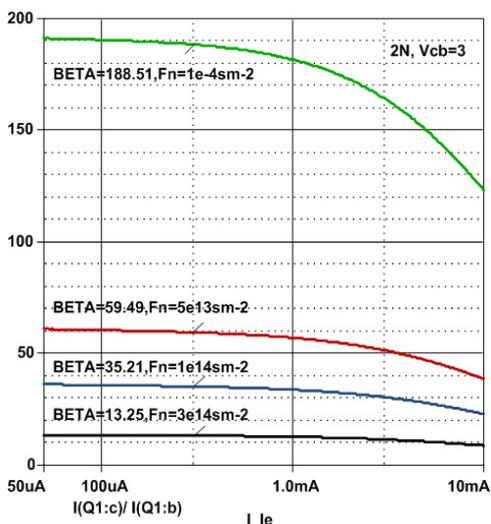


Рисунок 1.8 – Зависимость BETA от эмиттерного тока для транзистора типа 2N КБТ-техмаршрута

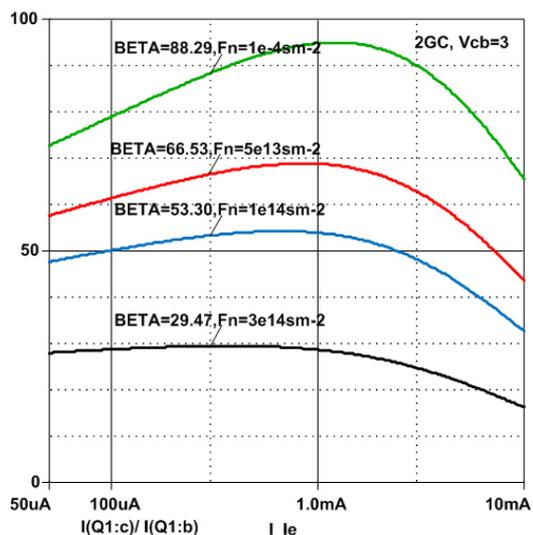


Рисунок 1.9 – Зависимость BETA от эмиттерного тока для транзистора типа 2GC БиПТП-техмаршрута

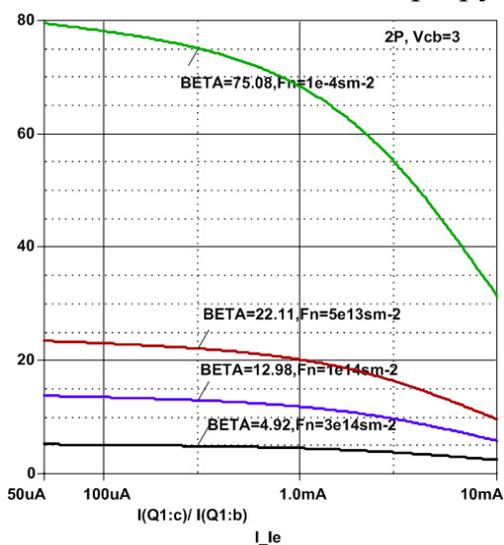


Рисунок 1.10 – Зависимость BETA от эмиттерного тока для транзистора типа 2P КБТ-техмаршрута

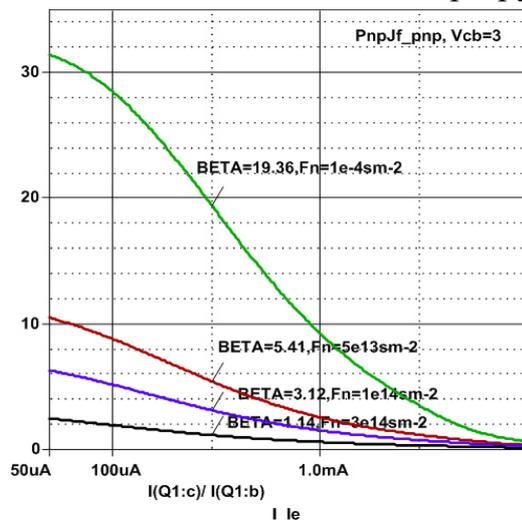


Рисунок 1.11 – Зависимость BETA от эмиттерного тока для транзистора типа PnpJFpnp БиПТП-техмаршрута

На основе экспериментальных данных о радиационном изменении параметров интегральных транзисторов и опыта проектирования аналоговых ИС, малочувствительных к воздействию внешних дестабилизирующих факторов (помех, температуры и др.), сформулированы основные правила схемотехнического синтеза микросхем с повышенным уровнем радиационной стойкости [51].

Так, для обеспечения среднего уровня радиационной стойкости, ориентировочно для интегрального потока нейтронов величиной до 10^{13} н/см² и поглощенной дозы гамма-излучения до 300 крад, допустимо применение упрощенного подхода к проектированию биполярных аналоговых ИС, а именно:

- использование дифференциальной структуры микросхем;
- максимальное увеличение плотности эмиттерного тока до границы наступления эффектов высокого уровня инжекции;
- использование горизонтальных р-п-р- транзисторов только в источниках тока или в схемах с общей базой, в которых деградация при радиационном воздействии коэффициента передачи тока $\beta_{\text{ЭТА}}$ слабо влияет на малосигнальные параметры аналоговых ИС;
- формирование резисторов на сильнолегированных полупроводниковых слоях;
- схемотехническая доработка - моделирование аналоговых ИС, выявление каскадов наиболее чувствительных к воздействию проникающей радиации и их модернизация (введение цепей компенсации входных токов, стабилизация режима работы с помощью отрицательной обратной связи, уменьшение радиационного изменения напряжения смещения нуля, применение новых методов построения многофункциональных аналоговых компонентов).

Аналоговые ИС с высоким уровнем радиационной стойкости, обеспечивающим работоспособность при потоке нейтронов более 10^{13} н/см² и поглощенной дозе более 300 крад, целесообразно проектировать на

вертикальных n-p-n БТ с тонкой базовой областью (высокой граничной частотой) и p-ПТП. Малые радиационные изменения параметров указанных активных элементов, достигаемые при высокой плотности эмиттерного тока в n-p-n БТ и применении сильнолегированного канала в p-ПТП, обуславливают незначительное ухудшение характеристик аналоговых микросхем. В то же время при схемотехническом синтезе биполярных микросхем с высоким уровнем радиационной стойкости рекомендуется применение следующих правил:

1. В качестве критерия качества при схемотехнической оптимизации следует выбирать минимальное изменение приоритетного параметра ИС при радиационном воздействии (например, для быстродействующего ОУ – скорости нарастания выходного напряжения, для прецизионного – напряжения смещения или уровня шумов).

2. Не применять для усиления горизонтальные p-n-p-транзисторы, заменять их p-ПТП.

3. Источники вытекающего тока следует выполнять на p-ПТП, а втекающего – на n-p-n-транзисторах.

4. Для двухкаскадного ОУ входной дифференциальный каскад рекомендуется выполнять на: n-p-n-транзисторах с источником втекающего тока; p-ПТП с источником вытекающего тока; комбинации n-p-n- и p-ПТП с перекрестными связями (ток в плечах дифференциального каскада определяется напряжением затвор-исток p-ПТП).

5. Промежуточный каскад ОУ может быть реализован на: n-p-n-транзисторах, если дифференциальный каскад выполнен с использованием p-ПТП; симметричном «перегнутом каскаде» с использованием p-ПТП; несимметричном «перегнутом каскаде» с использованием p-ПТП.

6. Выходной каскад должен быть выполнен по схеме двухтактного повторителя напряжения с использованием комбинации p-ПТП и n-p-n-транзисторов.

Оценка возможности проектирования низкотемпературных аналоговых микросхем проводилась на основе изучения научно-технической информации, возможностей базового предприятия по изготовлению полупроводниковых пластин (ОАО Интеграл), а также результатов измерений транзисторов «АБМК-1.3» при температуре жидкого азота.

Проведенный анализ позволил установить:

1. При температуре жидкого азота ВЕТА всех БТ упал до величины менее 2, что исключает возможность разработки усилительных схем.

2. Крутизна р-ПТП увеличивается до температуры минус 100С, начинает уменьшаться при температурах менее минус 120С (рис. 1.12, 1.13), а при температуре жидкого азота незначительно меньше, чем при нормальных условиях (25С).

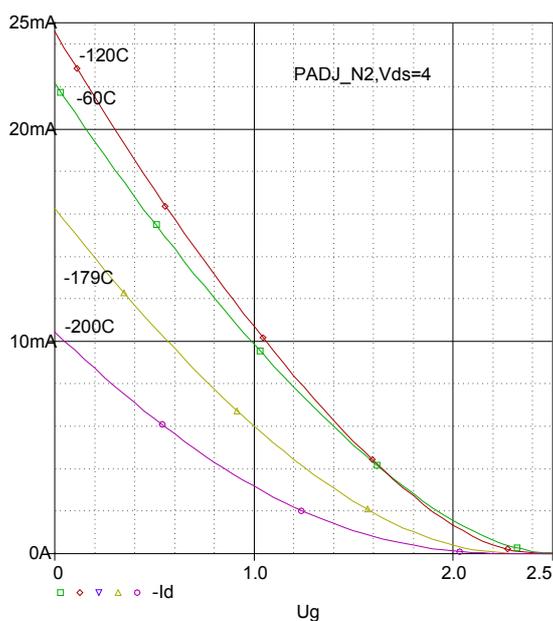


Рисунок 1.12 – Зависимость тока стока от напряжения затвор-исток р-ПТП типа PADJ при разных температурах

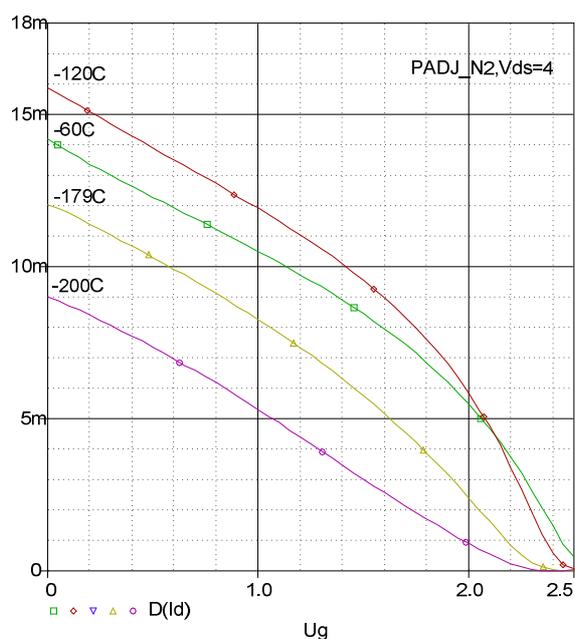


Рисунок 1.13 – Зависимость крутизны от напряжения затвор-исток р-ПТП типа PADJ при разных температурах

3. Из литературных источников известны направления модернизации структуры элементов для обеспечения высокого ВЕТА БТ при крайне низких температурах. Такую доработку технологии принципиально возможно

выполнить на ОАО «Интеграл», но они потребуют больших материальных затрат и окупятся только при большой потребности в низкотемпературных ИС.

4. Известны схемы усилителей напряжения на одних р-ПТП.

Таким образом, изготовление низкотемпературных аналоговых схем возможно с использованием существующего БиПТП технологического маршрута, но требует проектирование схем только на р-ПТП.

1.2.6 КБТ – технологический маршрут

Как указывалось ранее, для реализации аналоговых устройств с повышенным быстродействием и радиационной стойкостью начаты работы по созданию нового технологического маршрута, обеспечивающего формирование на одной пластине комплементарных высокочастотных БТ и р-ПТП. Типовая структура элементов, формируемых по КБТ-техмаршруту, показана на рис. 1.14.

Новый техмаршрут должен обеспечить получение следующих интегральных элементов и их параметров:

- 1) n-p-n- транзистор, $f_{TMAX} > 3$ ГГц, $BETA > 70$, $VAF > 80$ В, $BV_{CEO} > 10$ В;
- 2) p-n-p- транзистор, $f_{TMAX} > 3$ ГГц, $BETA > 60$, $VAF > 40$ В, $BV_{CEO} > 10$ В;
- 3) р-ПТП минимальных размеров, напряжение отсечки $1,0$ В $< V_{TH} < 2,0$ В, прибивное напряжение исток-сток $BV_{SD} > 10$ В;
- 4) резисторы с удельным сопротивлением слоя (R_S), равным 500 Ом/квадрат;
- 5) низкоомные резисторы, $R_S = 150$ Ом/квадрат;
- 6) 2 уровня межсоединений.

При необходимости, в технологический маршрут могут быть добавлены блоки формирования:

- 7) высокоомных резисторов с $R_S = 1,5$ кОм/квадрат;
- 8) конденсаторов с удельной емкостью $0,5$ фФ/мкм².

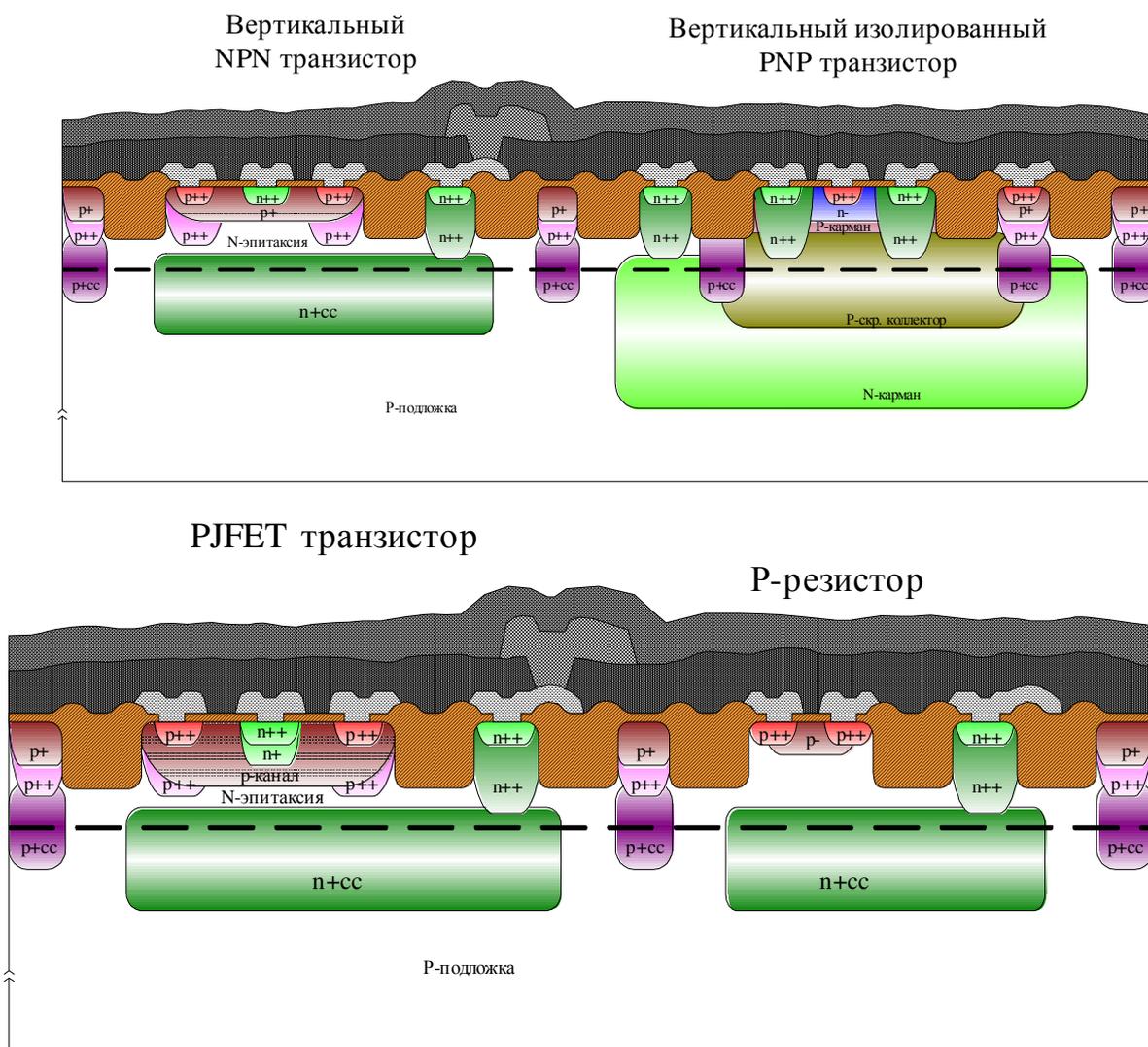


Рисунок 1.14 – Типовая структура элементов, формируемых по КБТ-техмаршруту

Первые образцы микросхем, изготовленных по КБТ-техмаршруту, планируется получить в 1 кв. 2015 г.

1.2.7 Новые средства проектирования полужаказных аналоговых микросхем

Для КБТ-техмаршрута в настоящее время разрабатывается новый БМК и БСК.

Создаваемый БМК имеет ряд отличий от «АБМК-1.3», а именно:

1) В нем не будут применяться функционально-интегрированные элементы, которые сводят на нет основное преимущество нового техмаршрута – высокую граничную частоту БТ.

2) Для реализации дифференциальных каскадов с каскодным включением входных и нагрузочных транзисторов увеличено число активных элементов.

3) Все БТ имеют два контакта к коллекторной области.

4) Мощные транзисторы и конденсаторы расположены по периферии макроячейки и под контактными площадками.

5) Номиналы резисторов увеличены приблизительно в 2 раза по сравнению с «АБМК-1.3», т.к. f_{TMAX} транзисторов, формируемых на новом техмаршруте, достигается при коллекторном токе в 2 раза меньшем.

6) Длина и ширина резисторов выбрана таким образом, чтобы между головками резисторов можно было провести не менее двух межсоединений с минимальным шагом.

7) Для увеличения количества контактных площадок, расположенных по периметру кристалла, их форма выполнена в виде прямоугольника.

В БСК планируется применять конфигурируемые аналоговые блоки (КАБ) [52]. КАБ должен обеспечить возможность изменения структуры аналоговой ИС путем изменения межуровневых контактов и второго уровня межсоединений и программирования параметров – варьированием рабочими токами транзисторов и номиналами RC- цепей.

В настоящий момент на изготовлении находятся два блока: САВ-1 - с входными БТ и САВ-4 с входными р-ПТП.

В качестве примера на рис. 1.15, 1.16 приведены электрическая схема входного каскада и упрощенная схема ОУ на основе САВ-1.

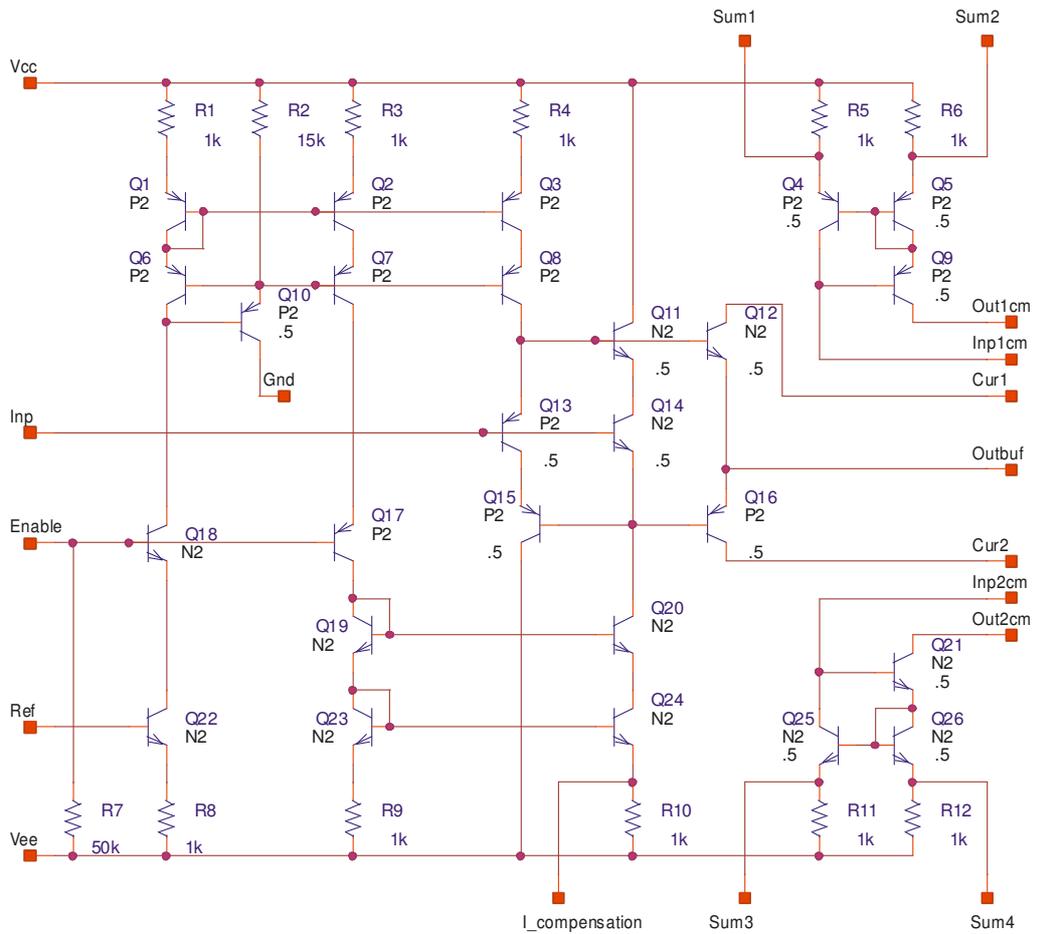


Рисунок 1.15 – Электрическая схема входного каскада САВ-1

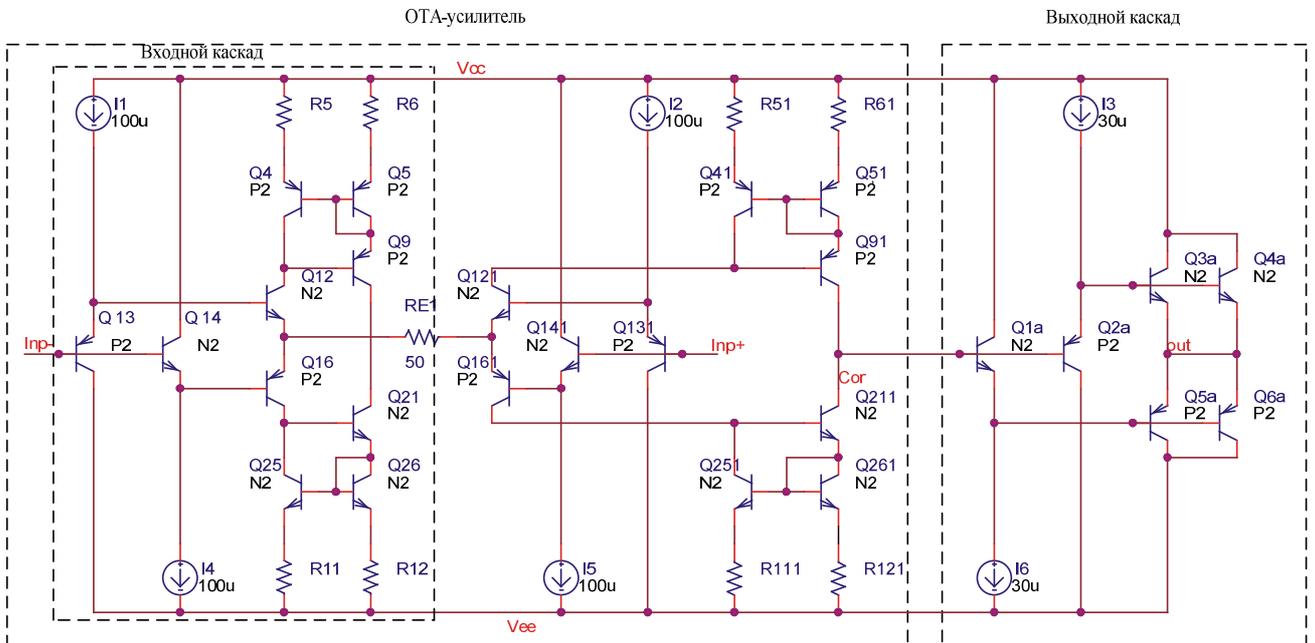


Рисунок 1.16 – Упрощенная схема ОУ на основе САВ-1

Изменение межсоединений внутри САВ-1 позволяет получить различные аналоговые устройства: повторитель напряжения; аналоговый мультиплексор

2:1; аналоговый мультиплексор 2:1 с повышенной нагрузочной способностью; преобразователь напряжение-ток с различным коэффициентом преобразования и допустимым входным сигналом, моно- и биполярным выходным сигналом; ОТА- усилитель; ОУ; мультидифференциальный ОУ.

1.2.8 Прецизионный радиационно-стойкий операционный усилитель на основе биполярно-полевого технологического процесса

Операционные усилители (ОУ) на полевых и биполярных транзисторах, выполненные на основе архитектуры «перегнутого каскода» находят широкое применение в современной радиоэлектронной аппаратуре. Их основные достоинства – расширенный частотный диапазон, а также эффективное использование напряжения питания.

Для работы в условиях космического пространства, в экспериментальной физике необходимы радиационно-стойкие ОУ с малым напряжением смещения нуля ($U_{см}$) и повышенным коэффициентом усиления по напряжению (100-120дБ). Решение этих задач возможно с использованием биполярно-полевого технологического процесса, обеспечивающего формирование р-канальных полевых и высококачественных n-p-n биполярных транзисторов с радиационной стойкостью до 1 Мрад и потоком нейтронов до 10^{13} н/см². Однако для таких ОУ необходима специальная схемотехника, учитывающая ограничения биполярно-полевой технологии.

Существенный недостаток классического ОУ (рис. 1.17) состоит в том, что в диапазоне рабочих, прежде всего низких температур, а также при воздействии потока нейтронов он имеет повышенные значения напряжения смещения нуля ($U_{см}$) (единицы-десятки милливольт). В конечном итоге это снижает прецизионность такого ОУ. Кроме этого, его коэффициент усиления по напряжению (K_v) получается небольшим.

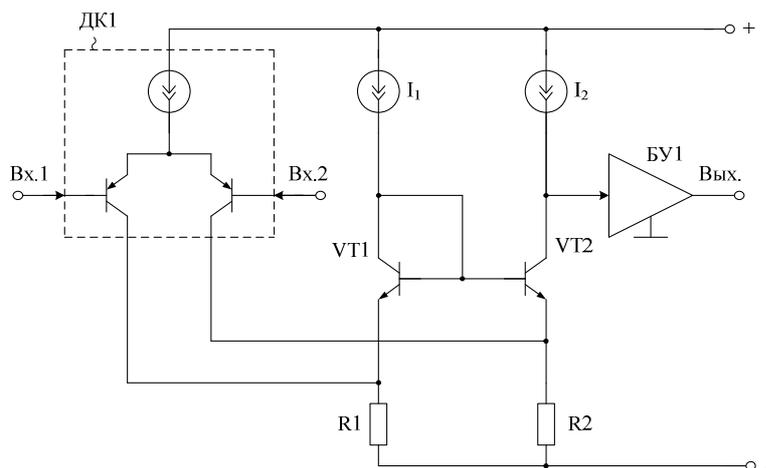


Рисунок 1.17 – Схема классического ОУ

Основная задача, решаемая в предлагаемом ОУ рис. 1.18, состоит в уменьшении напряжения смещения нуля, повышении коэффициента усиления дифференциального сигнала ОУ в разомкнутом состоянии до уровня 130-140дБ, повышении коэффициента ослабления входных синфазных сигналов ОУ. Данные параметры обеспечиваются новой архитектурой [53].

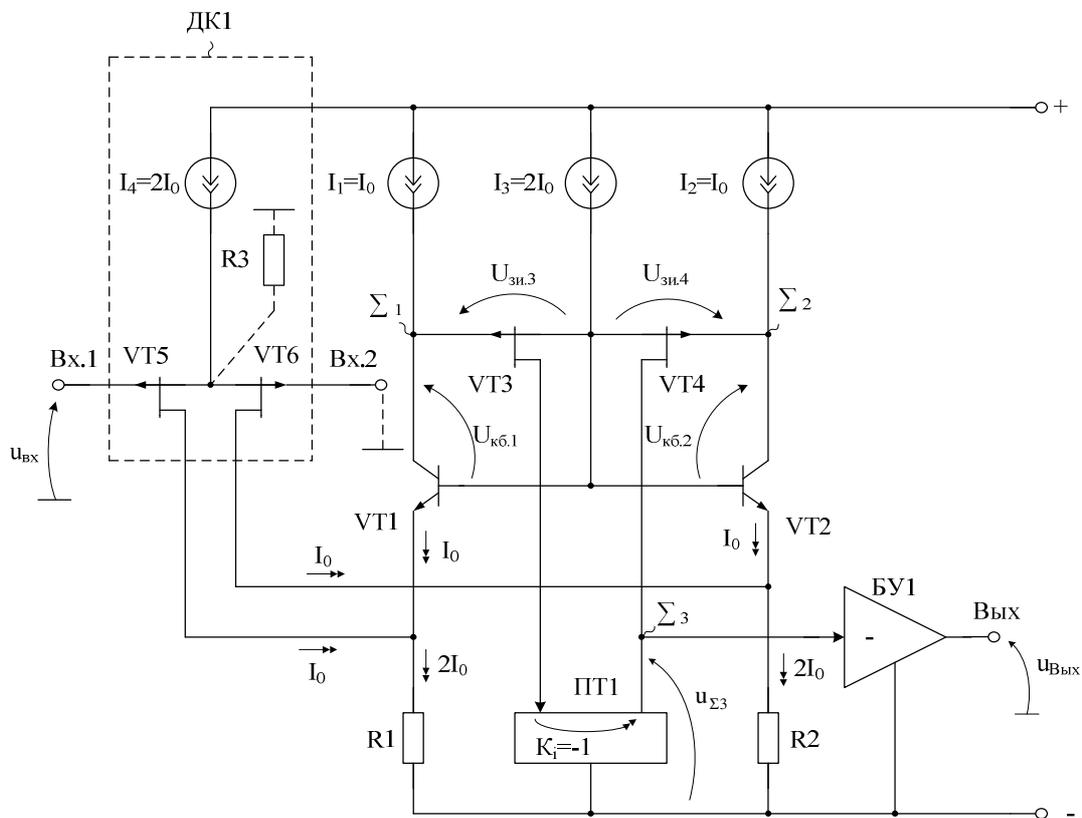


Рисунок 1.18 – Схема предлагаемого ОУ [53]

Статический режим транзисторов схемы рис. 1.18 устанавливается источниками опорного тока, выполненными в виде токостабилизирующих двухполюсников I_1 , I_2 и I_4 . При этом токи стока и токи коллекторов транзисторов схемы определяются уравнениями:

$$I_{c5} = I_{c6} \approx 0,5I_4 = I_0, \quad (1.1)$$

$$I_{e1} = I_{e2} \approx I_1 = I_2 = I_0, \quad (1.2)$$

$$I_{c3} = I_{c4} \approx 0,5I_3 = I_0, \quad (1.3)$$

$$I_{R1} = I_{R2} = 2I_0, \quad (1.4)$$

где I_1 , I_2 , I_4 – токостабилизирующих токи двухполюсников.

Коэффициент усиления по напряжению схемы ОУ рис. 1.18 определяется произведением:

$$K_y = \frac{u_{\text{ВЫХ.}}}{u_{\text{ВХ.}}} = K_1 \cdot K_2 \cdot K_{12}, \quad (1.5)$$

где $u_{\text{ВЫХ.}}$ - приращение выходного напряжения ОУ, вызванное изменением

входного напряжения ($u_{\text{ВХ.}}$); $K_1 = \frac{u_{\Sigma1-\Sigma2}}{u_{\text{ВХ.}}}$ - коэффициент преобразования

входного напряжения ОУ ($u_{\text{ВХ.}}$) в напряжение между узлами $\Sigma1$, $\Sigma2$ ($u_{\Sigma1-\Sigma2}$);

$K_2 = \frac{u_{\Sigma3}}{u_{\Sigma1-\Sigma2}}$ - коэффициент передачи дифференциального напряжения между

узлами $\Sigma1$, $\Sigma2$ на вход буферного усилителя 12 ($\Sigma3$); $u_{\Sigma1-\Sigma2}$ - приращение

напряжения между высокоимпедансными узлами $\Sigma1$ и $\Sigma2$; $K_{12} = \frac{u_{\text{ВЫХ.}}}{u_{\Sigma3}}$ -

коэффициент передачи по напряжению буферного усилителя БУ1; $u_{\Sigma 3}$ - приращение напряжения в высокоимпедансном узле $\Sigma 3$.

Причем

$$K_1 \approx R_{\text{эКВ.}\Sigma 1-\Sigma 2} \cdot S_1 \gg 1, \quad (1.6)$$

$$K_2 \approx R_{\text{эКВ.}\Sigma 3} \cdot S_{3-4} \gg 1, \quad (1.7)$$

где $R_{\text{эКВ.}\Sigma 1-\Sigma 2}$ - эквивалентное дифференциальное сопротивление между высокоимпедансными узлами $\Sigma 1$ и $\Sigma 2$; $R_{\text{эКВ.}\Sigma 3}$ - эквивалентное сопротивление в высокоимпедансном узле $\Sigma 3$;

$$S_1 = \frac{S_5 S_6}{(S_5 + S_6)}, \quad S_{3-4} = 2 \frac{S_3 S_4}{(S_3 + S_4)},$$

S_3, S_4, S_5, S_6 - крутизны стоко-затворной характеристики соответствующих полевых транзисторов (VT3, VT4, VT5, VT6).

Численное значение эквивалентного сопротивления $R_{\text{эКВ.}\Sigma 1-\Sigma 2}$ близко к сопротивлениям закрытых коллекторов переходов выходных транзисторов VT1 и VT2, а сопротивление $R_{\text{эКВ.}\Sigma 3}$ определяется, в основном, входным сопротивлением буферного усилителя БУ1. Как следствие, за счет создания в схеме рис. 1.18 трёх высокоимпедансных узлов ($\Sigma 1, \Sigma 2, \Sigma 3$) коэффициент усиления по напряжению разомкнутого ОУ рис. 1.18 получается достаточно большим (130-140дБ) и на несколько порядков превышает K_y классической схемы (рис. 1.17).

На рис. 1.19 приведена схема, в которой инвертирующий выходной буферный усилитель БУ1 реализован в виде выходного транзистора VT7 по схеме с общим эмиттером, источника тока I_5 и неинвертирующего каскада.

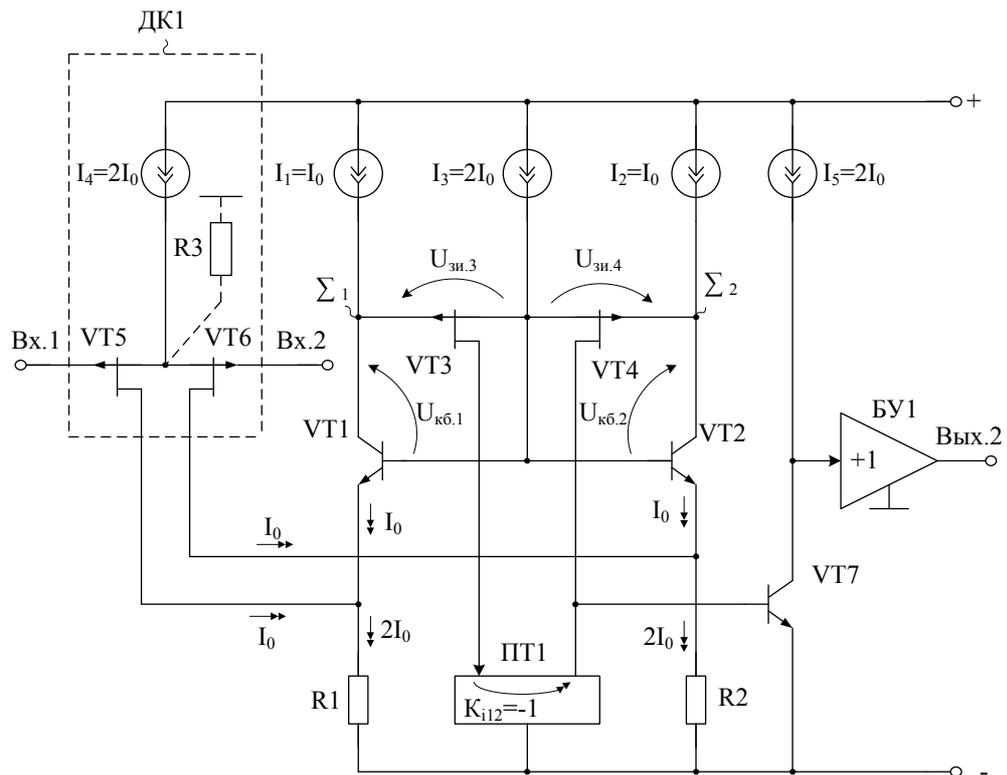


Рисунок 1.19 – Вариант практической реализации предлагаемого ОУ [53]

На рис. 1.20 приведена схема ОУ рис. 1.18 в среде компьютерного моделирования PSpice на моделях интегральных транзисторов АБМК_1_3 НПО «Интеграл» (г.Минск).

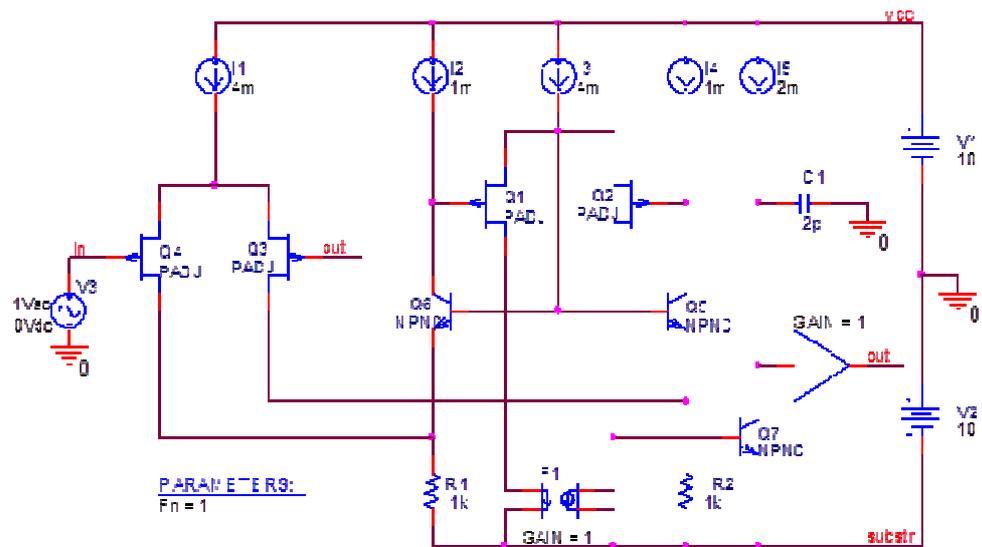


Рисунок 1.20 – Схема ОУ рис. 1.18 в среде компьютерного моделирования PSpice [53]

На рис. 1.21 представлена амплитудно-частотная характеристика ОУ рис. 1.20 при 100% отрицательной обратной связи.

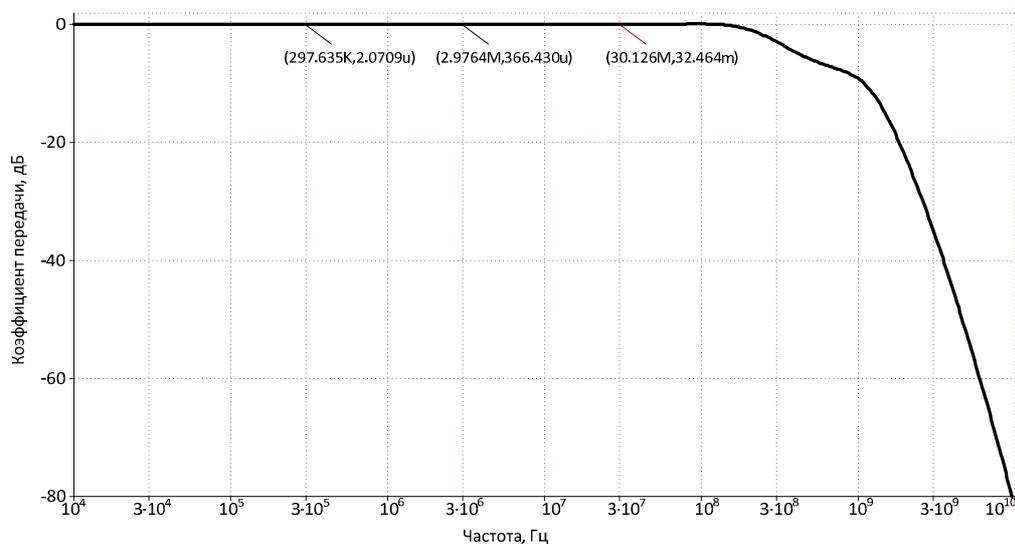


Рисунок 1.21 – Амплитудно-частотная характеристика предлагаемого ОУ при 100% отрицательной обратной связи [53]

На рис. 1.22 показана рис. 1.20, из которой следует, что предлагаемая схема рис. 1.20 имеет повышенный коэффициент усиления по напряжению, близкий к 140 дБ ($K_u=100.000.000$).

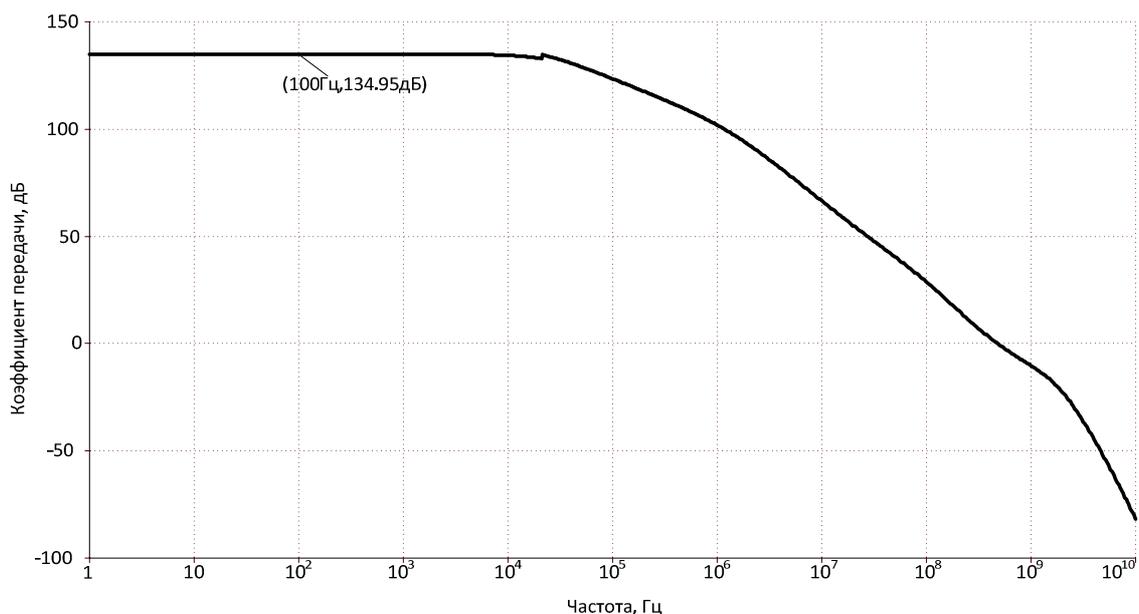


Рисунок 1.22 – Амплитудно-частотная характеристика разомкнутого ОУ с повышенным коэффициентом усиления по напряжению [53]

На рис. 1.23 приведена зависимость напряжения смещения нуля ($U_{см}$) схемы ОУ рис. 1.20 от потока нейтронов.

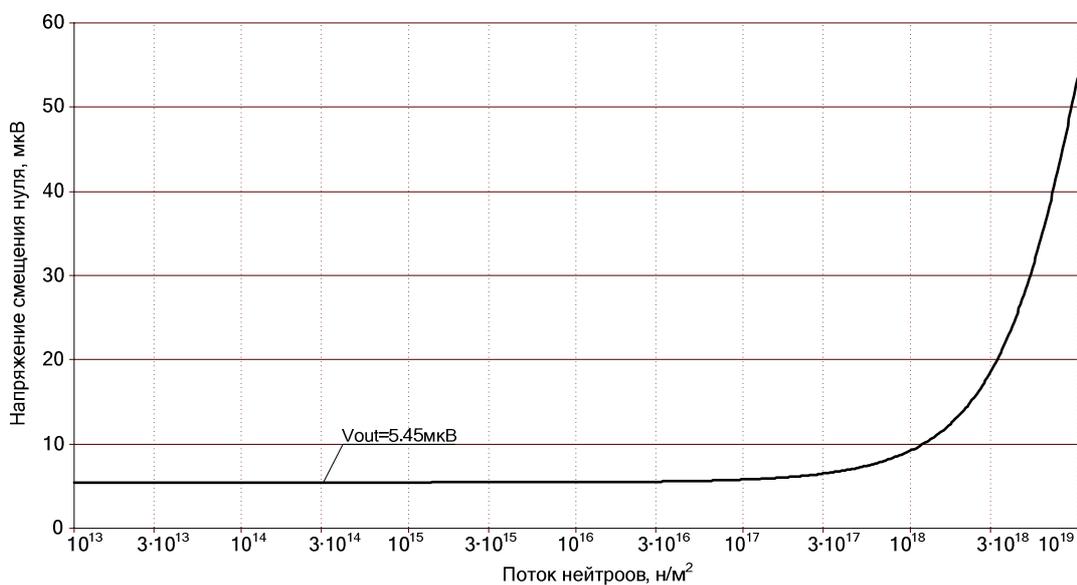


Рисунок 1.23 – Зависимость напряжения смещения нуля ($U_{см}$) схемы ОУ рис. 1.20 от потока нейтронов [53]

На рис. 1.24 показана зависимость напряжения смещения нуля схемы ОУ рис. 1.20 в диапазоне температур от $-60 \div +80^\circ\text{C}$.

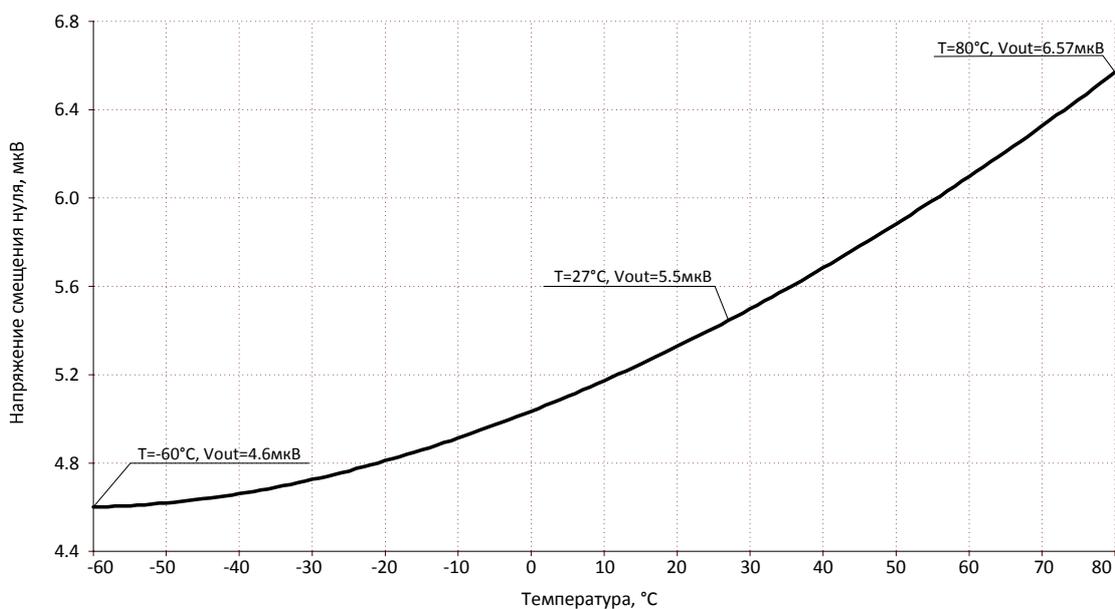


Рисунок 1.24 – Температурная зависимость напряжения смещения нуля схемы ОУ рис. 1.20 [53]

В предлагаемой схеме ОУ (в сравнении с классической) повышается также коэффициент ослабления входных синфазных сигналов. Данный эффект объясняется повышенной симметрией схемы ОУ рис. 1.20 и введением отрицательной обратной связи по синфазному сигналу (транзисторы VT3 и VT4). За счет высокой симметрии схемы ОУ и применения полевых транзисторов VT3, VT4 напряжение смещения нуля предлагаемого ОУ измеряется микровольтами (рис. 1.23, рис. 1.24).

Таким образом, предлагаемый ОУ имеет существенные преимущества в сравнении с классическим вариантом построения.

1.2.9 Радиационно-стойкая аналоговая микросхема для обработки сигналов лавинных фотодиодов и основные схемы ее включения

На основе модернизированной аналоговой интегральной схемы (ИС) для датчиков космической аппаратуры и малошумящих полевых транзисторов с p-n-переходом и каналом n-типа (n-ПТП) создан электронный модуль обработки сигналов лавинных фотодиодов (ЛФД), содержащий зарядочувствительный усилитель (ЗЧУ) и активный полосовой фильтр (ПФ) со структурой CR-RC⁴. Наименьший эквивалентный шумовой заряд модуля достигнут для ПТП типа KS363V и составляет 292 эл.+1,9 эл./пФ при времени пика 2,2 мкс. Приводятся схемные решения и экспериментальные характеристики.

Анализ параметров современных фотоприемников позволил установить, что во многих случаях реализация оптико-электронных устройств, регистрирующих десятки фотонов, целесообразна на основе ЛФД и малошумящей считывающей электроники [54].

Ранее нами были созданы и экспериментально исследованы электронные модули «CRP-MDL-1», «CRP-MDL-2» обработки сигналов ЛФД, использующие аналоговую ИС для датчиков космической аппаратуры [54]. Анализ результатов их измерений позволил выявить недостаточную эффективность обработки сигналов ЛФД с большой внутренней емкостью (C_D)

из-за повышенного уровня шумов, который для ЗЧУ характеризуется зависимостью эквивалентного шумового заряда (*ENC*, equivalent noise charge) от емкости, соединенной с входом. Под эквивалентным шумовым зарядом понимается входной заряд, вызывающий на выходе системы сигнал, равный среднеквадратическому значению напряжения шумов. Обычно величина *ENC* описывается среднеквадратическим значением заряда, выраженным в количестве электронов (эл.) [54].

Изучение наилучших малошумящих изделий данного класса показало, что предельно малый уровень шумов обычно достигают за счет применения дискретного малошумящего *n*-ПТП. В этом случае минимизация шума возможна за счет емкостного согласования *n*-ПТП и ЛФД (желательно, чтобы входная емкость *n*-ПТП была равна емкости ЛФД) и охлаждения внешнего *n*-ПТП. Примером таких устройств могут служить гибридные ИС фирмы Amptek (США) [54].

Целью настоящего раздела является рассмотрение схемотехники и параметров электронного модуля обработки сигналов ЛФД, созданного на основе модернизированной аналоговой ИС для датчиков космической аппаратуры и малошумящих *n*-ПТП.

Особенности электронного модуля. Для создания устройства обработки сигналов ЛФД с предельно низким уровнем *ENC* был выполнен ряд работ [54].

1. Модернизирована аналоговая микросхема для датчиков космической аппаратуры, в которой операционные усилители (ОУ) U1A, U1B заменены на входной каскад CSP-Stage2 (рис. 1.25), а ОУ U2A, U2B, U2C, входящие в инструментальный усилитель, в новой ИС (рис. 1.26) выполнены в виде отдельных компонентов.

2. Разработана электрическая схема электронного модуля (рис. 1.27), предусматривающая возможность подключения внешних малошумящих *n*-ПТП.

3. Изучены характеристики модуля при использовании *n*-ПТП с различной входной емкостью (табл.1.2).

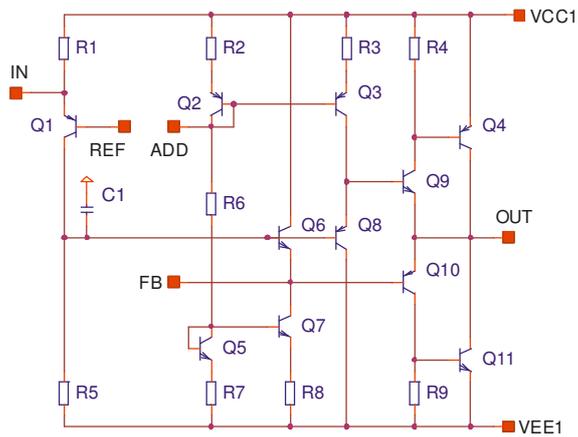


Рисунок 1.25 – Электрическая схема входного каскада CSP-Stage2 микросхемы

Таблица 1.2 – Типовые параметры n-ПТП, примененных в электронном модуле

Параметр	Наименование транзистора			
	IF140A	2SK152	2SK363	HT009
Напряжение отсечки, В	от -0,5 до -6,0	от -0,55 до -2,0	от -0,3 до -1,2	от -1,0 до -7,0
Максимальный ток стока, мА	от 5,0 до 15,0	от 9,5 до 42,0	от 5,0 до 30,0	до 20,0
Крутизна, мА/В	> 4,5	> 21,0	> 25,0	от 10,0 до 30,0
Входная емкость, пФ	< 3,0	< 9,0	75,0	нет данных

Структура модернизированной микросхемы показана на рис. 1.26.

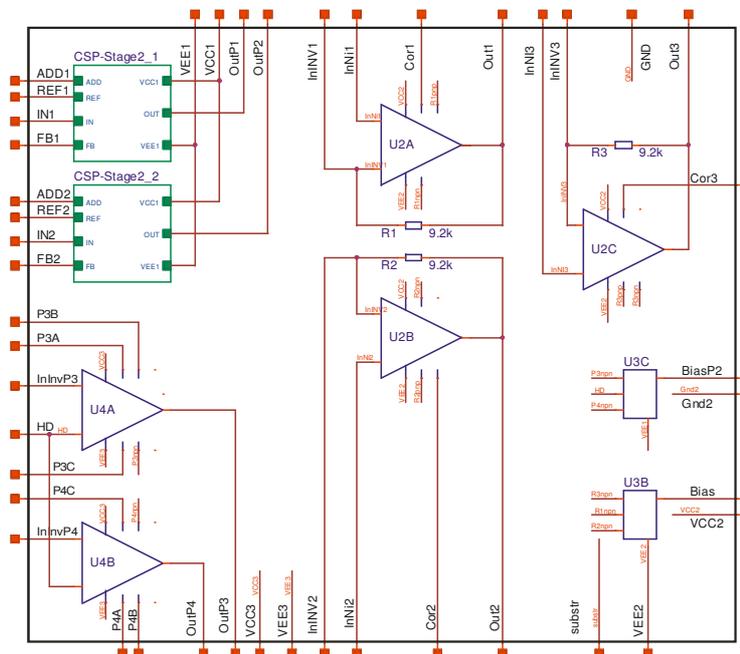


Рисунок 1.26 – Структура микросхемы

ИС содержит два входных каскада CSP-Stage2-1, CSP-Stage2-2, работающих с внешним n-ПТП, два инвертирующих усилителя напряжения

U4A, U4B с головным малошумящим р-ПТП и токовым аттенуатором, три ОУ U2A, U2B, U2C с резистором, величиной 9,2 кОм, в цепи отрицательной обратной связи, блоки U3B, U3C, задающие рабочий режим [54].

При подключении к выводу IN блока CSP-Stage2 стока n-ПТП, исток которого соединен с шиной нулевого потенциала, а затвор – с входом, и соединении выводов REF и ADD полученная схема представляет собой «перегнутый» каскод, в котором транзистор Q1 включен с общей базой, а усиление по напряжению определяется крутизной внешнего n-ПТП и суммарным сопротивлением всех параллельных цепей, соединенных с высокоимпедансным узлом- коллектором Q1.

Канал обработки сигнала фотодиода, реализованный в электронном модуле (рис. 1.27) включает ЗЧУ на CSP-Stage2-2, J_1 , C_2 , R_3 ; дифференцирующую цепь C_1 , R_1 с «компенсацией полюса нулем» резистором R_2 ; последовательно соединенные активные интеграторы: первый (C_6 , R_{11} , U4A), второй (C_3 , R_5 , U2B), третий (C_4 , R_7 , U2A) и четвертый (C_5 , R_8 , U2C).

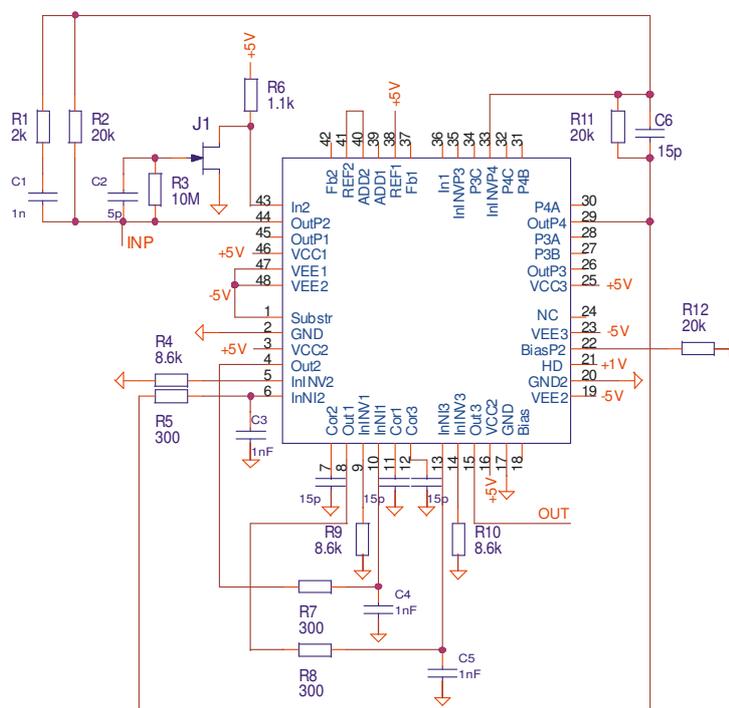


Рисунок 1.27 – Упрощенная электрическая схема электронного модуля обработки сигналов ЛФД

Таким образом, канал представляет собой соединение ЗЧУ и активного ПФ типа $CR-RC^4$.

Экспериментальные результаты. Измерения электронного модуля выполнялись с помощью комплекта оборудования, включающего: цифровой осциллограф Agilent «MSO 6052A» или «Infiniium» HP 54830B; выносной пробник 10073C; генератор сигналов произвольной формы Agilent 33250A; аттенюатор Agilent 8494G; двухканальный источник питания Agilent E3646; интерфейсный модуль USB – GPIB Agilent 82357B; систему сбора данных Agilent 34970A с набором управляющих модулей; персональный компьютер; калибратор импульсный И1-15; делитель напряжения ДН-1.

Оборудование было объединено в единую систему с помощью шины GPIB. Управление выполнялось с помощью разработанного в среде «Agilent VEE» специализированного программного обеспечения для автоматизированного определения характеристик ИС.

Полученные данные записывались в *.txt файл, дальнейшая обработка которого производилась в среде MS EXCEL с помощью стандартных средств и специализированных программ (макросов).

Результаты измерений электронного модуля показаны на рис. 1.28-1.34, на которых приведены формы выходных сигналов при применении головных транзисторов КП303, IF140, KS152, конкретной величине входного заряда (Q_{IN}) и разных C_D ; зависимости ENC от C_D при различном времени пика выходного сигнала (T_P).

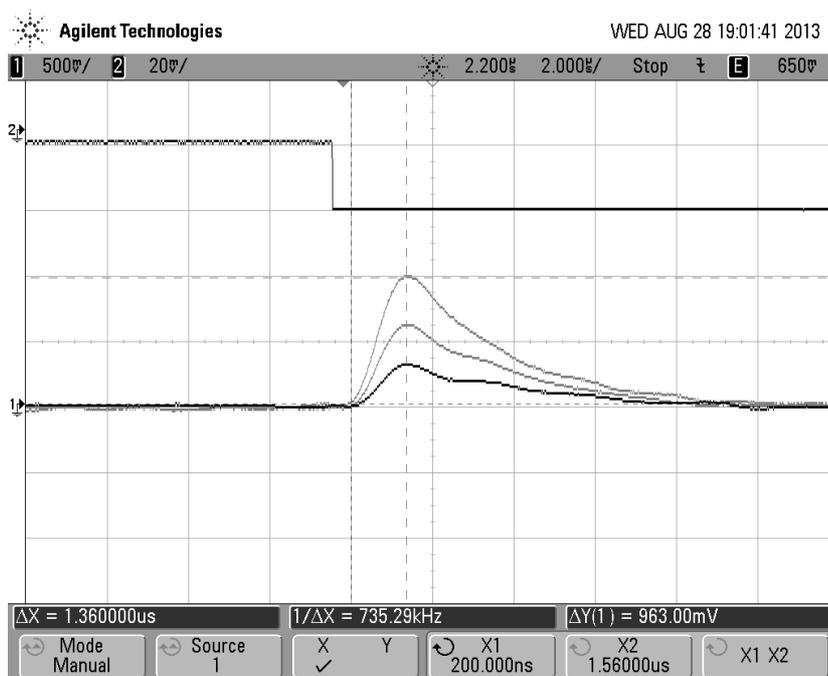


Рисунок 1.28 – Форма выходного сигнала электронного модуля с головным транзистором типа КП303 при $Q_{IN}=20$ фКл, $C_2 = 1$ пФ, $R_3 = 820$ МОм и различной емкости источника сигнала – 0, 30, 100 пФ

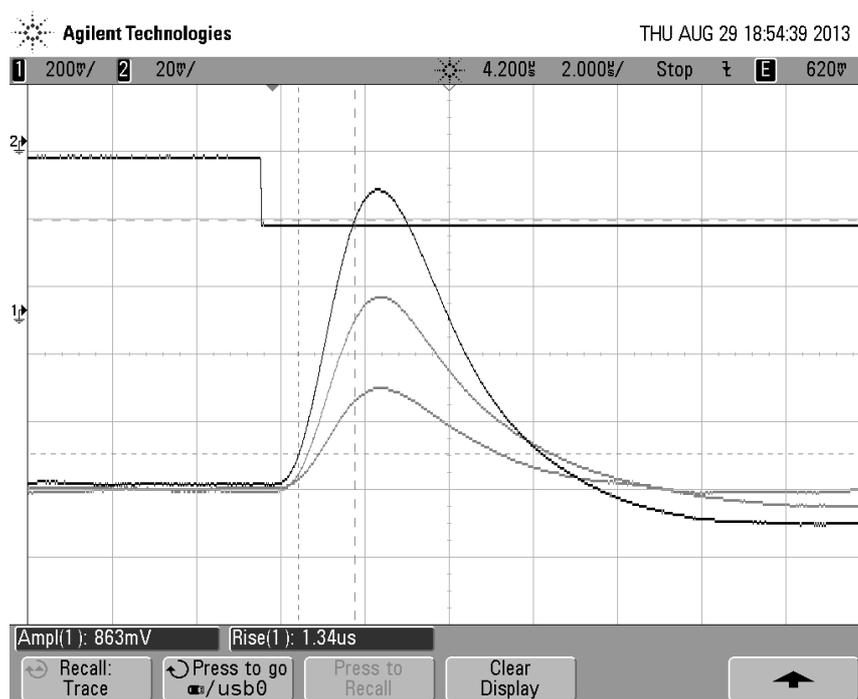


Рисунок 1.29 – Форма выходного сигнала электронного модуля с головным транзистором типа IF140 при $Q_{IN}=20$ фКл, $C_2 = 1$ пФ, $R_3 = 10$ МОм и различной емкости источника сигнала – 0, 30, 100 пФ

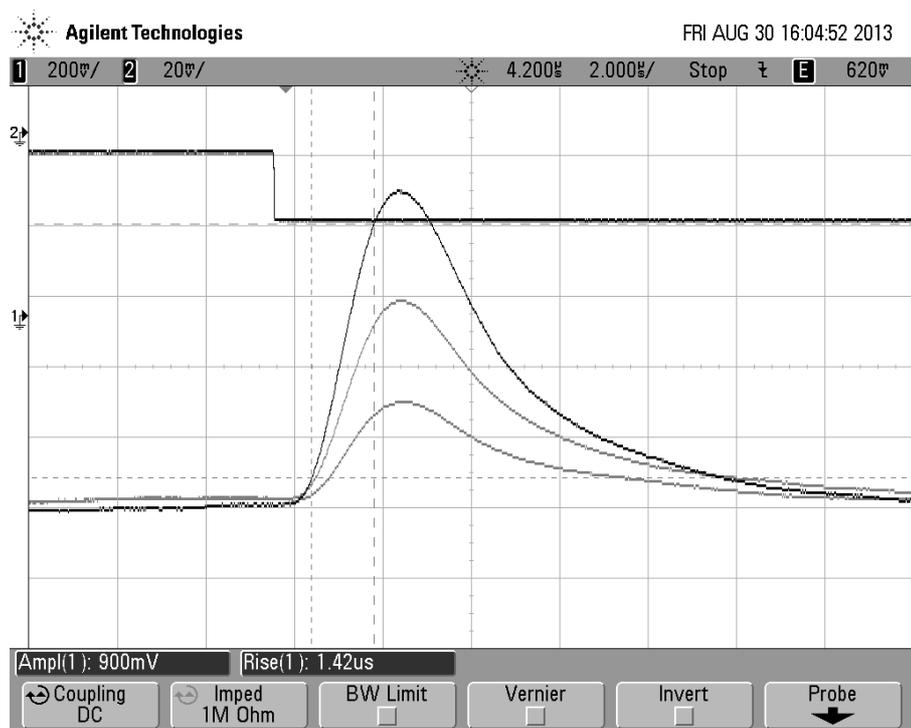


Рисунок 1.30 – Форма выходного сигнала электронного модуля с головным транзистором типа IF140 при $Q_{IN}=20$ фКл, $C_2=1$ пФ, $R_3=680$ МОм и различной емкости источника сигнала – 0, 30, 100 пФ

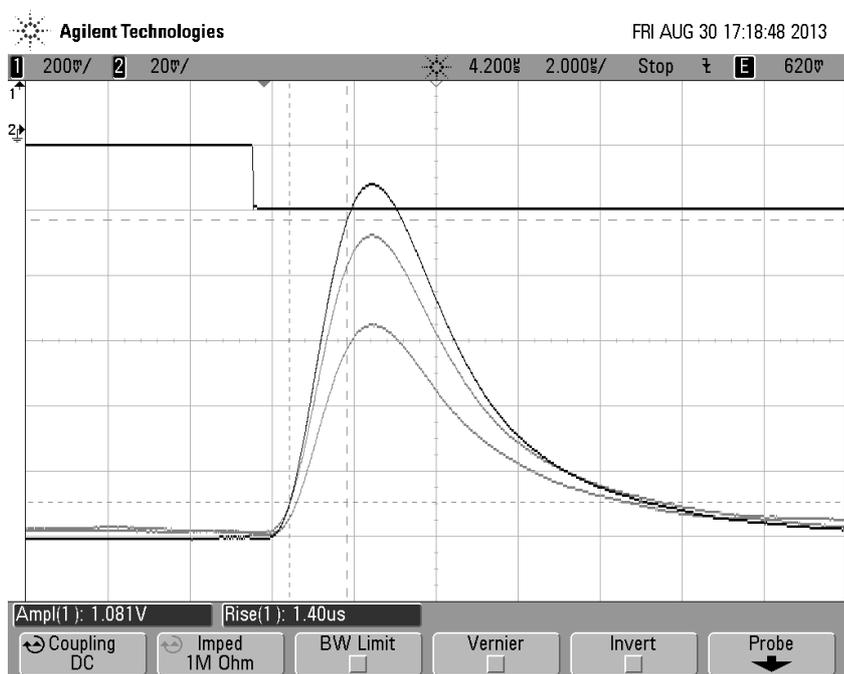


Рисунок 1.31 – Форма выходного сигнала электронного модуля с головным транзистором типа KS152 при $Q_{IN}=20$ фКл, $C_2=1$ пФ, $R_3=680$ МОм и различной емкости источника сигнала – 0, 30, 100 пФ

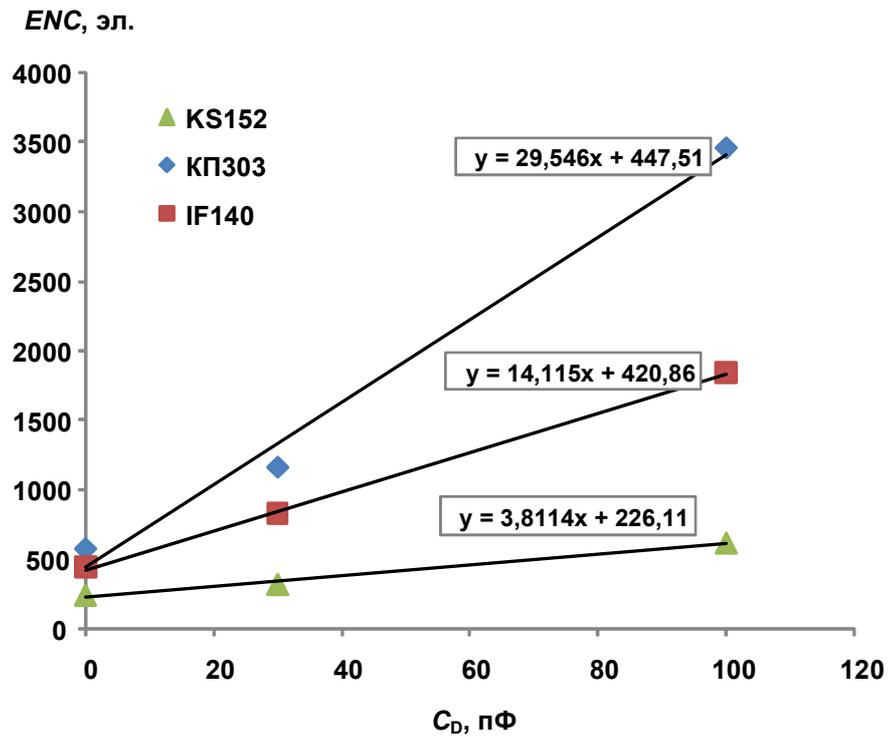


Рисунок 1.32 – Эквивалентный шумовой заряд ENC в зависимости от емкости источника сигнала C_D

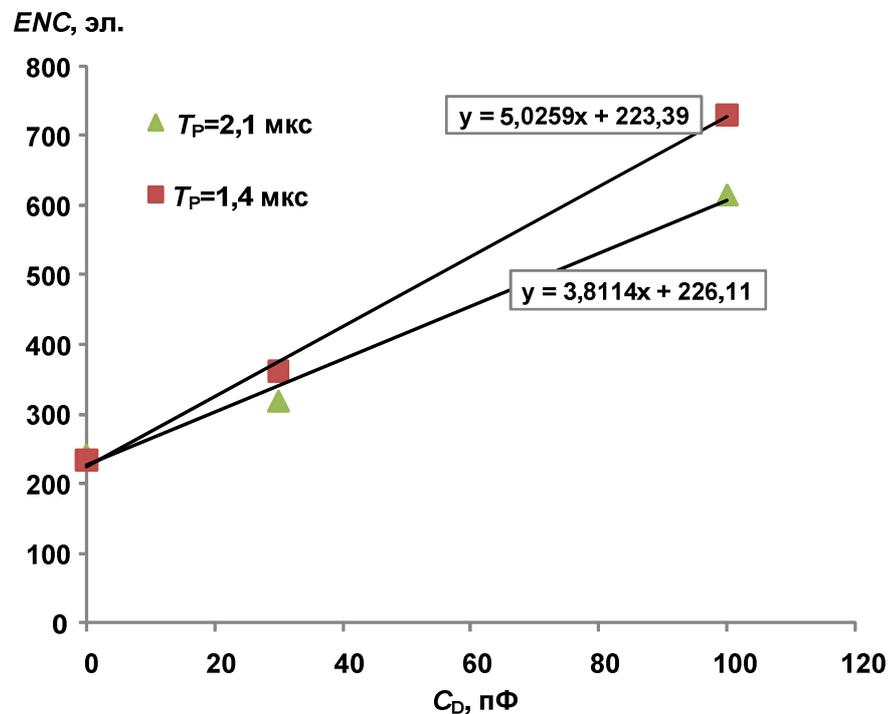


Рисунок 1.33 – Эквивалентный шумовой заряд ENC в зависимости от емкости источника сигнала C_D для KS152

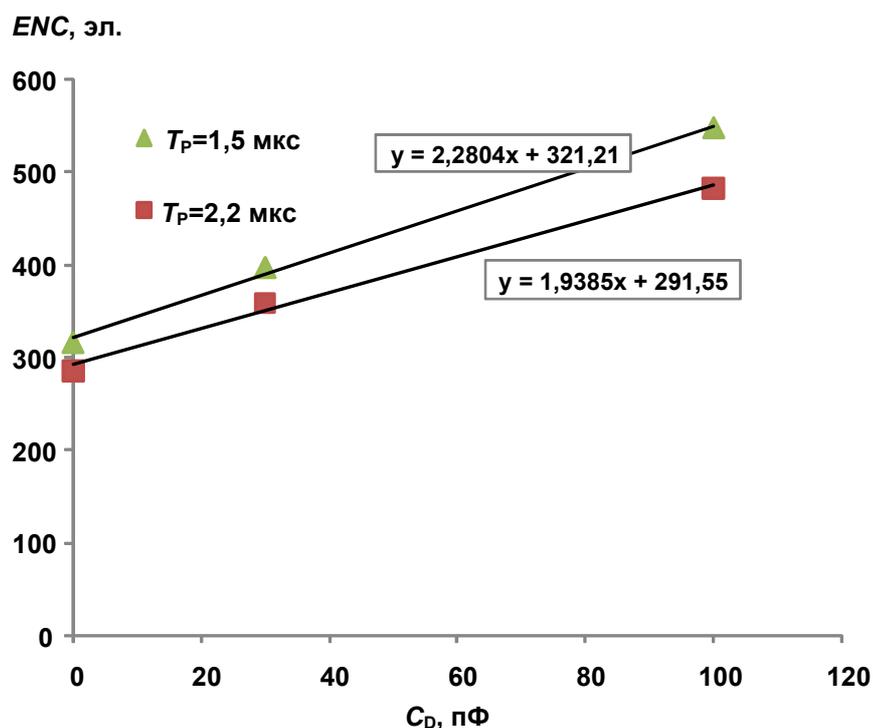


Рисунок 1.34 – Эквивалентный шумовой заряд ENC в зависимости от емкости источника сигнала C_D для KS363V

В результате измерений установлено, что шумы электронного модуля с разными головными ПТП описываются следующими соотношениями:

- для ПТП типа КП303 – 448 эл.+29,5 эл./пФ при $T_P = 1,5$ мкс;
- для ПТП типа IF140 – 421 эл.+14,1 эл./пФ при $T_P = 1,5$ мкс;
- для ПТП типа KS152 – 223 эл.+5,0 эл./пФ при $T_P = 1,4$ мкс;
- для ПТП типа KS152 – 226 эл.+3,8 эл./пФ при $T_P = 2,1$ мкс;
- для ПТП типа KS363V – 321 эл.+2,3 эл./пФ при $T_P = 1,5$ мкс;
- для ПТП типа KS363V – 292 эл.+1,9 эл./пФ при $T_P = 2,2$ мкс.

Анализ результатов измерений позволяет утверждать, что наименьший уровень шумов для ЛФД с большой емкостью обеспечивает применение ПТП типа KS363V – при $T_P = 2,2$ мкс, а для ЛФД с малой емкостью - KS152 при $T_P = 1,4$ мкс.

1.2.10 Метод расширения диапазона рабочих частот аналоговых микросхем на основе «перегнутых» каскодов

В современной микроэлектронике находят широкое применение «перегнутые» каскодные усилители (КУ) с резистивной (или резистивно-индуктивной) нагрузкой, включенной в коллекторную (стоковую) цепь выходных транзисторов. Однако верхняя граничная частота коэффициента усиления по напряжению (f_B , по уровню -3дБ) таких «перегнутых» КУ оказывается во многих случаях недостаточно высокой. Это связано с отрицательным влиянием на f_B емкостей коллектор-база ($C_{кб}$) выходных транзисторов КУ.

Численные значения f_B для технологических процессов, имеющих, например, повышенную радиационную стойкость, являются одним из главных факторов, определяющих частотный диапазон широкополосных усилителей на основе КУ рис. 1.35.

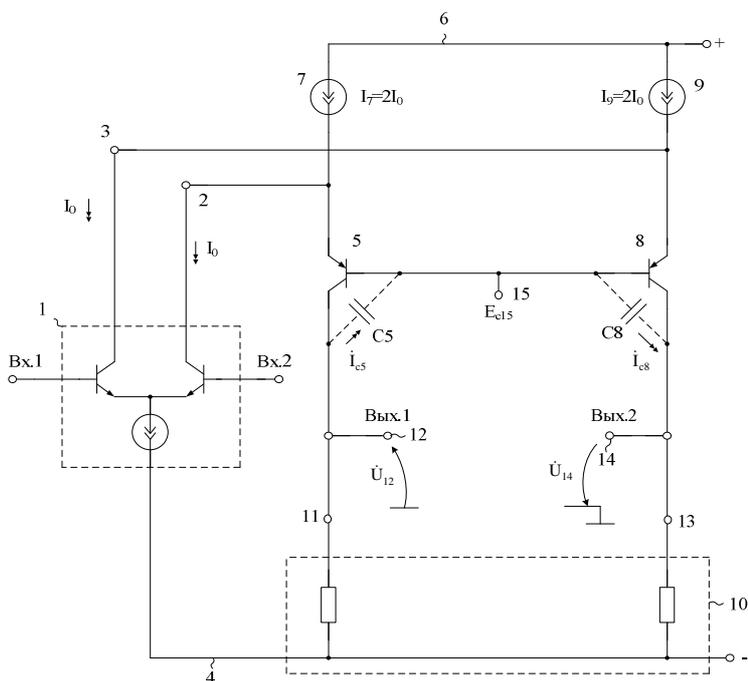


Рисунок 1.35 – Классическая схема широкополосного усилителя на основе «перегнутого» каскода

В области высоких частот на амплитудно-частотную характеристику предлагаемого КУ рис.1.36 [55] начинают влиять емкости коллектор-база первого 5 ($C_{кб.5}$) и второго 8 ($C_{кб.8}$) выходных транзисторов.

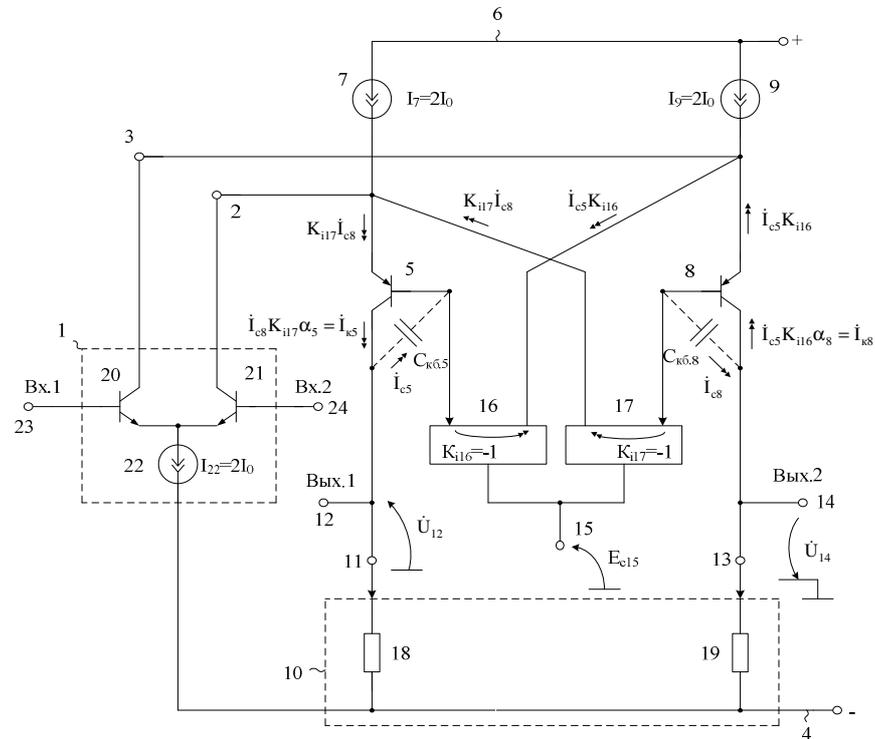


Рисунок 1.36 – Схема широкополосного усилителя [55]

При этом для схемы рис. 1.36 справедливы следующие уравнения:

$$\dot{I}_{c5} = \frac{\dot{U}_{12}}{\dot{Z}_5}, \quad \dot{I}_{c8} = \frac{\dot{U}_{14}}{\dot{Z}_8}, \quad (1.8)$$

где \dot{I}_{c5} - комплекс тока через паразитный конденсатор коллектор-база $C_{кб.5}$ транзистора 5; \dot{I}_{c8} - комплекс тока через паразитный конденсатор коллектор-база $C_{кб.8}$ транзистора 8; \dot{U}_{12} , \dot{U}_{14} - комплексы напряжений на первом 12 и втором 14 выходах устройства; $\dot{Z}_5 = \frac{1}{j\omega C_{кб.5}}$ - комплексное сопротивление паразитного конденсатора $C_{кб.5}$ на частоте сигнала ω ; $\dot{Z}_8 = \frac{1}{j\omega C_{кб.8}}$ -

комплексное сопротивление паразитного конденсатора $C_{кб.8}$ на частоте сигнала ω .

Ток \dot{I}_{c8} передается через второе 17 токовое зеркало в эмиттерную ($K_{i17}\dot{I}_{c8}$), а затем в коллекторную цепь транзистора 5 ($I_{к5}$). В результате в выходной цепи (узел 12) обеспечивается почти полная взаимная компенсация двух близких по величине, но противофазных по направлению емкостных токов:

$$\dot{I}_{12.c} = \dot{I}_{c5} - \dot{I}_{к5} = \dot{I}_{c5} - \alpha_5 K_{i17} \dot{I}_{c8} \approx \dot{U}_{12} j\omega [C_{кб.5} - \alpha_5 K_{i17} C_{кб.8}], \quad (1.9)$$

где $\alpha_5 \leq 1$ - коэффициент усиления по току эмиттера транзистора 5; \dot{U}_{12} - комплекс напряжения на первом 12 выходе устройства; K_{i17} - коэффициент передачи по току второго 17 токового зеркала.

Как следствие, эквивалентная постоянная времени $\tau_{в12}$, определяющая верхнюю граничную частоту ДУ рис. 1.36 для первого 12 выхода устройства, уменьшается:

$$\tau_{в12} = \frac{1}{\omega_b} = \frac{1}{2\pi f_b} \approx R_{18} [C_{кб.5} - \alpha_5 K_{i17} C_{кб.8}], \quad (1.10)$$

где R_{18} - сопротивление вспомогательного резистора 18.

После преобразований (1.3) можно получить, что

$$\tau_{в12} \approx R_{18} C_{кб.5} \left[1 - \alpha_5 K_{i17} \frac{C_{кб.8}}{C_{кб.5}} \right]. \quad (1.11)$$

Так как $\alpha_5 \approx 1$, $K_{i17}=1$, $C_{кб.8}=C_{кб.5}$, то из (1.4) следует, что в схеме рис. 1.36 обеспечивается повышение верхней граничной частоты:

$$f_{B12} = \frac{f_{B12}^*}{1 - \alpha_5 K_{i17} \frac{C_{к6.8}}{C_{к6.5}}} \gg f_{B12}^*, \quad (1.12)$$

где $f_{B12}^* = \frac{1}{2\pi R_{18} C_{к6.5}}$ - верхняя граничная частота ДУ-прототипа для первого 12

ВЫХОДА.

Аналогично для второго 14 выхода устройства можно найти

$$f_{B14} = \frac{f_{B14}^*}{1 - \alpha_8 K_{i16} \frac{C_{к6.5}}{C_{к6.8}}} \gg f_{B14}^*, \quad (1.13)$$

где $f_{B14}^* = \frac{1}{2\pi R_{19} C_{к6.8}}$ - верхняя граничная частота ДУ-прототипа для второго 14

ВЫХОДА.

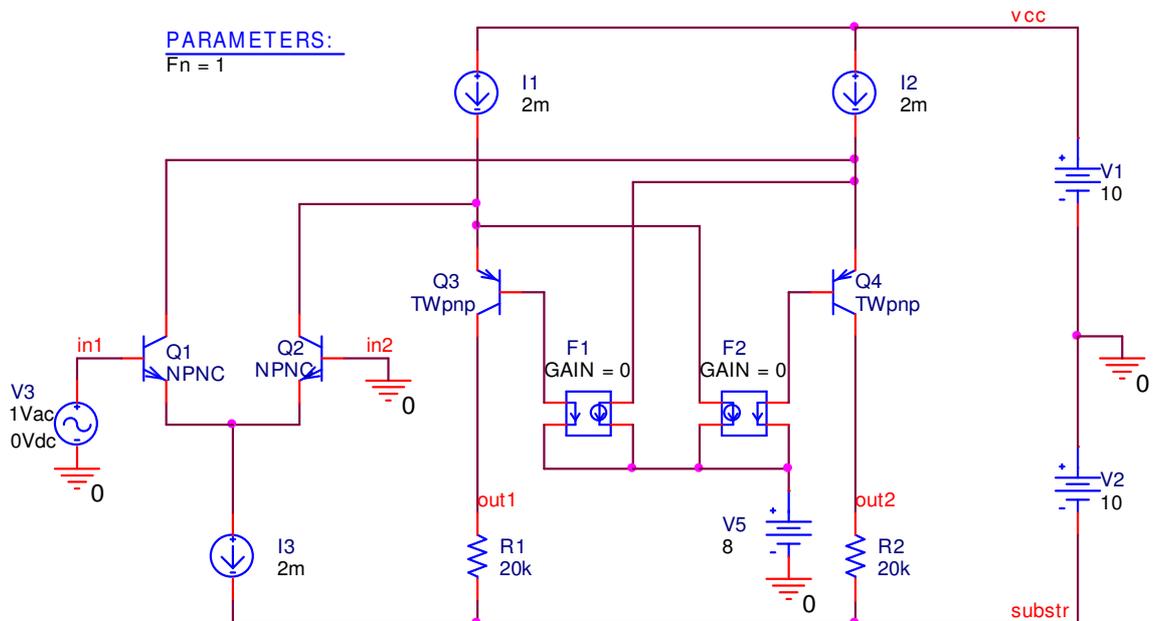


Рисунок 1.37 – Схема широкополосного усилителя в среде PSpice

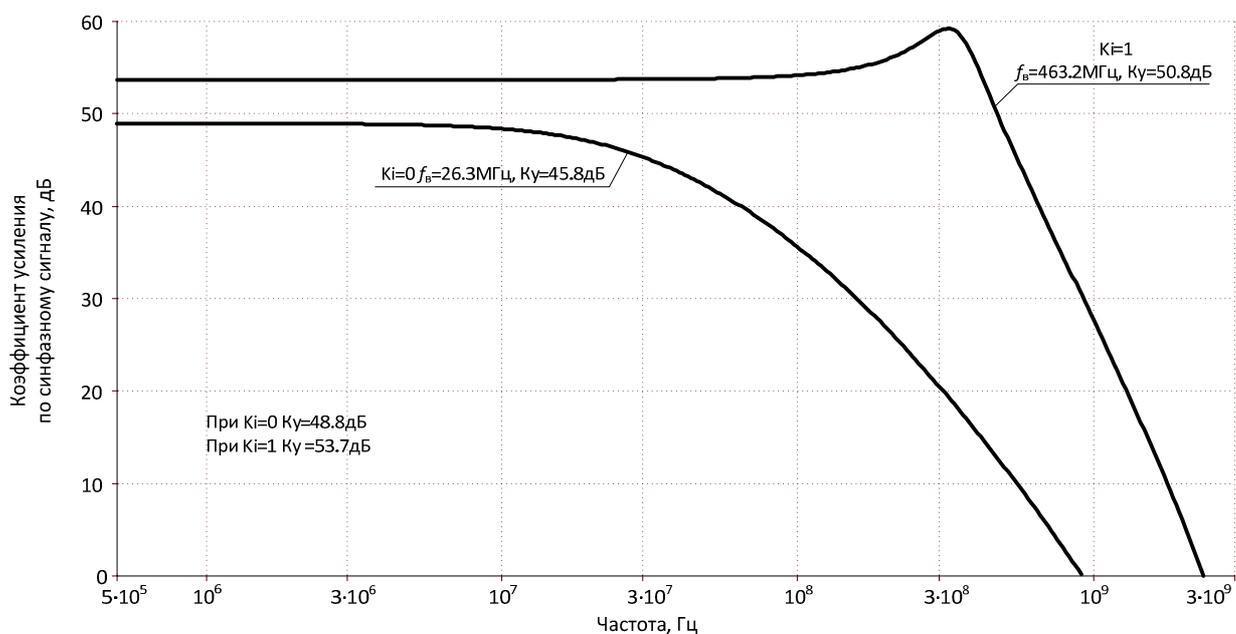


Рисунок 1.38 – Амплитудно-частотные характеристики сравниваемых усилителей

Результаты компьютерного моделирования (рис. 1.37, рис. 1.38) подтверждают, что в заявляемой схеме рис. 1.36 частота f_{B12} увеличивается (в сравнении с f_{B12}^* прототипа) более чем на порядок.

1.3 Выводы

Основным вектором развития производства радиационно-стойких IP модулей и СФ блоков систем связи и технической диагностики является применение широкозонных полупроводниковых приборов. Однако для многих применений в импортозамещающей радиоэлектронной аппаратуре Союзного государства перспективна биполярно-полевая технология НПО «Интеграл» (г. Минск), обеспечивающая работоспособность изделий при накопленной дозе радиации до 1 Мрад и потоке нейтронов до 10^{14} м/см².

Обобщена информация о радиационной стойкости транзисторов основных классов, в т.ч. на основе материалов с широкой запрещенной зоной.

Исследования четырех поколений SiGe транзисторов с проектными нормами 0,25; 0,18; 0,13 и 0,09 мкм, выполненные российскими учеными под руководством Петросянца К.О., показывают, что по суммарной поглощенной дозе радиации SiGe транзисторы имеют уникальные показатели стойкости (до 50-100 мРад). Учитывая низкую стоимость SiGe микросхем, данный технологический процесс следует рекомендовать для многих перспективных функциональных узлов и СФ блоков систем связи и технической диагностики, работающих в гигагерцовом диапазоне частот.

Рассмотрены особенности проектирования радиационно-стойких и низкотемпературных аналоговых микросхем по КТБ технологическому маршруту.

Разработан прецизионный радиационно-стойкий операционный усилитель на основе биполярно-полевого технологического процесса, а также радиационно-стойкая аналоговая микросхема для обработки сигналов лавинных фотодиодов в физике высоких энергий.

Разработан метод расширения диапазона рабочих частот аналоговых микросхем на основе «перегнутых» каскодов, который рекомендуется использовать в широкополосных усилителях на основе радиационно-стойкого биполярно-полевого технологического процесса.