

На правах рукописи

Ольчев Сергей Иванович

**ДВУХФАЗНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ СУБМИКРОННЫХ КМОП
ЦИФРОВЫХ СБИС С ПОВЫШЕННОЙ
СБОЕУСТОЙЧИВОСТЬЮ К ВОЗДЕЙСТВИЮ
ОТДЕЛЬНЫХ ЯДЕРНЫХ ЧАСТИЦ**

05.13.05 – «Элементы и устройства вычислительной техники и
систем управления»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Автор:

Москва – 2011 г.

Диссертация выполнена в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ»

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор
Стенин Владимир Яковлевич

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор
Петросьянц Константин Орестович

кандидат технических наук,
Соболев Сергей Анатольевич

Ведущая организация:

Институт проблем проектирования в
микроэлектронике РАН

Защита диссертации состоится 17 октября 2011 г. в 16 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 212.130.02 в НИЯУ «МИФИ» по адресу 115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31, тел. 323-91-67.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ «МИФИ».

Автореферат разослан «15» сентября 2011 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д.т.н., профессор



П.К. Скоробогатов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

Актуальность проблемы

В настоящее время существует тенденция повышения производительности микропроцессорных систем, применяемых для аппаратуры авиационной техники и космических аппаратов. Увеличение производительности достигается, в частности, переходом на технологии с меньшими проектными нормами. КМОП СБИС с проектно-технологическими нормами менее 0,25 мкм имеют повышенную чувствительность к эффектам воздействия отдельных ядерных частиц.

Перспективным направлением развития электронной компонентной базы для аппаратуры авиационной техники и аппаратуры космических аппаратов является разработка методов проектирования элементов цифровых субмикронных КМОП СБИС с повышенной сбоеустойчивостью к эффектам воздействия отдельных ядерных частиц. Радиационно-стойкие техпроцессы в настоящее время по проектным нормам отстают на 4 - 6 поколений от современных коммерчески-доступных технологических процессов. Для достижения наилучшей производительности в мире активно развивается направление радиационно-стойкого проектирования Radiation Hard by Design (RHBD), основанного на использовании коммерчески-доступных технологических процессов с применением схемотехнических, топологических и алгоритмических методов повышения сбоеустойчивости.

Проектирование микропроцессорных СБИС, цифровых СБИС типа система на кристалле, а также управляющей логики субмикронных статических КМОП ОЗУ обычно происходит на основе традиционных КМОП логических элементов. Дополнительные схемотехнические и конструктивно-топологические меры по повышению сбоеустойчивости к воздействию радиационных факторов применяются при проектировании банков памяти статических КМОП ОЗУ. Эти меры направлены на защиту СБИС ОЗУ от тиристорных эффектов, дозовых эффектов и одиночных сбоев и включают в себя специальную схемотехнику ячеек памяти, использование контактов к подложке и n-карманам, охранные кольца, дополнительные ячейки памяти для контроля потери данных.

Одним из схемотехнических подходов к повышению сбоеустойчивости логических комбинационных элементов цифровых субмикронных СБИС к эффектам воздействия отдельных ядерных частиц является использование двухфазных элементов, схемотехника которых направлена на введение дополнительных элементов и связей между ними с целью повышения сбоеустойчивости самих логических элементов, а также блокировки распространения помехи между элементами. Двухфазные элементы представляют интерес в качестве схемотехнической меры по повышению сбоеустойчивости

при проектировании асинхронных устройств КМОП СБИС ОЗУ, таких, как, дешифратор адреса, блок управляющей логики, усилители записи-считывания, к которым предъявляются повышенные требования по быстродействию. Имеется опыт разработки и применения КМОП ячеек памяти типа NASA и DICE, которые фактически являются вариантами D-триггера на основе двухфазных КМОП инверторов. Опыт разработки этих структур подтверждает их потенциально повышенную устойчивость к эффектам воздействия отдельных ядерных частиц, поэтому в качестве **предмета исследования** были выбраны двухфазные КМОП элементы цифровых субмикронных СБИС. **Объектом исследования** являются развитие схемотехнических и топологических решений, позволяющих повысить сбоеустойчивость двухфазных логических элементов к воздействию отдельных ядерных частиц.

В настоящее время в Российской Федерации в рамках федеральной целевой программы "Развитие электронной компонентной базы и радиоэлектроники" на 2008 - 2015 годы предусмотрена разработка отечественных быстродействующих микропроцессоров в частности для авионики, космической техники, аппаратуры, используемой в интересах Федерального агентства по атомной энергии и для других специализированных применений, где необходима повышенная сбоеустойчивость к эффектам воздействия отдельных ядерных частиц. Поэтому **значимой и актуальной** является задача развития методов проектирования двухфазных логических элементов цифровых субмикронных КМОП СБИС с повышенной сбоеустойчивостью к воздействию отдельных ядерных частиц.

Цель и задачи диссертации

Целью диссертации является развитие методов проектирования двухфазных логических элементов цифровых субмикронных КМОП СБИС с повышенной сбоеустойчивостью к воздействию отдельных ядерных частиц.

Достижение указанной цели обеспечено решением следующих **задач**:

- Сравнительный анализ различных типов КМОП логических элементов субмикронных КМОП СБИС, применяемых в условиях воздействия отдельных ядерных частиц, и обоснование наиболее перспективных схемотехнических методов повышения сбоеустойчивости.
- Обоснование схемотехнических решений субмикронных КМОП логических комбинационных и последовательностных двухфазных (двухпортовых) элементов с повышенной сбоеустойчивостью к эффектам воздействия отдельных ядерных частиц.

- Обоснование схемотехнических решений субмикронных двухфазных (двухпортовых) КМОП логических элементов с повышенной сбоеустойчивостью к эффектам воздействия отдельных ядерных частиц и малым энергопотреблением.
- Определение зависимостей и связей между параметрами двухфазных элементов и допустимыми параметрами локальных импульсов тока с целью обоснованного выбора параметров транзисторов элементов на основании предъявляемых требований по сбоеустойчивости.
- Разработка рекомендаций по проектированию топологий и конструкций двухфазных субмикронных КМОП элементов с повышенной сбоеустойчивостью при минимальных дополнительных затратах по площади.
- Разработка вариантов базовых субмикронных двухфазных КМОП логических элементов по нормам проектирования КМОП КНИ 0,25 мкм и объемный КМОП 0,18 мкм с использованием топологии с пространственным разнесением чувствительных областей двухфазных КМОП элементов и экспериментальное исследование электрических характеристик логических элементов на тестовых структурах.

Научная новизна диссертации

1. Развита схемотехника двухфазных логических элементов комбинационного и последовательного типов в части применения перекрёстных связей входов образующих их элементов – конверторов. Такие решения двухфазных элементов дают возможность существенно повысить величину критического заряда переключения по сравнению с традиционной КМОП логикой.
2. Установлен эффект и дана оценка снижения сбоеустойчивости элементов двухфазной КМОП логики из-за влияния увеличения емкостной связи между дифференциальными частями двухфазных элементов, возникающей при топологическом разнесении дифференциальных частей с чувствительными областями.
3. Методические рекомендации по проектированию топологии двухфазных КМОП элементов с пространственным разнесением чувствительных областей дифференциальных частей двухфазных КМОП элементов с минимальными дополнительными затратами по площади кристалла за счёт использования пространства между отдельными областями данных элементов частями смежных элементов структуры.

Практическая значимость диссертации

1. Установлены оценочные коэффициенты затрат на площадь шин метал-

лизации связи дифференциальных частей двухфазных КМОП логических элементов по проектным нормам 0,25 мкм, 0,18 мкм и 65 нм, обусловленные пространственным разнесением частей элементов для повышения их сбоеустойчивости к эффектам воздействия отдельных ядерных частиц.

2. Результаты исследований использованы в НИИ системных исследований РАН в рамках ОКР «Мангуст-БУ» при проектировании двухфазных логических КМОП элементов по проектным нормам КМОП 0,18 мкм и КМОП КНИ 0,25 мкм. На предприятии КБ «Корунд-М» изготовлены тестовые образцы субмикронных интегральных структур кольцевых генераторов с проектной нормой 0,25 мкм по технологии КМОП КНИ.
3. На основе полученных в диссертации базовых результатов в НИИСИ РАН начаты разработки элементной базы двухфазной КМОП логики по норме 65 нм для высоконадежной цифровых и микропроцессорных КМОП СБИС.

Положения, выносимые на защиту

1. Схемотехнические решения комбинационных и последовательностных двухфазных КМОП элементов в части применения перекрёстных связей входов образующих их элементов, позволяющие повысить сбоеустойчивость логических элементов в 10...15 раз по сравнению с традиционными КМОП логическими элементами по нормам проектирования 0,18 мкм.
2. Эффект снижения сбоеустойчивости элементов двухфазной КМОП логики из-за влияния емкостной связи между дифференциальными частями двухфазных элементов, возникающей при топологическом разнесении дифференциальных частей с чувствительными областями. Оценка допустимых длин шин связи в зависимости от сопутствующего снижения критических значений зарядов и критических значений амплитуд импульсов воздействующего тока для КМОП элементов с проектной нормой 0,18 мкм. Величины критического заряда переключения двухфазных КМОП элементов при этом в 10...15 раз превышают значения для традиционных КМОП элементов с проектной нормой 0,18 мкм.
3. Методические рекомендации по проектированию топологии двухфазных КМОП элементов с пространственным разнесением чувствительных областей дифференциальных частей двухфазных КМОП элементов с минимальными дополнительными затратами по площади кристалла за счёт использования пространства между отдельными областями данных элементов частями смежных элементов структуры.

Апробация диссертации

Результаты работы доложены на всероссийских конференциях «Электроника, микро- и нанoeлектроника» (2010 г.), «Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем – 2010 (МЭС-2010)», «Радиационная стойкость электронных систем - Стойкость-2010», «Курчатовская молодёжная научная школа» (2010 г. – 2011 г.), «Научная сессия МИФИ» (2009 г. – 2011 г.).

Публикации

Основные результаты диссертации опубликованы в 12 работах (в период с 2008 г. по 2011 г.), в том числе три в журналах из перечня ВАК. Пять работ опубликованы без соавторов.

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из списка условных обозначений, введения, четырёх глав, заключения, списка литературы и четырёх приложений; содержит 182 страницы, в том числе 95 рисунка, 30 таблиц и список литературы из 127 наименований.

Содержание диссертации

Во введении обоснована актуальность темы, проведен выбор объектов исследований, определена цель диссертации. Обобщены краткие результаты анализа ранее выполненных научных работ по тематике диссертации. Приведена постановка задачи и сформулированы основные положения, выносимые на защиту. Изложены научная новизна и практическая ценность диссертации.

Двухфазные КМОП логические инверторы с повышенной сбоеустойчивостью к эффектам воздействия отдельных ядерных частиц

Субмикронные КМОП СБИС используются в современной авиационной и космической электронике. КМОП СБИС с проектно-технологическими нормами менее 0,25 мкм имеют повышенную чувствительность к эффектам воздействия отдельных ядерных частиц. В настоящее время проектирование субмикронных микропроцессорных СБИС, а также управляющей логики субмикронных статических КМОП ОЗУ обычно происходит на основе традиционных КМОП логических элементов. Целью диссертации являлось раз-

вите схемотехники сбоеустойчивых логических элементов. Были предложены сбоеустойчивые двухфазные (двухпортовые) КМОП инверторы и элементы И-НЕ на основе 2-х и 4-х транзисторных конверторов. Имеется опыт разработки и применения КМОП ячеек памяти типа NASA и DICE, которые фактически являются вариантами D-триггера на основе двухфазных КМОП инверторов. Опыт разработки этих структур подтверждает их потенциально повышенную устойчивость к эффектам воздействия отдельных ядерных частиц, однако отсутствует сравнительный анализ элементной базы двухфазной КМОП логики и обоснование эффективных решений.

Было предложено рассматривать двухфазные элементы с разделением стоковых цепей чувствительных узлов как элементы, состоящие из двух конверторов, где каждый конвертор формирует одну из выходных фаз на основании двухфазного входного сигнала. Как основа структур КМОП двухфазных элементов комбинационной логики в работе были приняты 2-х и 4-х транзисторные элементы с двумя входами (конверторы). На рис. 1а представлена схема 2-транзисторного конвертора 2Т КМОП, на рис. 1б представлена схема 4-транзисторного конвертора 4Т КМОП, на рис. 1в представлено условное обозначение КМОП конверторов.

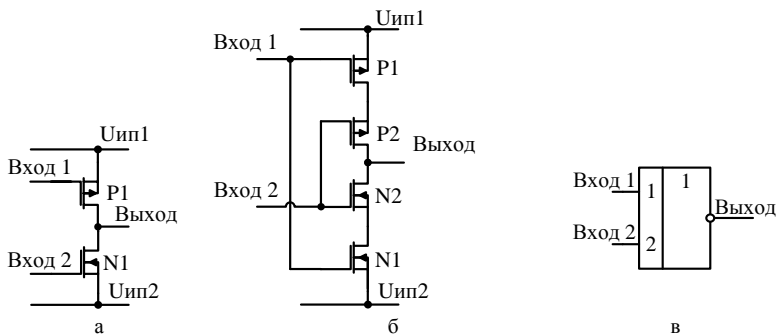


Рис. 1. Схема 2-транзисторного конвертора 2Т КМОП (а), схема 4-транзисторного конвертора 4Т КМОП (б), условное обозначение конвертора (в)

В качестве схемотехнических реализации двухфазных КМОП элементов в работе было предложено рассматривать два типа связей между образующими КМОП конверторами: 1) прямая связь входов; 2) перекрёстная связь входов (см. рис. 2). На рис. 3 представлено условное обозначение двухфазного инвертора. В двухфазных элементах с перекрёстными связями входов осуществляется несимметричное управление конверторами по дифференциальным входам. В табл. 1 представлено описание особенностей схем двухфазных инверторов.

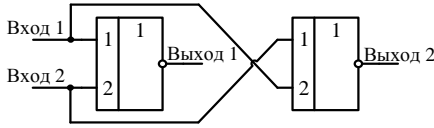


Рис. 2. Схема двухфазного инвертора на основе КМОП конверторов с перекрёстной связью входов

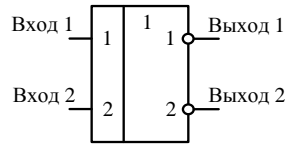


Рис. 3. Условное обозначение двухфазного КМОП инвертора

Таблица 1. Наименования инверторов и особенности их схем

Наименования инверторов	Особенности инверторов и их связь со схемами конверторов
2Т КМОП	Однофазный 2-транзисторный КМОП инвертор
2пр×2Т КМОП	Двухфазный КМОП инвертор на 2-транзисторных КМОП конверторах с прямыми связями входов конверторов
2пер×2Т КМОП	Двухфазный КМОП инвертор на 2-транзисторных КМОП конверторах с перекрёстными связями входов конверторов
2×4Т КМОП	Двухфазные КМОП инверторы на 4-транзисторных КМОП конверторах
4Т КМОП ДП	Двухфазный 4-транзисторный КМОП инвертор с экранирующими P и NМОП транзисторами

Моделирование для корректного сравнения вариантов схем логических элементов проводилось в симуляторе Spectre САПРа Cadence для случая длины каналов транзисторов 0,18 мкм, ширины канала PМОП транзисторов 0,9 мкм и ширины канала NМОП транзисторов 0,6 мкм. Эффект воздействия отдельных ядерных частиц оценивался по реакции элементов на импульс тока, который отражал сбор заряда с трека частицы чувствительной областью обратно смещённого *p-n* перехода сток-подложка закрытых транзисторов. В табл. 2 представлены основные результаты моделирования характеристик двухфазных КМОП инверторов.

Таблица 2. Параметры статических КМОП инверторов (величина критического заряда $Q_{кр}$, статический ток потребления $I_{пст}$, время переключения $t_{п}$ при различных значениях напряжения питания $U_{ин}$), спроектированных по проектно-технологической норме 0,18 мкм

Инвертор	$Q_{кр}$ при $U_{ин}=1,8$ В, фКл	$Q_{кр}$ при $U_{ин}=1,2$ В, фКл	$I_{пст}$ при $U_{ин}=1,8$ В, пА	$I_{пст}$ при $U_{ин}=1,2$ В, пА	$t_{п}$ при $U_{ин}=1,8$ В, пс	$t_{п}$ при $U_{ин}=1,2$ В, пс
2Т КМОП	87	31	6,6	4,1	26	50
2пр×2Т КМОП	275	82	13,2	8,1	25	47
2пер×2Т КМОП	15000*	15000*	13,2	8,1	26	50
2×4Т КМОП	15000*	15000*	3,0	2,3	64	124
4Т КМОП ДП	454	171	6,6	4,1	79	152

Примечания: значком * отмечены значения заряда, при которых ещё не произошло переключение инвертора

Анализ реакции КМОП элементов показал, что воздействие локального импульса тока в период переключения элемента только ускоряет его переключение из одного логического состояния в другое и величина критического заряда при таком воздействии увеличивается. Оценка критического заряда производилась по минимальной величине, которая характерна для воздействия локального импульса тока на элемент в исходном статическом логическом состоянии «1».

Моделирование двухфазных элементов, спроектированных по нормам КМОП 0,18 мкм, в симуляторе Spectre САПРа Cadence показало, что лучшими параметрами по сочетанию сбоеустойчивости (оцениваемой по величине критического заряда переключения), токам потребления и быстродействию обладают двухфазные инверторы 2пер×2Т КМОП на 2-транзисторных конверторах с перекрёстными связями входов конверторов, двухфазные инверторы 2пер×4Т КМОП и 2пр×4Т КМОП на 4-транзисторных конверторах с прямыми и перекрёстными связями входов конверторов, двухфазные инверторы 4Т КМОП ДП с экранирующими транзисторами без разделения каналов.

Двухфазные КМОП логические элементы И-НЕ с повышенной сбоеустойчивостью к эффектам воздействия отдельных ядерных частиц

Анализ схемотехники двухфазных элементов показал, что основой двухфазных элементов комбинационной логики является 2- и 4-транзисторные конверторы 2Т КМОП и 4Т КМОП. На рис. 4 представлена схема конвертора И-НЕ на 2-транзисторном конвертере 2Т КМОП. На рис. 6б представлен конвертор И-НЕ на 4- транзисторном конвертере 4Т КМОП. На рис. 6в представлено условное обозначение конвертора И-НЕ.

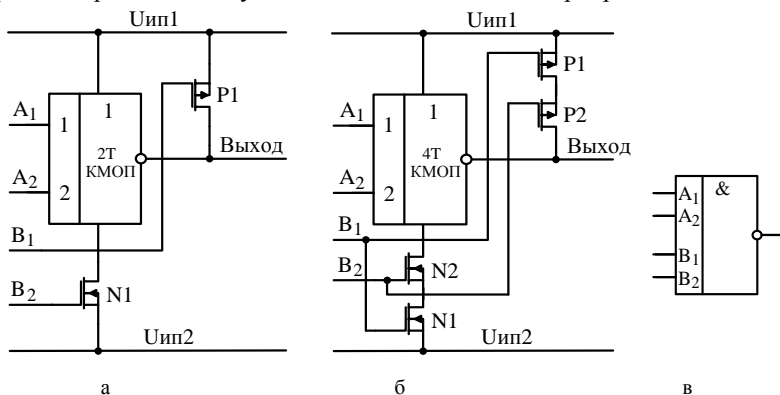


Рис. 4. Схема КМОП конвертора И-НЕ на основе конвертора 2Т КМОП (а), схема КМОП конвертора И-НЕ на основе конвертора 4Т КМОП (б), условное обозначение конвертора И-НЕ (в)

В качестве схемотехнических реализации двухфазных КМОП элементов И-НЕ в работе было предложено рассматривать два типа связей между образующими их КМОП конверторами И-НЕ: 1) прямая связь входов; 2) перекрёстная связь входов (см. рис. 5). В двухфазных элементах И-НЕ с перекрёстными связями входов осуществляется несимметричное управление конверторами по дифференциальным входам. Использование двух типов связей входов позволило оценить эффективность того или иного схемотехнического решения. На рис. 6 представлено условное обозначение двухфазных элементов И-НЕ

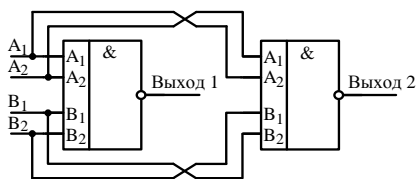


Рис. 5. Схема двухфазного элемента И-НЕ на основе КМОП конверторов И-НЕ с перекрёстной связью входов

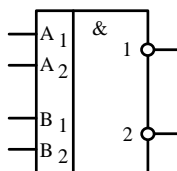


Рис. 6. Условное обозначение двухфазного элемента И-НЕ

Моделирование параметров в симуляторе Spectre САПРа Cadence и сравнение параметров двухфазных КМОП элементов И-НЕ с параметрами традиционных однофазных КМОП элементов И-НЕ показало, что двухфазные КМОП элементы И-НЕ в зависимости от типа схемы, величины напряжения питания и температуры, имеют от 3 до 15 раз большую величину критического заряда переключения, при этом не более, чем в 2 раза больший ток потребления, изменение времени переключения варьируется в 1...3 раза для разных видов элементов и в 2,0...3,2 раза большую площадь. Основные параметры моделирования представлены в табл. 3.

Таблица 3. Параметры статических КМОП логических элементов И-НЕ (величина критического заряда $Q_{кр}$, статический ток потребления $I_{п.ст}$, время переключения $t_{п}$ при различных значениях напряжения питания $U_{ип}$), спроектированных по норме 0,18 мкм

Элемент И-НЕ на инверторе типа	$Q_{кр}$ при $U_{ип}=1,8$ В, фКл	$Q_{кр}$ при $U_{ип}=1,2$ В, фКл	$I_{п.ст}$ при $U_{ип}=1,8$ В, пА	$I_{п.ст}$ при $U_{ип}=1,2$ В, пА	$t_{п}$ при $U_{ип}=1,8$ В, пс	$t_{п}$ при $U_{ип}=1,2$ В, пс
2Т КМОП	165	71	4,4	3,1	36	68
2пр×2Т КМОП	1738	1400	8,9	6,2	36	67
2пер×2Т КМОП	15000*	15000*	8,9	6,2	38	71
2×4Т КМОП	15000*	15000*	3,5	2,6	85	165
4Т КМОП ДП	330	143	4,4	3,2	95	177

Примечания: значком * отмечены значения заряда, при которых ещё не произошло переключение элемента И-НЕ

Было установлено, что реакция двухфазных элементов на локально воздействующий импульс тока зависит от параметров КМОП транзисторов двухфазных элементов, определяющих связь выходного тока КМОП конвертора в момент сбоя со значением амплитуды импульса тока (см. рис.7). Для двухфазного КМОП инвертора по нормам проектирования 0,18 мкм с шириной канала РМОП транзисторов 0,22...1,5 мкм и шириной канала ЛМОП транзисторов 0,6 мкм, амплитуда импульса тока, приводящего к сбою или блокировке состояния двухфазного элемента, связана со значением выходного тока инвертора коэффициентом 1,1...2,2. На рис. 8 представлены нагрузочные выходные характеристики конвертора двухфазного инвертора. Можно определить предельно допустимые значения параметров импульсов локально воздействующего тока, зная нагрузочные выходные характеристики двухфазных элементов (см. рис. 8), которые задают связь амплитуды импульса тока и амплитуды импульса напряжения помехи, вызывающего сбой.

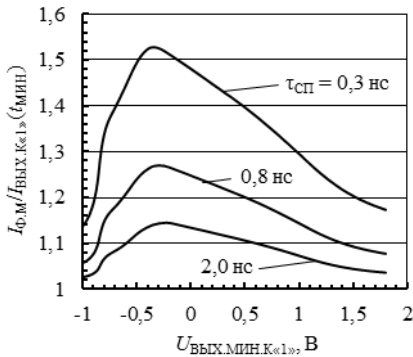


Рис. 7. Зависимости отношения амплитуды фототока $I_{Ф,М}$ к величине выходного тока $I_{ВЫХ,К<1>}$ конвертора 2Т КМОП по нормам 0,18 мкм от значений выходного напряжения конвертора $U_{ВЫХ,МИН,К<1>}(t_{МИН})$ в исходном логическом состоянии «1» в момент времени достижения выходным напряжением экстремума при различных постоянных времени спада $\tau_{СП}$ импульса тока и нагрузке конвертора на двухфазный КМОП инвертор с перекрёстными связями, ширина канала РМОП транзистора $W_P = 0,9$ мкм, ширина канала ЛМОП транзистора $W_N = 0,6$ мкм

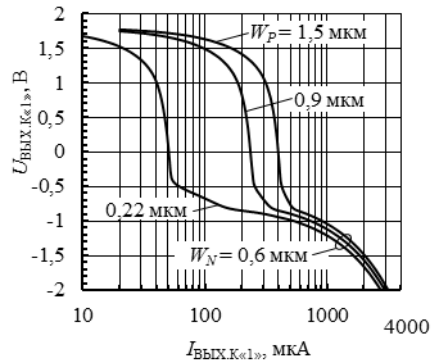


Рис. 8. Зависимости выходного напряжения конверторов $U_{ВЫХ,К<1>}$ в исходном состоянии логической «1» от выходного тока конвертора $I_{ВЫХ,К<1>}$ 2Т КМОП по нормам 0,18 мкм в статическом режиме, ширина канала ЛМОП транзистора – 0,6 мкм, ширина канала РМОП транзисторов – 0,22 мкм; 0,9 мкм; 1,5 мкм

***D*- и *RS*- триггеры на основе двухфазных КМОП логических элементов**

Проведённый в работе анализ схемотехники *D*-триггеров на двухфазных КМОП инверторах показал, что по типу связей составляющих их инверторов *D*-триггеры можно разделить на два вида: *D*-триггер с прямыми связями входов и *D*-триггер с перекрёстными связями входов (см. рис. 9).

Амплитуды помехи, приводящие к переключению состояния (сбою) двухфазного 0,18 мкм КМОП *D*-триггера с перекрёстными связями входов на основе элементов 2пер×2Т КМОП, имеют значения 3,77...3,36 В. Такие помехи возникают от воздействия локального импульса тока тока с постоянной времени спада 0,3 нс при величинах интегрального критического заряда 1580 фКл. Амплитуда помехи переключения *D*-триггера с проектной нормой 0,18 мкм на традиционных КМОП инверторах составляет 0,66...1,0 В. Такие помехи возникают от воздействия локального импульса тока тока с постоянной времени спада 0,3 нс при величинах интегрального критического заряда 80 фКл.

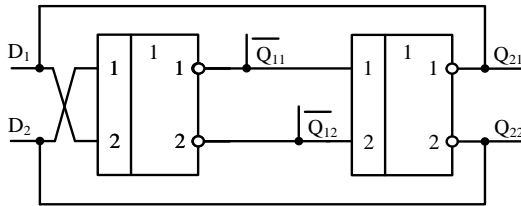


Рис. 9. Схема *D*-триггера с перекрёстной связью входов на основе двухфазных КМОП инверторов

Проведённый в работе анализ схемотехники *RS*-триггеров на двухфазных КМОП элементах И-НЕ показал, что по типу связей составляющих их элементов *RS*-триггеры можно разделить на два вида: *RS*-триггер с прямой связью входов и *RS*-триггер с перекрёстной связью входов (см. рис. 10).

Моделирование двухфазных элементов, спроектированных по нормам КМОП 0,18 мкм, в симуляторе Spectre САПРа Cadence показало, что лучшими параметрами по сочетанию сбоеустойчивости (оцениваемой по величине критического заряда переключения), токам потребления и быстродействию обладают *D*- и *RS*-триггеры на основе двухфазных инверторов 2пер×2Т КМОП на 2-транзисторных конверторах с перекрёстными связями входов конверторов, на основе двухфазных инверторов 2×4Т КМОП с 4-транзисторными конверторами с прямыми и перекрёстными связями входов конверторов.

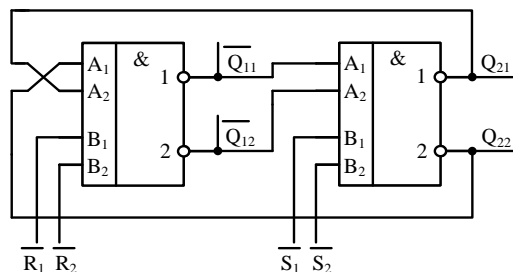


Рис. 10. Схема RS-триггера с перекрёстной связью входов на основе двухфазных КМОП инверторов

Автором было установлено, что эффект блокировки помехи двухфазными элементами существенно больше при перекрёстной связью входов двухфазных элементов в схемах как комбинационной, так и последовательностной логики. Этот эффект определяется асимметричными переключательными характеристиками парных конверторов в составе инверторов и элементов И-НЕ, а также асимметричным прохождением помехи через ёмкость затвор-сток закрытых транзисторов. Эффект от использования перекрёстной связью по величине критического заряда переключения по сравнению с использованием прямой связью входов двухфазных элементов может достигать 15 раз.

Особенности проектирования топологии двухфазных КМОП логических элементов по проектно-технологическим нормам 0,25 мкм и 0,18 мкм

Автором установлен эффект снижения критических значений зарядов и амплитуд импульсов тока для двухфазных элементов, обусловленных ёмкостной связью их дифференциальных входов. Эта ёмкостная связь обусловлена двухпроводным характером соединительных шин и ёмкостью парных элементов установки логического состояния триггеров. Установлена связь длин дифференциальных шин связей двухфазного элемента и коэффициента снижения его сбоеустойчивости до предельно допустимых величин. Установлено, что критические значения амплитуд воздействующих импульсов тока, характеризующих сбоеустойчивость двухфазных КМОП инверторов (см. рис. 11) и D-триггеров (см. рис. 12) по проектной норме 0,18 мкм существенно снижаются, если ёмкости связи между дифференциальными узлами превышает 3...4 фФ.

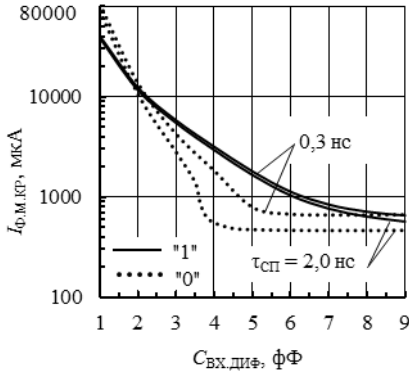


Рис. 11. Критические значения амплитуд импульса тока $I_{Ф,М.КР}$ в зависимости от емкости между входами двухфазных инверторов $C_{ВХ,ДИФ}$ по нормам проектирования 0,18 мкм при их логических состояниях «0» и «1»

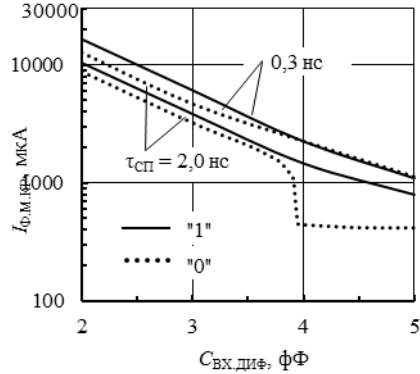


Рис. 12. Критические значения амплитуды импульса тока $I_{Ф,М.КР}$ для D -триггеров в зависимости от емкости между входами его инверторов $C_{ВХ,ДИФ}$ по нормам проектирования 0,18 мкм при логических состояниях «0» и «1»

Величина удельной ёмкости между шинами металлизации дифференциальных линий двухфазных элементов для слоя металлизации 1...4 для норм проектирования 0,18 мкм составляет 0,058...0,022 фФ/мкм. Максимальная допустимая протяжённость шин металлизации дифференциальных линий двухфазных элементов по нормам проектирования 0,18 мкм составляет 50...70 мкм. Допустимое снижение величины критического заряда переключения при этом составляет 1000...3000 фКл, а максимальная амплитуда локального импульса тока 500...1500 мкм.

Проектирование топологии двухфазных элементов на основе конверторов типа 2Т КМОП (см. рис. 13) и 4Т КМОП (см. рис. 14) с пространственным разнесением их парных чувствительных к воздействию отдельных ядерных частиц областей позволяет практически исключить одновременный сбор заряда двумя чувствительными областями элемента с трека частицы, за счёт чего сбоеустойчивость двухфазных элементов по величине критического заряда переключения повышается как минимум в 15 раз.

Проектирование топологии двухфазных элементов на основе конверторов типа 2Т КМОП и 4Т КМОП с пространственным разнесением их парных чувствительных к воздействию отдельных ядерных частиц областей возможно на основе принципа масштабирования, для чего установлены коэффициенты пропорциональности для проектных норм КМОП 0,25 мкм, 0,18 мкм и 65 нм между величинами необходимой дополнительной площади металлизации межсоединений и расстояниями, на которые осуществляется разнесение зарядо чувствительных парных узлов двухфазных

элементов. На рис. 15 представлены зависимости линейного увеличения площади двухфазных элементов в зависимости от расстояния, на которое осуществляется разнесение зарядо чувствительных областей.

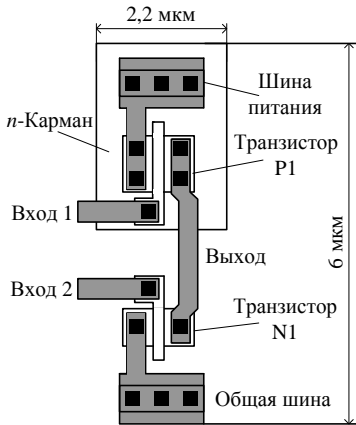


Рис. 13. Эскиз топологии 2-транзисторного конвертора 2Т КМОП, разработанного по нормам проектирования 0,18 мкм

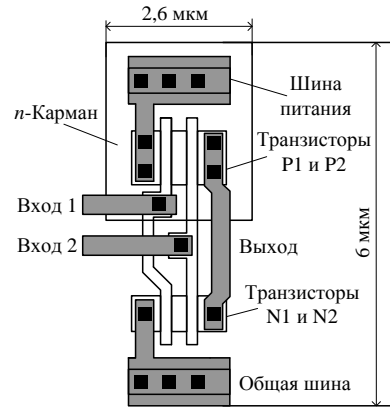


Рис. 14. Эскиз топологии 4-транзисторного конвертора 4Т КМОП, разработанного по нормам проектирования 0,18 мкм

Разработана топология двухфазных КМОП инверторов и элементов И-НЕ на основе конверторов 2Т КМОП и 4Т КМОП по нормам проектирования КНИ КМОП 0,25 мкм и объёмный КМОП 0,18 мкм с пространственным разнесением конверторов. Взаимное включение чувствительных областей смежных двухфазных элементов позволило минимизировать дополнительные затраты по площади при разнесении конверторов. На рис. 16 представлен эскиз топологии двух двухфазных КМОП инверторов на основе конверторов 2Т КМОП по нормам проектирования КНИ КМОП 0,25 мкм и взаимным включением чувствительных областей в пространство между конверторами. На рис. 17 представлен эскиз матричного расположения конверторов двух двухфазных КМОП инверторов на кристалле и связей между ними.

Установлены выражения, позволяющие рассчитывать площадь топологии двухфазных элементов с пространственным разнесением конверторов и взаимным включением в пространство между конверторами чувствительных областей смежных двухфазных элементов:

$$S_{ЭЛ} = 2 S_{\text{конв}} + S_{\text{мет}}, \quad (1)$$

где $S_{\text{конв}}$ – площадь конвертора, $S_{\text{мет}}$ – площадь металлизации межсоединений конверторов.

Площадь металлизации межсоединений конверторов рассчитывается по следующей формуле:

$$S_{\text{МЕТ}} = k_{\text{МЕТ}} (N_{\text{КОНВ}} + 1), \quad (2)$$

где $k_{\text{МЕТ}}$ – коэффициент пропорциональности дополнительных затрат по площади на металлизацию межсоединений, $N_{\text{КОНВ}}$ – количество конверторов смежных элементов, расположенных между конверторами данного двухфазного элемента.



Рис. 15. Зависимость площади топологии двухфазных инверторов, нормированной на площадь однофазного инвертора, от усреднённой величины расстояний между МОП транзисторами одноимённого типа проводимости в различных конверторах для различных норм проектирования

Коэффициент пропорциональности дополнительных затрат по площади на металлизацию межсоединений рассчитывается по следующей формуле:

$$k_{\text{МЕТ}} = 2 N_{\text{ДИФ}} l_{\text{КОНВ}} (d_{\text{Ш}} + h_{\text{Ш}}), \quad (3)$$

где $N_{\text{ДИФ}}$ – количество дифференциальных входов элемента ($N_{\text{ДИФ}} = 1$ для двухфазных КМОП инверторов, $N_{\text{ДИФ}} = 2$ для двухфазных КМОП элементов И-НЕ), $l_{\text{КОНВ}}$ – длина конвертора, $d_{\text{Ш}}$ – расстояние между шинами металлизации, $h_{\text{Ш}}$ – ширина шины металлизации. Площадь двухфазных инверторов с пространственным разнесением и включением в пространство между чувствительными областями одной дифференциальной части смежного двухфазного элемента на основе конверторов 2Т КМОП составляет для норм проектирования 0,25 мкм – 43,1 мкм², для норм проектирования 0,18 мкм – 26,2 мкм², для норм проектирования 65 нм – 4,8 мкм². Площадь двухфазных инверторов на основе конверторов 4Т КМОП для норм проектирования 0,25...0,065 мкм имеет в 1,2...1,4 раза большую площадь, чем аналогичные двухфазные инверторы на основе конверторов типа 4Т КМОП. Увеличение расстояния на 10 мкм между чувствительными областями дифференциальных частей двухфазных КМОП элементов для проектных норм 0,25...0,065 мкм приводит к

увеличению затрат на площадь шин металлизации связи по отношению к площади двухфазного элемента в 0,6...2,8 раз.

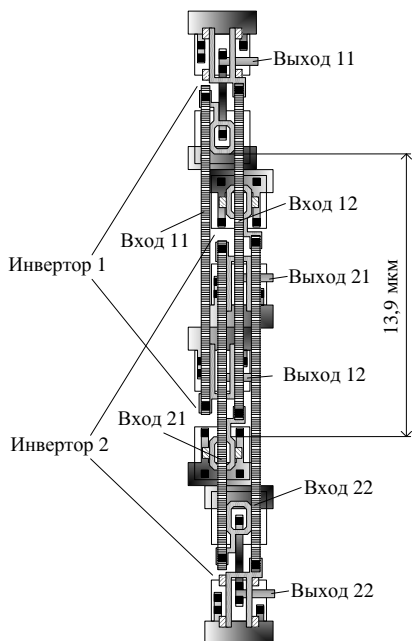


Рис. 16. Пример размещения на кристалле двух независимых двухфазных инверторов по нормам проектирования КНИ КМОП 0,25 мкм с пространственным разнесением конверторов и взаимным включением в пространство между конверторами конверторов другого двухфазного инвертора

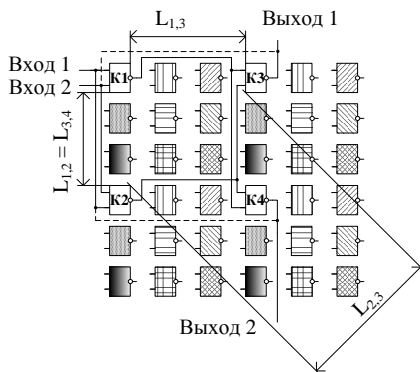


Рис. 17. Эскиз матричного расположения конверторов двух двухфазных КМОП инверторов на кристалле и связей между ними

Разработанные топологические решения базовых двухфазных элементов с 2-транзисторными и 4-транзисторными конверторами изготовлены в виде интегральных тестовых элементов и структур кольцевых генераторов, состоящих из 599 инверторов и 2-х элементов И-НЕ, с субмикронными проектными нормами 0,25 мкм. По результатам экспериментальных исследований было установлено бесбойное функционирование тестовых структур в диапазоне напряжений питания 2,5...1,5 В. В табл. 4 - табл. 6 представлены результаты экспериментального исследования электрических характеристик тестовых структур.

Таблица 4. Основные параметры тестовых кольцевых генераторов, состоящих из 599 однофазных инверторов 2Т КМОП и 2-х элементов И-НЕ

Напряжение $U_{инп}$, В	2,5	2,25	2	1,75	1,5
Частота генерации, МГц	13,85	12,44	11,08	9,59	8,08
Период генерации, нс	71,8	80,38	90,2	104,6	129
Ток потребления, мкА	1258	942	676,7	463,5	301,3

Таблица 5. Основные параметры тестовых кольцевых генераторов, состоящих из 599 двухфазных инверторов 2пер×2Т КМОП и 2-х элементов И-НЕ с пространственным разнесением конверторов

Напряжение $U_{инп}$, В	2,5	2,25	2	1,75	1,5
Частота генерации, МГц	11,33	10,12	9,008	7,7	6,19
Период генерации, нс	88,54	98,86	111,6	130,7	161
Ток потребления, мкА	871,9	633,7	439,5	291,3	183,2

Таблица 6. Основные параметры тестовых кольцевых генераторов, состоящих из 599 двухфазных инверторов 2пер×4Т КМОП и 2-х элементов И-НЕ с пространственным разнесением конверторов

Напряжение $U_{инп}$, В	2,5	2,25	2	1,75	1,5
Частота генерации, МГц	3,68	3,3	2,88	2,411	1,902
Период генерации, нс	273	302,8	346	413,8	524
Ток потребления, мкА	473,7	365,2	219,7	143,8	102,4

Тестовые структуры на двухфазных элементах с конверторами 4Т КМОП потребляют в 1,8...1,9 раз меньший ток, чем тестовые структуры на двухфазных элементах 2Т КМОП, динамический ток потребления которых при напряжениях питания 2,5...1,5 В составляет 870...180 мкА, что подтвердило обоснованность рекомендации об использовании двухфазных элементов с 4-транзисторными конверторами в функциональных блоках с пониженным энергопотреблением.

Заключение

Основной результат диссертации заключается в развитии методов проектирования двухфазных логических элементов цифровых субмикронных КМОП СБИС с повышенной сбоеустойчивостью к воздействию отдельных ядерных частиц.

Основные теоретические результаты диссертации:

1. Развита схемотехника двухфазных логических элементов комбинационного и последовательного типов в части применения перекрёстных связей входов образующих их элементов – конверторов. Такие решения двухфазных элементов дают возможность повысить величину критического заряда переключения двухфазных логических элементов более чем в 10 раз по сравнению с традиционной КМОП логикой с проектными нормами 0,18 мкм, для которой характерная величина критического заряда переключе-

чения не превышает 100...200 фКл.

2. Установлен эффект и дана оценка снижения сбоеустойчивости элементов двухфазной КМОП логики из-за влияния увеличения емкостной связи между дифференциальными частями двухфазных элементов, возникающей при топологическом разнесении дифференциальных частей с чувствительными областями. Величины суммарной ёмкости связи дифференциальных входов двухфазных элементов комбинационных и последовательностных типов с проектной нормой 0,18 мкм. не должны превышать значений 3...4 фФ. Величины критического заряда переключения двухфазных КМОП элементов при этом в 10...15 раз превышают значения для традиционных КМОП элементов с проектной нормой 0,18 мкм.

3. Методические рекомендации по проектированию топологии двухфазных КМОП элементов с пространственным разнесением чувствительных областей дифференциальных частей двухфазных КМОП элементов с минимальными дополнительными затратами по площади кристалла за счёт использования пространства между отдельными областями данных элементов частями смежных элементов структуры.

Основные практические результаты диссертации: и их внедрение:

1. Установлены оценочные коэффициенты затрат на площадь шин металлизации связи дифференциальных частей двухфазных КМОП логических элементов по проектным нормам 0,25 мкм, 0,18 мкм и 65 нм, обусловленные пространственным разнесением частей элементов.

2. Результаты исследований использованы в НИИ системных исследований РАН в рамках ОКР «Мангуст-БУ» при проектировании двухфазных логических КМОП элементов по проектным нормам КМОП 0,18 мкм и КМОП КНИ 0,25 мкм. На предприятии КБ «Корунд-М» изготовлены тестовые образцы субмикронных интегральных структур кольцевых генераторов с проектной нормой 0,25 мкм по технологии КМОП КНИ. Тестовые структуры на двухфазных КМОП элементах с 4-транзисторными конверторами имеют в 1,8...1,9 раз меньший ток потребления, чем тестовые структуры на двухфазных элементах с 2-транзисторными конверторами, что подтвердило рекомендации об использовании двухфазных элементов с 4-транзисторными конверторами в функциональных блоках СБИС с пониженным энергопотреблением.

3. На основе полученных в диссертации базовых результатов в НИИСИ РАН начаты разработки элементной базы двухфазной КМОП логики по норме 65 нм для высоконадежных цифровых и микропроцессорных КМОП СБИС.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

1. Ольчев С.И., Стенин В.Я. Двухфазные КМОП логические элементы с повышенной сбоеустойчивостью к воздействию отдельных ядерных частиц // Микроэлектроника. - 2011. - Т. 40. - № 3. - С. 172 - 187.

2. Ольчев С.И., Стенин В.Я. Моделирование характеристик субмикронных двухфазных КМОП логических элементов при воздействии отдельных ядерных частиц // Ядерная физика и инжиниринг. – 2011. – Т.2. – №5.
3. Ольчев С.И. Субмикронные КМОП цифровые элементы с повышенной устойчивостью к воздействию атмосферных нейтронов // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем - 2010. Сб. трудов под общ. ред. академика РАН А.Л. Стемпковского. - М.: ИППМ РАН, 2010. - С. 261 - 264.
4. Ольчев С.И. Схемотехнические особенности элементов комбинационной логики с требованиями к повышенной сбоеустойчивости и помехозащищённости // Научная сессия МИФИ-2010. Сб. научн. трудов.- М.: МИФИ, 2010. - Т.1.- С. 150 - 152.
5. Ольчев С.И. Тестовые кольцевые генераторы на однофазных и двухфазных логических элементах // Электроника, микро- и нанoeлектроника. Сб. научн. трудов. – М.: МИФИ, 2010. – С. 51 - 56.
6. Ольчев С.И. Повышение сбоеустойчивости субмикронных КМОП конверторных элементов двухпортовой комбинационной логики // Электроника, микро- и нанoeлектроника. Сб. научн. трудов. – М.: МИФИ, 2009. – С. 97 - 102.
7. Ольчев С.И. Оптимизация по быстродействию выходных буферов блоков статических ОЗУ, работающих на емкостную нагрузку // Электроника, микро- и нанoeлектроника. Сб. научн. трудов. – М.: МИФИ, 2008. – С. 52 - 56.
8. Ольчев С.И., Стенин В.Я. Сбоеустойчивые КМОП логические элементы с двухфазным управлением // Научно-технический сборник «Радиационная стойкость электронных систем – Стойкость-2010». - Вып. 13. - С. 236 - 238.
9. Ольчев С.И., Черкасов И.Г. Повышение сбоеустойчивости комбинационной логики КМОП СБИС к воздействию отдельных ядерных частиц // Научная сессия МИФИ-2009. Сб. научн. трудов.- М.: МИФИ, 2009. - Т.2.- С. 123 - 126.
10. Ольчев С.И., Стенин В.Я. Анализ сбоеустойчивости КМОП логических элементов с двухфазной структурой // Электроника, микро- и нанoeлектроника. Сб. научн. трудов. – М.: МИФИ, 2010. – С. 17 - 28.
11. Ольчев С.И., Стенин В.Я. Анализ сбоеустойчивости КМОП триггерных элементов с двухфазной структурой // Электроника, микро- и нанoeлектроника. Сб. научн. трудов. – М.: МИФИ, 2010. – С. 29 - 38.
12. Ольчев С.И., Стенин В.Я. Особенности двухфазных 0,18 мкм КМОП логических элементов при локальном воздействии импульсов тока // Электроника, микро- и нанoeлектроника. Сб. научн. трудов. – М.: МИФИ, 2011. – С. 16 - 23.