

На правах рукописи

Силаев Алексей Сергеевич

**АНАЛОГО-ЦИФРОВЫЕ МИКРОЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА  
АМПЛИТУДНОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ  
МИКРОПОЛОСКОВЫХ ДЕТЕКТОРОВ**

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

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Автор:

Москва – 2010 г.

Диссертация выполнена в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ»

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор  
Волков Юрий Алексеевич

Официальные оппоненты:

доктор технических наук  
Ачкасов Владимир Николаевич,  
ФГУП «НИИ Электронной Техники»

кандидат технических наук  
Мелешко Евгений Алексеевич,  
РНЦ «Курчатовский институт»

Ведущая организация:

ФГУП «НИИ Микроэлектронной Аппаратуры  
«Прогресс»

Защита диссертации состоится 20 декабря 2010 г. в часов минут на заседании диссертационного совета Д 212.130.02 в Национальном исследовательском ядерном университете МИФИ по адресу 115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31, тел. 323-92-35.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ.

Автореферат разослан « » ноября 2010 г.

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



П.К. Скоробогатов

# ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

## Актуальность темы

В настоящее время в развитии современной аппаратуры физического эксперимента наблюдается тенденция увеличения количества детекторов ионизирующего излучения, а следовательно и такого же увеличения электронных каналов съема и обработки сигналов этих детекторов. Число каналов в крупных международных экспериментах таких, как LHC, ALICE, ATLAS, CMS в CERN (Швейцария), PHENIX и STAR в BNL (США), CBM в FAIR (Германия), НУКЛОН (Россия) достигает более сотен тысяч каналов. Естественно, что с каждым годом предъявляются все более жесткие требования к характеристикам этих каналов, как в плане массогабаритных, так и в части электрических параметров.

Данная диссертация неразрывно связана с проектированием электронной аппаратуры для российского эксперимента НУКЛОН, направленного на изучение космических излучений (Роскосмос), и для международного эксперимента CBM, направленного на изучение сжатой барионной материи (FAIR, Германия). В упомянутых экспериментах используются многоканальные кремниевые микрополосковые детекторы. Основная часть задач амплитудной обработки сигналов кремниевых микрополосковых детекторов решается аналого-цифровыми устройствами, включающими в себя: зарядочувствительный усилитель, усилитель-формирователь, устройство выборки хранения (пиковый детектор), источник опорного напряжения, мультиплексор, выходной драйвер (аналого-цифровой преобразователь).

Создание систем сбора и обработки данных такого масштаба диктует необходимость выполнения всей электроники считывания в микроэлектронном исполнении в виде сложно-функциональных специализированных интегральных микросхем (СИМС), выполненных по современным КМОП технологиям с проектными нормами 0,18...0,35 мкм.

Разработка таких сложных микросхем возможно лишь с применением передовых САПР компаний Cadence Design Systems, Mentor Graphics и Synopsys.

Улучшение электрических характеристик многоканальных систем сбора и обработки сигналов в настоящее время связано в первую очередь с улучшением характеристик их входной аналоговой части: потребления, динамического диапазона, эквивалентного шумового заряда, коэффициента усиления, полосы пропускания и др.

Анализ существующих СИМС показал, что на сегодняшний день отсутствуют микросхемы для работы от микрополосковых детекторов с

необходимыми характеристиками, такими как потребление (единицы милливатт на канал) и динамический диапазон (сто пико кулон).

Поэтому разработка аналого-цифровых устройств в интегральном исполнении представляется весьма актуальной научно-технической задачей, направленной в конечном счете на улучшение характеристик электронной аппаратуры физических и космических экспериментов. Актуальной задачей является также оптимальное согласование микрополоскового детектора с амплитудным каналом обработки сигналов.

Вопросам теории и практики аналого-цифровых устройств для физических экспериментов посвящено большое количество публикаций и докладов на международных и российских конференциях. Заметный вклад в данную тематику внесли отечественные специалисты таких коллективов, как Курчатовский институт, ИФВЭ, ИТЭФ, ОИЯИ, НИИМА, СНИИП, НИИЯФ МГУ, ИЯИ РАН, ИПУ РАН и др.

**Целью диссертации** является развитие методики сквозного проектирования современных аналого-цифровых микроэлектронных устройств амплитудной обработки сигналов микрополосковых детекторов и создание комплекса специализированных интегральных микросхем для физических и космических экспериментов.

Для достижения данной цели использован комплексный подход, включающий решение следующих **задач**:

- анализ структурных и принципиальных схем микроэлектронных аналого-цифровых устройств и отдельных узлов физической аппаратуры обработки сигналов кремниевых детекторов;

- исследования и разработка зарядочувствительного усилителя с широким динамическим диапазоном;

- исследования и разработка других узлов аналогового канала: усилителя формирователя, устройства выборки хранения, источника опорных потенциалов, выходного драйвера;

- обоснование критериев качества аналого-цифровых устройств;

- анализ эквивалентных схем кремниевых микрополосковых детекторов и создание методики экстракции их SPICE параметров;

- разработка методики топологического проектирования аналого-цифровых устройств, включающей создание высокоточных и согласованных элементов (дифференциальных пар, точностных конденсаторов и резисторов), входных транзисторов с эквивалентной шириной канала до нескольких десятком миллиметров, учет взаимного влияния каналов;

- проведение тестирования разработанных СИМС.

Этот комплексный подход включал использование последних версий программных продуктов САПР компаний Cadence, Mentor

Graphics и Synopsys, а также технологических библиотек компаний изготовителей UMC (Тайвань), AMIS/OnSemi (Бельгия).

### **Научная новизна диссертации**

1. Разработана методика проектирования аналого-цифровых микроэлектронных устройств амплитудной обработки, позволяющая проводить сквозное проектирование специализированных интегральных микросхем на основе современных САПР и с использованием технологических библиотек компаний изготовителей.
2. Разработаны оригинальные структурные, схемотехнические и конструктивно-топологические методы (решения) реализации узлов амплитудного канала обработки сигналов детекторов.
3. Создана методика экстракции параметров SPICE модели микрополоскового детектора, позволяющая в едином цикле анализировать детектор и амплитудный канал, что весьма важно при решении задачи оптимального согласования детектора и считывающей электроники.
4. Предложены критерии качества микроэлектронного канала амплитудной обработки, включающие его важные характеристики: потребление, эквивалентный шумовой заряд, динамический диапазон, коэффициент усиления и занимаемую площадь на кристалле.

### **Практическая значимость результатов диссертации**

1. Впервые спроектирована и изготовлена 32-х канальная СИМС амплитудной обработки сигналов микрополосковых детекторов с динамическим диапазоном более 100пКл, не имеющая аналогов в России и за рубежом. Получено свидетельство о государственной регистрации топологии данной СИМС, реализованной по КМОП технологии с проектными нормами 0,35 мкм.
2. Разработан комплекс СИМС для физических и космических экспериментов СВМ и НУКЛОН:
  - 8-и канальный зарядочувствительный усилитель с компенсацией токов утечек (до 1мкА);
  - 16-и канальный малозумящий зарядочувствительный усилитель с эквивалентным шумовым зарядом менее 2000 электрон при емкости детектора 100 пФ;
  - 4-х и 6-и канальные аналого-цифровые устройства амплитудной обработки сигналов микрополосковых детекторов с энергопотреблением менее 2,0 мВт/канал.Данные микросхемы изготовлены по КМОП технологии с проектными нормами 0,18...0,35 мкм. На две из них получены свидетельства о регистрации их топологий.

## **На защиту выносятся**

1. Методика сквозного проектирования аналого-цифровых микроэлектронных устройств амплитудной обработки сигналов микрополосковых детекторов с использованием современной КМОП технологии и передовых САПР.
2. Результаты структурного, схемотехнического и топологического проектирования принципиальных узлов канала амплитудной обработки сигналов.
3. Методика создания SPICE модели микрополоскового детектора, позволяющая в едином цикле проектирования решать задачи согласования детектора со считывающей электроникой.
4. Критерии качества аналого-цифровых устройств амплитудной обработки, использование которых позволяет количественно сравнивать характеристики разрабатываемых устройств.
5. Комплекс специализированных интегральных микросхем для физических и космических экспериментов СВМ и НУКЛОН.

## **Апробация диссертации**

Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на следующих научно-технических конференциях и семинарах:

- International Symposium on Nuclear Electronics and Computing, Varna, Bulgaria, 2003, 2005 и 2009 г.г.
- Российской научно-технической конференции «Электроника, микро- и нанoeлектроника», 2003, 2004, 2007 и 2010 г.г.
- Научных сессиях НИЯУ МИФИ в период с 2005 по 2010 г.г.
- Международной научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы приборостроения, информатики, экономики и права» МГАПИ, 2002 г.

## **Публикации**

По теме диссертации опубликовано 21 печатная работа (из них 4 без соавторов), в том числе 3 статьи в изданиях из перечня ВАК РФ, получено 3 свидетельства о государственной регистрации топологии интегральной микросхемы.

## **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы из 114 наименований. Она содержит 150 страниц, включая 74 рисунка и 14 таблиц.

## **СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ**

**Во введении** обоснована актуальность темы, определена цель диссертации. Приведена постановка задачи и сформулированы основные

положения, выносимые на защиту, а также ее научная новизна и практическая ценность.

## 1. Анализ литературных источников, тенденции развития считывающей электроники, выбор технологии

На основе проведенного анализа литературных источников по современным аналого-цифровым устройствам обработки сигналов кремниевых детекторов формулируются требования к считывающей электронике, приводятся основные характеристики микрополосковых детекторов и СИМС, описывается состав канала амплитудной обработки и дается анализ современной полупроводниковой КМОП технологии.

Описываются структурные схемы современных аналого-цифровых устройств обработки сигналов. Данные устройства, как известно, в зависимости от целей и задач физического эксперимента подразделяются на устройства амплитудной и временной обработки сигналов. Материалы данной диссертации ориентированы на устройства амплитудной обработки.

Для современных аналоговых каналов предъявляются жесткие требования в первую очередь по потребляемой мощности, динамическому диапазону, шумам, быстродействию и микроминиатюризации. К примеру, потребляемая мощность не должна превышать единиц мВт/канал, а динамический диапазон в некоторых экспериментах достигает ста пКл.

Приводится сводная таблица с параметрами современных аналого-цифровых устройств, выполненных в интегральном исполнении, таких как VA32HDR, SVX4, HELIX128, CSP ASIC, Beetle, ASD, APV25, Eudet I3 (FP6), SiTR, SPECT, Ramses и др. В качестве примера ниже приведен фрагмент упомянутой таблицы.

Таблица 1.

Параметр	VA32 HDR14	SVX4	CSP ASIC	Beetle
Число каналов, шт	32	128	16	128
Технология изготовления, мкм	КМОП 0,35	КМОП 0,25	КМОП 0,35	КМОП 0,25
Площадь, мм×мм	4,4×3,4	6,4×9,1	2,4×2,4	6,1×5,1
Коэффициент усиления, мВ/фКл	5	5	1	5
Эквивалентный шумовой заряд, электрон	2700+50е/пФ (C <sub>д</sub> =20пФ)	2000+20е/пФ (C <sub>д</sub> =35пФ)	1400 (C <sub>д</sub> =25пФ)	500+47е/пФ (C <sub>д</sub> =10пФ)
Динамический диапазон, пКл	25	0,2	2	10
Потребляемая мощность, мВт/канал	2,0	3,0	6,0	2,2

Анализ характеристик позволил сделать заключение, что на сегодняшний день отсутствуют микросхемы, удовлетворяющие комплексу заданных характеристик для экспериментов НУКЛОН и СВМ. Анализ также позволил выявить следующие тенденции:

- Аналого-цифровые устройства, в частности аналоговые каналы амплитудной обработки, реализуются преимущественно в виде СИМС по КМОП технологии с проектными нормами 0,18...0,35 мкм.

- Интегрирование в одном кристалле все более сложных узлов в единую аналого-цифровую микросистему, содержащую зарядочувствительные и операционные усилители, формирователи, устройства выборки хранения (пиковые детекторы), источники опорного напряжения и тока, АЦП, дискриминаторы, мультиплексоры и др.

- Интегрирование на кристалле все большего числа каналов, при этом общая степень интеграции ИМС превышает десятки и сотни тысяч транзисторов, поэтому особое внимание уделяется системам питания, планировке кристалла, «развязке» аналоговой и цифровой частей.

В зависимости от конкретных задач физического эксперимента и с целью более объективного сравнения существующих и вновь разрабатываемых аналого-цифровых устройств, предлагается использовать один из следующих критериев качества:

$H_1 = DD/P_K$ , где  $DD$  – динамический диапазон,  $P_K$  – потребление канала;  $H_2 = K_y/Q_{ш}$ , где  $K_y$  – коэффициент усиления,  $Q_{ш}$  – эквивалентный шумовой заряд;  $H_3 = N_K/S$ , где  $N_K$  – число каналов,  $S$  – площадь кристалла.

Из данных критериев при необходимости можно сформулировать и более сложные критерии, равные произведениям двух и даже трех величин  $H = H_1 \times H_2 \times H_3$ .

Предложенные критерии позволяют количественно оценить характеристики данного рода устройств по следующим ключевым показателям: динамический диапазон, потребление, коэффициент усиления, эквивалентный шумовой заряд, количество каналов и занимаемая площадь на кристалле.

С учетом требований к считывающей электронике проведен анализ и сравнение полупроводниковых технологий, доступных для реализации устройств данного класса в России и за рубежом. Он показал, что на сегодняшний день более перспективными изготовителями ИМС следует считать зарубежные компании, так как они:

- обладают отработанными КМОП технологиями с проектными нормами 0,18...0,35 мкм и с различными технологическими опциями (например, Mixed Mode);

- имеют хорошо выверенные технологические библиотеки и полные комплекты документаций, включая SPICE модели и топологические виды элементов;

- обеспечивают в сжатые сроки изготовление прототипов (до 3



месяцев), используя программы MPW (Multi Project Wafer и miniASIC);

- в настоящее время нет экспортных ограничений для России, как по средствам проектирования, так и по доступу к передовым технологическим процессам.

На начало диссертации (2003г.) в России практически отсутствовали доступные КМОП технологии с прогрессивными проектными нормами, удовлетворяющими требованиям к считывающей электронике. Благодаря членству в европейской организации Europractice (с 2003 г.), НИЯУ МИФИ имеет доступ к зарубежным технологическим компаниям изготовителям, таким как UMC и TSMC (Тайвань), AMIS/OnSemi (Бельгия), Austriamicrosystems (Австрия), IHP и LFoundry (Германия). Использование данных технологий позволяет эффективно разрабатывать аналого-цифровые устройства для современных физических экспериментов с требуемыми характеристиками.

## **2. Методика сквозного проектирования, структурное и схемотехническое проектирование узлов**

Описывается предлагаемая методика (маршрут) сквозного проектирования аналого-цифровых устройств, основанная на использовании современной полупроводниковой КМОП технологии и передовых САПР, которая включает выполнение следующих этапов (см. рис.1):

- анализ технических требований;
- выбор и обоснование структурной схемы аналого-цифрового канала считывания и обработки информации;
- проведение поведенческого (структурного) моделирования, с использованием математических моделей (verilog, veriloga и др.) аналоговых и цифровых узлов;
- использование созданной SPICE модели кремниевого микрополоскового детектора с помощью технологического САПР TCAD компании Synopsys;
- выбор полупроводниковой технологии (технологического базиса) и анализ технической документации (Design Kits) фирм изготовителей;
- SPICE моделирование аналоговых узлов и амплитудного канала в целом с использованием SPICE модели детектора на основе технологических библиотек и САПР Cadence (Spectre, UltraSim), Mentor Graphics (Eldo, HSPICE); моделирование включает расчет по постоянному току, малосигнальный анализ, расчет шумовых характеристик, Worst Case (Corner) и Monte Carlo анализ;
- проведение параметрической оптимизации аналоговых узлов, поиск экстремума целевых функций в единой среде SPICE моделирования (Cadence, Neo Circuit и Mentor Graphics);

- проведение топологического проектирования аналого-цифровых узлов на основе технологических библиотек компаний изготовителей с использованием специализированных программ (Virtuoso XL, GXL, NeoCell);
- верификация разрабатываемых топологий с учетом правил проектных норм DRC, на соответствие принципиальным схемам LVS и осуществление экстракции паразитных элементов из топологий согласно правилам выбранного технологического базиса xRC;
- SPICE моделирование с учетом паразитных элементов, уточнение параметров проектируемых узлов и последующая коррекция топологий;
- создание файла в технологическом стандарте GDSII для передачи топологии микросхемы на технологическую фабрику изготовителя;
- проведение лабораторных испытаний реализованных микросхем, разработка печатных узлов с смонтированными элементами и разъемами в составе физической аппаратуры;
- подготовка технической документации (datasheet) и инструкции по применению специализированных микросхем.

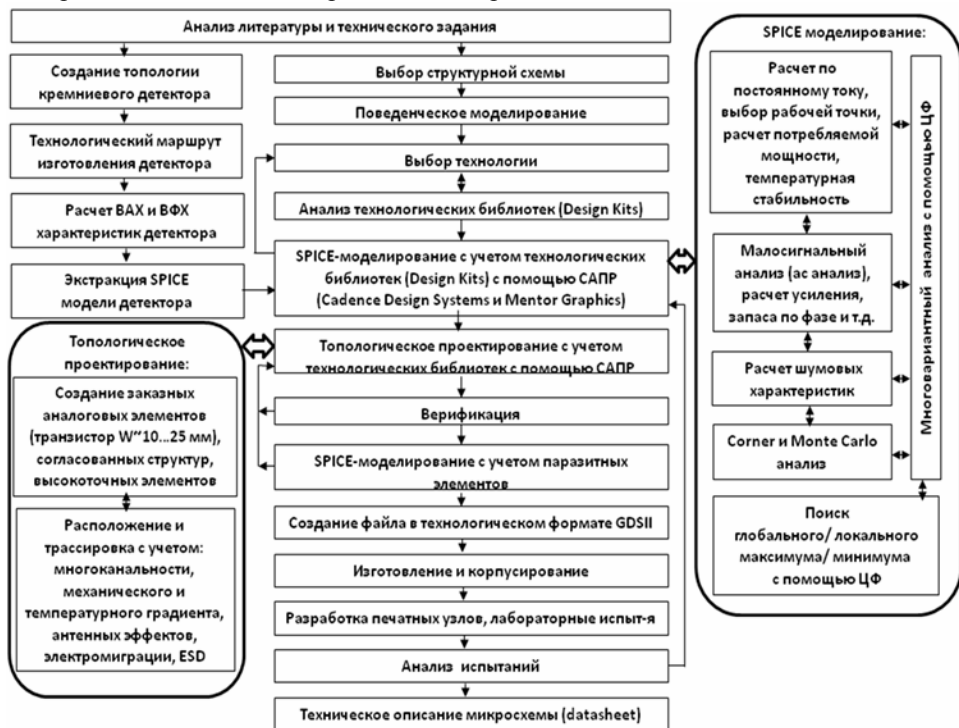


Рис. 1. Маршрут сквозного проектирования аналого-цифровых устройств в интегральном исполнении

Описывается состав входной части аналогового канала. Он состоит из зарядочувствительного усилителя (ЗЧУ), усилителя формирователя, схемы выборки-хранения и последующей цифровой обработки (мультиплексор, АЦП, выходной драйвер).

Среди аналоговых узлов амплитудного канала в диссертации более детально рассматривается ЗЧУ, который помимо усиления обеспечивает согласование с полупроводниковым детектором и минимизацию приведенного ко входу шума.

Приводится ряд разновидностей ЗЧУ (структурные и принципиальные схемы), а именно: маломушящий ЗЧУ, ЗЧУ с компенсацией токов утечки детекторов, ЗЧУ с широким динамическим диапазоном.

Передаточная характеристика ЗЧУ с широким динамическим диапазоном сверху ограничена напряжением питания ( $E_{ПИТ}$ ), а снизу шумами ( $E_{Ш}$ ). Как правило, значение динамического диапазона по заряду составляет до ста пико кулон (рис.2).

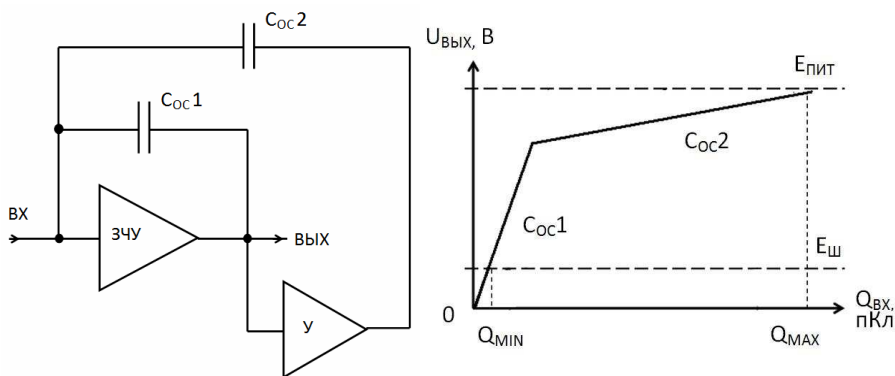


Рис. 2. Упрощенные структурная схема и передаточная характеристика ЗЧУ с широким динамическим диапазоном

Принципиальная особенность данной схемы – разделение полного динамического диапазона на два поддиапазона. Точка перелома данной характеристики выбрана при значении входного заряда, равного 3 пКл, что позволяет в области малых амплитуд обеспечить более высокий наклон передаточной характеристики и тем самым достичь лучшего отношения сигнал/шум, а в области больших сигналов – меньший наклон, обеспечивающий расширение динамического диапазона сверху. Переключение поддиапазонов происходит автоматически. Для этого к выходу ЗЧУ подключен дополнительный усилитель (У), работающий в режиме «В». В исходном состоянии и в области малых амплитуд, усилитель находится в отключенном состоянии. При более высоких

амплитудах усилитель открывается. При этом в канал ЗЧУ добавляется дополнительный конденсатор  $C_{OC2}$ , причем,  $C_{OC2} \gg C_{OC1}$ .

На рис. 3 показана принципиальная схема малошумящего ЗЧУ в среде Cadence.

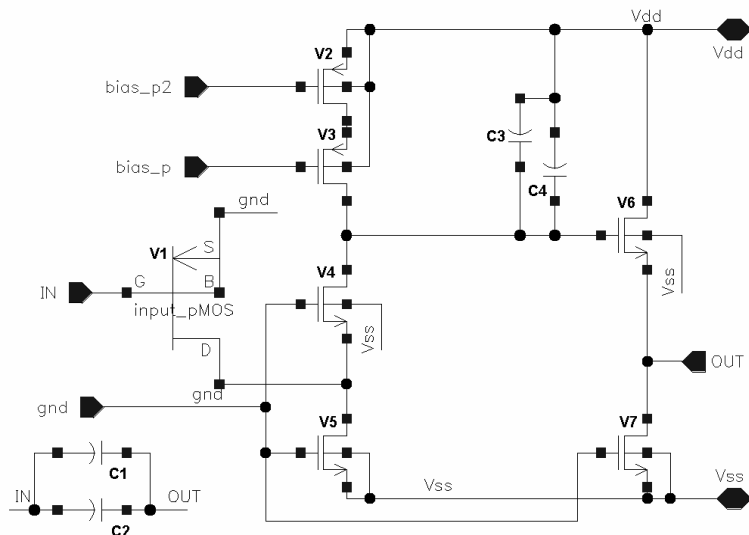


Рис. 3. Принципиальная схема ЗЧУ

Первый каскод построен по схеме каскода с параллельным питанием, на транзисторах V1 и V4. При этом в качестве входного транзистора V1 выбран полевой транзистор с P-каналом (транзистор с индуцированным каналом). Выбор типа проводимости входного транзистора обусловлен необходимостью минимизации шума типа  $1/f$  и полярностью входных сигналов. Для увеличения крутизны и минимизации шума входной транзистор имеет эквивалентную ширину канала  $W = 8000$  мкм и длину канала  $L = 0,35$  мкм. При этом входной транзистор обеспечивает крутизну порядка нескольких единиц мА/В. Транзистор V4 используется для минимизации эффекта Миллера, обусловленного проходной емкостью затвор-сток входного транзистора. Транзисторы V2, V3 и V5 работают как источники режимного тока. Второй каскод построен по схеме истокового повторителя на транзисторе V6 с динамической нагрузкой V7 и выполняет роль усилителя мощности.

Для улучшения частотной стабильности (увеличения запаса по фазе) в схему добавлены корректирующие конденсаторы C3 и C4 с суммарной емкостью 3 пФ. Эти конденсаторы подавляют возможные колебания в переходной характеристике.

Приводятся принципиальные схемы и результаты схемотехнического моделирования и других аналоговых узлов амплитудного канала.

Усилитель формирователь выполнен по схема полосового активного фильтра с многократным интегрированием типа CR-(RC)<sup>n</sup> для увеличения отношения сигнал/шум не менее 10 и с временем формирования 2,2 мкс. Устройство выборки хранения использует высокоточный конденсатор емкостью 1 пФ. Источник опорного напряжения (ИОН) с низким потреблением обеспечивает стабильное выходное напряжение 1,2 В в диапазоне температур -60...+125 С<sup>0</sup> и при изменении напряжения питания от 2,0 до 5,0 В. Благодаря проведенной оптимизации схемы ИОН удалось обеспечить ток потребления менее 10мкА и температурный коэффициент – 15 ppm/С<sup>0</sup>. В качестве примера на рис. 4 приведены результаты Monte Carlo анализа схемы ИОН:  $\sigma = 9,88\text{mВ}$  при количестве итераций N=500.

Кроме того, в диссертации приводится спроектированная и реализованная в микроэлектронном исполнении схема ФАПЧ с низким потреблением, предназначенная для формирования фазовых сигналов АЦП конвейерного типа и последующей цифровой обработкой данных.

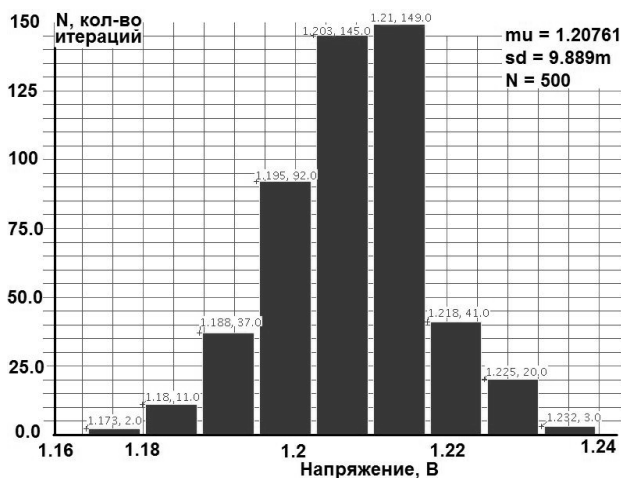


Рис. 4. Результаты Monte Carlo анализа ИОН

На основе предложенной методики сквозного проектирования разработан и реализован канал амплитудной обработки, топология которого приведена на рис. 5. Так как детекторная система является многоканальной, то топология канала спроектирована в виде вытянутого прямоугольника (полоски). Это сделано для того, чтобы выполнить требования по соотношению длины и ширины, что позволило сделать

геометрию кристалла близкой к квадратной. А это способствует повышению процента выхода годных микросхем при изготовлении.

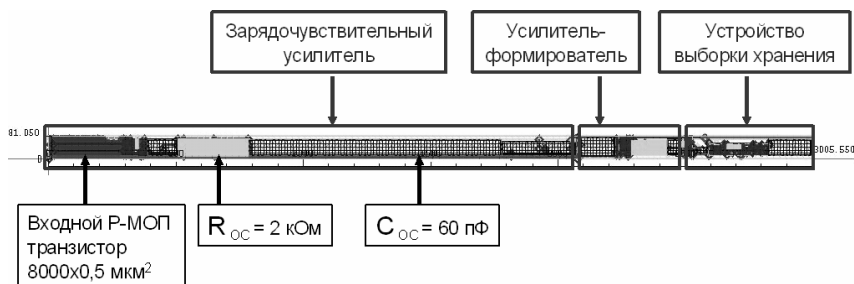


Рис. 5. Топология канала амплитудной обработки

Площадь канала составляет  $80 \times 3000 \text{ мкм}^2$ . Большую часть занимает ЗЧУ ( $80 \times 2000 \text{ мкм}^2$ ), в начале которого расположен входной P-МОП транзистор, далее резистор обратной связи  $R_{OC}$  и конденсатор  $C_{OC}$ , занимающий основную площадь ЗЧУ примерно  $60 \times 1000 \text{ мкм}^2$ . На усилитель формирователь отведена площадь  $80 \times 414,5 \text{ мкм}^2$ , а на устройство выборки хранения -  $80 \times 474,5 \text{ мкм}^2$ .

### 3. Модель кремниевого микрополоскового детектора

Как известно, кремниевые микрополосковые детекторы являются неотъемлемой частью детекторных систем физических экспериментов. Они характеризуются малыми размерами и хорошей пространственной и угловой разрешающей способностью.

В диссертации предложена модель (эквивалентная схема) микрополоскового детектора НУКЛОН в виде системы резистивно-емкостных цепочек, которая более точно описывает характеристики (в частности, шумовые) полупроводниковой структуры по сравнению с другими известными моделями, которые подробно рассмотрены в диссертации.

На рис. 6 представлена модель детектора, которая соответствует пяти микрополоскам, каждая из которых содержит элементы:  $R_{ME}$  - сопротивление металла,  $R_{P+}$  - сопротивление p+ имплантации,  $R_{МП}$  - сопротивление между микрополосками,  $R_{П}$  - сопротивление подложки,  $C_{ME}$  - емкость между металлами микрополоски,  $C_C$  - емкость окисного слоя  $\text{SiO}_2$  (емкость разделительного конденсатора),  $C_{МП}$  - емкость между микрополосками,  $C_{П}$  - емкость подложки.

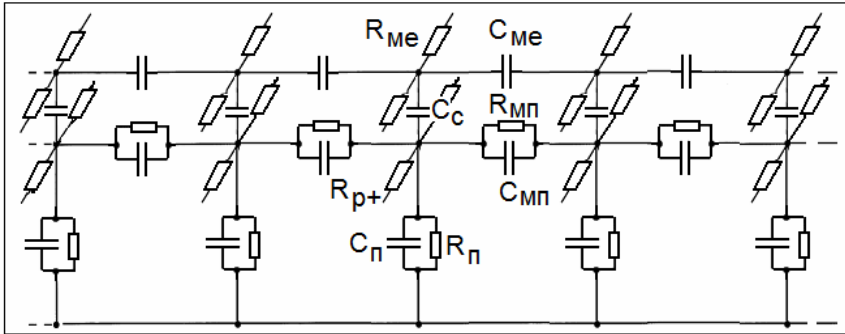


Рис. 6. Модель микрополоскового детектора НУКЛОН

Предложена методика экстракции параметров SPICE модели микрополоскового детектора с использованием технологического САПР Sentaurus (TCAD) компании Synopsys, которая включает в себя следующие этапы.

- Подготовка входных данных для маршрута проектирования: создание топологии детектора в технологическом формате файла GDSII или CIF. Данный формат содержит информацию о количествах используемых слоев (масок) при изготовлении детектора, а также название слоев и их геометрические размеры.
- Моделирование технологического маршрута изготовления детектора. При этом должны быть известны такие технологические параметры, как свойства подложки, сопротивление кремния, концентрация примеси, доза ионной имплантации, время отжига и взаимодействие с газами при диффузии, толщина окисла и металлизации, размеры пассивации и так далее.
- Сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными по основным технологическим параметрам: глубина залегания и концентрация примесей, толщина окисла образованного на поверхности детектора. При этом если результаты моделирования расходятся с экспериментальными значениями, то необходимо уточнить и скорректировать технологический процесс и повторить предыдущий этап.
- Моделирование вольт–амперных характеристик детектора. При этом рассчитываются и определяются: пробивное напряжение, ток утечки детектора, шум, распределение электрического поля на поверхности детектора, электростатический потенциал, плотность электрического тока и др. Полученные результаты используются при расчете сопротивлений модели детектора.
- Моделирование вольт– фарадных характеристик детектора. На данном этапе главной задачей является расчет зависимости емкости детектора

от приложенного напряжения  $C(V)$ . Рассчитывается напряжение полного обеднения и общая емкость детектора. Результаты моделирования используются при расчете емкостей модели детектора.

- Экстракция параметров SPICE модели микрополоскового детектора из полупроводниковой структуры. На данном этапе используется специализированный пакет программ, результатом работы которого является выходной файл в формате SPICE.

На основе предложенной методики спроектирована полупроводниковая структура микрополоскового детектора НУКЛОН, рассчитаны ВАХ и ВФХ, а также определен ряд других параметров детектора: ток утечки, электрический шум, емкость и сопротивление между микрополосками, напряжение полного обеднения, емкость разделительного конденсатора. Экстрактированы параметры SPICE модели: ток насыщения, объемное сопротивление, тепловой ток, ток при высокой инжекции, время переноса заряда, барьерная емкость при нулевом смещении, контактная разность потенциалов, коэффициент нелинейности барьерной емкости перехода, ширина запрещенной зоны, напряжение обратного пробоя, начальный ток пробоя, температурный коэффициент тока насыщения, линейный температурный коэффициент, коэффициент фликкер шума. Значения всех перечисленных параметров приведены в диссертации. Созданная модель позволила:

- перейти от простейшего представления модели кремниевого детектора в виде конденсатора (характеризующий емкость детектора) и источника постоянного тока (имитирующего ток утечки детектора) к более точной SPICE модели;

- использовать модель в различных САПР при SPICE моделировании детектора и канала амплитудной обработки, что в частности, помогло более точно рассчитать эквивалентный шумовой заряд ЗЧУ.

#### **4. Практическая реализация аналого-цифровых устройств**

Предложен маршрут топологического проектирования многоканальных СИМС, учитывающий особенности разрабатываемых микросхем и рекомендации фирм изготовителей. Ключевыми этапами этого маршрута являются:

- Определение геометрических размеров узлов (элементов) и выбор оптимального соотношения ширины и длины амплитудного канала. Так ширина канала составляет десятки микрон, а длина достигает единицы миллиметров. Расчет количества «fingers» (пальцев) и используемых фиктивных элементов для эквивалентной ширины канала входного транзистора от 1,0 до 50,0 мм.

- Взаимное расположение аналоговых узлов, портов входов-выходов, трассировка шин питания. Структура топологии канала



представляет следующую последовательность узлов: калибровочный конденсатор, ЗЧУ, усилитель формирователь, источник опорных потенциалов, устройство выборки хранения и цифровая часть с последующим выходным драйвером. Характерная ширина шин в канале составляет 5...15 мкм. При этом по всей длине шин (единицы миллиметров) обеспечивается контакт с подложкой для шины земли, а для шины питания – контакт с карманом.

- Разработка топологии заказных элементов: высокоточный конденсатор (емкость хранения, калибровочный), входной МОП транзистор ЗЧУ, симметричные дифференциальные пары усилителей, согласованные матрицы резисторов и конденсаторов.

Ниже рассматриваются СИМС, разработанные и реализованные с непосредственным участием автора. Так, для эксперимента НУКЛОН, разработан и изготовлен комплекс СИМС по КМОП технологии с проектными нормами 0,35 мкм компании AMIS/OnSemi, Бельгия: 16-и канальный малощумящий ЗЧУ; 4-х и 6-и канальные аналого-цифровые устройства с низким энергопотреблением; 32-х канальная микросхема амплитудной обработки с широким динамическим диапазоном.

Спроектированные и реализованные 4-х и 6-и канальные аналого-цифровые устройства, предназначены для отработки структурных и схемотехнических решений. Эти устройства содержат аналоговую и цифровую части, а также два тестовых канала с выводением на внешние контактные площадки промежуточных точек, что позволяет более детально исследовать поведение отдельных узлов.

Цифровая часть микросхемы выполняет две основные функции: калибровка каналов и «post»-аналоговая обработка, выполняемая мультиплексором и сдвиговым регистром. На рис.7 приведена топология 6-и канальной микросхемы, площадь которой составляет 2,0×4,0 мм<sup>2</sup>.

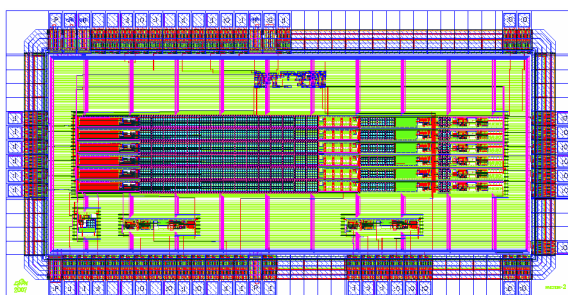


Рис. 7. Топология 6-и канальной СИМС

8-и канальная СИМС ЗЧУ с компенсацией токов утечек детектора (до 1 мкА) состоит из каналов амплитудной обработки, усилителя-формирователя, быстродействующего тактируемого компаратора и

программируемого ЗЧУ (рис.8). Аналоговый канал включает в себя ЗЧУ, источник опорных потенциалов (микротоков) и схему обратной связи.

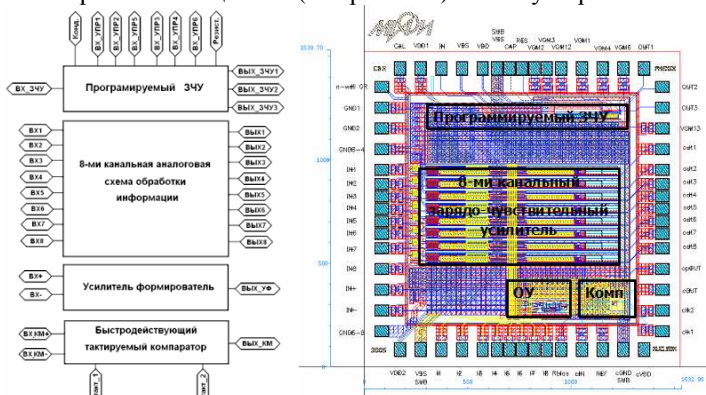


Рис. 8. Структура и топология 8-ми канальной СИМС

Микросхема спроектирована по 0,18 мкм КМОП технологии компании UMC и занимает на кристалле площадь  $1,5 \times 1,5 \text{ мм}^2$ . Одна из особенностей данной микросхемы заключается в создании и использовании заказных контактных площадок с минимальными размерами  $56 \times 69 \text{ мкм}^2$ , которые реализованы с использованием шести слоев металла и пяти слоев межсоединений, что позволило расположить на кристалле 60 площадок, вместо 48 стандартных. Электрические параметры СИМС приведены в табл. 2.

16-и канальная СИМС малошумящего ЗЧУ содержит два операционных усилителя с динамическим диапазоном от отрицательной до положительной шины питания, которые могут использоваться для построения усилителя формирователя, а также в качестве повторителя в схеме выборки-хранения (рис. 9).

С учетом жестких требований, предъявляемыми к системе обработки информации в космических условиях, разработанная СИМС обеспечила считывание сигналов микрополосковых детекторов в диапазоне  $0,1 \dots 9,0 \text{ пКл}$  (по заряду) при отношении сигнал-шум более 10 с учетом ограниченного потребления.

Основное внимание при проектировании данного малошумящего ЗЧУ уделено повышению крутизны входного транзистора при низком токе потребления, а также быстродействию и шумам усилителя. Для этого использован полевой транзистор с эквивалентной шириной канала 50 мкм, что обеспечило крутизну транзистора 280 мА/В. Площадь разработанной СИМС составляет  $4,0 \times 2,0 \text{ мм}^2$ . Оригинальность топологии подтверждена свидетельством о госрегистрации ИМС. Основные характеристики данной ИМС приведены в табл. 2.

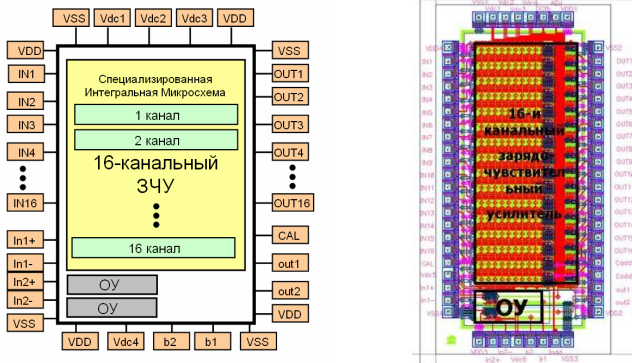


Рис. 9. Структура и топология 16-и канальной СИМС

На основе предложенной автором методики сквозного проектирования разработана и реализована 32-х канальная специализированная микросхема с широким динамическим диапазоном. На рис. 10 показана структурная схема микросхемы и ее топология, которая также защищена свидетельством о госрегистрации ИМС. Площадь микросхемы составляет  $4,0 \times 4,0 \text{ мм}^2$ .

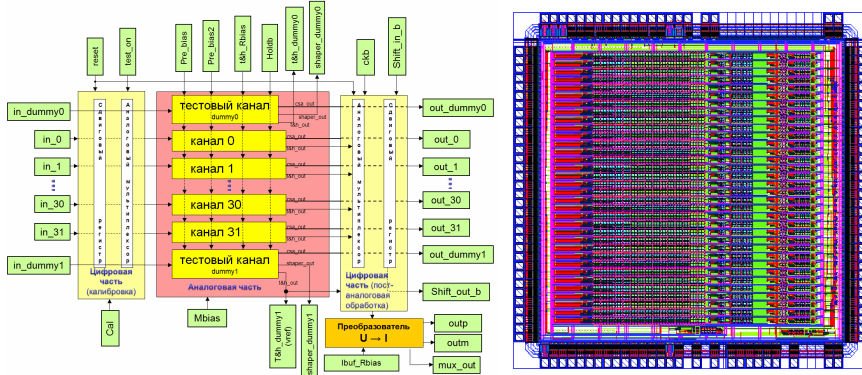


Рис. 10. Структура и топология 32-х канальной СИМС

В диссертации приведены результаты испытаний, которые проведены на измерительном стенде в лаборатории НИИЯФ МГУ. Стенд включал в себя, как аппаратные (осциллограф LeCroy 9304a, Tektronix TDS3034, Tektronix TDS2014, генератор импульсов HP33120A, тестовая плата Spartan 3E, блоки питания, преобразователь уровня сигналов, ЦАП SPT6219 и др.) так и специализированные программные (LabView, OS Spartan 3e, программа обработки Root) средства тестирования.

В качестве примера на рис. 11 приводится экспериментальная передаточная характеристика канала амплитудной обработки сигналов.

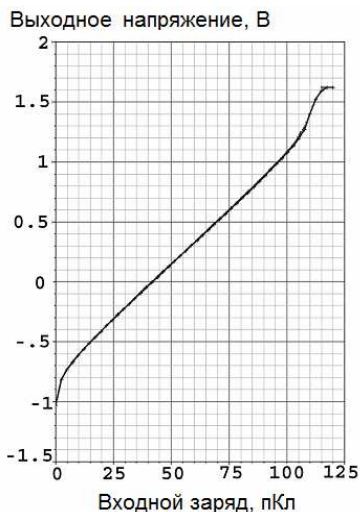


Рис. 11. Передаточная характеристика амплитудного канала

Основные характеристики аналого-цифровых устройств, реализованных в виде СИМС, приведены в табл. 2. Там же для сравнения указаны характеристики ближайшего функционального аналога ИМС VA32HDR14 компании IDEAS, Норвегия.

Полученные результаты позволяют утверждать, что по совокупности электрических характеристик (динамический диапазон, потребление и шум), реализованная ИМС не имеет аналогов в России и за рубежом.

Таблица 2.

Параметр	VA32 HDR14	Нуклон-32	Нуклон16	СВМ 8
Число каналов, шт	32	32	16	8
Состав канала	ЗЧУ, УФ, УВХ	ЗЧУ, УФ, УВХ	ЗЧУ+ ИОН	ЗЧУ+ ИОН+ОС
Проектные нормы, мкм	0,35	0,35	0,35	0,18
Коэффициент усиления, мВ/фКл	5	м.с. – 1,5 б.с. – 20 мВ/пКл	3	5
Динамический диапазон, пКл	25	> 100	9	7
Эквивалентный шумовой заряд, электрон	2700+50е/пФ при $C_d=20\text{пФ}$	8500+8е/пФ при $C_d=100\text{пФ}$	$\leq 2000$ при $C_d=100\text{пФ}$	$\leq 2000$ при $C_d=100\text{пФ}$
Потребляемая мощность, мВт/канал	2,0	< 2,0	1,0	1,2

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

**Основной научный результат** заключается в развитии методики сквозного проектирования аналого-цифровых устройств амплитудной обработки сигналов кремниевых микрополосковых детекторов на основе современных САПР (Cadence, Mentor Graphics, Synopsys), что позволило в конечном счете реализовать комплекс микросхем по полупроводниковой КМОП технологии с проектными нормами 0,18...0,35 мкм для

электронной аппаратуры космического эксперимента НУКЛОН (Роскосмос, Россия) и международного физического эксперимента СВМ (FAIR, Германия).

#### **Основной теоретический результат**

В диссертации созданы, развиты и обоснованы методики проектирования, модели и критерии оценки устройств амплитудной обработки сигналов микрополосковых детекторов, позволяющие существенно сократить время разработки и обеспечить точность требуемых характеристик.

#### **Частные теоретические результаты**

Развита общая методика проектирования аналоговых трактов, включающая выбор элементной базы, параметрическую оптимизацию узлов тракта с учетом Corner и Monte Carlo анализа, выбор наилучшего варианта, разработку топологии и моделирование с учетом экстракции паразитных элементов, данная методика позволяет достичь оптимального комплекса параметров.

Предложены критерии качества аналого-цифровых устройств и их отдельных узлов, позволяющие проводить сравнение различных вариантов данных устройств. Проведен сравнительный анализ известных на сегодняшний день специализированных интегральных микросхем.

Предложен и обоснован способ расширения динамического диапазона зарядочувствительного усилителя.

Создана методика расчета параметров эквивалентной схемы микрополоскового детектора, позволяющая моделировать детектор и считывающую электронику в едином цикле проектирования.

#### **Основной практический результат**

Впервые разработана и реализована отечественная 32-х канальная специализированная интегральная микросхема для съема и обработки сигналов кремниевых микрополосковых детекторов по полупроводниковой КМОП технологии с проектными нормами 0,35 мкм, с широким динамическим диапазоном - более 100 пКл и низким потреблением - менее 2,0 мВт/ канал.

#### **Частные практические результаты**

Спроектирован и реализован комплекс специализированных интегральных микросхем для использования в составе амплитудных аналого-цифровых трактов для многоканальных микрополосковых детекторов:

- 4-х и 6-и канальные прототипные аналого-цифровые устройства амплитудной обработки сигналов микрополосковых детекторов;
- 8-и канальный зарядочувствительный усилитель с компенсацией токов утечек детектора до 1мкА;
- 16-и канальный маломушящий зарядочувствительный усилитель с эквивалентным шумовым зарядом менее 2000 электронов.

Разработанные микросхемы реализованы по современным КМОП технологиям с проектными нормами 0,18...0,35 мкм. Оригинальность топологий микросхем подтверждена свидетельствами о государственной регистрации.

Таким образом, в ходе работы над диссертацией достигнута ее главная цель – развита методика сквозного проектирования микроэлектронных аналого-цифровых устройств амплитудной обработки сигналов кремниевых микрополосковых детекторов, а также разработана и реализована не имеющая аналогов в России и за рубежом 32-канальная специализированная микросхема с широким динамическим диапазоном и малым энергопотреблением. Данная микросхема позволяет заметно улучшить качество физической и космической аппаратуры.

### **Список работ, опубликованных по теме диссертации**

1. Аткин Э.В., Волков Ю.А., Воронин А.Г., Ильющенко И.И., Силаев А.С., Феденко А.Ю. Многоканальный зарядово-чувствительный усилитель для регистрации сигналов двухсторонних кремниевых детекторов трековой системы проекта СВМ // Приборы и техника эксперимента, 2010. – №4. – С.57-60.

2. Аткин Э.В., Волков Ю.А., Силаев А.С. и др. Интегральная микросхема для регистрации сигналов кремниевых детекторов // Приборы и техника эксперимента, 2010. – №2. – С.62-73.

3. Силаев А.С. Оптимизация характеристик источника опорного напряжения // Электроника, микро- и нанoeлектроника. Сб. научн. трудов. / Под ред. В.Я. Стенина. – М.: НИЯУ МИФИ, 2010. – С. 221-224.

4. Воронин А.Г., Меркин М.М., Силаев А.С. SPICE модель кремниевого микрополоскового детектора // Научная сессия МИФИ – 2010. Аннотации докладов. Т.1. Ядерная физика и энергетика М.: НИЯУ МИФИ, 2010. – С.158.

5. Atkin E., Klyuev A., Silaev A., Fedenko A., Karmanov D., Merkin M., Voronin A. Integrated circuit readout for the silicon sensor test station // arXiv.org : Архив электронных препринтов. 2009. URL: <http://arxiv.org/pdf/0906.2063v1>.

6. Yu.A. Volkov, A.S. Silaev. Silicon microstrip detector model for readout electronics // Proceedings of XXII International Symposium on Nuclear Electronics and Computing. – 2009. – P. 250-252.

7. Yu.A. Volkov, A.S. Silaev. A micropower phase-locked loop IC for processing the signals of silicon detectors // Proceedings of XXII International Symposium on Nuclear Electronics and Computing. – 2009. – P. 247-249.

8. E. Atkin, I. Ilyushchenko, D. Semenov, A. Silaev, A. Voronin. Optimization of a CSA IC for silicon microstrip detectors // Proceedings of XXII International Symposium on Nuclear Electronics and Computing. – 2009. – P. 54-56.

9. Силаев А.С. Микромощный ФАПЧ с умножением частоты // Научная сессия МИФИ – 2009. Аннотации докладов. Т.1. Ядерная физика и энергетика М.: МИФИ, 2009. - С.187.

10. Аткин Э.В., Воронин А.Г., Клюев А.Д., Силаев А.С. Специализированная ИМС обработки аналоговых сигналов для кремниевых детекторов // Электроника, микро- и нанoeлектроника. Сб. научн. трудов / Под ред. В.Я. Стенина. – М.: МИФИ, 2007. – С.107-112.

11. Аткин Э.В., Силаев А.С. 16-канальная СИМС ЗЧУ для микрополосковых детекторов // Научная сессия МИФИ – 2007. Сб. научн. трудов. Т.1. М.: МИФИ, 2007. - С.130.

12. Э.В. Аткин, Ю.А. Волков, А.Г. Воронин, А.В. Смирнов, А.С. Силаев, В.А. Толочко. 8-канальный зарядочувствительный усилитель в интегральном исполнении // Научная сессия МИФИ – 2006. Сб. научн. трудов. Т.1. М.: МИФИ, 2006. С.152-155.

13. Atkin E., Bocharov Yu., Ilyushchenko I., Klyuev A., Silaev A., Simakov A., Smirnov A., Voronin A., Ejov V., Fedenko A. Development of building blocks for data driven architecture for the CBM microstrip detectors // CBM progress report. – 2006. – P.146-149.

14. E. Atkin, Yu. Volkov, A. Voronin, A. Smirnov, A. Silaev, V. Tolochko 0.18um CSA ASIC for Microstrip Detectors // Proceedings of XX-th International Symposium on Nuclear Electronics. – 2005. – P.89-92.

15. Масленников В.В., Демин А.А., Зо Мин Аунг, Силаев А.С. Возможности реализации гираторных фильтров на основе аналоговых базовых матричных кристаллов // Радиотехника, 2005. – №12. – С.87-95.

16. Аткин Э.В., Ильющенко И.И., Силаев А.С. Амплитудный канал обработки сигналов микрополосковых детекторов // Научная сессия МИФИ – 2005. Сб. научн. трудов. Т.1. М.: МИФИ, 2004. – С.171-172.

17. Силаев А.С. Моделирование характеристик зарядочувствительного усилителя сигналов кремниевых детекторов // Электроника микро- и нанoeлектроника. Сб. науч. трудов / Под ред. В.Я. Стенина. – М.: МИФИ, 2004. – С.120-122.

18. E. Atkin, A. Demin, A. Goldsher, I. Ilyushchenko, M. Khokhlov, V. Maslennikov, V. Meshcheriakov, A. Siaev, Yu. Volkov Development of Ics for Radiation Detector Signal Read-Out, Based on Analog Semicustom Arrays // Proceedings of XIX International Symposium on Nuclear Electronics and Computing. – 2003. – P.74-81.

19. Аткин Э.В., Волков Ю.А., Дмитриев Ю.В., Ильющенко И.И., Мишин Ю.Н., Плешко А.Д, Силаев А.С., Субботин В.Т., Черников В.И. Оптоэлектронный блок регистрации сигналов детекторов ионизирующих излучений // Электроника микро- и нанoeлектроника. Сб. науч. трудов. – М.: МИФИ, 2003. – С.106-113.

20. Жуков В.С., Силаев А.С. Моделирование статических характеристик биполярного транзистора при масштабировании //

Электроника микро- и нанoeлектроника . Сб. науч. Трудов / Под ред. В.Я. Стенина. – М: МИФИ, 2003. – С.90-91.

21. Силаев А.С. Экспериментальные и теоретические исследования зависимости сопротивления полупроводникового резистора от температуры // V Международная научно-практическая конференция «Фундаментальные и прикладные проблемы приборостроения, информатики, экономики и права». МГАПИ. – 2002. – С.188-191.

### **Свидетельства о государственной регистрации ТИМС**

1. Аткин Э.В., Волков Ю.А., Воронин А.Г., Силаев А.С. Шестнадцатиканальная интегральная микросхема малощумящего зарядочувствительного усилителя // Свидетельство о государственной регистрации ТИМС ФИПС №2010630036 от 03.03.2010.

2. Аткин Э.В., Волков Ю.А., Воронин А.Г., Силаев А.С. и др. Тридцатидвухканальная интегральная микросхема для проекта «Нуклон» федерального космического агентства Роскосмос // Свидетельство о государственной регистрации ТИМС ФИПС №2010630090 от 08.09.2010.

3. Аткин Э.В., Бочаров Ю.И., Волков Ю.А., Силаев А.С. и др. Четырехканальная специализированная интегральная микросхема для считывания сигналов микрополосковых кремниевых детекторов // Свидетельство о государственной регистрации ТИМС ФИПС №2010630091 от 17.09.2010.

### **Список отчетов по НИОКР, в которые вошли результаты диссертации**

1. Микросистема на кристалле с новой архитектурой, управляемой потоком данных, для многоканальных микрополосковых детекторов. Итоговый отчет. М.: МИФИ, 2005.

2. Развитие и исследование новых методов селекции обрабатываемых аналоговых данных и их логической фильтрации. Отчеты за 1-3-й этапы проекта ФЦП №2.2.2/1906 - № ГР01200963038. М.: НИЯУ МИФИ, 2009.

3. Исследование и развитие новых методов построения считывающей электроники, управляемой потоком данных, для многоканальных датчиков в ядерно-физических экспериментах. Отчет за 1-3-й этапы проекта ФЦП №2.1.2/2877- № ГР012009606/74. М.: НИЯУ МИФИ, 2009.

4. Разработка и исследование электронной компонентной базы нового поколения для ядерно-физической и космической аппаратуры. Отчет за 1-й этап ФЦП №2010-1.1-219-141-022 - №ГР01201064154. М.: НИЯУ МИФИ, 2010.

Автор выражает свою благодарность и признательность за помощь и внимание профессору Волкову Юрию Алексеевичу, а также к.т.н. Аткину Эдуарду Викторовичу и к.ф.-м.н. Меркину Михаилу Моисеевичу за неоценимые научные консультации соответственно по вопросам проектирования микрoeлектронных схем и кремниевых микрополосковых детекторов.