

На правах рукописи

Маланкин Евгений Звонимирович

**АДАПТИВНЫЕ ТРАКТЫ КМОП ИНТЕГРАЛЬНЫХ
МИКРОСХЕМ ДЛЯ МНОГОКАНАЛЬНЫХ ГАЗОВЫХ
ЭЛЕКТРОННЫХ УМНОЖИТЕЛЕЙ**

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

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Автор:



Маланкин Евгений Звонимирович

Москва – 2018 г.

Диссертация выполнена в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ»

Научный руководитель: **Аткин Эдуард Викторович**,
кандидат технических наук, доцент
НИЯУ МИФИ, г. Москва

Официальные оппоненты: **Басиладзе Сергей Геннадьевич**,
доктор технических наук, профессор,
заведующий лабораторией НИИЯФ
МГУ

Тимошенко Александр Геннадиевич,
кандидат технических наук, доцент
кафедры телекоммуникационных
систем, НИУ «МИЭТ»

Ведущая организация: Международная межправительственная
организация Объединенный институт
ядерных исследований (ОИЯИ)

Защита диссертации состоится 28 июня 2018 г. в 16 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 212.130.13 в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ» по адресу 115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31, тел. (499) 788-56-99.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ и на сайте <http://ods.mephi.ru>.

Автореферат разослан « » _____ 2018 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба направить по адресу: 115409, Москва, Каширское шоссе, 31, диссертационные советы НИЯУ МИФИ.

Ученый секретарь
диссертационного совета
НИЯУ МИФИ к.т.н.,



Веселов Д. С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

Диссертация посвящена решению актуальной научно-технической задачи разработки адаптивных трактов в составе КМОП интегральных микросхем для многоканальных газовых электронных умножителей.

Актуальность проблемы

Новые физические эксперименты на ускорителях LHC, FAIR, NICA, ILC диктуют жесткие требования к детекторам и электронике по числу каналов, быстродействию, шумам, потребляемой мощности и площади. Планируется значительное увеличение светимости ускорителей и высокие входные загрузки детекторов (до 10 МГц – FAIR, до 40 МГц – LHC). Для этого требуется существенное увеличение быстродействия детекторов и считывающей электроники.

Газовые детекторы широко применяются в установках крупных физических экспериментов. Технологии изготовления газовых детекторов постоянно совершенствуются. Появляются новые типы газовых детекторов, уровень быстродействия которых достигает 10 МГц. По координатному разрешению газовые детекторы приблизились к полупроводниковым (пиксельные детекторы – 1 мкм, полосковые детекторы 25 - 50 мкм, 50 - 70 мкм - газовые).

Новым типом газовых детекторов, отвечающим требованиям современных экспериментов являются микро-структурные газовые детекторы (МСГД). К МСГД относятся: микрополосковые газовые счетчики, Micromegas и газовые электронные умножители (ГЭУ). Практически все современные детекторные установки крупных физических экспериментов, в частности модернизируемые установки в CERN (ATLAS, CMS, LHCb и ALICE), новые эксперименты CBM на ускорительном комплексе FAIR (Германия) и установки MPD и SPD на коллайдере NICA (Россия) будут включать в себя до нескольких миллионов каналов МСГД.

Среди МСГД наиболее широкое применение в указанных экспериментах нашли газовые электронные умножители (ГЭУ, *англ. GEM – gas electron multipliers*). ГЭУ обладают высоким газовым усилением, могут работать при высоких загрузках и криогенных температурах.

Детекторные установки на основе ГЭУ в экспериментах на ускорителях имеют гранулярную структуру. В пределах одной установки, основанной на

ГЭУ могут использоваться детекторы с различными размерами анодной площадки для оптимизации характеристик установки по критерию быстродействия, шумовых свойств, числа каналов, потребления и т.д. Размер анодной площадки ГЭУ может варьироваться от нескольких миллиметров до нескольких сантиметров. Это означает, что емкость детекторов может иметь большой разброс в пределах от 1 до 150 пФ. Такой диапазон значительно шире, чем у твердотельных координатных детекторов (например, 20-30 пФ для кремниевых микрополосковых детекторов, до 100 фФ – пиксельные детекторы, сотни фФ – кремниевые дрейфовые детекторы). Увеличение эквивалентной емкости приводит к росту собственных шумов электроники и сдвигу оптимальной постоянной времени усилителя-формирователя (УФ) в сторону увеличения, что противоречит необходимости уменьшения постоянной времени вследствие роста входной загрузки в канале. Поиск оптимального решения по быстродействию и энергетическому разрешению тракта приводит к необходимости применения адаптивного подхода при проектировании трактов считывающей электроники ГЭУ. Под адаптивным подходом здесь понимается способность формирователя варьировать временем формирования сигнала в зависимости от входной загрузки так, чтобы не пропускать события в периоды пиковых значений входной загрузки и максимизировать отношение сигнал шум в периоды, когда входная загрузка не велика.

Данная работа посвящена решению актуальных задач по созданию методики структурного, схемотехнического и топологического проектирования адаптивных трактов считывания сигналов многоканальных газовых электронных умножителей в технологии КМОП. Работа нацелена на создание считывающей электроники нового поколения для мюонной камеры эксперимента CBM на ускорителе FAIR.

Состояние исследований по теме

В настоящее время большое количество публикаций посвящено тематике проектирования специализированных интегральных микросхем (СИМС, *от англ. ASIC – application specific integrated circuit*) считывания сигналов многоканальных детекторов. Среди множества зарубежных публикаций по рассматриваемой тематике следует отметить работы Р. Grybos, R. Szczygiel и М. Idzik (AGH, Польша), М. Bregant (Университет Сан Пауло, Бразилия),

А. Marchioro (ЦЕРН, Швейцария), Р. Fischer (Гейдельбергский Университет, Германия). В публикациях рассмотрены проблемы проектирования микросхем считывания для различных многоканальных детекторов, но отсутствует описание прямых прототипов предложенного в данной работе адаптивного тракта.

Среди отечественных работ можно выделить учебное пособие «Электронные методы съема, отбора и регистрации данных ядернофизического эксперимента» и публикации «Специализированные интегральные схемы для детекторов ионизирующих излучений» и «Специализированные интегральные схемы в системах радиационных измерений» С. Г. Басиладзе, посвященные аппаратуре физического эксперимента, монографию «Ядерная электроника» А. П. Цитовича, учебное пособие Гаврилова Л. Е. «Основы ядерной электроники» и монографию Казеннова Г. Г. «Основы проектирования интегральных схем и систем».

Выполнен ряд диссертационных работ, близких к данному исследованию по предметной области и тематике. В диссертации В. В. Шумихина «Маломощные амплитудные тракты КМОП интегральных микросхем для микрополосковых детекторов» (НИЯУ МИФИ, 2013 г.) рассмотрены вопросы схемотехнического проектирования и оптимизации потребляемой мощности амплитудного тракта, но не рассматриваются вопросы оптимизации амплитудного разрешения тракта в условиях повышенной входной загрузки.

В диссертации А. Д. Ключева «Методы и средства обработки сигналов многоканальных детекторов устройствами, управляемыми потоком данных» (НИЯУ МИФИ, 2010 г.) исследованы вопросы уменьшения потерь данных за счет применения алгоритмов дерандомизации, но не исследованы возможности повышения загрузочной способности такта за счет автоматической перестройки параметров тракта в зависимости от интенсивности прихода сигналов на входы микросхемы.

В работах, посвященных считывающей электронике ГЭУ, недостаточно полно отражены обобщённые данные по методам структурного, схемотехнического и топологического проектирования адаптивных трактов в составе КМОП интегральных микросхем.

Вопросам исследования адаптивных трактов для многоканальных ГЭУ и обобщения методов их проектирования посвящено данное диссертационное исследование

Целью диссертации является создание адаптивных трактов в составе КМОП интегральных микросхем считывания сигналов многоканальных газовых электронных умножителей на основе разработанной структурной схемы и методики проектирования, нацеленной на оптимизацию пропускной способности, шумов и площади тракта.

Для достижения этой цели был использован комплексный подход, включающий решение следующих взаимосвязанных теоретических и экспериментальных задач:

1. Анализ особенностей детекторных систем на основе ГЭУ, а также структурных и топологических решений современных многоканальных микросхем считывания.
2. Разработка базового структурного решения адаптивного тракта для считывания сигналов ГЭУ, позволяющего оптимизировать время формирования в зависимости от уровня входной загрузки и эквивалентной емкости ГЭУ.
3. Разработка методики проектирования адаптивных трактов микросхем для считывания и обработки сигналов многоканальных ГЭУ.
4. Создание специализированного маршрута проектирования микросхем с адаптивной структурой тракта для считывания сигналов многоканальных ГЭУ с использованием современных средств микроэлектронных САПР.
5. Разработка схемно-топологических решений для адаптивного узла
6. Апробация разработанных структуры, методики и маршрута при проектировании адаптивных трактов в составе микросхем считывания и обработки сигналов многоканальных ГЭУ.
7. Разработка стенда и проведение лабораторных исследований опытных образцов специализированных ИМС для многоканальных ГЭУ.

Научная новизна работы:

1. Предложена и обоснована новая адаптивная структура тракта для считывания и обработки сигналов многоканальных ГЭУ, позволяющая повысить пропускную способность тракта до нескольких мегагерц за счет изменения времени формирования, в зависимости от величины входной загрузки и эквивалентной емкости ГЭУ.
2. Предложен критерий оптимизации параметров адаптивного тракта по пропускной способности, шумам и площади на кристалле, основанный на анализе наложений сигналов и собственных шумов тракта.

3. Разработана методика проектирования адаптивных трактов микросхем считывания для многоканальных ГЭУ, позволяющая максимизировать пропускную способность адаптивного тракта, за счет чего удалось повысить пропускную способность до 2 МГц.

4. Предложен специализированный маршрут проектирования многоканальных микросхем считывания с адаптивными трактами, позволяющий сократить время моделирования в 10 раз за счет использования высокоуровневой модели адаптивного тракта и источника входных сигналов, а также учесть влияние на работу канала цифровых помех, распространяемых по подложке кристалла.

Практическая ценность:

1. С использованием предложенного структурного решения разработана и изготовлена 32-канальная специализированная микросхема считывания сигналов многоканальных ГЭУ для мюонной системы международного эксперимента CBM на ускорителе FAIR. За счет применения адаптивного структурного решения удалось достичь уровня пропускной способности трактов 2 МГц.

2. На основе предложенной методики и маршрута разработаны и изготовлены специализированные 8-канальная и 2-канальная микросхемы считывания сигналов многоканальных ГЭУ. С помощью данных микросхем были проведены лабораторные исследования совместно с прототипом мюонного детектора CBM на основе ГЭУ.

3. Разработан стенд для лабораторных исследований и характеристики многоканальных микросхем считывания ГЭУ. Проведены лабораторные исследования опытных образцов изготовленных микросхем.

4. Получен патент на изобретение РФ Аткин Э. В., Иванов В. В., Маланкин Е. З., Самсонов В. М. // Свидетельство о выдаче патента на изобретение РФ №2564956 от 10 октября 2015 г.

5. Разработаны лабораторные работы по курсу «Основы ядерной электроники» специальности «Электроника и автоматика физических установок», выпущены учебные пособия:

Э. В. Аткин, Ю. И. Бочаров, В. А. Бутузов, Ю.А. Волков, А. А. Куков, Е. З. Маланкин, Д. Л. Осипов, А. Б. Симаков. // Проектирование элементов аналого-цифровых интегральных микросхем: Лабораторный практикум – М.: НИЯУ МИФИ, 2012, 56 с.

Э. В. Аткин, Ю.А. Волков, П. Ю. Иванов, Е.З. Маланкин, Д. Д. Норманов, В.В. Шумихин. // Проектирование и анализ аналоговых интегральных схем с использованием САПР Cadence /. – М.: НИЯУ МИФИ, 2017. 67 с.

6. Результаты диссертации использовались в НИР, выполненных при поддержке Минобрнауки (Постановлению Правительства РФ №220 по договору от 24 июня 2013 г. № 14.А12.31.002) в «Лаборатории проектирования специализированных интегральных микросхем» на базе кафедры «Электроника» НИЯУ МИФИ.

Результаты, выносимые на защиту:

1. Базовое структурное решение адаптивного тракта микросхем считывания и обработки сигналов многоканальных ГЭУ.
2. Методика проектирования адаптивных микросхем считывания для многоканальных ГЭУ, позволяющая достичь оптимальных значений пропускной способности и шумов при различных уровнях входной загрузки.
3. Маршрут проектирования многоканальных микросхем считывания с адаптивными трактами, позволяющий снизить время проектирования и повысить достоверность результатов моделирования за счет использования модели источника и трактов, написанных на языке Verilog-A, а также за счет анализа распространения помех по подложке кристалла.
4. Практическая реализация адаптивности считывающих трактов в составе специализированных интегральных 8-канальной и 2-канальной микросхем для лабораторных исследований прототипов ГЭУ и 32-канальной микросхемы для мюонной системы эксперимента СВМ (Дармштадт, Германия)
5. Результаты лабораторных исследований опытных образцов многоканальных СИМС для считывания сигналов многоканальных ГЭУ, подтверждающие целесообразность и эффективность использования примененных при проектировании решений.

Апробация работы

Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на научно-технических конференциях и семинарах: XXIV International Symposium on Nuclear Electronics & Computing (NEC'2013), Научные сессии НИЯУ

МИФИ, Topical Workshop on Electronics for Particle Physics (TWEPP – 2014, 2015, 2016), International Workshop on Radiation Imaging Detectors (iWorld–2015, 2016), совещания международной коллаборации эксперимента CBM, International Conference on Particle Physics and Astrophysics (ICPPA - 2015, 2016).

Результаты диссертации опубликованы в 23 печатных работах, в том числе 17 – в журналах, включенных в базу SCOPUS и/или Web of Science, 5 из которых включены в список журналов, рекомендуемых ВАК РФ.

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, двух приложений и списка литературы. Общий объем диссертации 125 страниц, включая 72 рисунка и 11 таблиц. Список литературы включает 114 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Анализ построения микросхем считывания сигналов многоканальных газовых электронных умножителей

Множество детекторов физических экспериментов на ускорителях LHC, NICA, FAIR, ILS и т.д., строятся на основе газовых детекторов, работающих в лавинном режиме. Наиболее широко применимыми детекторами этого класса являются газовые электронные умножители. Об этом свидетельствует большое число (несколько сотен) публикаций за последние годы.

В многоканальных детекторных системах на основе ГЭУ для уменьшения числа каналов, оптимизации быстродействия, шумов, потребляемой мощности т.д. считывающие электроды имеют различную гранулярность (площадь анода от нескольких мм² до нескольких см²), при этом детекторная емкость может варьироваться в диапазоне 1 – 150 пФ. Поиск оптимального решения для считывающего тракта по быстродействию, шумам, площади и потребляемой мощности в условиях, когда параметры детектора и сигналов меняются в широком диапазоне в пределах одной установки, приводит к необходимости динамически варьировать временем формирования сигнала в зависимости от входной

загрузки так, чтобы минимизировать потери полезных сигналов в условиях высоких входных нагрузок.

Анализ литературных источников показал, что на данный момент существует ряд прототипов, близких по параметрам к требованиям современных многоканальных детекторных систем (см. Таблицу 1). Микросхема STS-XYTER (AGH, Краков) для кремниевой трековой системы эксперимента CBM включает в себя 128 каналов считывания. STS-XYTER работает в режиме самозапуска и осуществляет измерения амплитуды и временной метки сигнала. Недостатком данной микросхемы является невозможность увеличивать пропускную способность канала при высоких нагрузках больше 150 кГц. Динамический диапазон до 12 фКл и диапазон емкостей детектора до 30 пФ не позволяет использовать данную микросхему для считывания сигналов детекторов на основе ГЭУ.

Наиболее близкой к требованиям газовых детекторов микросхемой является SAMPА. Она работает в широком диапазоне детекторных емкостей (~80 пФ) и обеспечивает шум порядка 1500 эл. Среди недостатков можно отметить достаточно низкую входную нагрузку (~ 100 кГц) и невозможность перестройки параметров тракта.

Примером микросхемы с адаптивным к входной нагрузке временем формирования является микросхема APV25. Она включает в себя 128 каналов, при этом каждый канал включает в себя формирователь, который работает с внешним запуском в двух режимах: оптимальном по шумам или оптимальном по пропускной способности. Такая структура обеспечивает в режиме внешнего запуска эффективную обработку в реальном времени пачки входных сигналов длительностью 4 мкс. В режиме оптимального шума на выходе процессора формируются сигналы с длительностью по основанию $T_w = 300$ нс. В режиме оптимальном по пропускной способности формируется укороченный сигнал длительностью 50 нс. Следствием такой операции укорачивания сигнала является увеличение эквивалентного шумового заряда. В режиме оптимальной пропускной способности шум более, чем в 1.6 раза больше, чем в оптимальной по шумам пиковой моде.

Недостатком формирователя сигнала микросхемы APV25 является то, что он не способен работать в непрерывном режиме самозапуска, а работает лишь в режиме внешнего запуска. Размер обрабатываемой пачки событий ограничен временным интервалом равным 4 мкс. Это значит, что он обеспечивает высокую пропускную способность (до 20 МГц) только в

течение интервала времени равного 4 мкс, а затем требуется дополнительное время на подготовку к следующему циклу измерений. Серьезным недостатком является также то, что переключение между режимами формирования сигнала осуществляется по внешней команде, т.е. формирователь не способен самостоятельно адаптировать свои параметры к изменяющейся входной нагрузке.

Таблица 1 Характеристики современных многоканальных микросхем

Параметры /СИМС	STS-XYTER	SAMPA	APV25
Загрузочная способность, МГц	0,15	0,1	0,5
ЭШЗ, эл.	1500 эл. при $C_{дет} = 30$ пФ	1600 эл. при $C_{дет} = 80$ пФ	430 эл. + 61эл./пФ
Диапазон емкостей детектора	до 30 пФ	до 80 пФ	До 25 пФ
Возможность перестройки	нет	да	да
Динамический диапазон	12 фКл	500 фКл	20 фКл
Число каналов	128	32	128
Технология	КМОП 180 нм	КМОП 130 нм	0.25 мкм КМОП

Базовая структура адаптивного тракта для считывания сигналов многоканальных ГЭУ

Функционирование тракта при высоких нагрузках, различная гранулярность детектора на основе ГЭУ приводит к решению следующих задач:

- выделение полезных сигналов и минимизации их потерь,
- минимизация ложных срабатываний,
- оптимизация энергопотребления на канал и площади занимаемой трактом на кристалле.

Решение задачи оптимизации тракта по указанным выше параметрам приводит к адаптивному подходу при построении трактов считывания сигналов ГЭУ. Для решения этих задач предложена новая структура адаптивного тракта (см рис. 1).

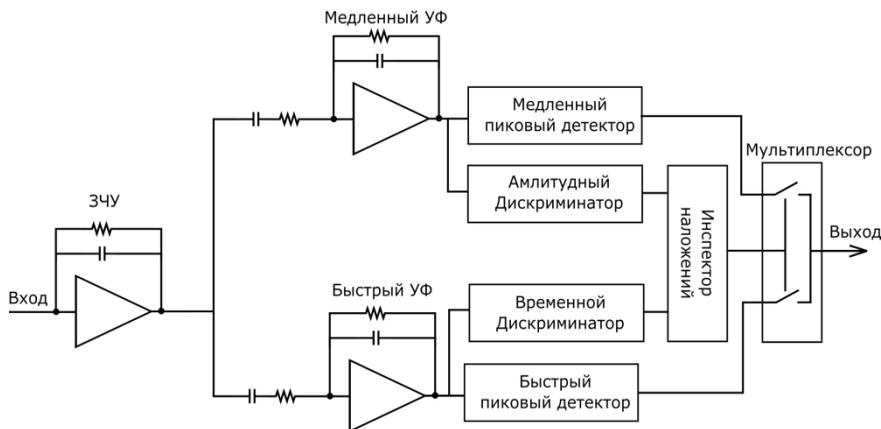
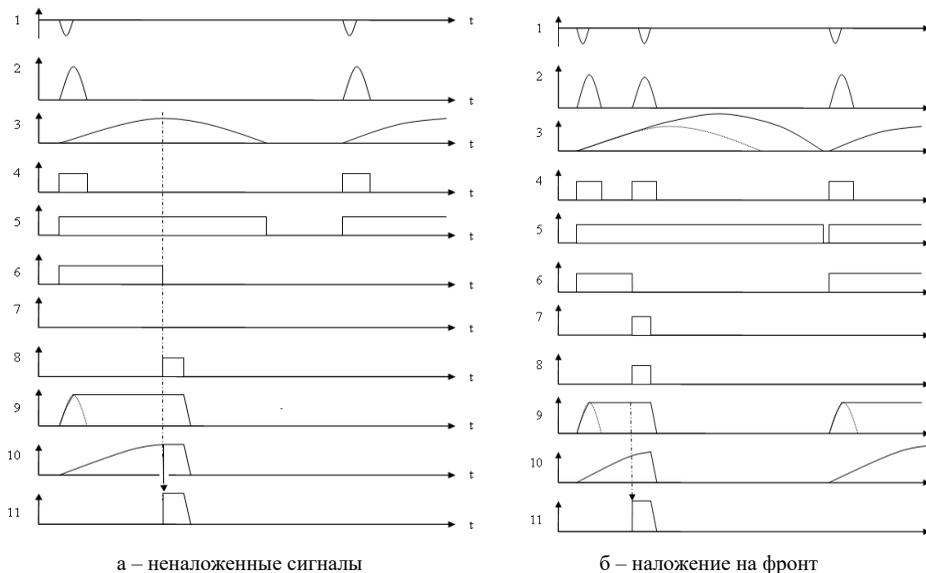


Рис. 1 Структура канала с адаптивным формирователем сигнала

Архитектура тракта включает в себя ЗЧУ, быстрый и медленный УФ. Медленный УФ обладает оптимальными с точки зрения отношения сигнал-шум параметрами, что обеспечивает максимальную разрешающую способность тракта. Быстрый канал обладает оптимальными характеристиками по пропускной способности. Быстрый и медленный пиковые детекторы фиксируют максимальную амплитуду формирователей. Амплитудный и временной дискриминаторы используются для определения наложений сигналов, а также для фиксации временной метки сигнала. Выбор времени формирования осуществляется инспектором наложений и мультиплексором.

В случае отсутствия наложений выходных сигналов медленного УФ (3) (рис. 2а) на выход формирователя передается пиковая амплитуда сигнала, зафиксированная медленным пиковым детектором (10). В случае обнаружения наложения на фронт (рис. 2б) на выход тракта передается амплитуда сигнала, которая зафиксирована быстрым пиковым детектором (9). В случае наложения на спад сигнала (рис. 2в), формируемого медленным УФ, на выход тракта передается сначала амплитуда сигнала с выхода

медленного пикового детектора, а затем амплитуда наложенного на спад сигнала с выхода быстрого пикового детектора.



а – неналоженные сигналы

б – наложение на фронт

Рис. 2 Эпюры поясняющие принцип работы адаптивного тракта. 1 – выход ЗЧУ, 2 – выход быстрого УФ, 3 – выход медленного УФ, 4 – выход временного дискриминатора, 5 – выход амплитудного дискриминатора, 6 – импульс разрешения инспекции наложения, 7- индикация наложений, 8 – сигнал управления мультиплексором, 9 – быстрый пиковый детектор, 10 – медленный пиковый детектор, 11 – сигнал на выходе мультиплексора

При появлении сигнала на выходе одного из дискриминаторов, инспектор наложений формирует сигнал (6) длительности равной пиковому времени медленного УФ. В течение длительности этого импульса производится инспекция наложений на фронт, которая состоит из проверки количества импульсов, поступающих с выхода временного дискриминатора (4). Если в результате инспекции будет обнаружен только один импульс, то принимается решение, что наложения на фронт не зафиксировано, если же за время действия эталонного импульса с выхода временного дискриминатора будут обнаружены два и более импульсов, то принимается решение, что зафиксировано наложение на фронт, и вырабатывается сигнал “наложение” (7) и передается соответствующий сигнал управления мультиплексором (8). Инспекция наложений производится также и по наложениям на спад сигнала (см. рис. 2в), формируемого медленным УФ.

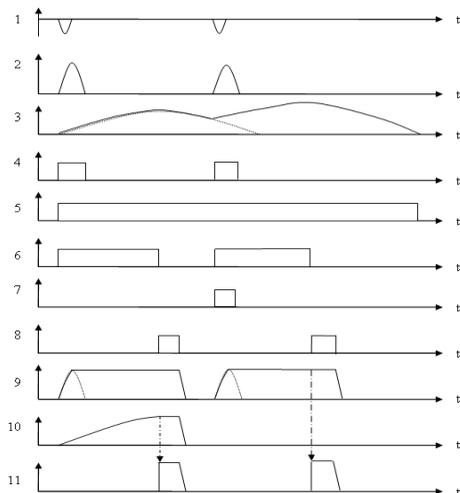


Рис. 2в Наложение сигнала на спад

Для этого инспектор наложений проверяет количество импульсов эталонной длительности за время длительности импульса с выхода амплитудного дискриминатора (5). В условиях различной гранулярности считывающих электродов газовых электронных умножителей, а также различной степени загрузки в различных координатах детектора, параметры канала могут быть оптимизированы динамически, в зависимости от входной загрузки. Структура адаптивного формирователя в соавторстве защищена патентом РФ на изобретение (№2564956).

Таким образом, предложенная архитектура тракта считывания позволяет увеличить пропускную способность. Количественно это значение можно определить как коэффициент увеличения пропускной способности, который равняется $k_{max} = \tau_{медл} / \tau_{быстр}$ раз, где $\tau_{медл}$ – постоянная времени медленного УФ, а $\tau_{быстр}$ – постоянная времени быстрого УФ.

Базовая структура адаптивного тракта, расширенная за счет дополнительных каналов обработки сигнала (см. рис. 3), позволяет уменьшить число потерянных полезных сигналов в несколько раз. Число каналов обработки сигнала ограничено допустимой площадью на кристалле и потребляемой мощностью. Для уменьшения площади адаптивного тракта на кристалле аналоговый пиковый детектор в каждом канале обработки предложено заменить на АЦП и цифровой пиковый детектор.

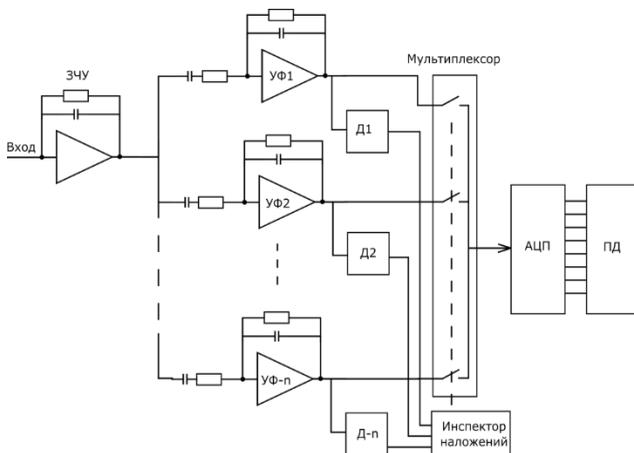


Рис. 3 Расширенная архитектура адаптивного тракта с n каналами обработки сигнала

Критерий оптимизации адаптивного тракта по пропускной способности

Специфичность задачи обработки сигналов ГЭУ приводит к необходимости выработки критериев адаптивности к предложенной схеме. Значения постоянных времени и количество каналов УФ в адаптивном тракте определяют такие основные характеристики тракта как: амплитудное разрешение и пропускную способность. Оптимизацию этих двух характеристик по сути можно свести к минимизации числа потерь полезных сигналов, проходящих через тракт. В условиях высоких загрузок потери полезных сигналов могут возникать вследствие двух причин: наложений сигналов и собственных шумов электроники. Для оценки количества потерянных полезных сигналов предложено ввести коэффициент потерь, равный сумме шумовых потерь и потерь в следствие наложений:

$$k_{\text{общ.пот.}} = k_{\text{шум.}} + k_{\text{налож.}}(1)$$

Для сигналов с равномерным амплитудным распределением и частотой, распределенной по Пуассону значение коэффициента можно представить в виде:

$$k_{\text{общ.}} = \frac{6ENC(C_{\text{дет.}}\tau) - D_{\text{min}}}{D} + \left(1 - \frac{6ENC(C_{\text{дет.}}\tau)}{D}\right) \cdot (1 - e^{-r_{\text{вх}}T_M(\tau)})(2),$$

где первое слагаемое – коэффициент шумовых потерь, зависящий от уровня шума в тракте ENC и нижней границы динамического диапазона, а второе слагаемое – коэффициент потерь наложенных сигналов, который зависит от длительности выходного сигнала УФ по основанию T_M и среднего значения частоты входной загрузки $r_{вх}$.

График зависимости коэффициента потерь от постоянной времени УФ представлен на рис. 4. Минимум данной функции определяет оптимальное значение постоянной времени УФ для заданной емкости детектора $C_{дет}$ и средней частоты входной загрузки $r_{вх}$.

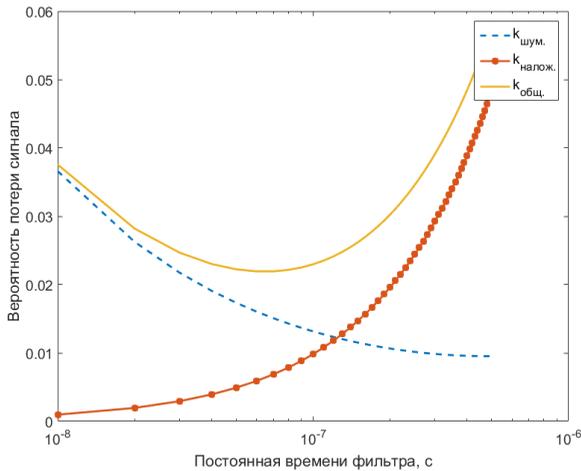


Рис. 4 Значение общего коэффициента потерь для различных постоянных времени УФ.

Размер считывающего анода ГЭУ выбирается исходя из оптимального значения количества импульсов на единицу площади. Таким образом с уменьшением загрузки площадь анода возрастает. В этом случае каждому каналу детектора на основе ГЭУ соответствует значение входной загрузки и эквивалентной емкости детектора. Тогда выражение (2) примет вид:

$$k_{налож.}(n) = \frac{6ENC(C_{дет}(n), \tau_k)}{D} + \left(1 - \frac{6ENC(C_{дет}(n), \tau_k)}{D}\right) \cdot (1 - e^{-r_{вх}(n)d*\tau_k}) \quad (3),$$

где $k(n)$ – коэффициент потерь n -го канала $ENC(C_{ДЕТ}(m), \tau_k)$ – шум в n -ом канале при условии, что время формирования равно τ_k , $d*\tau_k$ – длительность выходного сигнала УФ по основанию, $r_{вх}(n)$ – средняя входная нагрузка в n -

ом канале. Графики зависимости коэффициента потерь сигналов от номера канала для разных УФ с разными временами формирования приведены на рис. 5.

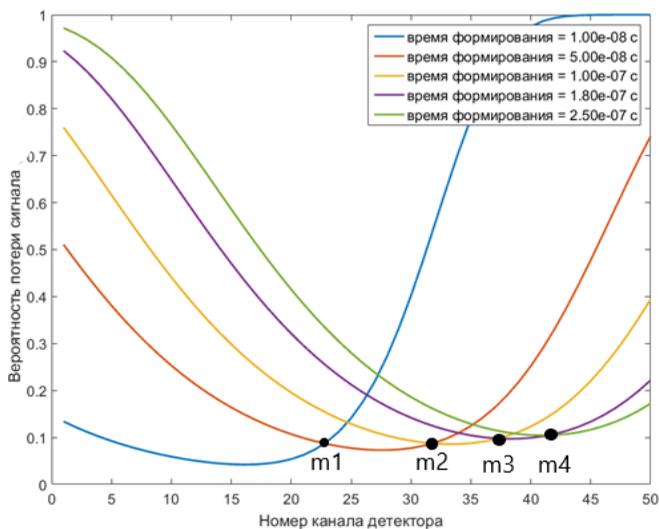


Рис. 5 Зависимость коэффициента потерь сигналов для УФ с разными постоянными времени.

Суммарное значение потерянных полезных сигналов во всех каналах обработки за единицу времени можно определить выражением:

$$N = \sum_{n=1}^{m1} k_1(n) * r_{вхп} + \sum_{n=m1}^{m2} k_2(n) * r_{вхп} + \dots + \sum_{n=m_{i-1}}^{m_i} k_i(n) * r_{вхп} \quad (4)$$

, где N – число потерянных сигналов, n – номер канала детектора, i – общее количество УФ в адаптивном тракте, k_i – коэффициент потерь i -го УФ адаптивного тракта, $r_{вхп}$ – входная загрузка n -го канала детектора. Как видно из рис. 5, использование большего числа УФ уменьшает число потерянных сигналов в несколько раз. Однако увеличение количества блоков УФ приводит к значительному увеличению площади тракта на кристалле, поскольку реализация УФ требует наибольшее количество площади, по сравнению с другими блоками.

Автором предложен критерий выбора количества и значений УФ в адаптивном тракте. Критерием является минимум целевой функции (см. рис. б):

$$F(i) = N * \frac{s(i)}{s_{min}}(5),$$

где N – число потерянных сигналов, определяемое выражением (4), $s(i)$ – сумма площадей i усилителей формирователей, s_{min} – площадь УФ с минимальной постоянной времени.

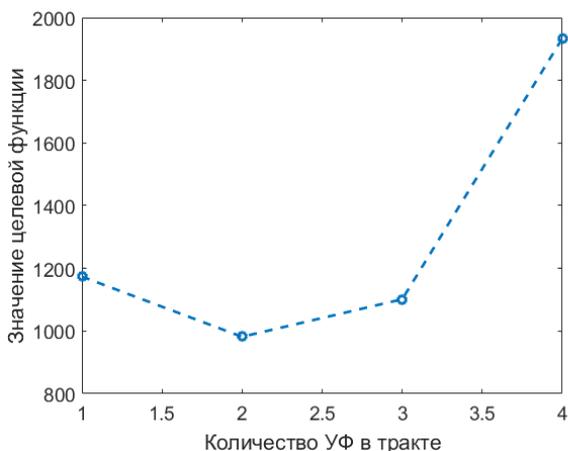


Рис. 6 Зависимость значения целевой функции от количества УФ в тракте

Методика проектирования адаптивных трактов для многоканальных газовых электронных умножителей

На основании структурного решения адаптивного тракта и критерия оптимизации с учетом требования к числу каналов в микросхемах считывания сигналов газовых электронных умножителей (32 – 64 канала) разработана оригинальная методика проектирования адаптивного тракта для многоканальных газовых электронных умножителей. Основными задачами при проектировании адаптивного тракта для многоканальных ГЭУ являются: максимизация пропускной способности трактов в условиях высоких входных загрузок и оптимизация шумов тракта при больших эквивалентных емкостях детектора. Для реализации методики требуется выполнение последовательных этапов, изображенных на рис.7.

На первом этапе производится анализ результатов физического моделирования. На основании данных о структуре детектора, средних частотах загрузки и частотных распределениях сигналов определяется количество УФ в адаптивном тракте по критерию адаптивности. Количество УФ зависит от диапазона значений эквивалентных емкостей детектора, средних частот загрузки в каналах детектора и допустимой площади тракта на кристалле. Для каждого УФ производится расчет минимальных коэффициентов потерь сигнала и суммы потерь сигналов по формулам (3), (4). Исходя из минимального значения коэффициента потерь, определяются оптимальные значения постоянных времени УФ. Находится минимальное значение целевой функции (5), которое определяет количество УФ в тракте. Для выбранных постоянных времени производится расчет пассивных цепей фильтра для реализации требуемой передаточной функции. Если полученные характеристики удовлетворяют требованиям к считывающему тракту, производится схемотехническое проектирование и анализ полученных результатов.



Рис. 7 Методика проектирования адаптивного тракта для считывания сигналов ГЭУ

Маршрут проектирования микросхем считывания сигналов многоканальных газовых электронных умножителей

Маршрут (см. рис. 8) отличается от существующих тем, что при моделировании используется разработанная автором структурная модель адаптивного тракта и источник входных сигналов, учитывающий разбросы входного сигнала по частоте и амплитуде. Статистическое моделирование на ранней стадии проектирования позволяет сократить время моделирования на этой стадии проектирования в ~10 раз. Также маршрут отличается

оригинальным подходом к пост-топологическому моделированию многоканальных микросхем для аппаратуры физического эксперимента. На стадии пост-топологического моделирования предлагается использование инструментов высокоскоростного пост-топологического моделирования, применение иерархической экстракции ИМС, а также моделирование экстрактированной схемы многоканальной аналоговой части ИМС и поведенческой модели ее цифровой части, экстракции паразитных элементов подложки, анализа эффектов электромиграции и просадок напряжений на шинах питания. За счет выбранного подхода удастся значительно сократить время пост-топологического моделирования без потери точности оценки функциональных параметров ИМС.

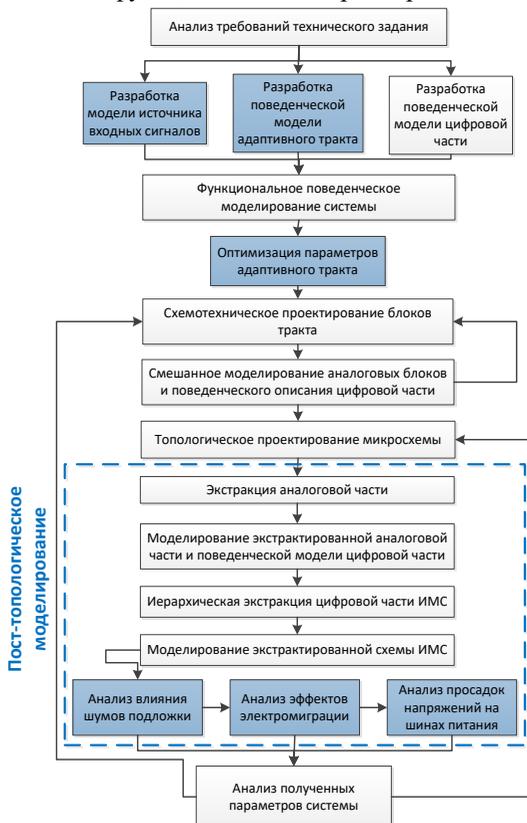


Рис. 8 Маршрут проектирования микросхем с адаптивными трактами для многоканальных ГЭУ

Практическая реализация адаптивных трактов в микросхемах считывания сигналов многоканальных газовых электронных умножителей

Структурное решение адаптивного тракта, методика и маршрут проектирования были апробированы при проектировании прототипных микросхем СВМ MUCH v2, СВМ MUCH v3 и СВМ MUCH v4 для мюонных камер международного физического эксперимента СВМ на ускорителе FAIR. Каждый канал ИМС СВМ MUCH v2 (рис. 9) содержит предусилитель, к которому подключены два УФ (быстрый и медленный). Выходы УФ соединены через дифференциальный драйвер с дискриминаторами. В данной микросхеме реализованы все аналоговые блоки, входящие в состав адаптивного тракта, отработано функционирование отдельных блоков и тракта в целом. Микросхема позволяет считывать сигналы с детекторов на основе ГЭУ емкостью до 100 пФ, в диапазоне 100 фКл. На основании критерия адаптивности выбраны постоянные времена быстрого УФ (50 нс) или медленного УФ (250 нс), что позволило увеличить пропускную способность тракта до 2 МГц.

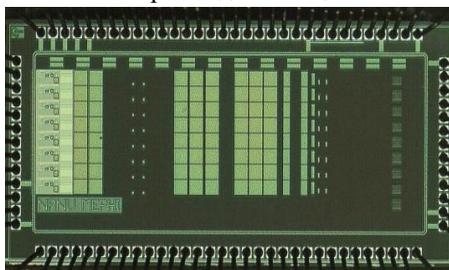


Рис. 9 8-канальная СИМС СВМ MUCH v2

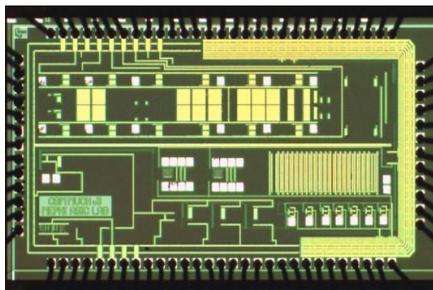


Рис. 10 Микросхема СВМ MUCH v3

В прототипной микросхеме ИМС MUCHv3 (рис. 10). Отработано функционирование адаптивного тракта совместно с АЦП и цифровыми блоками пикового детектора и временной метки. СИМС содержит 2 тракта считывания, включающих в себя, помимо аналогового канала с медленным и быстрым УФ, дискриминатор, схему установки порогов, АЦП и селектор каналов, позволяющий перестраивать тракт в зависимости от входной загрузки. Таким образом, в данной микросхеме реализован адаптивный подход, позволяющий варьировать временем формирования, в зависимости от входной загрузки. Микросхема MUCHv4 (рис. 11) является полнофункциональным

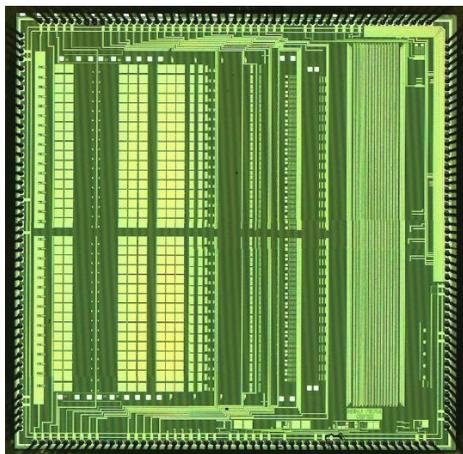


Рис. 11 32-х канальная микросхема считывания сигналов мюонных камер эксперимента CBM (CBM MUCH v4)

прототипом микросхемы считывания и обработки сигналов мюонных камер эксперимента CBM. Микросхема имеет 32 аналоговых адаптивных тракта съема и обработки сигналов ГЭУ. Микросхема оптимизирована для работы в условиях входных загрузок до 2 МГц. Площадь кристалла составляет 5 x 5 мм². Потребляемая мощность в пересчете на канал не превышает 10 мВт.

В таблице 1 приведены результаты измерений разработанных микросхем и их сравнение с ближайшими аналогами по ряду ключевых параметров.

Таблица 2 Сравнение разработанных ИМС с аналогами

Параметры /ИМС	Быстродействие, МГц	ЭШЗ, эл.	$C_{дет}$, пФ	Число каналов	мВт/канал	Технология
CBM MUCH v2	2,00	2000 эл. при $C_{дет} = 80$ пФ	До 80 пФ	8	13 мВт	КМОП 180 нм
CBM MUCH v3	2,00	1500 эл. при $C_{дет} = 50$ пФ	До 50 пФ	2	13 мВт	КМОП 180 нм
CBM MUCH v4	2,00	1500 эл. при $C_{дет} = 50$ пФ	До 100 пФ	32	13 мВт	КМОП 180 нм
STS-XYTER (AGH, Краков)	0,15	1500 эл. при $C_{дет} = 30$ пФ	до 30 пФ	128	10 мВт	КМОП 180 нм
SAMPA(Университет Сан-Пауло)	0,10	1600 эл. при $C_{дет} = 80$ пФ	до 80 пФ	32	10 мВт	КМОП 130 нм
APV25 (ЦЕРН)	0,50	430 эл. + 61 эл./пФ	До 25 пФ	128	2 мВт	КМОП 250 нм

Разработанные микросхемы значительно превосходят ближайшие аналоги по пропускной способности (в 5 – 10 раз), в частности за счет

адаптивного подхода к проектированию трактов. В то же время, спроектированные тракты позволяют работать с эквивалентной емкостью в диапазоне до 100 пФ, что выше, чем у приведенных аналогов. Разработанные микросхемы также не уступают своим аналогам по уровню шума и потребляемой мощности. Результаты проектирования представлены на престижных международных конференциях и рабочих совещаниях коллаборации СВМ, а также в журналах и трудах конференций. Спроектированные микросхемы являются уникальными в своем роде отечественными разработками и отвечают всем требованиям современных многоканальных детекторных систем на основе многоканальных газовых электронных умножителей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основной результат диссертации заключается в решении актуальной задачи развития теории и создании методики проектирования адаптивных трактов для многоканальных ГЭУ, нацеленной на повышение пропускной способности тракта и разработку на этой основе ряда интегральных микросхем считывания, удовлетворяющих современным требованиям к электронной компонентной базе крупных физических экспериментов.

Основной научный результат

Предложена и обоснована новая структура адаптивных трактов считывающих микросхем, нацеленная на максимизацию пропускной способности в трактах многоканальных микросхем считывания ГЭУ.

Частные научные результаты

1. Разработана базовая и расширенная структуры адаптивного тракта для считывания и обработки сигналов многоканальных ГЭУ, позволяющая повысить пропускную способность тракта до нескольких МГц.
2. Предложен критерий оптимизации трактов по пропускной способности основанный на оценке потерь сигналов за счет наложений и собственных шумов считывающей электроники.
3. Разработана методика проектирования адаптивных трактов микросхем считывания многоканальных ГЭУ, нацеленная на достижение компромиссных по совокупности характеристик электронных узлов и позволившая увеличить пропускную способность тракта ~ в 5 раз.

4. Разработан маршрут проектирования специализированных микросхем, позволяющий снизить время, затрачиваемое на моделирование многоканальной структуры, за счет использования разработанной высокоуровневой модели адаптивного тракта и источника входных воздействий и повысить достоверность результатов проектирования за счет иерархической экстракции и моделирования эффектов распространения помех по подложке, просадок напряжения на шинах питания и эффектов электромиграции

Основной практический результат

На основе предложенной структуры, методики и маршрута проектирования разработаны и изготовлены в КМОП технологии с проектными нормами 0,18 мкм специализированные многоканальные микросхемы для считывания сигналов газовых электронных умножителей. Разработанные микросхемы являются уникальными в своем классе отечественными разработками и не уступают по совокупности характеристик зарубежным аналогам.

Частные практические результаты

1. Разработана схемно-топологическая библиотека электронных узлов для адаптивных трактов, использованная при проектировании многоканальных микросхем считывания для международного эксперимента CBM.

2. Разработанный маршрут проектирования и методика оптимизации параметров адаптивного тракта для ГЭУ применены при создании 32-канальной специализированной микросхемы считывания сигналов мюонной камеры эксперимента «CBM» на ускорителе FAIR, 8-канальной и 2-канальной микросхем считывания сигналов многоканальных ГЭУ.

3. Разработан стенд для лабораторного исследования многоканальных микросхем считывания сигналов газовых электронных умножителей. На лабораторном стенде получены экспериментальные характеристики опытных образцов многоканальных микросхем считывания

4. Выпущен патент РФ Формирователь сигналов амплитудного спектрометра ионизирующего излучения Аткин Э. В., Иванов В. В., Маланкин Е. З., Самсонов В. М. // №2564956 от 10 октября 2015 г.

5. Подготовлены и изданы сборники лабораторных работ:

Проектирование элементов аналого-цифровых интегральных микросхем / Э. В. Аткин, Ю. И. Бочаров, В. А. Бутузов, Ю.А. Волков, А. А. Куксов, Е. З. Маланкин, Д. Л. Осипов, А. Б. Симаков. – М.: НИЯУ МИФИ, 2012, 56 с. Пособие внедрено в учебный процесс курса «Ядерная электроника» на кафедре Электроника НИЯУ МИФИ.

Проектирование и анализ аналоговых интегральных схем с использованием САПР Cadence / Э. В. Аткин, Ю.А. Волков, П. Ю. Иванов, Е.З. Маланкин, Д. Д. Норманов, В.В. Шумихин. – М.: НИЯУ МИФИ, 2017. 67 с.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

1. Atkin E., E. Malankin et al., "32-channel self-triggered ASIC for GEM detectors," 2017 IEEE 30th International Conference on Microelectronics (MIEL), Nis, 2017, pp. 225-228. (WoS, Scopus)

2. Atkin E., Malankin E., Shumikhin V., Levin V. Development of a low-noise readout ASIC for Silicon Drift Detectors in high energy resolution X-Ray spectrometry Journal of Instrumentation. 2017. Т. 12. № 3. С. C03039. (WoS, Scopus)

3. Аткин Э.В., Волков С.С., Воронин А.Г., Иванов В.В., Комков Б.Г., Кудин Л.Г., Маланкин Е.З., Никулин В.Н., Рощин Е.В., Самсонов В.М., Шумихин В.В., Ханзадеев А.В. Тестирование прототипов детекторов для мюонной трековой системы эксперимента СВМ на ускорителе PS в ЦЕРН // Приборы и техника эксперимента. 2016. № 1. С. 61-67. (БАК, WoS, Scopus)

4. E. Malankin, Two-phase low-power analogue CMOS peak detector with high dynamic range // International Conference on Particle Physics and Astrophysics (ICPPA-2015), Journal of Physics: Conference Series, Methods of experimental physics, 2016, Vol. 675, №4, С. 042032 (WoS, Scopus)

5. E. Malankin and A. Voronin, Multichannel readout ASIC design flow for high energy physics and cosmic rays experiments // International Conference on Particle Physics and Astrophysics (ICPPA-2015) Journal of Physics: Conference Series, Methods of experimental physics, 2016, Vol. 675, № 4, С. 042034 (WoS, Scopus)

6. E. Atkin, E. Malankin et al., Readout channel with majority logic timestamp and digital peak detector for muon chambers of the CBM experiment // *Journal of Instrumentation*. 2016. Vol. 11. № 12. C. C12069. (WoS, Scopus)
7. E. Atkin, E. Malankin et al., Development and experimental study of the readout ASIC for muon chambers of the CBM experiment, *Journal of Instrumentation*. 2016. T. 11. № 1. C. C01084. (WoS, Scopus)
8. E. Atkin, E. Malankin et al., Low-noise analog readout channel for SDD in X-ray spectrometry, *Journal of Instrumentation*. 2016. T. 11. № 1. C. C01086. (WoS, Scopus)
9. E. Atkin, I. Bulbakov, A. Gusev, E. Malankin, et al. Development of the read-out ASIC for muon chambers, *Journal of Physics: Conference Series*. 2016. T. 675. № 4. C. 042030. (WoS, Scopus, РИНЦ)
10. E. Atkin, P. Ivanov, A. Krivchenko, V. Levin, A. Gusev, E. Malankin, et al., The read-out ASIC for silicon drift detectors, *Journal of Physics: Conference Series*. 2016. T. 675. № 4. C. 042031. (WoS, Scopus)
11. Osipov D., Malankin E., Shumikhin V. Linearity analysis of single-ended SAR ADC with split capacitive DAC, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering "1st International Telecommunication Conference "Advanced Micro- and Nanoelectronic Systems and Technologies" 2016*. C. 012014. (Scopus)
12. E. Malankin et al. Development of the asynchronous readout ASIC for GEM detectors // *2016 IEEE Nuclear Science Symposium, Medical Imaging Conference and Room-Temperature Semiconductor Detector Workshop (NSS/MIC/RTSD)*, Strasbourg, 2016, pp. 1-5. (Scopus)
13. Аткин Э.В., Маланкин Е.З. и др. Исследование координатных газовых детекторов для мюонной трековой системы эксперимента CBM на основе технологий GEM и TGEM // *Приборы и техника эксперимента*, №2, 2015, С. 32 – 40 (ВАК, WoS, Scopus)
14. Аткин Э.В., Волков С.С., Воронин А.Г., Иванов В.В., Комков Б.Г., Кудин Л.Г., Маланкин Е.З., Никулин В.Н., Роцин Е.В., Рыбаков Г.В., Самсонов В.М., Тарасенкова О.П., Шумихин В.В., Ханзадеев А.В., Чернышева Е.А. Исследование координатных газовых детекторов для мюонной трековой системы эксперимента CBM на основе технологий MICROMEGAS и

MICROMEAS + GEM/TGEM // Приборы и техника эксперимента. 2015. № 5. С. 20-30 (BAK, WoS, Scopus)

15. Аткин Э.В., Волков С.С., Воронин А.Г., Жданов А.А., Иванов В.В., Комков Б.Г., Кудин Л.Г., Маланкин Е.З., Никулин В.Н., Рошин Е.В., Самсонов В.М., Шумихин В.В., Ханзадеев А.В., Шведчиков А.В. Тестирование прототипов детекторов для мюонной трековой системы эксперимента CBM на протонном пучке ускорителя ПИЯФ при высоких нагрузках // Приборы и техника эксперимента. 2015. № 6. С. 20-25. (BAK, WoS, Scopus)

16. E. Atkin, E. Malankin et al. Development of the read-out ASIC for muon chambers of the CBM experiment // Journal of Instrumentation. 2015. Vol. 10. № 4. С. C04006 (WoS, Scopus)

17. Аткин Э.В., Маланкин Е.З., Шумихин В.В. Предусилитель для мюонной системы эксперимента CBM // Приборы и техника эксперимента. 2014. № 3. С. 53. (BAK, WoS, Scopus)

Публикации в других изданиях:

18. E. Atkin, E. Malankin et al. 32-channel readout ASIC for Muon Chambers of the CBM experiment // CBM progress report 2016. Printed in Darmstadt by GSI, 2017, P. 94

19. E. Atkin, V. Ivanov, E. Malankin, et al. Prototype ASIC for Muon Chambers // CBM Progress report 2015, GSI Darmstadt, Germany, 2016, p. 70

20. E. Atkin, V. Ivanov, E. Malankin, E. Roshchin, V. Samsonov, V. Shumikhin, A. Voronin GEM demonstrator based on FEE ASIC for MUCH // CBM Progress report 2013, GSI Darmstadt, Germany, 2014, p. 68

21. E. Atkin, E. Malankin, V. Shumikhin Analog front-end chip for GEM detectors // Nuclear Electronics & Computing (NEC'2013): Proceedings of the XXIV International Symposium (Varna, Bulgaria, September 9-16, 2013). – Dubna: JINR, 2013. – pp. 22 -29

22. E. Atkin, E. Malankin, V. Shumikhin Prototype ASIC of Analog Frond-End for MUCH // CBM Progress report 2012, GSI Darmstadt, Germany, 2013, p. 52

23. Маланкин Е.З. Входной каскад операционного усилителя с широким диапазоном синфазных напряжений // 15-я Международная телекоммуникационная конференция молодых ученых и студентов «Молодежь и наука», Москва, НИЯУ МИФИ, 2011, 2 с.

Свидетельства о государственной регистрации топологии ИМС

1. Аткин Э.В., Шумихин В.В., Воронин А. Г., Иванов В. В., Иванов П. Ю., Маланкин Е. З., Норманов Д. Д., Осипов Д. Л., Самсонов В. М., Гусев А. В. Восьмиканальная интегральная микросхема считывания сигналов мюонных камер // Свидетельство о государственной регистрации ТИМС №2015630074 от 6 июля 2015 г.

2. Аткин Э.В., Шумихин, Маланкин Е. З. и др. Интегральная микросхема сложно-функциональных блоков обработки сигналов газовых лавинных детекторов // Свидетельство о государственной регистрации ТИМС №2015630086 от 1 сентября 2015 г.

Патент РФ

Аткин Э. В., Иванов В. В., Маланкин Е. З., Самсонов В. М. // Свидетельство о выдаче патента на изобретение РФ №2564956 от 10 октября 2015 г.