

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники

УДК 621.375

ГАЛКИН
Ярослав Денисович

МЕТОДЫ ПОСТРОЕНИЯ СХЕМОТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ
ДЛЯ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ КРЕМНИЕВЫХ
ФОТОЭЛЕКТРОННЫХ УМНОЖИТЕЛЕЙ

АВТОРЕФЕРАТ

на соискание степени магистра технических наук
по специальности 1-41 80 01 Твердотельная электроника, радиоэлектронные
компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах

Научный руководитель
кандидат техн. наук, доцент
СТЕМПИЦКИЙ Виктор Романович

Минск 2020

Работа выполнена на кафедре микро- и наноэлектроники учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Научный руководитель:

Стемпичкий Виктор Романович, кандидат технических наук, доцент кафедры микро- и наноэлектроники учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», заместитель начальника Научно-исследовательской части БГУИР, научный руководитель НИЛ "Компьютерное проектирование микро- и наноэлектронных систем"

Рецензент:

Белошицкий Анатолий Павлович, кандидат технических наук, доцент кафедры защиты информации учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Защита диссертации состоится «23» июня 2020 года в 9:00 на заседании Государственной комиссии по защите магистерских диссертаций в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г.Минск, ул. П.Бровки, 6, 1 уч. корп., ауд. 114, тел.: 293-89-26, e-mail: kafme@bsuir.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

ВВЕДЕНИЕ

Ядерная электроника является составной частью интенсивно развивающейся отрасли промышленности (ядерного приборостроения), одна из главных задач которой – регистрация ионизирующих излучений. Существование различных источников ионизирующих излучений и отличающихся требований к их анализу обусловило создание многих видов детекторов, преобразующих энергию ионизирующих излучений в электрические сигналы, и электронных устройств для измерений и обработки по определенным критериям данных об амплитуде, длительности фронтов, форме, времени поступления сигналов детекторов.

Обычно предварительная обработка сигнала детектора осуществляется в аналоговой форме с помощью устройств, при схемотехническом синтезе которых решается ряд специфических задач, а именно: выбор типа «головного» элемента, под которым понимают активный элемент непосредственно соединённый с детектором; совокупности его параметров и режима работы; разработка схемотехнической структуры и параметрическая оптимизация импульсных преобразователей, формирователей, фильтров, компараторов для уменьшения уровня шумов, увеличения быстродействия устройств и точности определения времени поступления входного сигнала.

Кремниевые фотоэлектронные умножители, называемые в литературе как SiPM, MAPD, MPPC, с успехом применяются в ряде областей науки и техники для регистрации различных видов электромагнитных излучений. Причём в ряде изделий применение SiФЭУ обеспечило значительное улучшение технико-экономических показателей и переход создаваемой радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) на новый качественный уровень. К такой РЭА относится:

1. Аппаратура позитронной эмиссионной томографии (Positron Emission Tomography, PET), применяющая времяпролетный (Time of Flight, TOF) метод обработки сигналов SiФЭУ: PET сканеры, PET томографы, однофотонные эмиссионные компьютерные томографы (Single Photon Emission Computer Tomography, SPECT)

2. Приспособления для операций в медицине (Intra-Operative Positron Imaging Probe), миниатюрные оптические сенсоры для регистрации флюоресценции малого уровня также используют матрицы SiФЭУ и считывающую электронику .

3. Одноэлементные (single element) SiФЭУ с большой чувствительной поверхностью или матрицы SiФЭУ с суммированием сигналов всех элементов

обеспечивает высокий уровень параметров одноканальных детекторов проникающей радиации .

Портативные детекторы радиации, а именно:

- персональные дозиметры (определяют полную поглощенную дозу гамма-излучения),
- персональные детекторы радиации (определяют наличие низких уровней проникающей радиации),
- определители изотопов (измеряют спектр гамма-излучения и определяют тип исходных изотопов), – должны быть компактными, легкими, стойкими к вибрациям, дешевыми, поэтому для их реализации более всего подходят Si-ФЭУ.

4. Si-ФЭУ чувствительные к излучению в инфракрасной области находят применение в инфракрасной лазерной дальнометрии при измерении скорости и расстояния, системах автопилотирования и круиз-контроля в автомобилях, потребительской электронике .

5. SiФЭУ применяют в различных экспериментальных установках физики частиц и высоких энергий . При этом рекордные характеристики получают при охлаждении Si-ФЭУ до сверхнизких температур (около $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$), при которых усиление Si-ФЭУ слабо изменяется по сравнению с нормальными условиями, а темновой ток уменьшается до 10^4 раз.

По сравнению с вакуумными ФЭУ полупроводниковые детекторы обеспечивают меньший уровень шумов, который может быть дополнительно уменьшен при использовании некоторых особенностей Si-ФЭУ:

- шумы Si-ФЭУ пропорциональны площади их чувствительной поверхности, поэтому для уменьшения шумов применяют фокусирование оптического излучения и выбор площади чувствительной поверхности SiФЭУ близкой к сечению световода;
- шумы Si-ФЭУ уменьшаются при снижении температуры, что обеспечивается использованием термоэлектрических преобразователей на элементах Пельтье.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы магистерской диссертации

Разрабатываемые методы планируется использовать при создании микросхем для систем визуализации видимого и инфракрасного излучений, проектируемых в НИИЯП БГУ в рамках подзадания 2.1.02.2 "Разработка электронных схем детектирования, преобразования сигналов фотоприемников и формирования сигналов на конечное устройство" ГПНИ «Фотоника, опто- и микроэлектроника».

Цель и задачи магистерской диссертации

Целью диссертационной работы является разработка и апробация конструктивно-схемотехнических методов проектирования аналоговых компонентов полузаказных микросхем считывающей электроники для обработки сигналов кремниевых фотоэлектронных умножителей .

Для достижения целей работы поставлены следующие задачи:

провести анализ современного состояния исследований по разработке специализированных микросхем для обработки сигналов кремниевых фотоэлектронных умножителей, выбрать способ реализации и технологию изготовления с учётом возможностей отечественных предприятий;

разработать схемотехнические решения основных компонентов считывающей электроники с учётом выбранного способа реализации, необходимости изготовления в интегральном исполнении нескольких каналов обработки сигналов (не менее 4) и увеличения процента выхода годных;

провести схемотехническое моделирование и параметрическую оптимизацию аналоговых компонентов с целью уменьшения потребляемой мощности и разброса параметров при сохранении требуемого быстродействия;

выработать рекомендации по практическому использованию созданных конструктивно-схемотехнических методов и направлениях дальнейших работ по их улучшению.

Объект и предмет исследования

Объектом исследования является кремниевые аналоговые микросхемы ядерной электроники на основе биполярных транзисторов и полевых транзисторов с p-n-переходом.

Предметом исследования являются конструктивно-схемотехнические методы и решения многоканальных микросхем ядерной электроники, позволяющие уменьшить потребляемую мощность и разброс параметров при сохранении требуемого быстродействия.

Связь работы с приоритетными направлениями научных исследований и запросами реального сектора экономики

Работа проводилась в рамках подзадания 2.1.02.2 "Разработка электронных схем детектирования, преобразования сигналов фотоприемников и формирования сигналов на конечное устройство" ГПНИ «Фотоника, опто- и микроэлектроника».

Основные положения, выносимые на защиту

Схемотехническое решение интегральной микросхемы зарядочувствительного усилителя, предназначенной для обработки сигналов кремниевых фотоэлектронных умножителей, отличающееся применением базового матричного кристалла МН2ХА030, обеспечивает динамический диапазон формирующего усилителя в пределах от 0,4 пКл до 4 пКл, что соответствует 30 включенным ячейкам SiPM Photonique и временем пика 18,4 нс, а также позволяет осуществлять регулировку усиления выходного сигнала в пределах $\pm 0,8$ В и базового уровня в пределах $\pm 0,9$ В.

Личный вклад соискателя

Личный вклад автора состоит в участии в проведении моделирования электрических параметров, непосредственном участии в подготовке проведения измерения параметров готового устройства, а именно разводке печатной платы, написании программного обеспечения для считывания данных с измерительных приборов, участии в измерении параметров готового изделия, участии в обсуждении полученных результатов, подготовке научных статей по тематике диссертационной работы, а также в написании докладов и участии на конференциях. Совместно с научным руководителем определены структура, цели и задачи исследования, обобщены основные научные результаты. Совместно с соавторами публикаций осуществлялась подготовка и проведение исследований, обсуждались полученные результаты.

Апробация результатов диссертации

Основные теоретические результаты и законченные этапы диссертационной работы были доложены на Белорусско-Китайском конкурсе научно-технического творчества студентов, получен диплом 3-й степени

Публикации

По материалам диссертации опубликовано и подготовлено к опубликованию 6 работ. Все 6 – это статьи в сборниках материалов научных конференций.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, трёх глав, заключения и списка использованных источников,

графического материала. Общий объем магистерской диссертации составляет 77 страницы, включая 35 иллюстраций, 3 таблицы, библиографический список из 52 наименований, 10 страниц графического материала, состоящие из слайдов презентации.

Библиотека БГУИР

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В *первой главе* проведен детальный анализ литературных источников, посвященных исследованиям в области применения кремниевых фотоэлектронных умножителей и интерфейсов для считывания сигналов с них. Показаны структура Si-ФЭУ и его вольт-амперная характеристика. Приведены некоторые примеры подключения Si-ФЭУ к интерфейсу, эквивалентная схема Si-ФЭУ. Описан механизм работы Si-ФЭУ. Приведено сравнение параметров нескольких интерфейсов для считывания сигналов с Si-ФЭУ. Разобран пример фналогового интерфейса на КМОП технологии. Показаны направления разработки считывающей электроники для Si-ФЭУ

Вторая глава посвящена методологии моделирования аналоговых интегральных микросхем. В ней описываются основные методы и подходы компьютерного моделирования, а также специфика обработки сигналов детекторов. Данная глава содержит в себе краткое описание используемых средств автоматизированного моделирования, основных уравнений и сущности методов проектирования

В *третьей главе* представлены результаты моделирования аналоговой микросхемы ADPreampl3, предназначенной для считывания сигналов с Si-ФЭУ, включающие: описание библиотеки базового матричного кристалла MP2XA030, используемого для моделирования, электрические схемы разработанного трансрезистивного усилителя, описание узлов разработанного усилителя, описание упрощённой эквивалентной схемы SiPM Photonique, временные диаграммы и передаточную характеристику. . Представлены результаты измерения готового изделия, включающие разработку печатной платы для исследования параметров изделия, описания используемого оборудования, методику измерения, временные и передаточные характеристики. Приведено сравнение основных результатов моделирования и измерения. Установлено, что измерения выявили существенное превышение измеренных значений времени пика, уменьшение коэффициента преобразования и потребляемых токов. Даны рекомендации по предотвращению ухудшения параметров изделия.

В *заключении* кратко изложены основные результаты магистерской диссертации, приведены результаты моделирования и измерения параметров разработанной аналоговой микросхемы ADPreampl3 предназначенной для считывания сигналов с Si-ФЭУ

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проанализированы особенности схемотехнической структуры канала аналоговой обработки сигнала детектора. Отмечены общие черты и отличия импульсных преобразователей заряд–напряжение и ток–напряжение.

Для элементов БМК МН2ХА030 разработан усилитель ADPreampl3, содержащий быструю и медленную сигнальную цепь обработки сигнала.

Быстрая сигнальная цепь включает трансрезистивный усилитель-формирователь с полосой пропускания до 60 МГц, схемой подстройки базового уровня в диапазоне от -0,1 В до 0,2 В, а медленная сигнальная цепь - зарядочувствительный усилитель-формирователь со схемой восстановления и подстройки базового уровня в рекомендуемом диапазоне от -1 В до 1 В и возможностью электронной регулировки коэффициента преобразования.

Схема восстановления и подстройки базового уровня обеспечивает неизменную форму выходного импульса напряжения при постоянном входном токе усилителя, изменяющемся от -190 мкА до 190 мкА, и пренебрежимо малое изменение базового уровня при $\pm 20\%$ разбросе сопротивлений интегральных резисторов.

Усилитель ADPreampl3 допускает переход в "спящий" режим с уменьшением тока потребления до 10 мкА, сохраняет работоспособность при поглощённой дозе гамма-излучения до 500 крад и воздействии интегрального потока нейтронов до 10^{13} н/см² и может найти применение в многоканальных микросхемах обработки сигналов SiФЭУ.

Экспериментально установлено, что созданная схема восстановления базового уровня уменьшает разброс базового уровня усилителя ADPreampl3 почти в 100 раз и позволяет плавно изменять базовый уровень на выходах OutA, OutAinv в диапазоне $\pm 0,9$ В.

При максимальном усилении динамический диапазон ADPreampl3 превышает 20 дБ, однако при этом наблюдается зависимость коэффициента преобразования от величины входного заряда. Для регистрации больших входных зарядов рекомендуется уменьшить величину выходного импульса уменьшением напряжения на выводе Gain либо обрабатывать сигнал с вывода FOut.

Измерения выявили несовпадение результатов моделирования и измерений: времени пика (на выходе OutA при моделировании – 14,5 нс, а при измерении готового изделия – 18,4 нс; на выходе FOut при моделировании – 8,5 нс, а при измерении готового изделия – 20,4 нс; на выходе OutInvA при

моделировании – 13,5 нс, а при измерении готового изделия – 21,6 нс); коэффициента преобразования (0,7 мВ/фКл при моделировании, и 0,6 мВ/фКл при измерении готового изделия); тока потребления (5,71 мА при моделировании, и 3,66(-5,0) мА при измерении готового изделия) поэтому в ближайшее время планируется корректировка межсоединений элементов БМК и уточнение Spice-параметров транзисторов по результатам измерений экспериментальных образцов.

Библиотека БГУИР

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

Статьи в рецензируемых научных журналах

[1-А.] Анализ результатов проектирования считывающей электроники кремниевых умножителей на основе базового матричного кристалла МН2ХА030 / Я.Д. Галкин [и др.] // Доклады БГУИР. – 2020. – 18(3). – С. 81–87. <https://doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-3-81-87>.

[2-А.] Experimental Studies of the Silicon Photomultiplier Readout Electronics Based on the Array Chip МН2ХА030 / Y. Galkin, [et al.] // Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal. – 2020. – 5(3) – P. 108–114. DOI: 10.25046/aj050314

Статьи в сборниках материалов научных конференций

[3-А.] Разработка на базовом матричном кристалле МН2ХА030 специализированных аналоговых микросхем для радиоэлектронной аппаратуры двойного применения / Я. Д. Галкин [и др.] // 8-я Международная научная конференция по военно-техническим проблемам, проблемам обороны и безопасности, использованию технологий двойного применения (Минск, 16-17 мая 2019 г.): сборник научных статей. В 5 ч. Ч. 1 / Государственный военно-промышленный комитет Республики Беларусь. – Минск: Лаборатория интеллекта, 2019. – С. 52–55.

[4-А.] Silicon Photomultipliers' Analog Interface with Wide Dynamic Range / Y.D. Galkin, [et al.] // Proceedings of 17th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS-2019), 13-16 September 2019 / Batumi, Georgia – 2019. – P. 270–273 DOI: 10.1109/EWDTS.2019.8884430

[5-А.] Circuit Features of Multichannel Chips of Reading Electronics of Silicone Photomultiplier Tubes / Y. D. Galkin, [et al.] // 2019 23rd International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC), 9-11 October 2019 / Sinaia, Romania – 2019. – P. 149 –155 DOI: 10.1109/icstcc.2019.8885998

[6-А.] Implementation of Reading Electronics of Silicone Photomultiplier Tubes on the Array Chip МН2ХА030 / Y.D. Galkin, [et al.] // Visnyk NTUU KPI Serii A – Radiotekhnika Radioaparotobuduvannia. – 2019. – Iss. 78. – P. 60–66. DOI: 10.20535/RADAP.2019.78.60-66.

Публикации, не относящиеся к тематике диссертационных исследований

[7-А.] Галкин, Я.Д. Аппаратно-программный комплекс для измерений параметров многоканальных источников питания / Я.Д. Галкин, А.В. Кунц,

О.В. Дворников, В.А. Чеховский, В.Л. Дятлов // Актуальные проблемы физической и функциональной электроники : материалы 22-й Всероссийской молодежной научной школы-семинара : сб. науч. тр. / – Ульяновск : УлГТУ, 2019. – С. 259–260.

[8-А.] Галкин, Я.Д. Автоматизация измерений параметров специализированной аналоговой микросхемы МН2ХА020-01 / Я.Д. Галкин, А.В. Кунц, О.В. Дворников, В.А. Чеховский, В.Л. Дятлов // Актуальные проблемы физической и функциональной электроники : материалы 22-й Всероссийской молодежной научной школы-семинара : сб. науч. тр. / – Ульяновск : УлГТУ, 2019. – С. 261–262.

[9-А.] Галкин, Я.Д. Схемотехническое моделирование зарядочувствительного усилителя Радиотехника и электроника / О.В. Дворников, В.А. Чеховский, Я.Д. Галкин, А.В. Кунц // : 55-я юбилейная научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов : сб. тез. Док. / Минск : БГУИР, 2019. – С. 178–179

[10-А.] Галкин, Я.Д. Радиационно-стойкий компаратор напряжений на базовом матричном кристалле МН2ХА030 / О.В. Дворников, В.А. Чеховский, Я.Д. Галкин, А.В. Кунц // : Радиотехника и электроника : 55-я юбилейная научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» : сб. тез. док. / Минск : БГУИР, 2019. – С. 225–226

[11-А.] Galkin, Y.D. Test Chip for Identifying Spice-Parameters of Cryogenic BiFET Circuits / Oleg V. Dvornikov, Nikolay N. Prokopenko, Vladimir A. Tchekhovski, Yaroslav D. Galkin, Alexei V. Kunz, Anna V. Bugakova // ESSDERC 2019 - 49th European Solid-State Device Research Conference (ESSDERC), 2019, P. 102–105

[12-А.] Галкин, Я.Д. Новая методика измерения разброса параметров дифференциальной пары полевых транзисторов с управляющим р-п переходом / А.В. Бугакова, Я.Д. Галкин, О.В. Дворников, В.Л. Дятлов / Физико-технические проблемы в науке, промышленности и медицине (ФТПНПМ-2019) : сборник научных трудов Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных ; Томский политехнический университет. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2019. – С. 208–209.

[13-А.] Галкин Я.Д. Разработка топологических решений аналого-цифровых преобразователей в системе автоматизированного проектирования компании CADENCE / Я.Д. Галкин, Е.В. Демиденко, А.В. Кунц, А.Т. Русак, И.Ю. Ловшенко // Технические средства защиты информации : тезисы докладов

XVI белорусско-российской научно–технической конференции. / Минск : БГУИР, 2018. – С. 28–29.

[14-А.] Галкин Я.Д. Аналоговый интерфейс кремниевых фотоэлектронных умножителей с большим динамическим диапазоном / Я. Д. Галкин, А. В. Кунц, В. Р. Стемпицкий // 56-я Научная Конференция Аспирантов, Магистрантов и Студентов БГУИР, Минск. – 2020. – С. 68.

[15-А.] Галкин Я.Д. Влияние температуры на выходные параметры зарядочувствительного усилителя / А. В. Кунц, Я. Д. Галкин, В. Р. Стемпицкий // 56-я Научная Конференция Аспирантов, Магистрантов и Студентов БГУИР, Минск. – 2020. – С. 68.

Библиотека БГУИР