

Тестовые и калибровочные системы для считывающей электроники кремниевых детекторов

Часть 1

А. Воронин, к. ф. -м. н.¹, И. Кудряшов²

УДК 539.1.075 | ВАК 05.27.01

Тестирование и калибровка каналов считывающей электроники (СЭ) кремниевых детекторов играет важную роль при отладке аппаратуры кремниевых систем в экспериментах физики высоких энергий (ФВЭ) и физики космических лучей (ФКЛ). Это связано с многоканальностью СЭ и, соответственно, технологическими разбросами параметров измерительных каналов, достигающих $\pm 20\%$ и более. В статье обсуждаются основные вопросы, связанные с проведением тестирования и калибровкой СЭ кремниевых детекторов, принципы построения и структурные решения для тестовых систем и аппаратно-программных комплексов для контроля СЭ.

Различают электрическую и физическую калибровки аппаратуры. Электрическая калибровка показывает работоспособность аппаратуры, но из-за неполной эквивалентности параметров измерительного канала при регистрации частиц и при подаче на вход калибровочных сигналов не обеспечивает полноценной калибровки СЭ [1]. Для исключения этой проблемы проводятся физические калибровки на ускорителях и/или при воздействии космических лучей с последующим сравнением, а также коррекцией измерений. Однако для определения деградации или изменения параметров СЭ в ходе эксперимента требуется электрическая калибровка аппаратуры.

Электрическое тестирование можно проводить двумя способами: на специальном тестовом стенде (ТС) и/или при помощи внутренней (встроенной в СЭ) проверочной системы [2, 3]. ТС также позволяет откалибровать внутреннюю проверочную систему.

Внутренние тестовые, или как принято их называть, калибровочные системы, которые реализуются в СЭ всех кремниевых систем, могут иметь два варианта использования:

- проверка правильности функционирования СЭ;
- электрическая калибровка измерительных каналов СЭ.

Калибровка аппаратуры особенно важна для космических исследований, когда необходимо учитывать деградацию аппаратуры в течение длительного полета на необитаемом космическом аппарате, поскольку при этом отсутствует возможность замены или ремонта аппаратуры. Например, для проекта АТЭС на основе электрических испытаний и испытаний на ускорителе [4] были созданы калибровочные методики СЭ, базирующиеся на комплексном подходе с использованием результатов электрической и физической калибровок. Подобная задача решена в проекте НУКЛОН для малого ионизационного калориметра (МИК).

ВНУТРЕННЯЯ КАЛИБРОВОЧНАЯ СИСТЕМА

Электрическая калибровочная система – неотъемлемая часть любой СЭ для кремниевых детекторов. Применение периодической калибровки обусловлено разбросами параметров каналов, их дрейфом во времени, температуре и под воздействием других дестабилизирующих факторов. Одна из проблем схемотехники калибровочной системы – создание генератора тестовых импульсов, который, в соответствии с принципом работы кремниевых детекторов, должен формировать короткий импульс тока, по форме совпадающий с импульсом детектора [1], который подается на вход предусилителя, связанного с детектором через отдельную цепь. Калибровочная цепь должна минимально влиять на параметры предусилителя. Аппроксимацией реального сигнала детектора можно считать короткий прямоугольный импульс тока, который в случае использования ЗЧУ может быть заменен на перепад напряжения (функция Хевисайда). В итоге,

¹ Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д. В. Скобельцина МГУ им. М. В. Ломоносова, ведущий научный сотрудник, voronin@silab.sinp.msu.ru.

² Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д. В. Скобельцина МГУ им. М. В. Ломоносова, научный сотрудник, ilya.kudryashov.85@gmail.com.

в качестве тестового генератора наиболее часто применяется генератор прямоугольных импульсов напряжения. Основным недостатком такого генератора является формирование импульса обратной полярности по спаду входного импульса, что может приводить к сдвигу базовой линии и другим искажениям, а также превращает входной каскад в усилитель напряжения. Это не в полной мере соответствует реальной схеме преобразования тока в напряжение [1]. Наличие ключей, линий связи и задержек в калибровочной цепи между генератором тестового импульса и входом канала также может приводить к искажениям результатов электрической калибровки.

Таким образом, калибровочная система не может полностью обеспечить имитацию импульсов детектора, возникающих при прохождении реальных частиц через детектор. Поэтому возникает необходимость физической калибровки кремниевой системы с использованием реальных источников излучений и введение коррекции в результаты электрической калибровки.

Электрическая калибровочная система предназначена:

- на этапе разработки аппаратуры – для исследования работы опытных образцов специализированных интегральных микросхем (СИМС) и полной схемы СЭ по всему комплексу параметров;
- при методических физических сеансах – для настройки аппаратуры и сравнения физических результатов с результатами электрической калибровки;
- на этапе сборки установки для проведения эксперимента – для подготовки установки к проведению эксперимента (серийное тестирование);
- на этапе проведения эксперимента – для контроля параметров установки и при необходимости регулировки ее параметров или ремонта.

Основные параметры, позволяющие оценить качество работы канала: величина пьедестала, уровень шума, передаточная характеристика и, в случае измерения времени, точность его измерения. Две последние характеристики могут быть получены только при подключении на вход канала тестового импульса. Тестовый импульс подается на вход через калибровочную емкость, величина которой много меньше суммарной емкости детектора, чтобы исключить влияние калибровочного канала.

Часто применяемая схема калибровочной системы показана на рис. 1.

Управляемый генератор может быть внешним (СИМС CR-1 [5]) и внутренним (СИМС FSSR2 [6]). В качестве внутреннего генератора используется цифро-аналоговый

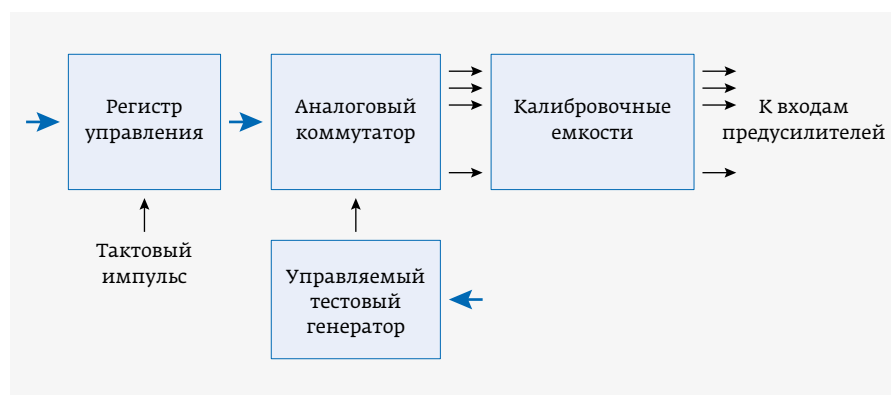


Рис. 1. Вариант построения внутренней калибровочной системы СЭ

преобразователь. Тактовым импульсом, с помощью аналогового коммутатора, на калибровочных емкостях определенных каналов создается перепад напряжения. Амплитуда перепада соответствует коду, поступающему на управляемый тестовый генератор. Оригинальная схема формирования тестового импульса (рис. 2) реализована в СИМС SVX4 [7].

При подключении группы СИМС к линии VCal внешнее напряжение Vext делится внутри СИМС пропорционально резистору Rext и количеству подключенных блоком управления VCal делителей 5 и 2,5 кОм (см. рис. 2). Таким образом, при использовании внешнего постоянного напряжения Vext можно генерировать набор тестовых напряжений, которые при помощи ключа, управляемого CalStrobe, превращают Vext в тестовые импульсы VCal, поступающие на калибровочные емкости.

Часто использование внутренней калибровки совмещается с работой ТС на этапах отладки и сборки СЭ. В настоящее время иногда недостаточно иметь систему внутренней калибровки, показанную на рис. 1 и 2. В работе [2]

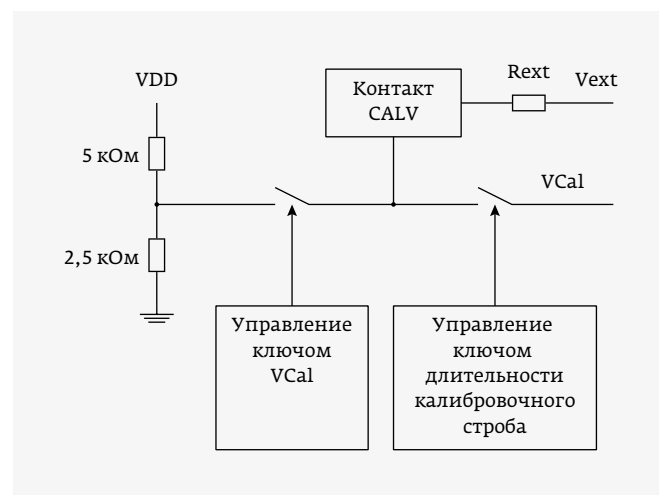
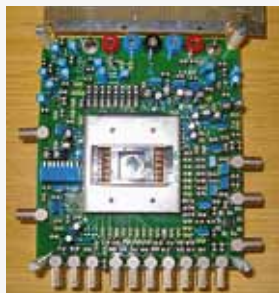


Рис. 2. Формирование тестового импульса в СИМС SVX4



а)



б)



в)

Рис. 3. Тестовые платы с контактными устройствами для измерений: а – опытных 8-канальных СИМС кремниевых детекторов проекта СВМ; б – СИМС MUCH-V3 проекта СВМ; в – СИМС CR-1 проекта АТЭС

предложена структура калибровочной и контрольной системы, обеспечивающей кроме калибровки каналов, проверку работы отдельных блоков СИМС, а также измерение температуры, тока потребления и других параметров СИМС.

ЭЛЕКТРОННЫЕ ТЕСТОВЫЕ СТЕНДЫ (ТС)

Электронные ТС могут быть собраны из стандартных измерительных приборов. Но, как правило, для кремниевых систем необходимо разработать некоторые оригинальные блоки тестовой аппаратуры. Это связано с нестандартностью конструктива и СЭ. Как минимум разрабатывается плата (рис. 3) с контактными устройствами, разъемами и сервисная электроника (рис. 4), в остальном применяются стандартные приборы (тестирование СИМС CR-1).

Тестовый стенд для СИМС CR-1 (см. рис. 4а) проекта АТЭС содержит стандартные приборы: цифровой осциллограф (1), который используется, в частности, как АЦП; генератор калибровочных импульсов (2); блок питания (3). Также в состав стенда входят разработанные устройства: блок включения питания и измерения тока потребления и напряжений питания (4); плата с контактными устройствами для СИМС в пластмассовом корпусе (5); плата управления (6); плата с контактными устройствами для кристалла СИМС в металлокерамическом корпусе (7). Стенд позволяет измерить все основные параметры СИМС CR-1 [5].

На рис. 4б показана структура стенда для измерений характеристик опытного образца схемы с переключением каналов [8], а также тестовых блоков операционного усилителя (ОУ) и устройства выборки хранения (УВХ), расположенных на этом же кристалле. Кварцевый генератор тактовых импульсов совместно с блоком управления, использующий программируемую логическую интегральную схему (ПЛИС), задает код амплитуды тестового импульса для ЦАП и временные диаграммы для АЦП

и СИМС (центр рисунка). Драйверы служат для согласования выходных импедансов СИМС и входов измерительных приборов. АЦП через шину USB передает в компьютер оцифрованные данные измерений.

Результаты измеренных параметров приведены в статьях, описывающих данные СИМС [5, 8].

АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЕ КОМПЛЕКСЫ ДЛЯ ТЕСТИРОВАНИЯ ИС И АППАРАТУРЫ ЧТЕНИЯ ДАННЫХ МНОГОКАНАЛЬНЫХ КРЕМНИЕВЫХ ДЕТЕКТОРОВ

Многие современные микросхемы требуют более сложных ТС, которые обычно называют аппаратно-программными комплексами (АПК). Здесь мы приведем описание лабораторных АПК и их функции для проверки СИМС и СЭ, предназначенных для экспериментов ФВЭ и ФКЛ, а также прикладных задач (тестирования на ускорителе).

Кроме лабораторных АПК, непосредственно в научном центре, где расположена экспериментальная установка, для обеспечения ее правильного функционирования требуются отдельная ТС или АПК. Экспериментальные физические установки ФВЭ, работающие регулярно в течение нескольких лет, обычно проходят две стадии: создание и модернизацию аппаратуры, а также ее ремонт. Для этого необходим АПК, который позволяет:

- испытывать различные версии микросхем чтения сигналов детекторов;
- отрабатывать схемотехнику вновь разрабатываемых микросхем и СЭ;
- проводить серийные испытания микросхем перед установкой микросхем в макетную или рабочую аппаратуру;
- отрабатывать и испытывать электронные блоки с использованием новых версий микросхем.

Некоторые из этих задач решаются также в лабораторных условиях.

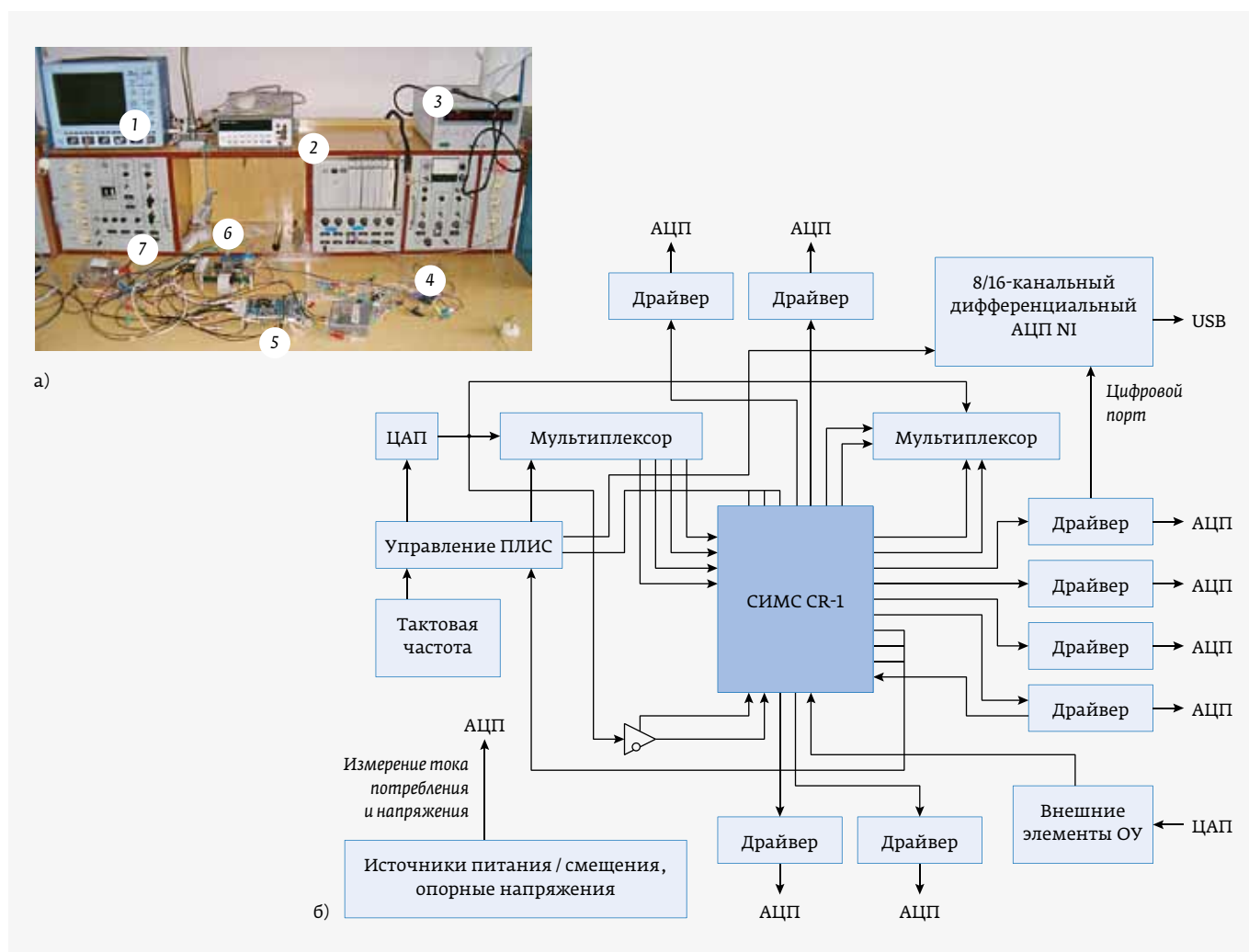


Рис. 4. Тестовый стенд для СИМС CR-1 проекта АТИС: а – внешний вид; б – структурная схема

Не менее важная задача при создании кремниевых систем – методическая отработка СЭ с детекторами при воздействии на них ионизирующего излучения. Тестирование может проводиться в лаборатории с источником излучения, но этот метод не позволяет изучить работу СЭ в полном объеме. Для выполнения задачи проверки СЭ с ионизирующими излучениями обычно проводят методические тестирующие сеансы на ускорителях с частицами разных энергий и различным составом пучка.

Следует отметить несколько важных характеристик АПК (ТС), которые обеспечивают достоверность проводимых испытаний. Источники питания должны иметь минимальную амплитуду пульсаций (менее 0,1 мВ), поэтому предпочтительно применять линейные источники напряжения с дополнительными линейными стабилизаторами напряжения. В случае использования импульсных источников требуются фильтры, способные снизить уровень пульсаций до приемлемого уровня. В некоторых

случаях требуется экранировка каскадов на тестовой плате и минимальные величины паразитных элементов, образующиеся при трассировке проводников платы. Управляющие СИМС сигналы не должны проходить под кристаллом СИМС.

Набор параметров, которые необходимо измерять при помощи АПК, достаточно обширен и зависит от конкретной схемы СЭ. В общем случае при помощи АПК измеряются:

- статические параметры (рабочие точки элементов СЭ);
- аналоговые параметры: усиление отдельных каскадов, формы и амплитуды сигналов, переходные характеристики, линейность, уровень шума, динамический диапазон, динамическая емкость входного каскада, нагрузочная способность выходных каскадов, стабильность и значение базовой линии, разрешение при измерении времени, амплитудно-частотные характеристики, частотные спектры

сигналов и шумов, фазовый спектр шумов генератора, перекрестные помехи;

- параметры ЦАП и АЦП: значение младшего разряда, линейность, диапазон, количество действующих разрядов, джиттер, стабильность характеристик, быстродействие;
- цифровая часть: вероятность сбоев и критических задержек (случайные сбои при некоторых значениях кода);
- значения частот, формируемых в СИМС, джиттер формируемых частот;
- задержки сигналов;
- потребляемая мощность, температурные зависимости параметров.

При испытаниях многоканальных микросхем с количеством выходных площадок более 100 одна из проблем – обеспечение контактов с выходными площадками. Для создания универсальных многоконтактных зондов с высокими параметрами (низкая емкость (менее 0,3 пФ), широкая полоса пропускания (более 300 МГц), хорошая экранировка зондов) необходима разработка зонда под каждый тип СИМС.

Решением этой проблемы для отдельных микросхем является комбинированный подход, использующий сочетание свободно перемещаемых зондов (пикопробов) и специализированной печатной платы. Если микросхема имеет корпус с выходными площадками, то на печатной плате устанавливается тестовый разъем, позволяющий производить замену микросхем в контактном устройстве без дополнительных операций, таких как пайка. Для случая, когда микросхема должна применяться без корпуса, она устанавливается в промежуточный корпус с достаточным количеством контактов, при этом корпус не имеет верхней защиты (крышки). Промежуточный корпус затем вставляется в тестовый разъем.

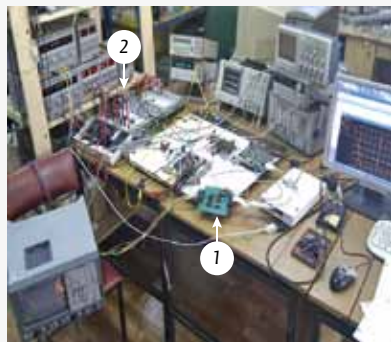
На специальной плате также устанавливаются фильтры питания; дополнительные элементы для обеспечения регулировок параметров каскадов микросхемы, если они предусмотрены схемой включения СИМС; драйверы для согласования импедансов измерительных приборов и ИС; контакты (разъемы) для соединения платы с измерительной электроникой (см. примеры в предыдущем разделе). Специальная плата, как правило, разрабатывается под каждый тип тестируемых микросхем. Остальные электронные блоки, обеспечивающие проверку микросхем, могут быть общими для различных типов тестирующего оборудования.

Для обеспечения контактирования зонда с точками схемы, снижения количества контактных площадок и уменьшения влияния паразитных элементов в опытных СИМС может вскрываться пассивация, нанесенная на кристалле СИМС (СИМС CR-1, MUCN V3).

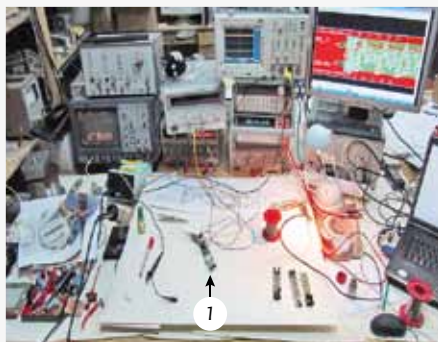
В заключение обсуждения общих вопросов тестирования СЭ можно сделать вывод, что все реализованные проекты для кремниевых детекторов показали необходимость применения современных тестовых комплексов, без которых проверка аппаратуры была бы значительно затруднена.

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ АПК

Рассмотрим тестовый комплекс, который предназначен для управления электроникой СЭ различных проектов, чтением данных, их преобразованием и визуализацией, а также оснащен вспомогательной диагностикой. Аппаратное и программное обеспечение, как стандартное (коммерческое), так и разработанное специально для стенда, обеспечивает все необходимые функции для реализации тестирования и отладки аппаратуры. АПК состоит из двух независимых частей. Первая часть – универсальная, она позволяет измерять параметры СИМС



а)



б)



в)

Рис. 5. Универсальный АПК: а – конфигурация стенда для тестов с СИМС НУКЛОН; б – конфигурация для тестов с СЭ дозиметра; в – СЭ с детектором и источником низкоэнергетичных электронов



Разработка и производство конденсаторов

оксидно-электролитические алюминиевые конденсаторы

K50-15, K50-17, K50-27, K50-37, K50-68, K50-77, K50-80, K50-81, K50-83, K50-84, K50-85, K50-86, K50-87, K50-88, K50-89, K50-90, K50-91, K50-92, K50-93, K50-94, K50-95(чип), K50-96, K50-97(чип), K50-98, K50-99, K50-100, K50-101(чип), K50-102, K50-103, K50-104, K50-105, K50-106

объемно-пористые танталовые конденсаторы

K52-1, K52-1М, K52-1БМ, K52-1Б, K52-9, K52-11, K52-17, K52-18, K52-19, K52-20, K52-21, K52-24, K52-26(чип), K52-27(чип), K52-28, K52-29, K52-30

оксидно-полупроводниковые танталовые конденсаторы

K53-1А, K53-7, K53-65(чип), K53-66, K53-68(чип), K53-69(чип), K53-71(чип), K53-72(чип), K53-74(чип), K53-77(чип), K53-78(чип), K53-82

суперконденсаторы (ионисторы)

K58-26, K58-27, K58-28, K58-29, K58-30, K58-31, K58-32, K58-33

накопители электрической энергии на основе модульной сборки суперконденсаторов НЭЭ, МИК, МИЧ, ИТИ

Система менеджмента качества сертифицирована на соответствие требованиям ISO 9001



и СЭ и может быть подключена к падовым или полосковым детекторам. Вторая часть, которая будет рассмотрена ниже, содержит светонепроницаемый бокс, предназначена для испытаний СЭ с микрополосковыми детекторами (микрострипами) и обеспечивает возбуждение одного стрипа детектора при шаге более 40 мкм при помощи лазера. Возможно исследование попадания нескольких частиц в детектор или кластер, образованный от одной частицы (сигнал в каждом стрипе) с радиоактивным источником.

На лабораторном универсальном АПК проведены электрические испытания СЭ вершинного детектора, который прошел три модификации. Установка «Спектрометр с вершинным детектором» (СВД-2) [9] размещена на выведенном пучке протонов в Институте физики высоких энергий. На этой установке производилась модернизация СЭ с микростриповыми детекторами на базе ИС VAI, VI' и VAI-3.

Для российского космического проекта НУКЛОН была разработана и протестирована специализированная 32-канальная микросхема с уникальным динамическим диапазоном до 120 пКл [10], а также прототип лэдэра на ее основе. Созданы и испытаны прототипы СИМС для проекта FAIR (например [11]), СЭ для дозиметра с кремниевым детектором, а также другая считывающая электроника:

- микросхемы, реализуемые с участием НИИЯФ МГУ и используемые в ряде проектов;
- электронная аппаратура, в которой установлены сторонние СИМС (прототипы микросхем и аппаратура для этих проектов прошли испытания, настройку и отладку на универсальном измерительном комплексе).

Универсальный тестовый комплекс (рис. 5) работает в двух режимах: тестирование электроники, когда сигналы детекторов имитируются импульсными генераторами, и проверка плат электроники с детекторами с использованием источников, создающих ионизирующее излучение для детекторов. Такими источниками могут быть: лазер, работающий в импульсном режиме, или радиоактивный источник. В случае использования радиоактивного источника требуется триггерная система, в качестве которой может быть использован цифровой осциллограф или отдельная система с регулируемым порогом.

Ядро универсального АПК для тестирования СИМС НУКЛОН показано на рис. 6. Тестируемые платы с СИМС и СЭ обозначены как 1 на рис. 5. Кроме того, для тестирования могут применяться блок управления напряжениями питания и измерения напряжений и токов потребления по отдельным цепям (обозначен как 2 на рис. 5) и блок коммутации (см. рис. 6). В состав универсального АПК также могут вводиться дополнительные приборы и блоки,

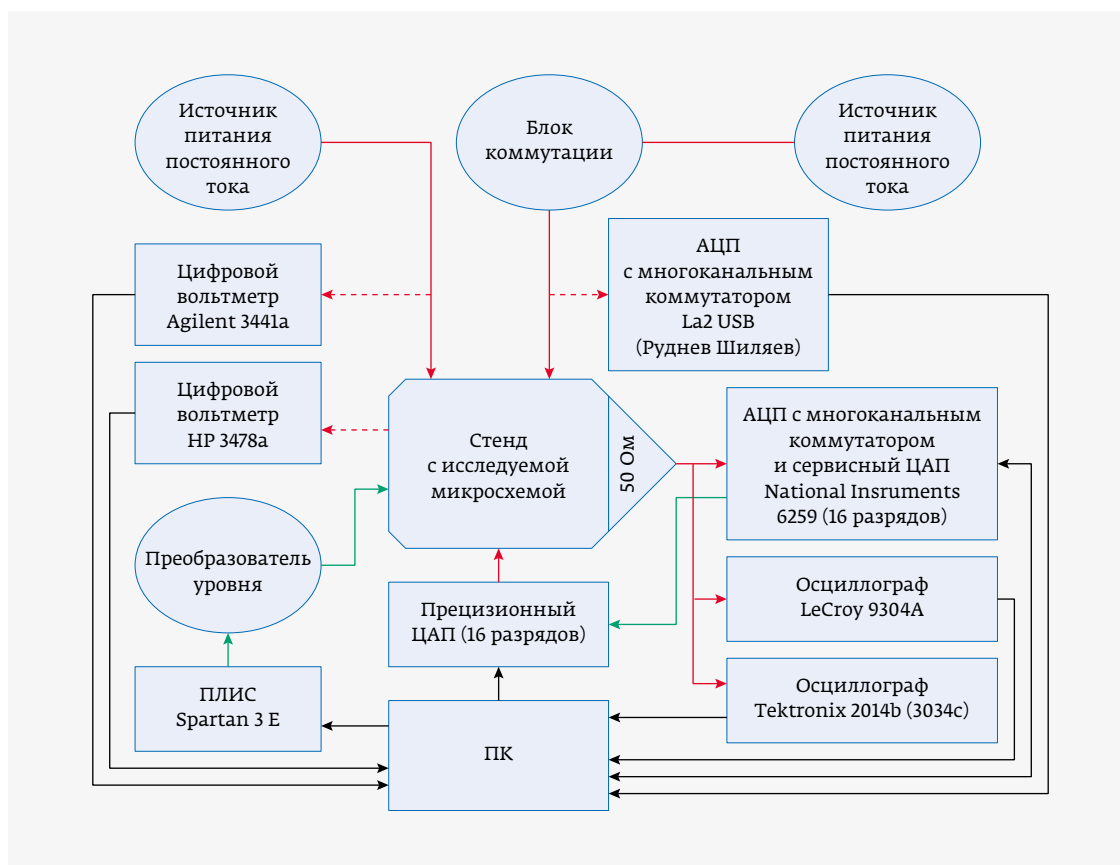


Рис. 6.
Ядро универсального АПК



ГРУППА КОМПАНИЙ

ЭЛЕКТРОННОЕ СПЕЦИАЛЬНОЕ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

АО НПП ЭСТО (Группа компаний ЭСТО) – объединение ведущих российских предприятий, специализирующихся на разработках, производстве, модернизации, продаже и сервисном обслуживании специального технологического оборудования.

Направления деятельности группы «ЭСТО»

Разработка и производство технологического оборудования (лазерное, вакуумное, сборочное, нестандартное) и внедрение технологий

Организация поставок как отдельных единиц зарубежного технологического оборудования, так и комплексных законченных технологий «под ключ»

Комплексная и частичная модернизация российского и зарубежного технологического оборудования любой сложности

Сервисное обслуживание российского и зарубежного технологического оборудования

Проектирование и строительство производств микроэлектроники

Обучение специалистов заказчика

Технологический аудит производства

Группа компаний ЭСТО более 20 лет производит оборудование для микроэлектроники в собственном инженерно-производственном комплексе метражом в 5000 кв.м в г. Зеленограде

Акционерное общество
«Научно-производственное
предприятие «Электронное
специальное технологическое
оборудование»

124460, Москва, Зеленоград,
просп. Георгиевский, д. 5, стр. 1
тел.: (499) 729-77-51,
(499) 479-12-39
info@nppesto.ru
www.nppesto.ru



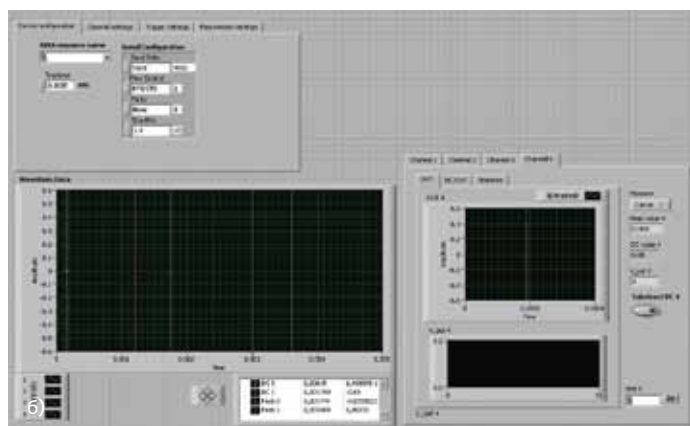
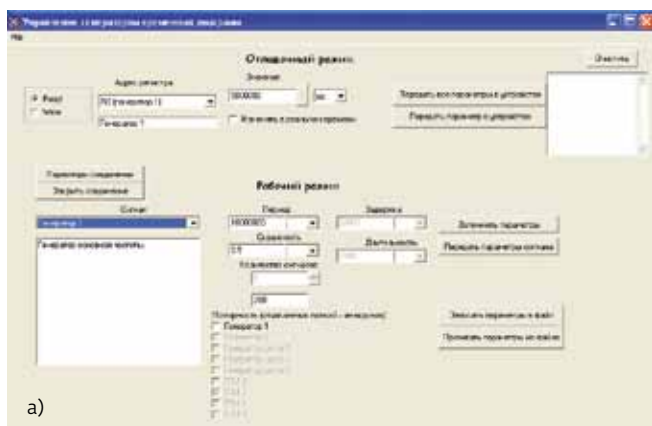


Рис. 7. Пользовательские интерфейсы: а – установки параметров сигналов управления СЭ; б – системы сбора данных

в частности, частотные и амплитудные анализаторы спектров. ПЛИС Spartan 3Е формирует тактовые частоты и временные диаграммы для управления СИМС СЭ.

Путем установки необходимых параметров и программирования ПЛИС можно сформировать сигналы управления для конкретной СЭ. Преобразователь логических уровней конвертирует униполярные уровни 0 и 3,3 В в требуемые уровни напряжения для управления СЭ, например для СИМС НУКЛОН – в биполярные сигналы $-1,65$ и $1,65$ В. В качестве генератора входного тестового воздействия используется 16-разрядный ЦАП SPT6219, управляемый при помощи блока NI USB-6259. Триггер вырабатывается платой Spartan. Амплитуда сигнала определяется 8-разрядным цифровым кодом с блока NI USB-6259 (диапазон входного напряжения 0–5 В). Аналоговые и дискретные выходные сигналы СЭ, напряжения питания и смещения оцифровываются при помощи двух осциллографов Tektronix TDS3014 и LeCroy 9304a, а также АЦП с коммутаторами NI USB-6259 и ЛА32 USB.

Осциллографы, кроме визуализации сигналов, имеют возможность математической обработки измеренных сигналов и применяются для предварительной работы с оцифрованными данными.

АПК может работать в автоматическом и ручном режимах. Автоматизация измерений определяется программным обеспечением, созданным в среде LabView и WinAPI/C++. На рис. 7 и 8 представлены интерфейсы системы сбора данных для установки параметров сигналов управления СЭ и интерфейс программы управления АЦП ЛА-2 USB. На тестовой плате СИМС НУКЛОН расположены: стабилизаторы напряжения, драйверы, элементы регулировки смещений каскадов СИМС, нагрузки. Для уменьшения влияния пробника на результаты измерений применяется активный пикопроб с входным импедансом 1 Гом/0,1 пФ.

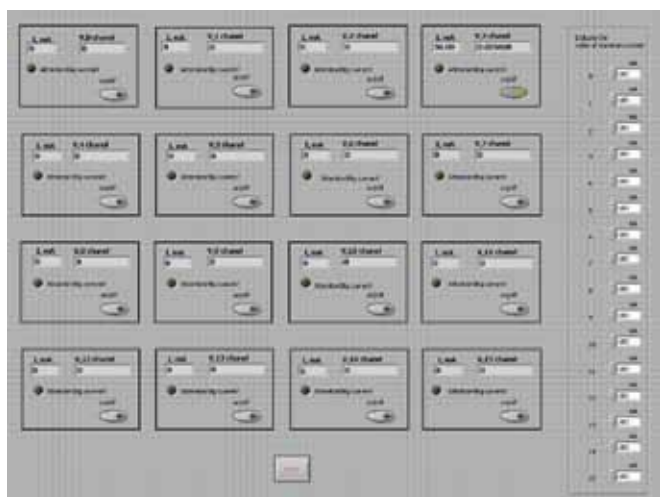


Рис. 8. Интерфейс управления АЦП ЛА-2 USB

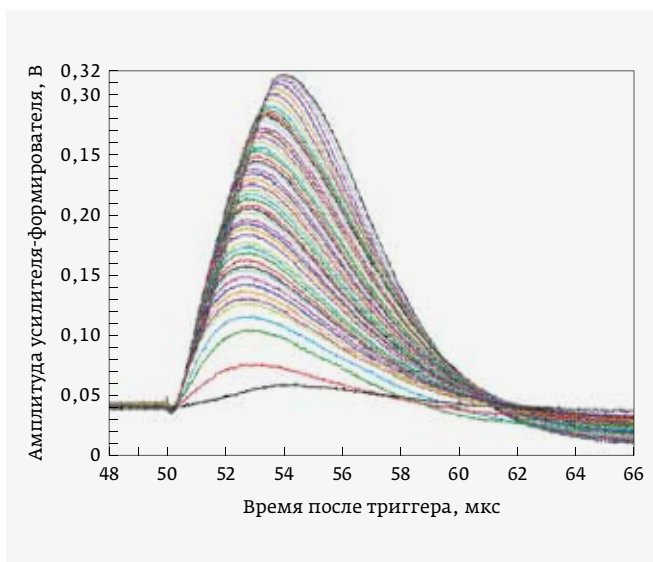


Рис. 9. Семейства откликов на входное воздействие для $VPF=2,7$ В

На рис. 9 приведено семейство измеренных с помощью пикопроба откликов шейпера СИМС для смещения $V_{PF}=2,7$ В. Основные результаты тестирования приведены в [10].

ЛИТЕРАТУРА

1. **Воронин А.** Моделирование сигналов головной части считывающей электроники кремниевых детекторов // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2021. № 2. С. 150–155.
2. **Воронин А.** Перспективные цифровые решения для считывающей электроники кремниевых детекторов // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2021. № 6. С. 96–108.
3. **Воронин А.** Структура каналов для считывающей электроники кремниевых детекторов // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология. 2019. № 2. С. 106–114.
4. **Guzik T. G., Adams J. H., Ahn H. S., Bashindzhagyan G., Voronin A. et al.** The ATIC long duration balloon project // Advances in Space Research 33 (2004) 1763–1770.
5. **Adams J. H., Voronin A. et al.** The CR-1 chip: custom VLSI circuitry for cosmic rays // Proceedings of the 26th ICRC. 1999. V. 5, Salt Lake City. P. 69.
6. **Re V. et al.** FSSR2, a self-triggered low noise readout chip for silicon strip detectors // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2006. V. 53. No. 4. PP. 2470–2476.
7. **Christofek L., Hanagaki K., Hoff J., Kreiger B., Rapidis P., Garcia-Sciveres M. et al.** SVX4 User's Manual // D0 Note 4252, FERMILAB-TM-2318-E. 2005.
8. **Аткин Э. В., Воронин А. Г., Ключев А. Д., Бочаров Ю. И.** Метод и интегральная микросхема для обработки нерегулярного во времени потока данных в многоканальной аппаратуре физического эксперимента // Приборы и техника эксперимента. 2010. № 1. С. 1–7.
9. **Авдейчиков В. В., Алеев А. Н., Ардашев Е. Н., Басиладзе С. Г., Богданова Г. А., Вишневская А. М., Волков В. Ю., Воробьев А. П., Воронин А. Г.** Спектрометр с вершинным детектором для экспериментов на ускорителе ИФВЭ // Приборы и техника эксперимента. 2013. № 1. С. 14–37.
10. **Аткин Э. В., Волков Ю. А., Воронин А. Г., Дементьев Д. В., Ильющенко И. И., Карманов Д. Е., Ключев А. Д., Кудряшов И. А., Лобанов А. А., Подорожный Д. М., Шумихин В. В.** Испытание 32-канальной интегральной микросхемы для регистрации сигналов кремниевых детекторов // Приборы и техника эксперимента. 2012. № 4. С. 43–48.
11. **Atkin E., Malankin E., Shumikhin V., Samsonov V., Voronin A. 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.

Тестирование электроники в эпоху миниатюризации






Хотите узнать больше о наших технологиях и продукции?
Свяжитесь с нами по электронной почте russia@jtag.com
или посетите наш сайт www.jtag.com.







Более 25 лет в самом сердце электроники



Клиенты в более чем 50 странах



По всему миру продано более 10 000 систем



Более 2500 клиентов



Поддержка по всему миру

Как разрабатывать, производить и тестировать высококачественные электронные изделия с меньшими затратами и в короткие сроки?



Загрузите нашу программу