

## ПРИМЕНЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ

УДК 539.1.075

### МНОГОКАНАЛЬНАЯ СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКАЯ СИСТЕМА РЕГИСТРАЦИИ СИГНАЛОВ СО СТРИПОВЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДЕТЕКТОРОВ

© 2019 г. Ю. В. Тубольцев<sup>a</sup>, И. В. Ерёмин<sup>a</sup>, А. А. Богданов<sup>a,\*</sup>, В. К. Ерёмин<sup>a</sup>,  
Ю. В. Чичагов<sup>a</sup>, А. С. Фомичев<sup>b</sup>, О. А. Киселёв<sup>c</sup>, Д. А. Костылева, А. А. Безбах<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН  
Россия, 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26

<sup>b</sup> Объединенный институт ядерных исследований, Лаборатория ядерных реакций им. Г.Н. Флерова  
Россия, 141980, Дубна Московской обл., ул. Жолио-Кюри, 6

<sup>c</sup> GSI Helmholtz Centre for Heavy Ion Research Planckstraße, 1, 64291 Darmstadt, Germany

\*e-mail: Alexander.A.Bogdanov@mail.ioffe.ru

Поступила в редакцию 16.04.2019 г.

После доработки 16.04.2019 г.

Принята к публикации 13.05.2019 г.

Описана система регистрации сигналов со стриповых полупроводниковых детекторов, созданная на основе специализированной микросхемы IDE1140. Система содержит 64 спектрометрических тракта, обеспечивающих регистрацию сигналов со стрипов детектора. Источником триггерного сигнала может служить внешний сигнал или детектор, регистрирующий прохождение частицы ионизирующего излучения через стрипы, амплитуда сигнала с которого может использоваться для спектрометрии частиц. Узел управления и считывания сигналов IDE1140, выполненный на программируемой логической интегральной схеме EP3C16Q240, служит для обработки, накопления и передачи данных. Приведены основные характеристики системы: интегральная нелинейность <1% в диапазоне от 5 до 160 фКл и эквивалентный шумовой заряд 0.7 фКл.

DOI: 10.1134/S0032816219060168

#### ВВЕДЕНИЕ

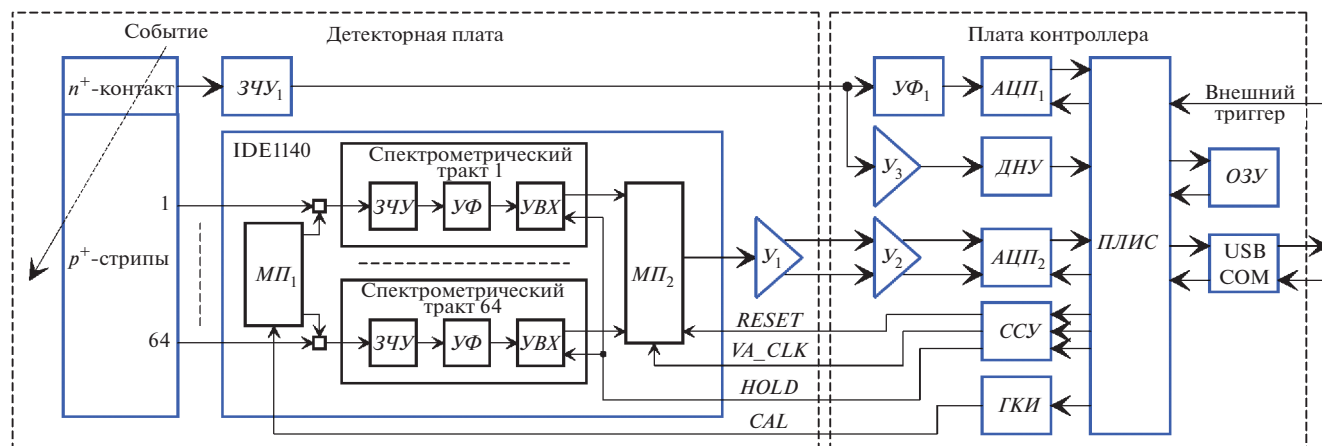
Успехи в области ядерной физики, астрофизики, физики высоких энергий и масс-спектрометрии во многом связаны с совершенствованием позиционно-чувствительных систем, в том числе и систем с высоким пространственным и энергетическим разрешением.

В ядерной физике в настоящее время широко используются кремниевые стриповые и пиксельные детекторы, способные с высокой точностью определять точку взаимодействия частицы с детектором. На их основе создаются детектирующие системы для регистрации траекторий частиц высоких энергий. Такие системы успешно используются в ЦЕРН [1], в экспериментах с радиоактивными ионными пучками на комплексе DRIBs-III Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ [2] и перспективны для работ по международной программе FAIR в центре ядерных исследований GSI (г. Дармштадт) [3, 4]. В современной астрофизике из кремниевых позиционно-чувствительных детекторов планируется формировать активную среду космического телескопа ГАММА-400 [5] и элементы обсерватории AMEGO [6].

Во всех перечисленных примерах используются различные системы регистрации сигналов с полупроводниковых позиционно-чувствительных детекторов. Одним из вариантов построения таких систем является применение многоканальных схем высокой степени интеграции с зарядочувствительным предусилителем, усилителем-формирователем и устройством выборки и хранения [7, 8]. Такие схемы позволяют зарегистрировать как координату частицы, так и ее энергию. Подробному описанию построения одной из таких систем [9] и посвящена данная статья.

#### СТРУКТУРНАЯ СХЕМА СИСТЕМЫ РЕГИСТРАЦИИ

Система регистрации была разработана для использования с односторонним планарным кремниевым  $p^+ - n - n^+$ -детектором с  $p^+$ -контактом, сегментированным на 64 стрипа, и с несегментированным  $n^+$ -контактом, с которого снимаются триггерный (быстрый) и спектрометрический (медленный) сигналы.



**Рис. 1.** Блок-схема системы регистрации. ЗЧУ – зарядочувствительный предусилитель; МП – мультиплексор; УФ – усилитель-формирователь; УВХ – устройство выборки и хранения; У – усилитель; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; ДНУ – дискриминатор нижнего уровня; ССУ – схема смещения уровней; ГКИ – генератор калибровочных импульсов; ПЛИС – программируемая логическая интегральная схема; ОЗУ – внешняя память; USB-COM – USB-передатчик.

Система содержит детекторную плату, предназначенную для работы в вакууме, и плату контроллера (рис. 1). По функциональному назначению можно выделить такие узлы, как: стриповый кремниевый полупроводниковый детектор, узел регистрации сигналов с 64-х стрипов детектора, узел генерации триггерного сигнала, узел первичной обработки, накопления и передачи данных, компьютер для окончательной обработки, хранения и представления данных.

Узел регистрации и обработки сигналов с 64-х стрипов детектора содержит специализированную микросхему большой степени интеграции типа IDE1140 [10], дифференциальные усилители  $Y_1$ ,  $Y_2$  и аналого-цифровой преобразователь АЦП<sub>2</sub>. Микросхема IDE1140 предназначена для регистрации зарядов и выбрана из ряда микросхем, представленных компанией IDEAS, исходя из числа стрипов детектора, необходимого диапазона регистрации сигналов, малой рассеиваемой мощности и малых размеров.

В соответствии с числом стрипов детектора микросхема содержит 64 спектрометрических тракта. Выходным сигналом каждого тракта является напряжение, полученное путем преобразования входного заряда, зарегистрированного в определенный момент времени. Каждый спектрометрический тракт содержит зарядочувствительный предусилитель ЗЧУ, усилитель-формирователь УФ и устройство выборки и хранения УВХ.

Сигналы с каждой схемы выборки и хранения последовательно считываются на выход микросхемы с помощью аналогового мультиплексора МП<sub>2</sub>, входящего в состав микросхемы. Считыванием управляет генератор серии импульсов, сконфигурированный в программируемой логической ин-

тегральной схеме ПЛИС (EP3C16Q240). Период следования импульсов  $t$  задает время считывания сигнала с IDE1140 и, следовательно, определяет общее время считывания сигналов со всех спектрометрических трактов как произведение  $t \cdot 64$ .

На входе IDE1140 имеется второй аналоговый мультиплексор МП<sub>1</sub>, предназначенный для подачи на входы ЗЧУ калибровочного сигнала с генератора калибровочных импульсов ГКИ. С помощью этого сигнала осуществляется проверка работоспособности и качества работы каналов.

Структура устройства обоснована принципом действия микросхемы IDE1140, который предполагает запуск цикла ее работы триггерным сигналом. Источником триггерного сигнала в данной схеме может являться внешний сигнал или сигнал с несегментированного  $n^+$ -контакта детектора (быстрый сигнал), тракт регистрации которого включает в себя зарядочувствительный предусилитель ЗЧУ<sub>1</sub> и следующие за ним быстрый усилитель  $Y_3$  и дискриминатор нижнего уровня ДНУ.

В схеме реализована функция формирования спектрометрического сигнала с несегментированного омического контакта детектора (медленный сигнал), которую обеспечивает зарядочувствительный предусилитель ЗЧУ<sub>1</sub> и усилитель-формирователь УФ<sub>1</sub> с аналого-цифровым преобразователем АЦП<sub>1</sub>.

Таким образом, в разработанном устройстве предусмотрены две возможности спектрометрии частиц: по сигналам, снимаемым со стрипов детектора, и по сигналам, снимаемым с общего омического контакта детектора.

Узел первичной обработки, накопления и передачи данных выполнен на программируемой

логической интегральной схеме ПЛИС, внешней оперативной памяти ОЗУ и USB-передатчике. В ПЛИС сконфигурированы: блок управления (который вырабатывает сигнал *HOLD* для *УВХ*, сигнал *RESET* на все регистры IDE1140 и сигнал *SHIN* на *МП<sub>2</sub>*), генератор серии импульсов *VA\_Clk*, внутренняя оперативная память, драйвер АЦП, блок управления внешней памятью и USB-драйвер. Поскольку IDE1140 работает с отличными от стандартных логическими уровнями сигналов, то для передачи сигналов с ПЛИС применена схема смещения уровней *ССУ*.

Работу устройства иллюстрирует рис. 2, она заключается в следующем. Частица, попадая на детектор, создает сигналы в виде собранного заряда на одном или нескольких стрипах детектора и одновременно на общем  $n^+$ -контакте. Сигнал с  $n^+$ -контакта, усиленный *ЗЧУ<sub>1</sub>*, формируется на выходе *У<sub>3</sub>* как быстрый сигнал. Этот сигнал отбирается по нижнему уровню *ДНУ*, с выхода которого уже логический импульс *TRIG* поступает на вход ПЛИС. По импульсу *TRIG* ПЛИС вырабатывает сигнал *RESET*, устанавливающий в исходное состояние все регистры IDE1140.

Электрические заряды со стрипов  $p^+$ -контакта регистрируются зарядочувствительными усилителями *ЗЧУ* и формируются с постоянной времени 6.5 мкс на усилителях-формирователях *УФ* микросхемы IDE1140. Импульсы с *УФ* отслеживаются устройствами выборки и хранения *УВХ* до того момента, пока не придет импульс *HOLD*, фиксирующий их текущее значение. Этот импульс формируется в ПЛИС по сигналу *TRIG* с задержкой на время формирования фронта импульса с *УФ*. Таким образом, в тех каналах, где зарегистрирован заряд с детектора, импульс *HOLD* фиксирует на конденсаторах *УВХ* максимальное значение импульса с *УФ*, а в других каналах — случайные значения шумовых сигналов.

После того как уровни сигналов с *УФ* зафиксированы на *УВХ*, ПЛИС посылает на IDE1140 логический импульс *SHIN* и вырабатывает серию из 64-х импульсов *VA\_Clk* с частотой 1 МГц (увеличиваемой при необходимости до 10 МГц, согласно спецификации микросхемы IDE1140). По первому импульсу *VA\_Clk* уровень сигнала *SHIN* записывается в первый разряд внутреннего сдвигового регистра мультиплексора *МП<sub>2</sub>*, который управляет коммутацией его ключей. Сдвиг записанного уровня обеспечивает последовательную передачу через мультиплексор напряжений со всех схем выборки и хранения, тем самым осуществляя их считывание. Оцифровка напряжений на АЦП<sub>2</sub> происходит по тактовым импульсам *ADC\_Clk*.

Сконфигурированные в ПЛИС блоки осуществляют контроль и управление элементами системы в зависимости от выбора одного из двух режимов работы: спектрометрического или ос-

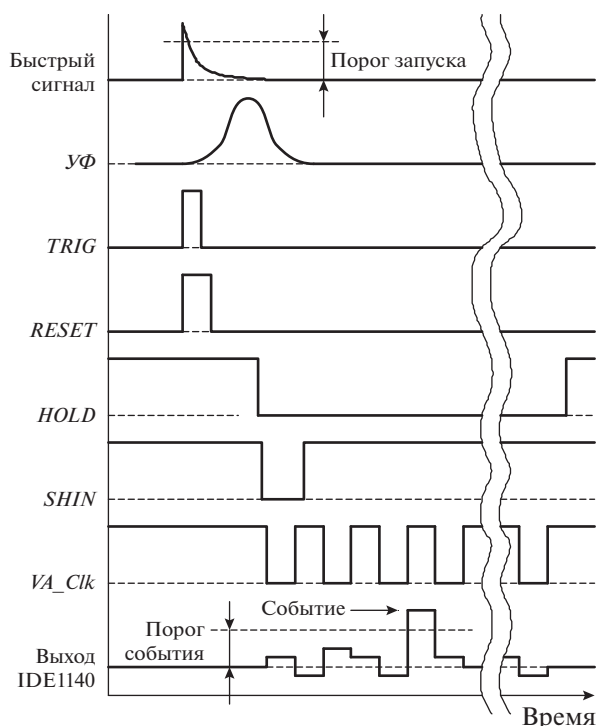


Рис. 2. Временная диаграмма работы устройства.

циллографического. В спектрометрическом режиме производится запись 64-х значений напряжений со спектрометрических трактов IDE1140 во внешнюю память (объем которой позволяет записать до 4032 событий) и одновременно строится амплитудное распределение сигналов с общего  $n^+$ -контакта детектора. В осциллографическом режиме производится запись осциллограммы с одного из АЦП во внешнюю память. При переполнении ОЗУ или по запросу компьютера измерение останавливается и данные считываются через USB-интерфейс.

Компьютер обеспечивает сбор, накопление, окончательную обработку данных и визуальное представление информации. Оператор осуществляет управление прибором и задает режимы его работы. В осциллографическом режиме на экран монитора выводится спектрометрический сигнал, оцифрованный с помощью АЦП<sub>1</sub>, сигналы со спектрометрических трактов микросхемы IDE1140, а также сигнал с нее в режиме тестирования, который позволяет по времени появления вершины тестового сигнала определять и устанавливать необходимую задержку сигнала *HOLD*, а также регулировать порог срабатывания амплитудного дискриминатора. В спектрометрическом режиме программа строит 64 амплитудных спектров сигналов со стрипов, амплитудный спектр сигналов в спектрометрическом канале  $n^+$ -контакта детектора и гистограмму координат зарегистрированных частиц.

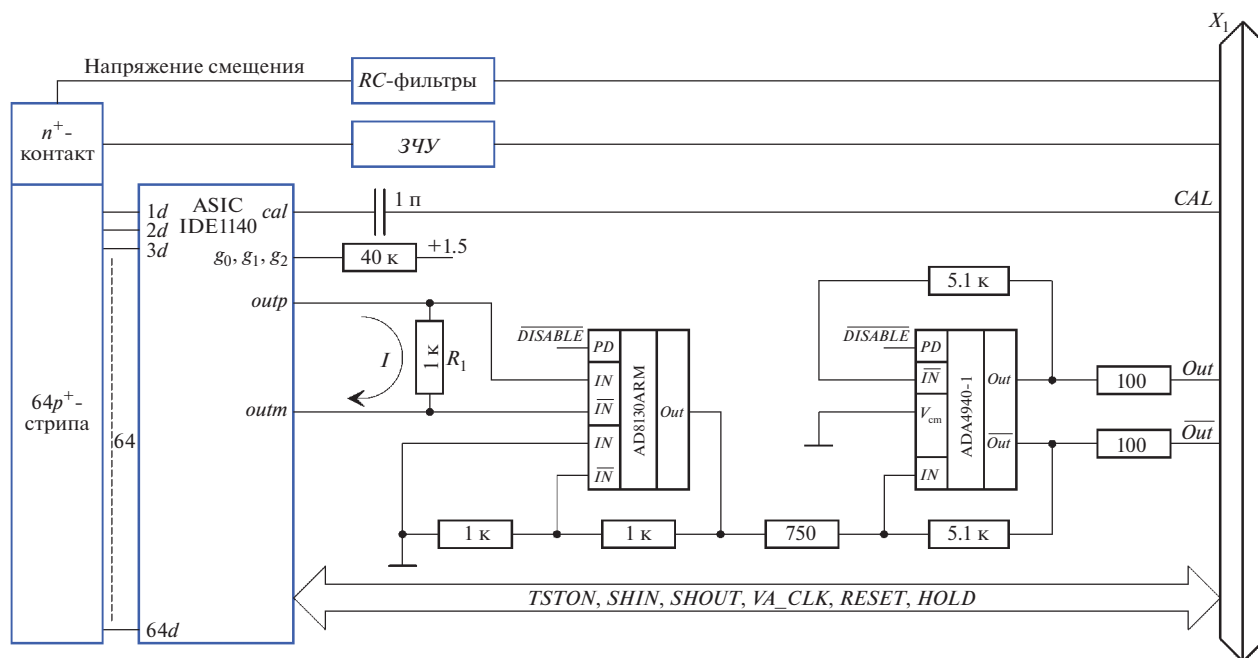


Рис. 3. Принципиальная электрическая схема детекторной платы.

Спектрометрические и триггерный сигналы, а также выходной сигнал с IDE1140, выведены на внешние разъемы устройства в тестовых целях. Кроме запуска системы считывания по внутреннему триггеру, в схеме предусмотрен запуск считывания по приходу внешнего триггера.

Конструктивно устройство выполнено на двух печатных платах. Детектор, микросхема IDE1140, предусилитель и RC-фильтры в цепи подачи напряжения смещения на стриповый детектор расположены на отдельной печатной плате – плате детекторов.

### ОПИСАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ДЕТЕКТОРНОЙ ПЛАТЫ

На рис. 3 представлена упрощенная электрическая схема детекторной платы. Она содержит детектор, микросхему IDE1140, два усилительных каскада и зарядочувствительный предусилитель. Усиление IDE1140 на линейном участке диапазона 0–72 фКл составляет 2.6 мкА/фКл. Преобразование выходного тока в напряжение осуществляется на резисторе  $R_1$  (1 кОм). Для усиления полученного сигнала используется дифференциальный усилитель, построенный на основе микросхемы AD8130. Структура этой микросхемы удобна тем, что ток обратной связи не влияет на напряжение, создаваемое выходным током IDE1140 на резисторе  $R_1$ .

Второй каскад собран на дифференциальном усилителе ADA4940 и предназначен для передачи парафазного сигнала на основную плату через

разъем  $X_1$ . Микросхема ADA4940, как и IDE1140, характеризуется малой мощностью потребления, что важно при работе детекторной платы в условиях вакуума. Кроме того, в схеме предусмотрен сигнал *DISABLE*, с помощью которого можно программно переводить схему в режим малого энергопотребления. Сигнал *TSTON* переводит схему в режим калибровки. Сигнал *SHOUT* сообщает о моменте окончания считывания напряжений со схем выборок и хранения.

Расположенный на детекторной плате зарядочувствительный предусилитель 3ЧУ, функционально относящийся к каналу формирования быстрого и медленного сигналов, рассмотрен ниже.

### ОПИСАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ФОРМИРОВАНИЯ БЫСТРОГО И МЕДЛЕННОГО СИГНАЛОВ

Схемы каналов формирования быстрого и медленного сигналов представлены на рис. 4. Каналы содержат по три основных узла: предусилитель, усилитель-формирователь и быстрый усилитель. Предусилитель выполнен на модуле  $M_1$ , усилитель-формирователь – на модуле  $M_5$  и микросхеме  $M_6$ , быстрый усилитель – на микросхемах  $M_2$ ,  $M_3$  и  $M_4$ . Усилитель-формирователь и быстрый усилитель созданы в виде отдельной съемной печатной платы, соединенной через разъем с платой контроллера.

Модуль  $M_1$  представляет собой зарядочувствительный предусилитель CR-110 [11], выбранный из ряда предусилителей фирмы Cremat Inc по чув-

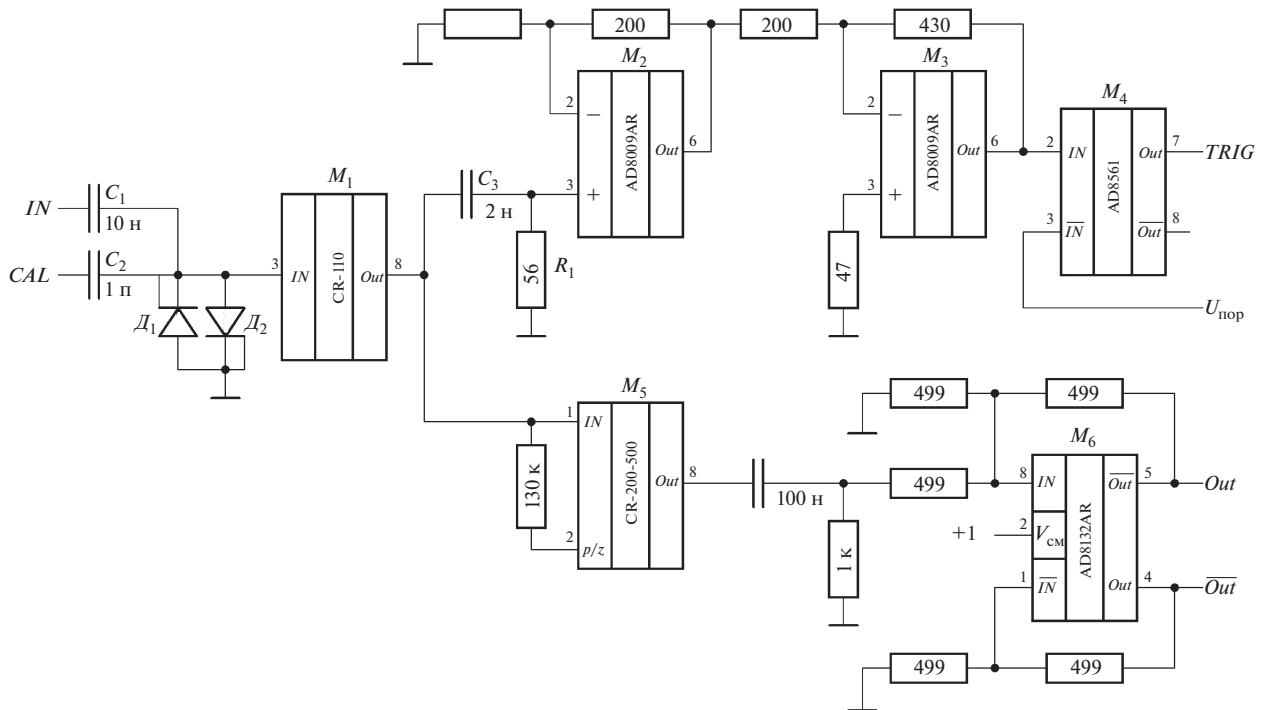


Рис. 4. Схема каналов формирования быстрого и медленного сигналов.  $M_1$  – модуль CR-110;  $M_2, M_3$  – AD8009AR;  $M_4$  – AD8561;  $M_5$  – модуль CR-200-500;  $M_6$  – AD8132AR;  $D_1, D_2$  – PAD1.

ствительности к заряду и коэффициенту его преобразования. Собственный шумовой заряд, приведенный к входу модуля, составляет 200  $\bar{e}$  RMS (среднеквадратичное значение в электронах); эквивалентный шумовой заряд – 720 эВ RMS (Si). Коэффициент преобразования CR-110 – 1.4 В/пКл или 62 мВ/МэВ при энергии образования пары 3.6 эВ.

Для защиты входов используются InterFET диоды  $D_1$  и  $D_2$  с минимальными паразитными параметрами: обратный ток менее 1 пА, емкость менее 1 пФ. Входной сигнал и сигнал калибровки поступают через конденсаторы  $C_1$  и  $C_2$  соответственно. В результате преобразования импульса входного заряда на выходе  $M_1$  образуется импульс экспоненци-

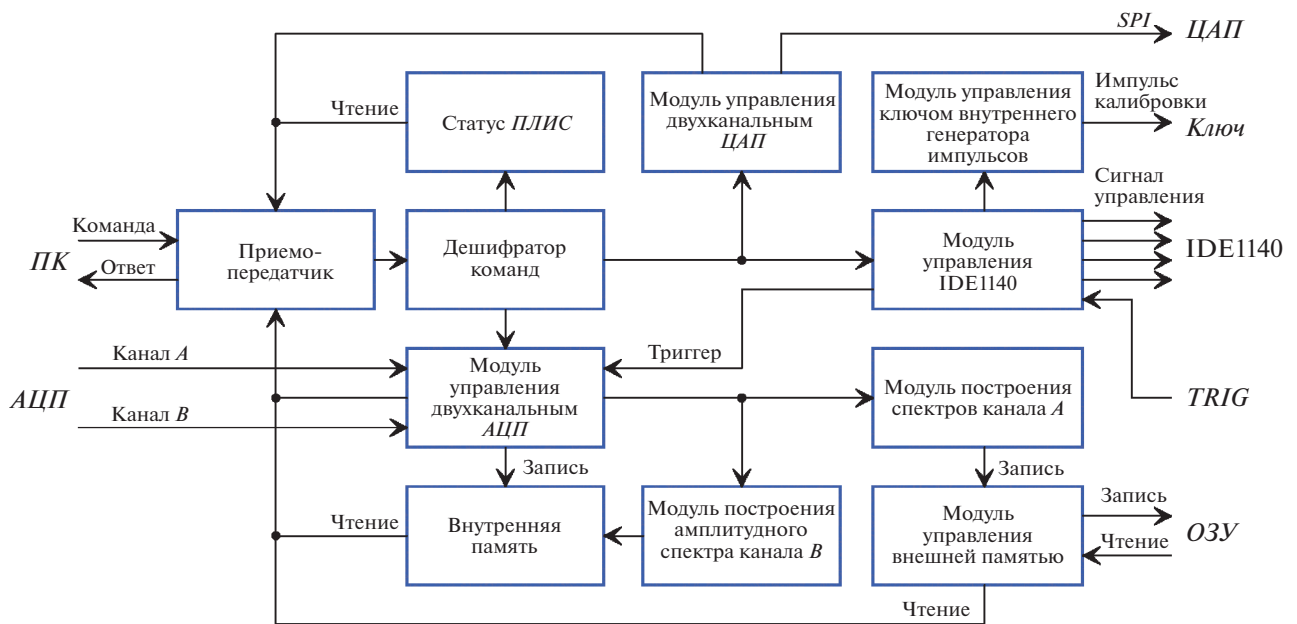
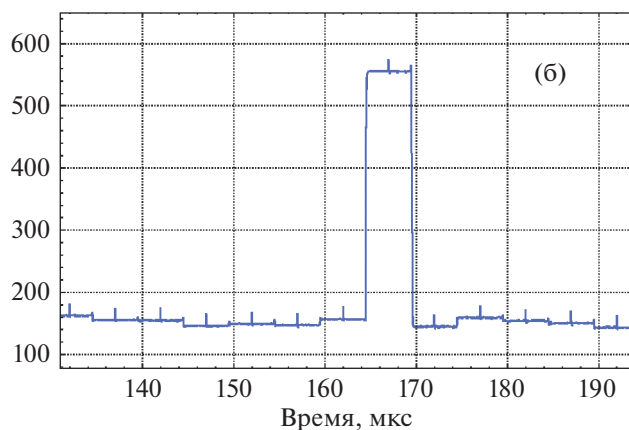
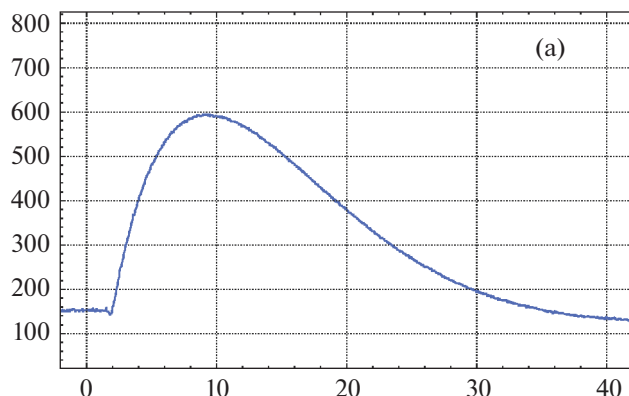


Рис. 5. Структурная схема микропрограммного обеспечения ПЛИС.

Значения АЦП



**Рис. 6.** Амплитуды сигналов с IDE1140 в относительных единицах: **а** – тестовый режим (фронт импульса 6.5 мкс, спад 30 мкс); **б** – вид считываемых сигналов в рабочем режиме при  $VA\_Clk = 200$  кГц.

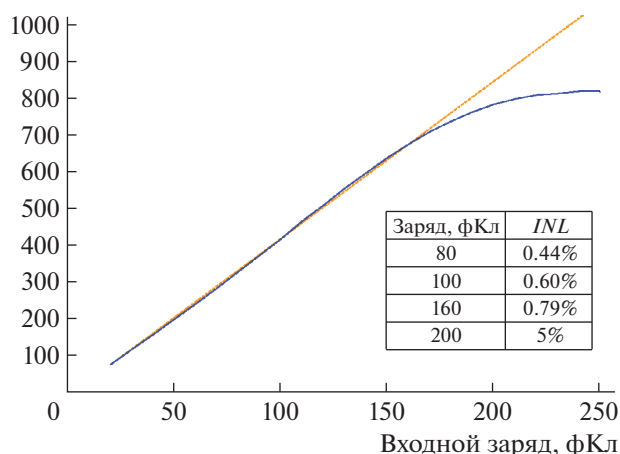
ально спадающего напряжения с постоянной времени 140 мкс и фронтом  $\sim 7$  нс. Этот импульс используется для временной привязки (внутреннего триггера) и амплитудного анализа.

Усилитель-формирователь  $M_5$  выполнен на микромодуле CR-200-500 фирмы Stemat Inc. Он предназначен для усиления скачкообразного сигнала с зарядочувствительного преусилителя и преобразования его в сигнал квазигансусовой формы.

Гибридная микросхема CR-200-500 представляет собой функционально законченный усилитель, формирующий “гауссиан” и состоящий из двух каскадов активных фильтров по схеме Саллена–Ки. Эта схема, с операционным усилителем, двумя резисторами и двумя конденсаторами, обеспечивает передаточную функцию второго порядка с постоянной времени формирования 1.2 мкс. Микросхема CR-200-500 обладает достаточно малым уровнем собственных шумов, приведенное к входу шумовое напряжение составляет 47 мкВ RMS.

Кроме активного фильтра, CR-200-500 имеет на входе разделительный конденсатор с цепью

Значения АЦП



**Рис. 7.** Интегральная нелинейность преобразования (INL) для различных диапазонов входных зарядов.

компенсации полюса нулем. Выходной каскад обеспечивает ток до 20 мА. Конструктивно микросхема CR-200-500 вставляется в DIP-панель и при необходимости иметь другое время формирования может быть легко заменена.

Для получения дифференциального сигнала на входе АЦП<sub>1</sub> используется выходной каскад усилителя-формирователя  $M_6$ , выполненный на микросхеме AD8132AR.

Быстрый канал предназначен для выработки триггерного сигнала TRIG. Разделительная цепь  $C_3-R_1$  выделяет фронт выходного сигнала преусилителя, после чего два каскада на микросхемах  $M_2$  и  $M_3$  усиливают импульс напряжения в  $\sim 20$  раз. Используемые в них операционные усилители AD8009 с токовой обратной связью обеспечивают незначительное искажение фронта импульса ( $\sim 2$  нс).

С быстрого выхода усилителя сигнал поступает на дискриминатор нижнего уровня  $M_4$ , выполненный на компараторе AD8561 и вырабатывающий логический сигнал TRIG на вход ПЛИС. Порог срабатывания компаратора задается напряжением с цифроаналогового преобразователя и может подстраиваться командами с компьютера.

## МИКРОПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПЛИС

Микропрограммное обеспечение ПЛИС, структурная схема которого представлена на рис. 5, состоит из отдельных законченных программных модулей, соединенных между собой сигнальными связями. Команда на запуск измерения поступает от персонального компьютера ПК в приемопередатчик. Дешифратор команд обращается к соответствующему программному модулю (для команды

запуска это модуль управления IDE1140), вызывая к исполнению необходимый цикл действий.

Когда измерение запущено, ПЛИС переходит в состояние ожидания поступления сигнала *TRIG*, свидетельствующего о том, что детектор зафиксировал событие. Вслед за этим ПЛИС записывает метку события в ОЗУ и запускает АЦП. Далее вырабатываются импульсы *RESET*, *SHIN*, *HOLD* и серия импульсов *VA\_Clk*, после чего начинается считывание и оцифровка поступающих сигналов. ПЛИС определяет средний уровень считываемых напряжений и записывает эти данные в ОЗУ. Затем ПЛИС переходит в состояние ожидания сигнала *TRIG* от следующего события.

Всего в ОЗУ может быть записано 4032 события, после чего ПЛИС выходит из режима измерения, более не реагирует на сигнал *TRIG* и выставляет статус для компьютера о необходимости передачи данных. По окончании чтения компьютер обрабатывает полученные данные, добавляя их к статистике предыдущих измерений, и в зависимости от выбранного режима вывода информации на экран представляет их в виде графиков пространственного и/или энергетического распределений.

#### ХАРАКТЕРИСТИКИ СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКОГО ТРАКТА

На рис. 6а представлена осциллограмма формы импульса с выхода микросхемы IDE1140, полученная в тестовом режиме работы системы, а на рис. 6б показаны напряжения, последовательно выводимые на ее выход в рабочем режиме. Напряжения являются результатом регистрации амплитуд шумовых импульсов и полезного сигнала.

Оценка интегральной нелинейности преобразования (*INL*) проводилась путем подачи на один из 64-х входов IDE1140 известного заряда и измерения значения соответствующего напряжения на ее выходе (рис. 7). При этом была отдельно измерена собственная нелинейность электронного тракта, которая составила 0.02%. Как видно из рисунка и фрагмента таблицы на поле рисунка, основной вклад в нелинейность вносит микросхема IDE1140 в области зарядов  $\geq 160$  фКл.

Характеристики разработанной системы:

- динамический диапазон регистрируемых сигналов от 5 до 250 фКл;
- интегральная нелинейность менее 1% в диапазоне от 5 до 160 фКл;
- эквивалентный шумовой заряд 0.7 фКл;
- коэффициент преобразования 4.4 канала АЦП/фКл в диапазоне от 5 до 160 фКл;
- время считывания 64 мкс;

- напряжение питания и ток потребления модуля 12 В, 250 мА.

Описанная схема допускает регистрацию и спектрометрию излучений различными сенсорами, однако при использовании кремниевых детекторов излучений ее потенциал реализуется максимально полно. Устройство на ее основе было испытано при работе со стриповым кремниевым детектором с размером чувствительной области от десятков квадратных миллиметров до десятков квадратных сантиметров.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Madaffari D.* on behalf of the ATLAS Collaboration // IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC 2017). Atlanta, Georgia, USA, 21–28 Oct 2017. <https://cds.cern.ch/record/2291135>
2. *Fomichev A.S., Grigorenko L.V., Krupko S.A., Stepantsovand S.V., Ter-Akopian G.M.* // Eur. Phys. J. 2018. V. A 54. P. 97. <https://doi.org/10.1140/epja/i2018-12528-0>
3. *Von Schmid M., Bagchi S., Bönig S., Csatlós M., Dillmann I., Dimopoulou C., Egelhof P., Eremin V., Furuno T., Geissel H., Gernhäuser R., Harakeh M.N., Hartig A.-L., Ilieva S., Kalantar-Nayestanaki N. et al.* // EPJ Web of Conferences 2014. V. 66. Article Number 03093. <https://doi.org/10.1051/epjconf/20146603093>
4. *Äystö J., Behr K.-H., Benlliure J., Bracco A., Egelhof P., Fomichev A., Gales S., Geissel H., Grahn T., Grigorenko L.V., Harakeh M.N., Hayano R., Heinz S., Itahashi K., Jokinen A., et al.* // Nucl. Instrum. and Methods. 2016. V. B 376. P. 111. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2016.02.042>
5. Сайт проекта Гамма-400. <http://gamma400.lebedev.ru>
6. *Rando R.* on behalf of the AMEGO team // JINST. 2017. V. 12. C11024. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/12/11/C11024>
7. *Zhang Fei, Fan Rui-Rui, Peng Wen-Xi, Dong Yi-Fan, Gong Ke, Liang Xiao-Hua, Liu Ya-Qing, Wang Huan-Yu* // Chinese Phys. C. 2014. V. 38. № 6. 066101. <https://doi.org/10.1088/1674-1137/38/6/066101>
8. *Chen Wei, Guo Jianhua, Wang Shen* // Nuclear Techniques. 2018. V. 41. Issue 2. P. 020402. <https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2018.hjs.41.020402>
9. *Тубольцев Ю.В., Богданов А.А., Ерёмин И.В., Ерёмин В.К., Чичагов Ю.В., Фомичев А.С., Аруев Н.Н.* // Письма в ЖТФ. 2018. Вып. 23. С. 56 <https://doi.org/10.21883/PJTF.2018.23.47010.17468>
10. Сайт Ideas. IDE1140: 64 Channel Sample-and-Hold and Multiplexer Output. <http://www.ideas.no/products/ide1140>
11. Сайт Cremat. CR-110. <http://www.cremat.com/CR-110-R2.pdf>