

15

Позиционно-чувствительный спектрометрический модуль для регистрации ионизирующего излучения полупроводниковыми стриповыми детекторами

© Ю.В. Тубольцев¹, А.А. Богданов¹, И.В. Ерёмин¹, В.К. Ерёмин¹,
Ю.В. Чичагов¹, А.С. Фомичев², Н.Н. Аруев¹

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург,
Россия

² Объединенный институт ядерных исследований, Лаборатория ядерных
реакций им. Г.Н. Флёрва, Дубна, Московская обл., Россия
E-mail: tuboltsev@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 20 июля 2018 г.

Разработан и реализован позиционно-чувствительный модуль для регистрации ионизирующего излучения на основе полупроводниковых стриповых детекторов и многоканального спектрометрического тракта. Динамический диапазон регистрируемого трактом заряда, генерированного ионизирующей частицей в детекторе, составляет 5–250 fC. Позиционно-чувствительный модуль является конструктивно законченным устройством с функциями усиления спектрометрического сигнала, оцифровки, буферизации, предварительной обработки и передачи данных на компьютер.

DOI: 10.21883/PJTF.2018.23.47010.17468

Решающим фактором успешного развития ядерной физики, астрофизики, физики высоких энергий и радиационной медицины является применение позиционно-чувствительных спектрометрических систем с высоким пространственным и энергетическим разрешением. В частности, такие спектрометрические системы, построенные на основе стриповых кремниевых планарных детекторов, успешно используются в экспериментах на Большом адронном коллайдере в ЦЕРН [1] и в работах по международной программе FAIR на площадке центра ядерных исследований GSI (Дармштадт) [2]. Многостриповые кремниевые

детекторы активно используются в экспериментах с радиоактивными пучками на комплексе DRIBs-III в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ [3]. Важнейшим требованием, предъявляемым к кремниевым детекторам упомянутых систем, является высокое позиционное разрешение. В результате количество независимых чувствительных элементов, формирующих однокоординатную матрицу и имеющих форму полосок — стрипов, даже в одном кремниевом детекторе может достигать тысячи. Столь большое число соответствующих стрипам независимых спектрометрических каналов регистрации сигналов обуславливает использование специализированных аналого-цифровых микросхем высокой степени интеграции [4,5], которые, как и вся элементная база электроники, находятся в интенсивном развитии. В результате сохраняется актуальность разработок на новой элементной базе и поддерживается интерес к соответствующим публикациям.

ФТИ им. А.Ф. Иоффе имеет значительный опыт в исследованиях и разработках кремниевых детекторов. В настоящее время в ФТИ в связи с участием в экспериментах в ОИЯИ и GSI разрабатывается многоканальная электроника, являющаяся составной частью модулей детектирования.

Нами описывается многоканальный позиционно-чувствительный спектрометрический модуль, предназначенный для регистрации ионизирующих частиц с энергovyделением в кремниевом детекторе от 0.1–5.6 MeV. Возможна работа устройства с несколько ухудшенной линейностью преобразования с энергovyделением до ~ 12 MeV.

В созданном экспериментальном модуле используется односторонний планарный кремниевый $p^+ - n - n^+$ -детектор с p^+ -контактом, сегментированным на 64 стрипа, и несегментированным n^+ -контактом. Исходя из необходимого диапазона регистрации сигналов с детектора была выбрана специализированная микросхема IDE1140 [6]. Структура устройства (рис. 1) обоснована принципом действия IDE1140, который предполагает запуск цикла его работы внешним триггерным сигналом. По функциональному назначению в устройстве можно выделить следующие узлы:

- узел регистрации и обработки сигналов стрипового детектора;
- узел генерации триггерного сигнала;
- узел обработки, накопления и передачи данных.

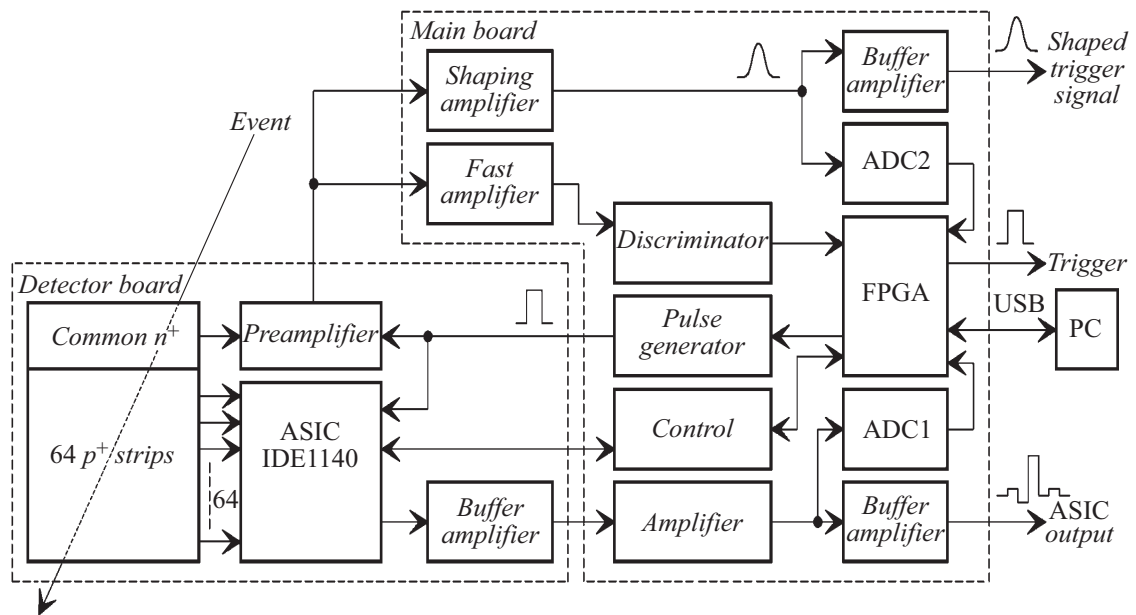


Рис. 1. Структурная схема позиционно-чувствительного спектрометрического модуля.

Узел регистрации и обработки сигналов стрипового детектора состоит из самой микросхемы IDE1140, буферных усилителей (buffer amplifier, amplifier) и аналого-цифрового преобразователя (ADC1).

Триггерный канал, предназначенный для регистрации сигналов с n^+ -контакта детектора, включает в себя зарядочувствительный предусилитель CR-110 фирмы Cremat Inc. [7] (preamplifier) и следующие за ним элементы, реализующие две функции: создание самого триггерного (стартового) сигнала и формирование спектрометрического сигнала. Первую функцию реализуют быстрый усилитель (fast amplifier) и дискриминатор (discriminator), вторую — усилитель-формирователь спектрометрического сигнала (shaping amplifier) и аналого-цифровой преобразователь (ADC2).

Узел обработки, накопления и передачи данных выполнен на программируемой логической матрице FPGA типа EP3C16Q240 и включает дополнительную оперативную память и USB-передатчик, которые на схеме не показаны.

Для проверки работоспособности и качества работы каналов предусмотрен внутренний генератор импульса калибровки (pulse generator).

Спектрометрический тракт работает по следующему алгоритму. Частица, попадая на детектор, создает сигнал в виде собранного заряда на одном или нескольких стрипах детектора. Одновременно возникает сигнал и на общем n^+ -контакте, заряд с которого преобразуется в напряжение при помощи зарядочувствительного предусилителя в триггерном канале. С быстрого выхода усилителя триггерного канала сигнал попадает на дискриминатор, вырабатывающий логический сигнал, поступающий на вход логической матрицы. Сигнал с усилителя-формирователя спектрометрического канала оцифровывается аналого-цифровым преобразователем ADC2.

Сигналы со всех стрипов регистрируются одновременно с помощью микросхемы IDE1140, каждый из 64 каналов которой включает зарядочувствительный предусилитель, формирующий усилитель и устройство выборки-хранения. По фронту триггерного импульса во всех каналах устройства выборки-хранения запоминаются амплитудные значения сформированных сигналов от стрипов. После этого через внутренний мультиплексор выполняются их последовательное считывание и оцифровка на ADC1. Микросхема FPGA осуществляет предварительную обработку данных, их накопление во внешней памяти и передачу в компьютер по интерфейсу USB.

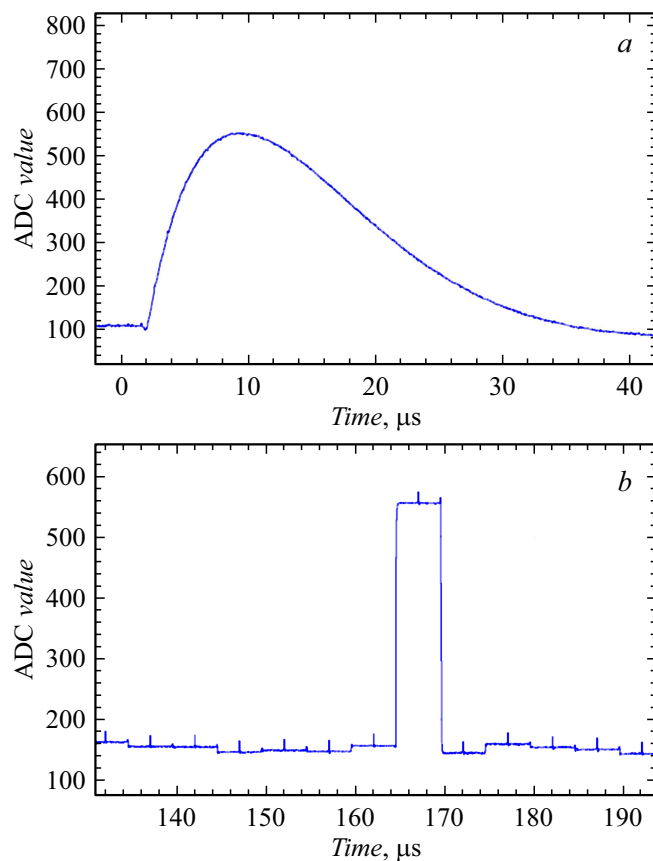


Рис. 2. Амплитуды сигналов с микросхемы IDE1140 в относительных единицах. *a* — тестовый режим (фронт импульса $6 \mu\text{s}$, спад $30 \mu\text{s}$), *b* — вид считываемых сигналов в рабочем режиме.

Конструктивно позиционно-чувствительный модуль выполнен на двух печатных платах. Детектор, микросхема IDE1140, предусилитель и RC-фильтры в цепи подачи напряжения смещения на стриповый детектор расположены на отдельной печатной плате повышенной точности изготовления, соединяемой с основной платой шлейф-кабелем.

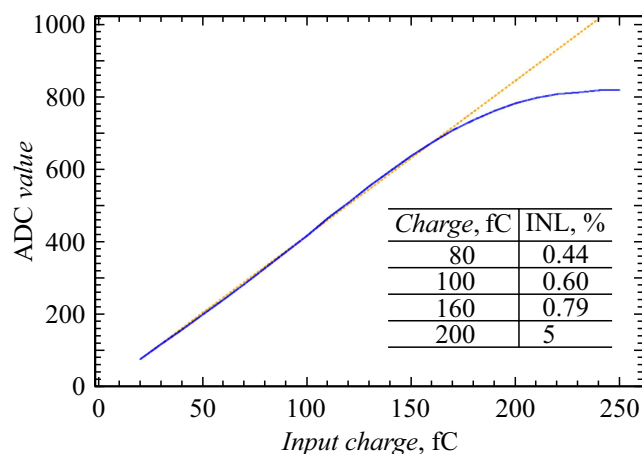


Рис. 3. Интегральная нелинейность преобразования (INL) для различных диапазонов входных зарядов.

В микросхеме IDE1140 предусмотрена возможность тестирования каждого усилительного канала отдельно. Результаты теста, выполненные с помощью внешнего генератора, показывают, что сигналы на выходах усилителей-формирователей подобны и имеют характерную форму, представленную на рис. 2, а. На рис. 2, б представлен фрагмент последовательности сигналов, считанных со схем выборки-хранения. Значимый сигнал зарегистрирован в одном канале, тогда как уровни напряжений на остальных каналах флуктуируют за счет шумов. Время считывания одного канала было установлено равным $5\mu\text{s}$, что повысило точность измерения его выходного напряжения за счет усреднения измерений, сделанных ADC1.

На рис. 3 представлена характеристика преобразования входного заряда в напряжение, измеренное ADC1. Собственная нелинейность электронного тракта, регистрирующего сигнал с выхода IDE1140, составляет 0.022%. Однако передаточная характеристика всего устройства, включающего IDE1140, имеет отчетливо выраженную нелинейность. В работе она была оценена величиной интегральной нелинейности (INL) и представлена в таблице на рис. 3 для разных диапазонов входного заряда.

Характеристики разработанного модуля были следующими:

- динамический диапазон регистрируемых сигналов от 5 до 250 fC;
- интегральная нелинейность менее 1% в диапазоне от 5 до 160 fC;
- эквивалентный шумовой заряд 0.7 fC;
- коэффициент преобразования 4.4 каналов ADC/fC в диапазоне от 5 до 160 fC;
- время формирования сигнала в микросхеме IDE1140: фронт 6 μ s, спад 30 μ s;
- напряжение питания 12 V, ток потребления модуля 250 mA.

Схемотехника, конструкция и программное обеспечение модуля разработаны для использования его в составе позиционно-чувствительных спектрометров со стриповыми кремниевыми детекторами с размером чувствительной области от 5×5 mm до 40 cm^2 и минимальным шагом стрипов 20 μ m.

Два макета позиционно-чувствительных модулей были протестированы при их облучении радиоактивным пучком ^{12}Be с энергией 39 MeV на нуклон, получаемым на фрагмент-сепараторе ACCULINNA-2 при ускорителе У-400М.

Таким образом, на основе приведенных характеристик позиционно-чувствительного модуля на базе микросхемы IDE1140 можно сделать заключение о возможности его эффективного применения при построении спектрометрических систем, разрабатываемых для решения задач ядерной физики, физики высоких энергий, астрофизики и масс-спектрометрии.

Список литературы

- [1] *Madaffari D.* Strip detector for the ATLAS detector upgrade for the high-luminosity LHC. CERN Document Server; <https://cds.cern.ch/record/2291135>
- [2] *Heuser J.M.* // JPS Conf. Proc. 2015. V. 8. P. 022007.
- [3] *Fomichev A.S., Grigorenko L.V., Krupko S.A., Stepantsov S.V., Ter-Akopian G.M.* // Eur. Phys. J. A. 2018. V. 54. P. 97.
- [4] *Zhang F., Fan R.-R., Peng W.-X., Dong Y.-F., Gong K., Liang X.-H., Liu Y.-Q., Wang H.-Y.* // Chin. Phys. C. 2014. V. 38. P. 066101.
- [5] *Chen W., Guo J., Wang S.* // Nucl. Techn. 2018. V. 41. P. 020402.
- [6] IDE1140: 64 Channel sample-and-hold and multiplexer output; <http://www.ideas.no/products/ide1140>
- [7] CR-110 charge sensitive preamplifier: application guide; <http://www.cremat.com/CR-110-R2.pdf>