

ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО
ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 53.082.79

СООТНОШЕНИЕ СИГНАЛ/ШУМ МОДУЛЯ КРЕМНИЕВОЙ
ТРЕКОВОЙ СИСТЕМЫ ЭКСПЕРИМЕНТА VM@N

© 2023 г. Д. В. Дементьев^{a,*}, М. О. Шитенков^a, В. В. Леонтьев^{a,b},
Н. В. Сухов^a, А. Д. Шереметьев^a, Ю. А. Мурин^a

^aОбъединенный институт ядерных исследований, Лаборатория физики высоких энергий
им. В.И. Векслера и А.М. Балдина
Россия, 141980, Дубна Московской обл. ул. Жолио-Кюри, 6

^bНИИ ядерной физики им. Д.В. Скобелына Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова
Россия, 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, 1, стр. 2

*e-mail: dementiev@jinr.ru

Поступила в редакцию 11.06.2022 г.

После доработки 22.06.2022 г.

Принята к публикации 22.08.2022 г.

Модуль с двусторонним микростриповым кремниевым сенсором является базовым элементом кремниевой трековой системы (КТС) эксперимента VM@N. Основным параметром для трековой системы физического эксперимента в области физики высоких энергий является соотношение сигнал/шум, которое определяется комплексным влиянием параметров детектора и считывающей электроники. В статье представлена аналитическая модель различных источников шума, а также рассматриваются параметры, определяющие эффективность сбора заряда с детектора. Приведены результаты измерений шума для различных конфигураций модуля, различающихся размером сенсора и длиной сигнального кабеля, соединяющего стрипы сенсора с входными цепями считывающей электроники. Приводятся результаты измерений сигнала от β -источника ^{106}Ru . Показано, что соотношение сигнал/шум для модулей КТС составляет не ниже 18.

DOI: 10.31857/S0032816223010111, EDN: JSRETI

ВВЕДЕНИЕ

В настоящий момент ведется модернизация детекторных систем эксперимента “Барионная материя на Нуклотроне” (VM@N), предназначенного для изучения свойств ядерной материи с плотностью до $4\rho_0$ в столкновениях тяжелых ионов на выведенном пучке Нуклотрона [1]. Модернизированная установка VM@N представляет собой эксперимент на фиксированной мишени, центральной частью установки будет широкоапертурная гибридная трековая система, расположенная внутри спектрометрического магнита СП-41. Трековая система будет включать в себя две подсистемы: семь плоскостей детекторов на основе газовых электронных умножителей (ГЭУ) [2] и расположенные перед ними четыре станции кремниевой трековой системы (КТС) [3]. КТС при этом является одной из самых сложных систем установки и включает в себя более чем 600 тыс. каналов, обеспечивающих треки вторичных частиц с пространственным разрешением до 25 мкм.

Базовым элементом КТС является модуль с двусторонним микростриповым кремниевым сенсором. Конструкция модуля разработана в

рамках сотрудничества с проектом CBM@FAIR [4] и состоит из уникальных компонентов. Главной особенностью конструкции модуля является использование сверхлегких алюминиевых кабелей на полиамидной основе для соединения сенсора со считывающей электроникой. Это позволяет расположить считывающую электронику детектора на периферии станций, минимизировав тем самым количество вещества в области детектора с наибольшей плотностью треков. Четыре станции КТС будут состоять из 292-х модулей различных типов. В зависимости от положения в станции каждый модуль состоит из сенсора определенного типоразмера, набора кабелей заданной длины и двух плат со считывающей электроникой для чтения сигналов с обеих сторон сенсора. Внешний вид модуля КТС показан на рис. 1. Конструкция и разработанная методика сборки модуля подробно описаны в [5].

Сенсоры КТС эксперимента VM@N имеют специально разработанную топологию и были изготовлены двумя производителями: НРС (Япония) и SiS (Германия). Для модулей, расположенных по краям станций, используются сенсоры размером 62×62 мм, центральные модули



Рис. 1. Фотография собранного модуля КТС эксперимента ВМ@N.

имеют сенсоры размером 42×62 мм. При изготовлении прототипов модулей для отладки технологии сборки также применялись сенсоры размером 22×62 мм. Независимо от размера, сенсор имеет 1024 стрипа на обеих сторонах, ширина стрипа составляет 58 мкм. При этом на N-стороне сенсора стрипы прямые и сонаправлены магнитному полю. Стрипы на P-стороне направлены под углом 7.5° по отношению к стрипам на N-стороне. Таким образом, поверхность каждого сенсора представляет собой сеть “пикселей” размером $\Delta x = 58$ мкм и $\Delta y = 58 \text{ мкм}/\text{tg}(7.5^\circ) = 440.6$ мкм. Для соединения коротких стрипов, находящихся в противоположных углах сенсора, используется второй слой металлизации. Это позволяет расположить контактные площадки для чтения всех стрипов вдоль одной стороны сенсора. Важной особенностью сенсоров КТС является интегрирование в каждый стрип сопротивления смещения и разделительной емкости, обеспечивающей связь по переменному току между имплантом и металлизацией стрипа для считывания сигнала. Толщина сенсоров составляет 285 ± 15 мкм для сенсоров SiS и 320 ± 15 мкм для сенсоров НРС.

Для чтения сигналов с сенсора используется быстрая считывающая электроника на основе специализированной интегральной микросхемы (СИМС) STS-XYTER [6, 7]. Ключевой особенностью микросхемы является архитектура, построенная на системе потоковой обработки сигнала, без использования внешнего триггера. Микросхема имеет 128 каналов, для формирования отметки амплитуды используется 5-разрядный АЦП с регулируемым динамическим диапазоном, а для формирования отметки времени – быстрый дискриминатор. Дискретность временной отметки равна половине периода несущей частоты и в случае ВМ@N составляет 12.5 нс. Максимальная пропускная способность микро-

схемы 50 млн сигналов/с. Этот параметр также зависит от несущей частоты, используемой в эксперименте, и, помимо этого, определяется количеством используемых линий передачи сигнала для конкретной СИМС. При этом максимальная частота входного сигнала для отдельного канала составляет 500 кГц. STS-XYTER может работать с сигналами обеих полярностей. Для этого используется дополнительный инвертор сигнала на выходе с зарядово-чувствительным усилителем (ЗЧУ) при работе с зарядами отрицательной полярности.

Для чтения 1024 стрипов на каждой из сторон сенсора используются восемь СИМС STS-XYTER в бескорпусном исполнении, установленных на специализированные платы FEB. Применение бескорпусных микросхем определяется высокой плотностью считывающих каналов и ограниченным местом для размещения считывающей электроники.

Для передачи сигналов со стрипов детектора на считывающие каналы СИМС используется набор из 32-х сигнальных кабелей с алюминиевыми проводниками. Так как расстояние между проводниками на плоском сигнальном кабеле не может быть меньше 100 мкм, для считывания последовательности стрипов сенсора используется стопка из двух кабелей со взаимным смещением 50 мкм. Контактные площадки для крепления кабеля на сенсоре и микросхемах располагаются в шахматном порядке, в два ряда. Наиболее важным параметром кабеля, влияющим на соотношение сигнал/шум, является его емкость, которая не превышает 0.5 пФ/см [8].

В данной работе рассматривается влияние различных параметров модуля кремниевой трековой системы ВМ@N на соотношение сигнал/шум, которое является основным для трековой системы.

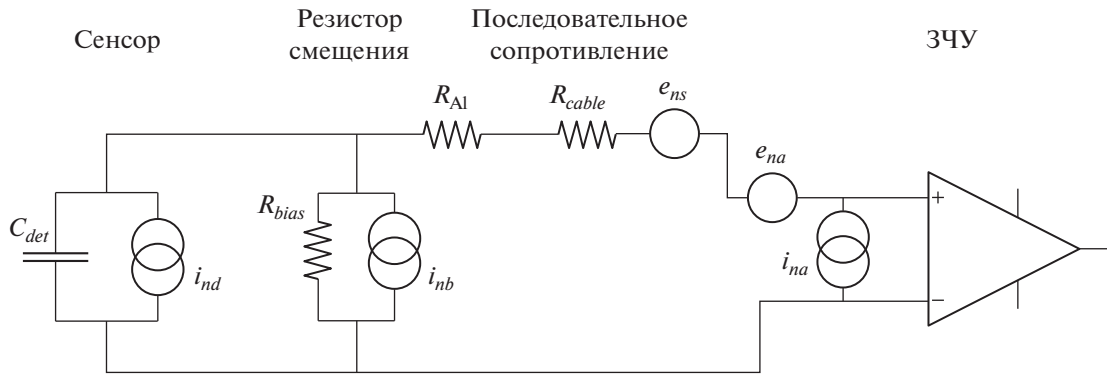


Рис. 2. Эквивалентная схема источников шума детектора. ЗЧУ – зарядово-чувствительный усилитель.

ЭКВИВАЛЕНТНЫЙ ШУМОВОЙ ЗАРЯД МОДУЛЯ КТС ВМ@N

В электрических цепях источники шума могут моделироваться в виде либо источников тока, либо источников напряжения. Так, например, ток утечки детектора I_d создает шум за счет флуктуаций электронной эмиссии. Такой шум является пуассоновским, и его спектральная плотность не зависит от частоты в диапазоне полосы пропускания аналогового тракта считывающей электроники. Источник такого шума может быть обозначен на эквивалентной схеме (рис. 2) в виде источника тока, параллельного детектору. Электрическое сопротивление в схеме также является источником шума за счет создаваемых флуктуаций тепловых скоростей носителей заряда. Тепловой шум также имеет равномерный “белый” спектр. При этом сопротивление, шунтирующее вход ЗЧУ (например, R_{bias} детектора), работает в качестве источника шумового тока. Сопротивление, подключенное последовательно, является источником шумового напряжения. Таким источником шумового напряжения является, например, сопротивление кабеля R_{cable} или сопротивление металлизации стрипа R_{Al} . Эквивалентная схема источников шума модуля показана на рис. 2.

Дополнительным источником шума являются процессы захвата и освобождения носителей заряда в резисторах, диэлектриках и полупроводниках. Флуктуации данных процессов создают шум, мощность которого имеет спектр фликкер-шума ($1/f$ -шум) [9].

Спектральная плотность токового шума является константой и имеет амплитуду

$$i_n^2 = 2eI_d + \frac{4kT}{R_{bias}} + i_{na}^2.$$

Амплитуда шума напряжения описывается формулой

$$e_n^2 = 4kT(R_{Al} + R_{cable}) + e_{na}^2.$$

Собственный шум тракта СИМС при этом определяется сопротивлением обратной связи ЗЧУ и входным сопротивлением тракта:

$$i_{na}^2 = \frac{4kT}{R_{a_int}}; \quad e_{na}^2 = 4kTR_{a_fb}.$$

Для расчета эквивалентного шумового заряда на выходе усилителя-формирователя необходимо проинтегрировать шум по всему динамическому диапазону усилителя-формирователя. Итоговое выражение имеет вид [9]:

$$ENC^2 = \underbrace{i_n^2 F_i T_s}_{\text{шумовой ток}} + \underbrace{e_n^2 F_v \frac{C_{sum}^2}{T_s}}_{\text{шумовое напряжение}} + \underbrace{F_{vf} A_f C_{sum}^2}_{1/f\text{-шум}}.$$

Вклад шума напряжения и фликкер-шума зависит от суммарной емкости на входе ЗЧУ:

$$C_{sum} = C_{det} + C_{cab},$$

где C_{det} – емкость стрипа детектора, а C_{cab} – емкость сигнальной линии кабеля.

Коэффициенты F_i , F_v и F_{vf} определяются типом усилителя-формирователя, используемого в каналах СИМС. Для усилителя-формирователя типа $CR-(RC)^2$, который применяется в медленном канале STS-XYTER, данные коэффициенты составляют: $F_i = 0.64$, $F_v = 0.85$ и $F_{vf} = 3.41$ [10]. Типичные значения параметров модуля, используемые в расчетах приведены в табл. 1. Уровень фликкер-шума рассчитывался исходя из результатов измерений, выполненных на микросхеме без подключенного сигнального кабеля, путем экстраполяции измеренных значений с учетом емкости на входе ЗЧУ. На рис. 3 приведены результаты расчетов уровня шума в медленном канале STS-XYTER от времени формирования усилителя-формирователя. Для сравнения показаны результаты для двух различных конфигураций модуля: с минимальной и максимальной длиной

Таблица 1. Параметры модуля КТС

Параметр модуля	Значение
Сопротивление металлизации стрипа R_{Al} , Ом/см	10.5
Сопротивление сигнального кабеля R_{cab} , Ом/см	0.6
Сопротивление обратной связи ЗЧУ R_{a-fb} , МОм	20
Сопротивление смещения сенсора R_{bias} , МОм	1.5
Емкость сигнального кабеля C_{cab} , пФ/см	0.4
Емкость стрипа сенсора C_{str} , пФ/см	1.5

сигнального кабеля и стрипа сенсора. Для модуля с малой емкостью на входе ЗЧУ разного типа шумы вносят примерно одинаковый вклад в общий шум при минимальном времени формирования усилителя-формирователя. Для модуля с высокой входной емкостью основным источником шума является шумовое напряжение, которое, в свою очередь, более чем на 74% определяется шумом, создаваемым сопротивлением смещения на сенсоре. Сравнение теоретических расчетов с результатами измерений уровня шума собранных модулей представлено ниже, в разделе “Измерение шума модуля”.

Следует отметить, что приведенные расчеты не учитывают шумы питания микросхемы. Помимо шума, источником ложных срабатываний сигнального тракта микросхемы могут являться электромагнитные наводки в частотном диапазоне, совпадающем с полосой пропускания усилителя-формирователя: 1–100 МГц. Для защиты от

помех используются тонкие (толщиной 15 мкм) алюминиевые экраны, закрывающие сенсор и сигнальные кабели, а также низковольтный интерфейс передачи данных типа LVDS.

ИЗМЕРЕНИЯ ШУМА МОДУЛЯ

Измерение шума в отдельно взятом канале СИМС основано на процедуре измерения значения порогов для 32-х компараторов АЦП. Для этого используется встроенная калибровочная система СИМС, а также счетчики числа срабатываний каждого компаратора. Калибровочная система включает в себя прецизионный ЦАП и проходную емкость 100 фФ, позволяющую имитировать токовый сигнал с детектора заданной амплитуды. Так как шум канала имеет нормальное распределение, то зависимость числа срабатываний компаратора от амплитуды калибровочного сигнала при фиксированном количестве импульсов имеет характер S-кривой. Анализ S-кривых для отдельного компаратора позволяет вычислить значение уровня шума в каждом канале.

Пример распределения шумов по каналам сенсора показан на рис. 4 и 5. Данный модуль состоит из сенсора с длиной стрипов 20 мм и комплекта кабелей, средняя длина которых составляет 117 мм. В каналах с аномально низким уровнем шума (менее 500 электрон) отсутствует электрический контакт между входом СИМС и стрипом сенсора, что может быть связано с некачественной сваркой алюминиевого кабеля и контактной площадки на сенсоре или микросхеме. Наблюдается зависимость между уровнем шума и номером

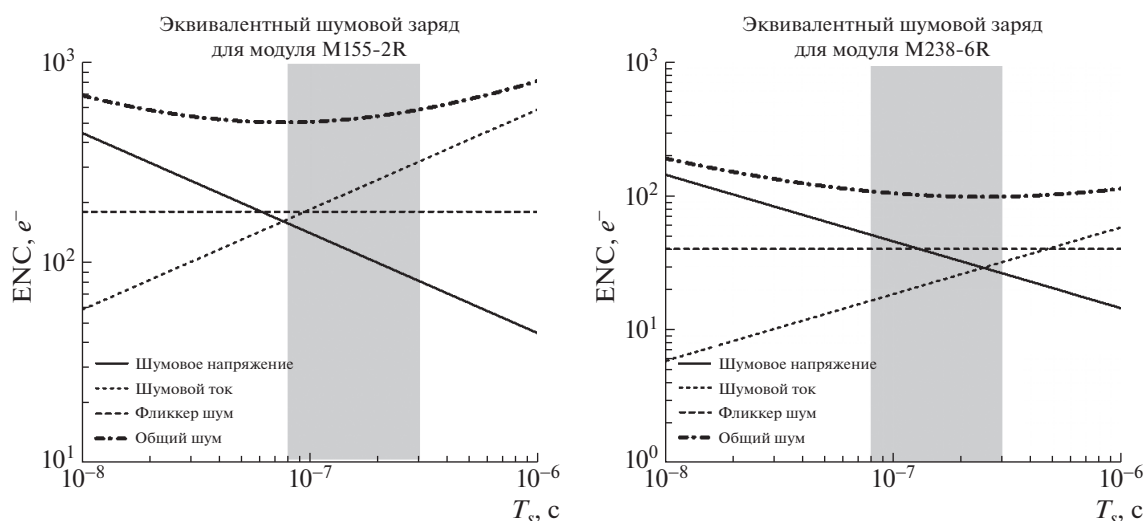


Рис. 3. Зависимость уровня шума (ENC) медленного усилителя-формирователя от времени формирования сигнала T_s . Слева – результаты аналитических расчетов для модуля с длиной стрипа 20 мм и длиной кабеля 155 мм, справа – для модуля с длиной стрипа 60 мм и длиной кабеля 238 мм. Серым цветом выделен диапазон, в котором возможна регулировка времени формирования сигнала в медленном усилителе-формирователе микросхемы STS-XYTER.

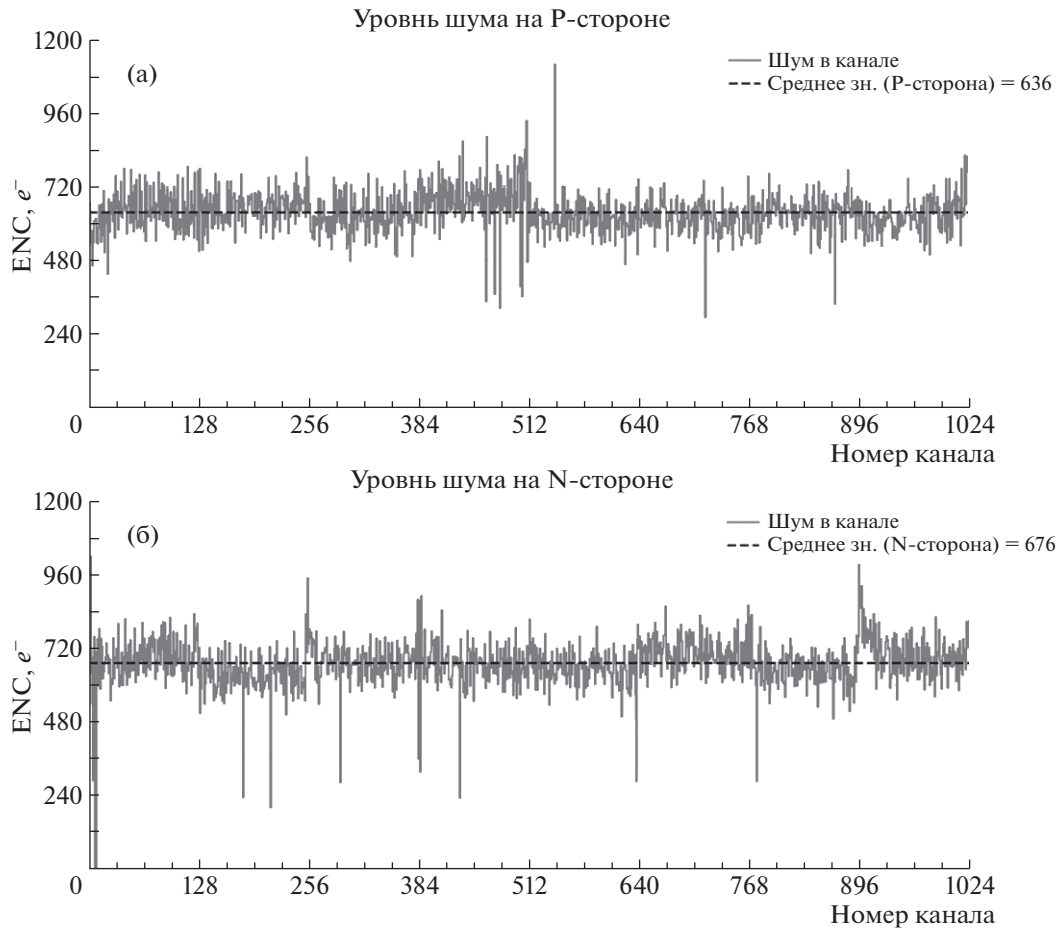


Рис. 4. Эквивалентный шумовой заряд (ENC) в каналах детектора на Р- (а) и N-стороне (б).

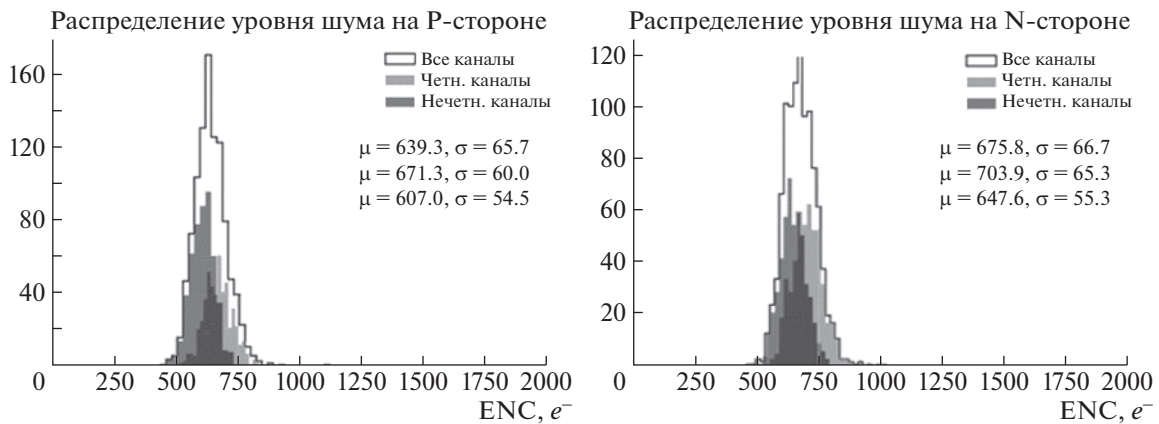


Рис. 5. Гистограмма уровня шума в каналах детектора на Р- (слева) и N-стороне (справа). Серым цветом показано распределение шума в четных каналах, черным цветом – в нечетных каналах. Общее распределение шума показано черной линией.

канала: в нечетных каналах средний уровень шума ниже, чем в четных (см. рис. 5). Это может быть связано с топологией микросхемы STS-XYTER,

где четные и нечетные каналы расположены в шахматном порядке. Четные каналы расположены ближе к краю кристалла, и проводники на

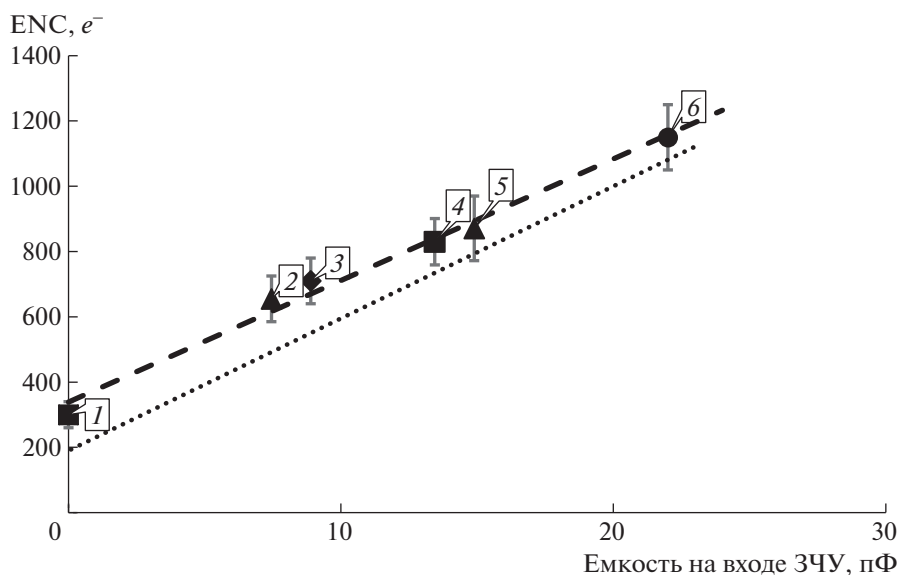


Рис. 6. Усредненный уровень шума в каналах модуля для его различных конфигураций: Точка 1 на графике соответствует измеренному собственному шуму микросхемы без подключенного сигнального кабеля; точки 2 и 3 показывают шум модулей с длиной стрипа сенсора 20 мм и длинами кабелей 117 и 155 мм соответственно; точки 4 и 5 — шум модулей с длиной стрипа 60 мм и длинами кабелей 117 и 155 мм соответственно; точка 6 — шум модуля с длиной стрипа 60 мм и длиной кабеля 410 мм. Теоретическая оценка уровня шума показана пунктирной линией.

этих каналах длиннее, имеют большее последовательное сопротивление и более восприимчивы к наводкам [10].

Так как шум зависит от емкости на входе СИМС, которая в свою очередь определяется размером сенсора и длиной кабеля, то очевидно, что шум зависит от конфигурации модуля. На рис. 6 показаны в сравнении расчетная зависимость уровня шума АЦП от входной емкости и измеренный уровень шума для нескольких конфигураций модуля. Точка 1 на графике соответствует измеренному собственному шуму микросхемы без подключенного сигнального кабеля. Точки 2 и 3 соответствуют уровню шума модулей с длиной стрипа сенсора 20 мм и длинами кабелей 117 и 155 мм; точки 4 и 5 — уровню шума модулей с длиной стрипа 60 мм и длинами кабелей 117 и 155 мм соответственно; точка 6 — уровню шума модуля с длиной стрипа 60 мм и длиной кабеля 410 мм (измерения с этим модулем выполнены в GSI [11]). Стоит отметить, что в зависимости от длин стрипа и кабеля модули обладают разным сопротивлением сигнальной линии. Влиянием этого источника шума, однако, можно пренебречь в приведенном сравнительном анализе.

Отличие теоретической зависимости от экспериментальной можно объяснить тем, что теоретическая модель не учитывает эффект шума и наводок по линии питания микросхемы. Исходя из полученных данных можно сделать вывод о том,

что максимальный уровень шума для модулей эксперимента VM@N не будет превышать $1200 e^-$.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ СБОРА ЗАРЯДА

Важнейшим параметром для трекового детектора является соотношение сигнал/шум. Под сигналом понимается амплитуда сигнала от минимально ионизирующей частицы — МИР. Такая частица должна обладать зарядовым числом 1, и для нее должно выполняться соотношение $\beta\gamma \sim 3$. При прохождении через кремниевый детектор эта частица рождает на своем пути в среднем 80 электрон-дырочных пар на 1 мкм пробега. При толщине детектора 320 мкм ожидаемая амплитуда сигнала составляет $25600e^-$ или 4 фКл. Однако следует учитывать, что заряд, интегрируемый считывающей электроникой детектора, в общем случае не равен свободному заряду, индуцированному на сенсоре. Причиной неэффективности сбора заряда является деление свободного заряда как между стрипами сенсора, так и между сенсором и ЗЧУ, а также баллистический дефицит [12]. Следует также учитывать, что эффективность сбора заряда падает в результате облучения детектора.

Эффект баллистического дефицита возникает, когда время формирования сигнала усилителя-формирователя сопоставимо или меньше времени сбора сигнала с детектора. Время сбора сигнала с детектора определяется как [13]:

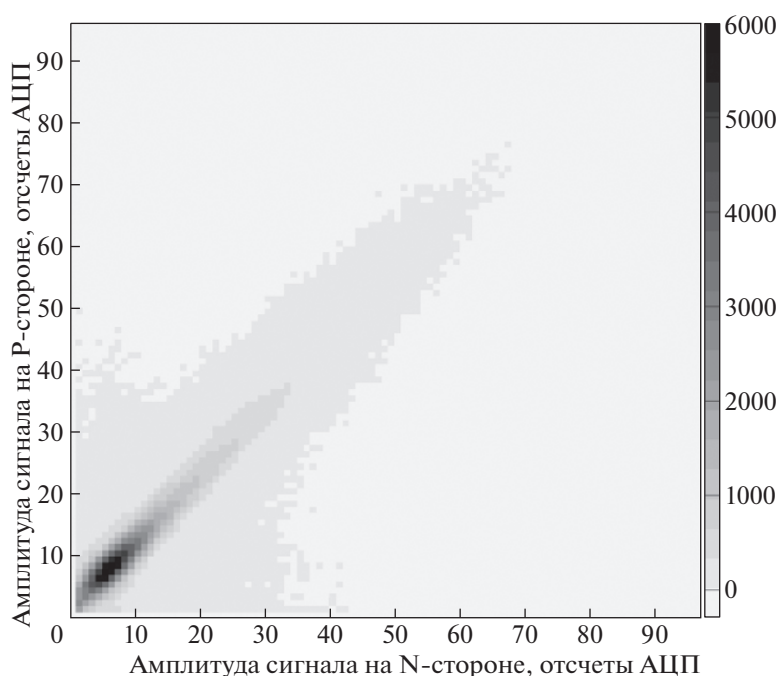


Рис. 8. Распределение амплитуд сигналов кластеров от ^{106}Ru на P- и N-сторонах модуля.

во время тестирования использовались два модуля. Модули были закреплены таким образом, чтобы сенсоры были выровнены относительно друг друга и образовывали параллельные поверхности. Источник располагался рядом с поверхностью исследуемого сенсора, второй модуль использовался для отбора нужных сигналов. Для анализа отбирались события, имеющие отклик на обеих сторонах каждого сенсора. На рис. 8 показано, как выглядит распределение амплитуд сигналов для кластеров на P- и N-стороне модуля. В связи с тем, что источник имел сравнительно большую площадь, угол, под которым электроны падают на поверхность сенсора, в большинстве случаев отличен от 90° . Это вызывало одновременное срабатывание нескольких стрипов сенсора при регистрации сигналов от электронов, проходящих под большими углами к поверхности детектора. На рис. 9 показаны распределения амплитуд сигналов от ^{106}Ru для 1-, 2- и 3-стриповых кластеров. Количество 2-стриповых кластеров превышает количество 1-стриповых для P-стороны, в то время как для N-стороны 1-стриповых кластеров больше. Такая разница вызвана более высоким порогом регистрации сигналов со стрипов N-стороны детектора.

Ожидаемая величина амплитуды сигнала на считывающей электронике детектора для одностриповых событий с учетом неэффективности сбора заряда составит $(24 \pm 1.3) \cdot 10^3 e^-$. Средние значения измеренных амплитуд сигналов для че-

тырех разных модулей приведены на рис. 10. Согласно рисунку, средняя амплитуда сигналов на P-стороне составляет $(24.8 \pm 0.9) \cdot 10^3 e^-$, что хорошо согласуется с ожидаемой оценкой, а на N-стороне — $(22 \pm 0.7) \cdot 10^3 e^-$, что на 11% меньше, чем средний сигнал на P-стороне. Мы предполагаем, что причиной такого несоответствия является паразитная емкость PSC (Polarity Selection Circuit), которая является частью аналогового тракта микросхемы. В случае P-стороны детектора, для которой основными переносчиками заряда являются дырки, данный элемент тракта не используется, и сигнал передается в обход PSC на усилитель-формирователь.

ВЫВОДЫ

По результатам проведенных аналитических вычислений и измерений можно сделать вывод о том, что в зависимости от конфигурации модуля КТС VM@N соотношение сигнал/шум модуля составляет от 18 до 30, что позволяет надежно выделять сигналы от регистрируемых частиц на фоне шума. Наблюдаемый разброс величины соотношения сигнал/шум определяется заметной разницей в уровне шума для различных конфигураций модулей, составляющих систему. Уровень шума зависит в первую очередь от шунтирующей емкости на входе ЗЧУ, т.е. от размера сенсора и длины сигнального кабеля. Стоит также учитывать, что за время выполнения физической про-

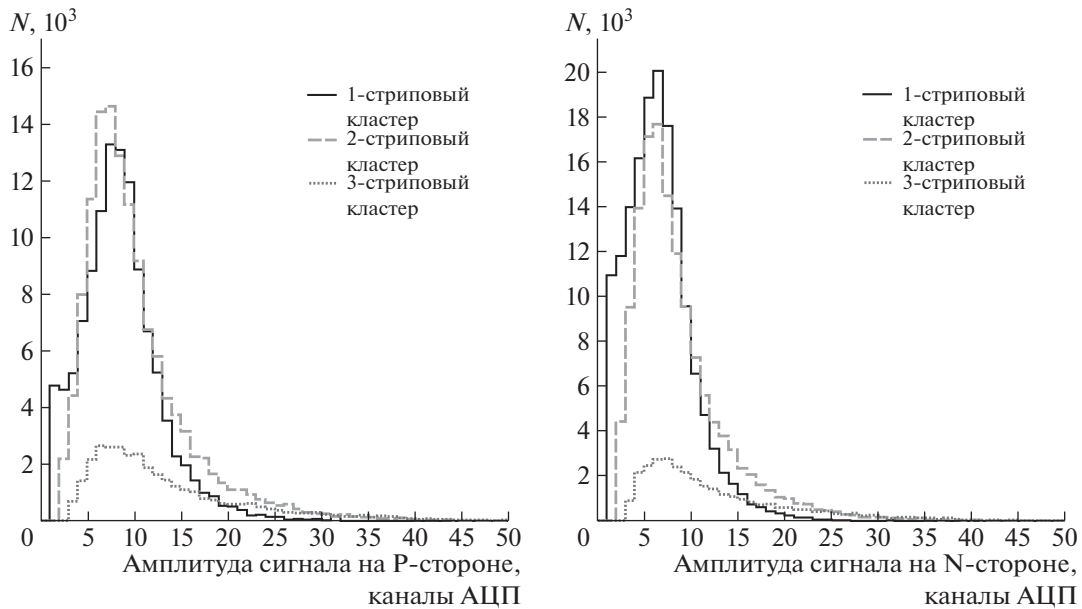


Рис. 9. Распределение амплитуд сигналов для 1- (сплошная линия), 2- (штриховая линия) и 3-стриповых (пунктирная линия) кластеров от β -источника ^{106}Ru на P- (слева) и N-стороне (справа) модуля.

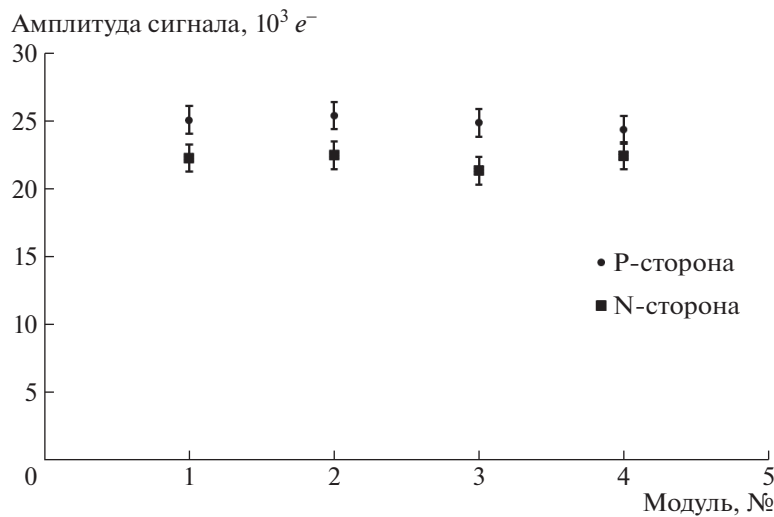


Рис. 10. Среднее значение амплитуд сигналов от β -источника ^{106}Ru для четырех различных модулей.

граммы эксперимента максимальная доза неионизирующего излучения для центральных сенсоров составит до 10^{11} 1-МэВ нейтронных эквивалентов/см². Данная доза не превышает порог инверсии проводимости *n*-типа в кремнии, однако может являться причиной незначительного (менее 5%) падения эффективности сбора заряда с кремниевого детектора [15]. Но даже с учетом этого эффекта соотношение сигнал/шум в конце рабочего цикла установки не должно быть ниже 16.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Senger P., Dementev D., Heuser J., Kapishin M., Lavrik E., Murin Y., Maksymchuk A., Schmidt H.R., Schmidt C., Senger A., Zinchenko A.* // Particles. 2019. V. 2. P. 481. <https://doi.org/10.3390/particles2040029>
2. *Vasilev S.E., Galavanov A.V., Kapishin M.N., Karjavine V.Yu., Kulish E.M., Lenivenko V.V., Makankin A.M., Maksymchuk A.I., Piyadin S.M., Khabarov S.V.* // Phys. Part. Nuclei Lett. 2019. V. 16. P. 859. <https://doi.org/10.1134/S1547477119060542>
3. *Dementev D., Elsha V., Murin Y., Sheremetev A., Shitenkov M., Sukhov N., Baranov A., Kharlamov P., Merkin M.,*

- Lavrik E., Senger A., Senger P.* // Phys. Part. Nuclei. 2022. V. 53. № 2. P. 197.
<https://doi.org/10.1134/S1063779622020265>
4. CBM Collaboration. *Ablyazimov T. et al.* // Eur. Phys. J. 2017. V. 53. P. 60.
<https://doi.org/10.1140/epja/i2017-12248-y>
5. *Sheremetiev A., Dementev D., Elsha V., Kolozhyari A., Murin Y., Shitenkov M., Sukhov N.* // Phys. Part. Nuclei. 2022. V. 53. № 2. P. 377.
<https://doi.org/10.1134/S1063779622020745>
6. *Kasinski K., Rodriguez-Rodriguez A., Lehnert J., Zubrzycka W., Szczygiel R., Otfinowski P., Kleczek R., Schmidt C.J.* // Nucl. Instr. and Meth. A. 2018. V. 908. P. 225.
<https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.08.076>
7. *Shitenkov M., Dementev D., Voronin A., Kovalev I., Kudryashov I., Kurganov A., Murin Yu.* // Phys. Part. Nuclei. 2021. V. 52. P. 826.
<https://doi.org/10.1134/S1063779621040559>
8. *Panasenko I., Schmidt H.R., Lavrik E., Simons C., Schmid C.J.* Microcable quality assurance: capacitance measurements. CBM Progress Report 2016. 03 2017.
<http://repository.gsi.de/record/201318>
9. *Spieler H.* Semiconductor Detector Systems. Semiconductor Science and Technology. V. 12. Oxford University Press, 2005. P. 34.
10. *Zubrzycka W., Kasinski K.* “Noise considerations for the STS/MUCH readout ASIC”. CBM STS-XYTER 2.1 and SPADIC 2.2 Submission Review. <https://indico.gsi.de/event/5976/>
11. *Rodríguez Rodríguez A.* PhD thesis, Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt am Main, Frankfurt am Main, 2020
12. *Lutz G.* Semiconductor Radiation Detectors. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2007.
<https://doi.org/10.1007/978-3-540-71679-2>
13. *Spieler H.* Semiconductor Detector Systems. Semiconductor Science and Technology. V. 12. Oxford University Press, 2005. P. 17.
14. <https://www.sciencedirect.com/topics/medicine-and-dentistry/ruthenium-106>
15. 3rd RD48 STATUS REPORT. CERN LHCC 2000-009. LEB Status Report/RD48. 31 December 1999.
<https://rd48.web.cern.ch/status-reports/RD48-3rd-status-report.pdf>