

Моделирование сигналов головной части считывающей электроники кремниевых детекторов

А. Воронин, к. ф-м. н.¹

УДК 539.1.075 | ВАК 05.27.01

При разработке считывающей электроники (СЭ) для детектирующих систем на основе кремниевых детекторов следует учитывать конструктивно-технологические особенности модулей детекторов и блоков головных каскадов, а также влияние паразитных элементов измерительного канала на точность измерений. Комплексный подход к моделированию системы «детектор – входной усилитель – шейпер» позволяет детально изучить форму сигналов и другие параметры измерительного канала, оценить влияние помех из соседних каналов. В статье описана методика моделирования сигналов системы «кремниевый детектор – зарядочувствительный усилитель (ЗЧУ) – шейпер», проведен анализ полученных результатов в сравнении с экспериментальными данными, выполнена оценка точности используемых моделей.

Блоки головных каскадов считывающей электроники (ЗЧУ и шейпера), определяющих основные параметры СЭ, невозможно в полной мере исследовать без учета влияния кремниевого детектора, подключаемого к входу ЗЧУ. Однако, при испытаниях специализированных интегральных микросхем (СИМС) к входу ЗЧУ часто подключают эквивалент детектора, как правило, емкость. Как было показано в [1, 2], хотя подключение сосредоточенной емкости детектора не дает полной картины работы модуля с кремниевым детектором, но даже с использованием простого имитатора детектора можно отследить изменение формы сигналов в зависимости от положения детектора относительно блоков СЭ. Более высокую точность оценки параметров головных каскадов можно получить, используя трехмерную модель детектора.

Например, в проекте HES-ZEUS пиковые детекторы с ЗЧУ в гибридном

исполнении установлены друг за другом на специальных платах, а шейперы – на других платах в составе отдельных блоков (рис. 1). На рис. 2 показаны отклики ЗЧУ, полученные экспериментально, для разных расстояний от детекторов до шейперов (входной сигнал подается через калибровочную емкость).

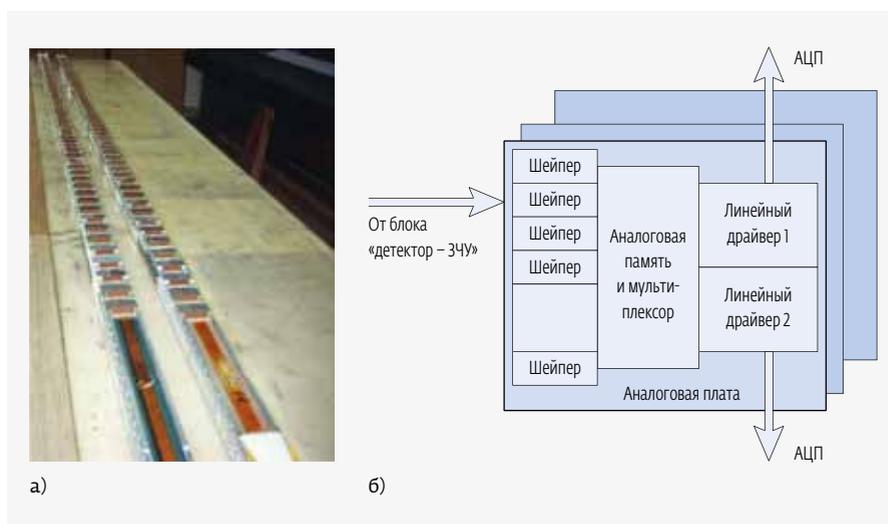


Рис. 1. Блоки СЭ для проекта HES-ZEUS: а – пиковые детекторы и ЗЧУ, установленные на длинных платах; б – блок-схема аналоговой платы, в состав которой входят шейперы, аналоговая память, мультиплексор и линейный драйвер

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

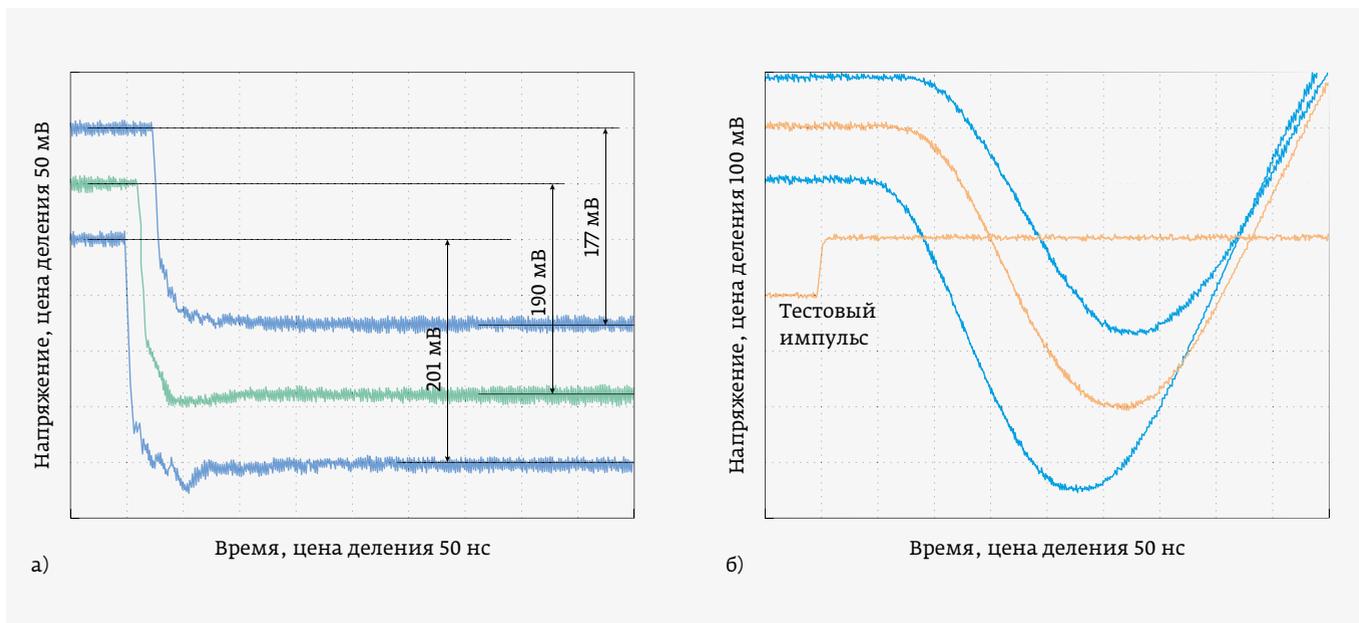


Рис. 2. Экспериментальные отклики ЗЧУ (а) и шейпера (б) проекта HES-ZEUS

Как видно из рис. 2, амплитуда сигналов ЗЧУ и шейпера падает примерно на 10%, а максимум сигнала шейпера сдвигается примерно на 25 нс в зависимости от положения детекторов с ЗЧУ на длинной плате (см. рис. 1). Задержки сигналов также увеличиваются (до 20 нс), фронт сигнала ЗЧУ затягивается и меняется его форма.

Достаточно точный расчет параметров модуля (особенно для стриповых детекторов) обеспечивает симулятор из пакета Virtuoso Spectre от Cadence. Наличие ошибок при проектировании СЭ в большинстве случаев связано с некорректным выбором моделируемой схемы (например, отсутствие в схеме паразитных элементов). Если при исследовании образцов микросхем обнаружены несоответствия между моделированием и экспериментальными данными, то в большинстве случаев

причину ошибок можно найти, скорректировав моделируемую схему.

Рассмотрим моделирование блока детектора и канала «ЗЧУ – шейпер», используя три варианта: трехмерную модель стрипового детектора из [1, 2], упрощенную модель детектора (емкость) и калибровочную емкость. В качестве ЗЧУ и шейпера в моделируемой схеме применим блоки, разработанные для проекта СВМ (СИМС MUCH V3) [3].

Вначале смоделируем схему, в которой вместо ЗЧУ СИМС MUCH V3 используется «идеальный» ЗЧУ, построенный на ОУ (рис. 3). Схема представляет собой ядро модуля головных каскадов с кремниевым детектором. В данной статье паразитные элементы конкретной реализации схемы не учитывались в целях лучшего понимания работы схемы.

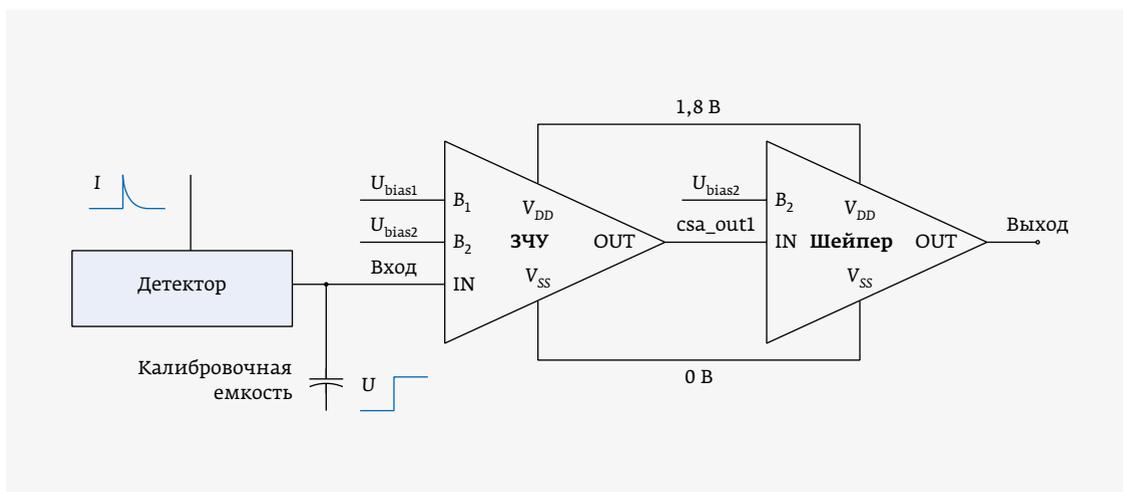


Рис. 3. Схема блока детектора и канала «ЗЧУ – шейпер»

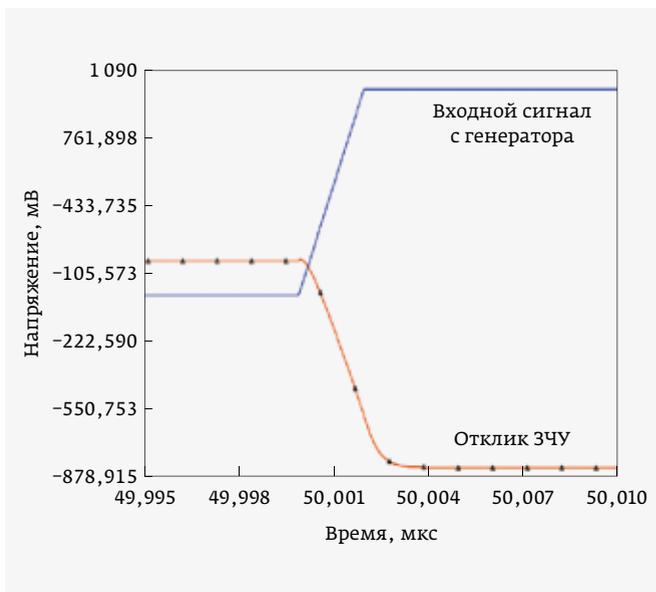


Рис. 4. Подача сигнала в ЗЧУ через калибровочную емкость без детектора

Рассмотрим моделирование «идеального» усилителя, аналогичное традиционной проверке модуля с калибровочной емкостью и модели детектора в виде одной емкости. Как отмечалось в [4], традиционная схема с калибровочной емкостью не полностью отражает реальные процессы в модуле. ЗЧУ в этом случае соответствует усилителю напряжения, поскольку фронты входного сигнала генератора и отклика ЗЧУ практически равны и составляют порядка 2 нс (рис. 4), что не отражает процесс сбора заряда в детекторе. При подключении модели

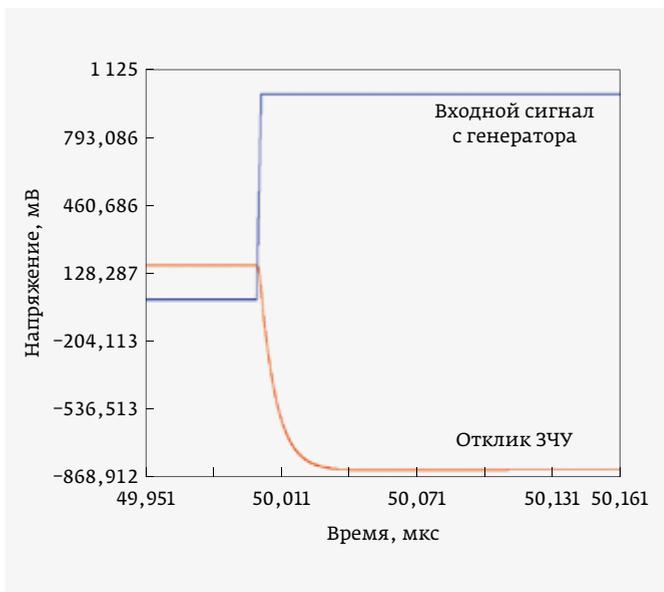


Рис. 5. Подача сигнала в ЗЧУ через калибровочную емкость с детектором 36 пФ

детектора в виде емкости 36 пФ фронт сигнала усилителя заваливается и для неидеального ЗЧУ определяется свойствами самого усилителя (рис. 5).

Полоса ЗЧУ при подаче сигнала через калибровочную емкость ограничена в области низких частот, поэтому для сигналов большой длительности ЗЧУ работает как дифференцирующий усилитель с постоянной времени обратной связи, поэтому ЗЧУ имеет отклик как по положительному, так и по отрицательному броску напряжения (рис. 6).

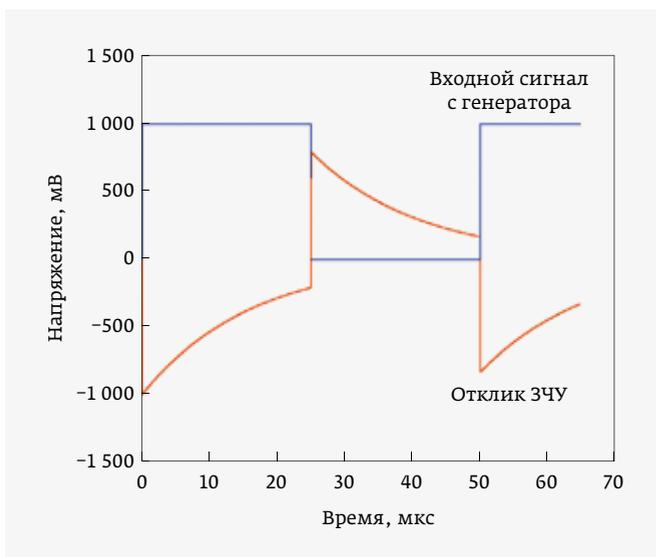


Рис. 6. Подача сигнала в ЗЧУ через калибровочную емкость периодического сигнала напряжения

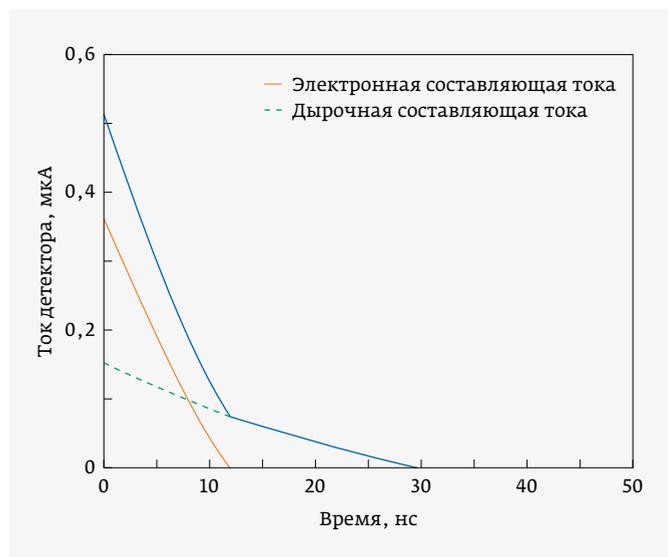


Рис. 7. Аппроксимация тока от частицы в точке ее прохождения через детектор

Рассмотрим теперь ситуацию, когда на вход ЗЧУ подается токовый сигнал, который является реальным входным сигналом усилителя. Форму входного импульса тока получим при помощи линейно-ломаной аппроксимации токового сигнала, генерируемого в точке попадания частицы в детектор (рис. 7). На рис. 8 сравниваются формы сигналов на входе ЗЧУ при использовании модели детектора в виде одного емкостного элемента с «идеальным» ЗЧУ и трехмерной модели детектора с ЗЧУ СИМС MUCH V3.

Очевидно, что модель реального усилителя и трехмерная модель детектора искажают импульс тока на входе ЗЧУ за счет элементов входа и конечного импеданса ЗЧУ.

В общем случае, используя трехмерную модель детектора [1, 2], с помощью симулятора Virtuoso Spectre можно смоделировать сигналы СЭ в канале и перекрестные помехи между каналами в детекторе и аппаратуре с учетом паразитных элементов схемы, а также прохождение частицы в определенной точке детектора или нескольких детекторов. Для этого токовый генератор необходимо подключать к разным точкам детектора.

Исследуем сигналы частицы для трехмерной модели стрипового детектора и сигналы СИМС MUCH V3 на выходах ЗЧУ и шейперов для разных длин детекторов модуля головных каскадов.

Например, на рис. 9 и 11 представлены результаты моделирования сигнала частицы, прошедшей рядом с входом ЗЧУ и на удаленном (на 6 см) от входа ЗЧУ конце детектора длиной 6 см. Из рисунков видно, что в зависимости от места пролета частицы амплитуда выходного сигнала ЗЧУ может варьироваться в пределах 10%. По результатам моделирования для детектора длиной 6 см амплитуда помехи на соседний канал составляет порядка 1 мВ.

Если сравнить смоделированные токовые сигналы на входе ЗЧУ и импульсы напряжения на его выходе (см. рис. 9) с результатами моделирования при подачи сигнала в ЗЧУ через калибровочную емкость (см. рис. 4) и осциллограммой сигнала ЗЧУ, подаваемого через калибровочную емкость (рис. 10), то можно

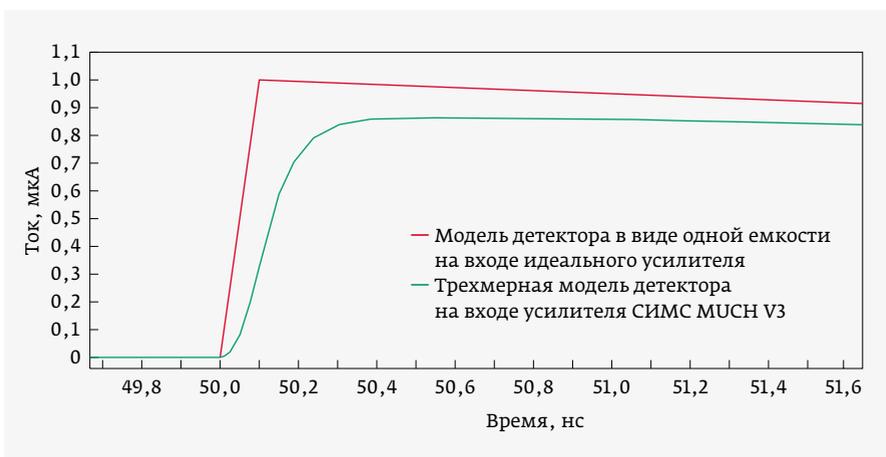


Рис. 8. Ток детектора на входе ЗЧУ

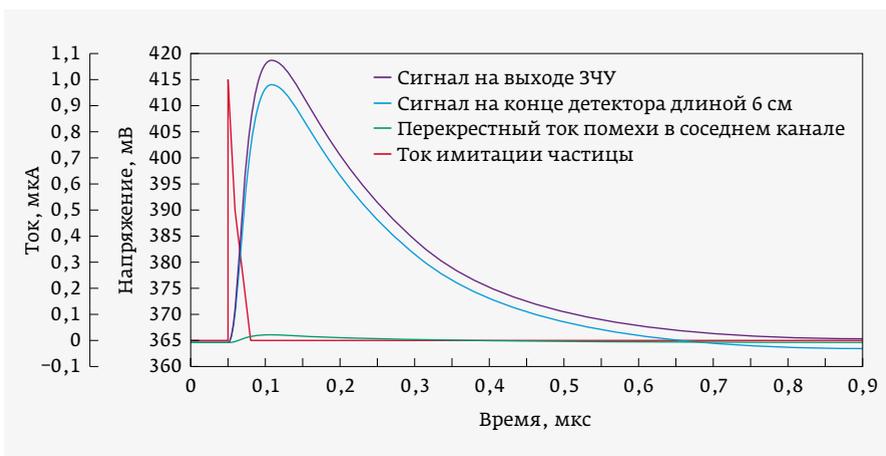


Рис. 9. Имитация частицы, прошедшей рядом с выходом детектора и на конце детектора длиной 6 см (выход ЗЧУ)

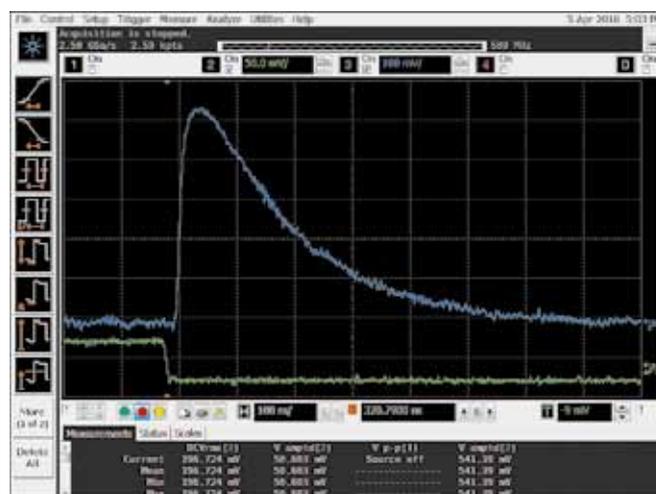


Рис. 10. Осциллограмма выходного сигнала ЗЧУ, снятая через пикопроб с калибровочной емкостью

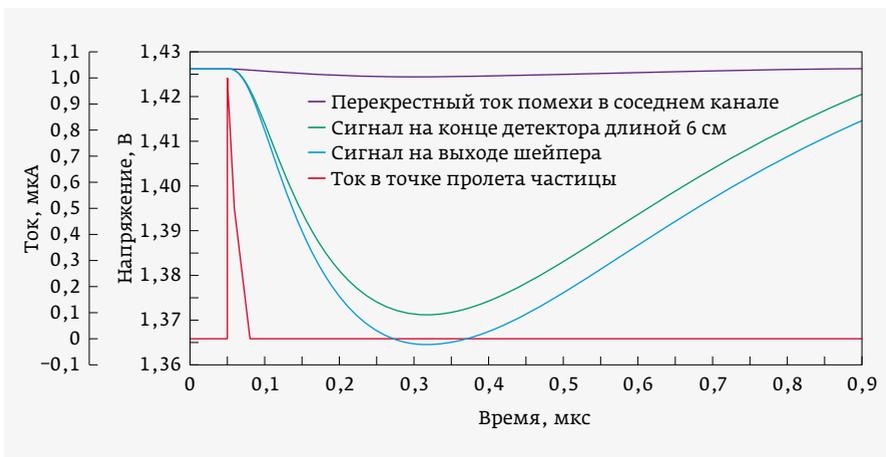


Рис. 11. Имитация частицы, прошедшей рядом с выходом детектора и на конце детектора длиной 6 см (выход шейпера)

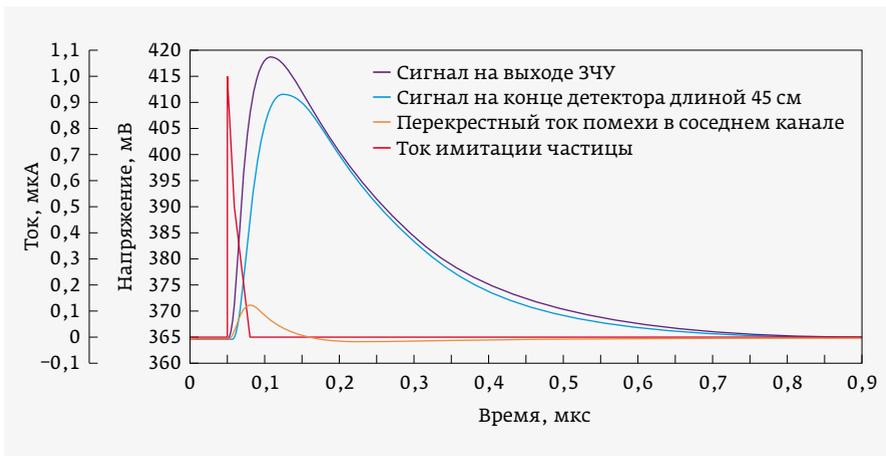


Рис. 12. Имитация частицы, прошедшей рядом с выходом детектора и на конце детектора длиной 45 см (выход ЗЧУ)

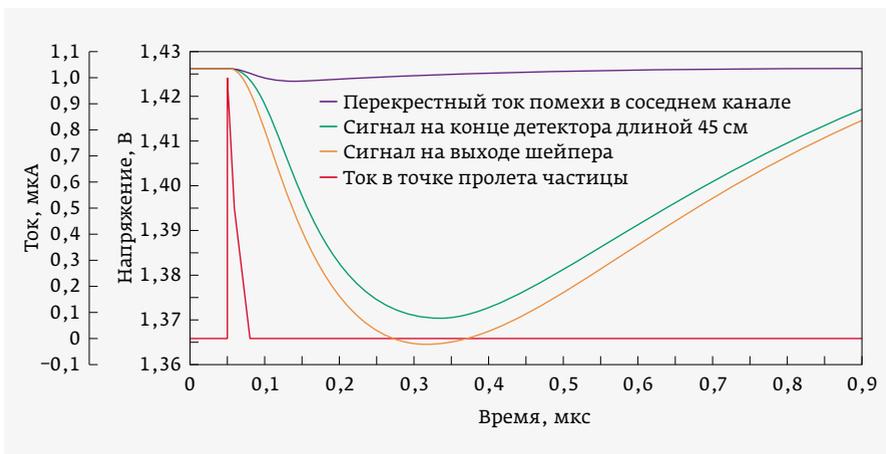


Рис. 13. Имитация частицы, прошедшей рядом с выходом детектора и на конце детектора длиной 45 см (выход шейпера)

заметить, что в последнем случае фронт сигнала короче, то есть при подаче сигнала через калибровочную емкость не учитывается время сбора заряда.

Если увеличить длину детектора до 45 см, то амплитуда помехи возрастает до 5–10 мВ, то есть до 10–15% от амплитуды сигнала (рис. 12, 13). Амплитуда выходного сигнала ЗЧУ в этом случае может варьироваться в диапазоне 15%. Такие величины помех и искажений сигнала могут привести к погрешностям при измерении амплитуды и времени прихода полезного сигнала. Задержка сигнала ЗЧУ составляет порядка 20 нс.

Стоит также отметить значительное искажение формы входного тока ЗЧУ для трехмерной модели детектора длиной 45 см при пролете частицы на удаленном конце стрипа (рис. 14).

Однако это изменяет амплитуду сигнала на выходе шейпера в пределах не более 15%, что говорит о незначительном различии значений площади под кривыми (см. рис. 14), то есть потери при сборе заряда в этом случае не превышают 15%.

В заключение, оценим точность моделирования при использовании различных вариантов описаний моделей. Для моделирования передаточной характеристики СИМС MUCN V4 [5] использовался симулятор Virtuoso AMS. Описание моделей цифровой и аналоговой частей схемы СИМС было выполнено несколькими способами. Для цифровой части был применен язык SystemVerilog из пакета Virtuoso, который позволяет моделировать аналого-цифровую СИМС. Для описания аналоговой части использовался Verilog-A и модели на транзисторном уровне (SPICE-модели из библиотеки элементов пакета Virtuoso).

Ошибка моделирования при разных способах описания схемы

не превышает 10% (рис. 15). Наиболее высокая линейность характеристики получается на выходе шейпера, за которым следует АЦП. Вероятно, такой разброс связан с точностью оцифровки при использовании различных моделей АЦП. В зависимости от требований к точности СИМС следует ввести коррекцию в модель на языке описания высокого уровня или проверить на уровне физического моделирования, насколько ошибка влияет на суммарный результат работы установки.

Таким образом, элементы стрипового детектора могут вносить определенные искажения в форму и амплитуду сигналов, а также создавать помехи в соседних каналах, что может оказывать существенное влияние на точность работы считывающей электроники. Моделирование системы «детектор – ЗЧУ – шейпер» позволяет оценить влияние элементов модуля, в том числе паразитных, и учесть это влияние при проектировании канала СЭ.

* * *

Положения этой статьи предполагается использовать в проекте VM@N при создании СЭ и реализации гранта РФФИ № 18-02-40047 «Система скоростного потокового чтения данных с широкоапертурной кремниевой трековой системы установки NICA-VM@N».

ЛИТЕРАТУРА

1. **Воронин А.** Моделирование кремниевых детекторов при разработке считывающей электроники. Часть 1 // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2018. № 9.
2. **Воронин А.** Моделирование кремниевых детекторов при разработке считывающей электроники. Часть 2 // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2018. № 10.
3. **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.
4. **Воронин А.** Головные каскады считывающей электроники кремниевых детекторов: входной усилитель и шейпер // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2021. № 1.
5. **Atkin E., Malankin E., Samsonov V., Shumikhin V., Voronin A. et al.** 32-channel self-triggered ASIC for GEM detectors // 2017 IEEE 30th International Conference on Microelectronics (MIEL), Nis, 2017, pp. 225–228.
6. **Kaplon J.** Challenges and advantages making analog front-ends (for Silicon Strip Detectors) in deep submicron technology. <https://slideplayer.com/slide/7081227/>.
7. **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.
8. **Atkin E., Voronin A., Karmanov D., Kudryashov I., Podorozhniy D., Shumikhin V.** The read-out ASIC for the Space NUCLEON project JINST 10 (2015) 04, C04005.

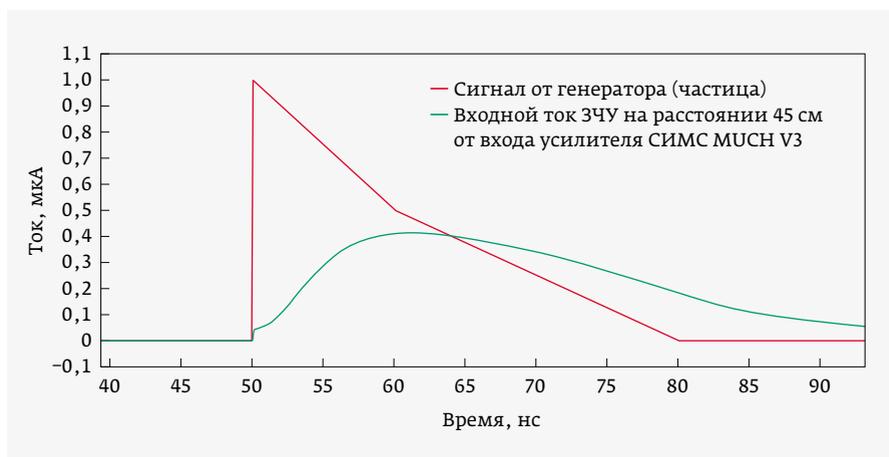


Рис. 14. Ток детектора на расстоянии 45 см от входа детектора

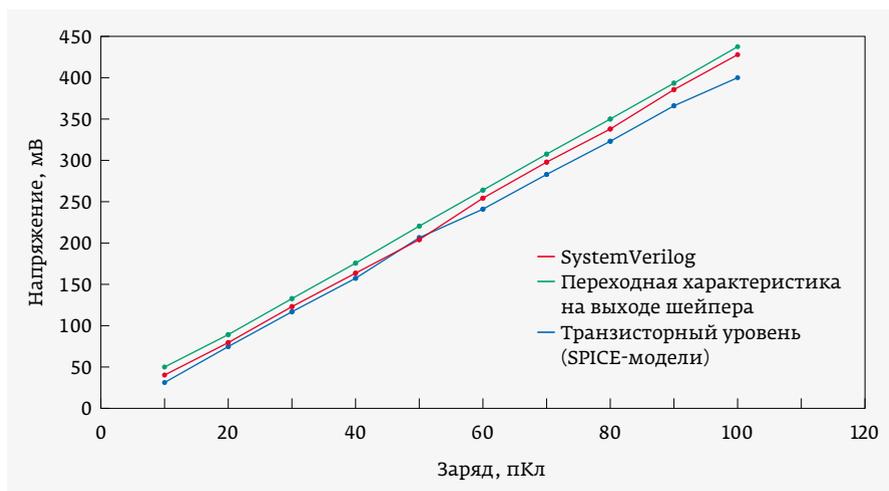


Рис. 15. Симуляция переходной характеристики при использовании различных моделей модуля СИМС MUCN V4 (в сравнении с переходной характеристикой головной части СЭ на выходе шейпера)