

Моделирование кремниевых детекторов при разработке считывающей электроники

Часть 2

А. Воронин, к. ф-м. н.¹

УДК 539.1.074 | ВАК 05.27.00

В первой части статьи, опубликованной в предыдущем номере журнала «ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес» [1], были детально рассмотрены свойства и параметры кремниевых детекторов для регистрации ионизирующих излучений, которые необходимо принимать во внимание при создании модели детектора для моделирования считывающей электроники (СЭ). Эта модель не учитывала элементы, связанные с конструкцией электронного модуля, включающего в себя кремниевый детектор. Во второй части статьи представим комплексную трехмерную модель модуля кремниевых детекторов, разработанную с учетом конструктивно-технологических особенностей этих устройств, рассмотрим методику моделирования модуля кремниевых детекторов и проанализируем результаты моделирования канала СЭ в симуляторе SPICE (Cadence Spectre) с использованием данной модели.

МОДУЛЬ КРЕМНИЕВЫХ ДЕТЕКТОРОВ КАК ЭЛЕМЕНТ МЕТОДИКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СЭ

Более точное представление о работе СЭ совместно с детектирующими элементами дает модель модуля, содержащего кремниевый детектор или несколько детекторов, соединенных между собой, а также другие элементы, поскольку конструктивные и технологические решения для модуля и используемые электронные компоненты влияют на характеристики сигналов детектора и СЭ. Пример конструкции модуля эксперимента D0 [1] приведен на рис. 1.

Главным элементом модуля для моделирования СЭ является схема кремниевого детектора. При этом некоторые элементы, конструктивно расположенные на плате модуля (например, элементы смещения), необходимо ввести в эквивалентную схему детектора.

На основе предложенной в [1] эквивалентной схемы детектора можно создать обобщенную схему, отражающую свойства детектора в составе модуля, – трехмерную схему двухстороннего стрипового АС-детектора с двойной металлизацией. Причем такая схема включает подавляющее количество элементов и связей между ними, входящих во все типы рассмотренных в [1] детекторов. В схему включаются только те элементы, которые могут оказывать значительное влияние на

моделирование СЭ. Остальные элементы модуля, для упрощения модели детектора, не используются.

Обобщенная схема состоит из соединенных между собой примитивов [1]:

- схемы сторон р- и n-детектора поперечного сечения детектора (рис. 2, 3);
- схемы сторон р- и n-детектора продольного сечения детектора (рис. 4, 5);
- схемы соединения емкостей и других элементов линий второго слоя металлизации (рис. 6).

Отличие схемы р-стороны (см. рис. 2) по сравнению со схемой, предложенной в [1], заключается в добавлении сопротивления нагрузки R_{load} и цепи, состоящей из диода D, сопротивления R_b и емкости C_b . Сопротивление R_{load} является сосредоточенным элементом и, замыкая цепь смещения U_{bias} , представлено на схеме для стрипового детектора только в последнем примитиве. Для падового детектора R_{load} может быть внешним элементом, расположенным на плате рядом с детектором. Диод D является моделью р-n-перехода, которая имитирует ток утечки. Исключив D, получим RC-модель детектора, для которой



Рис. 1. Конструкция модуля кремниевого детектора эксперимента D0

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

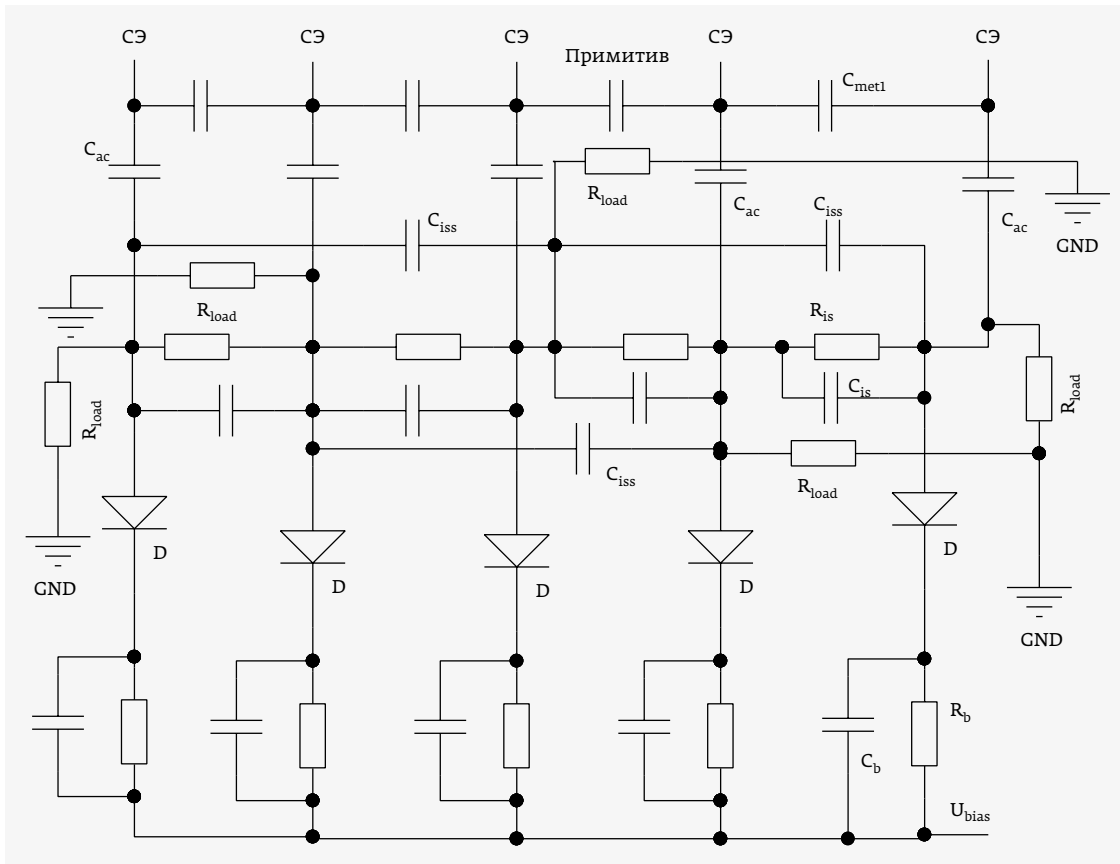


Рис. 2. Структура примитива р-стороны схемы модели поперечного сечения детектора

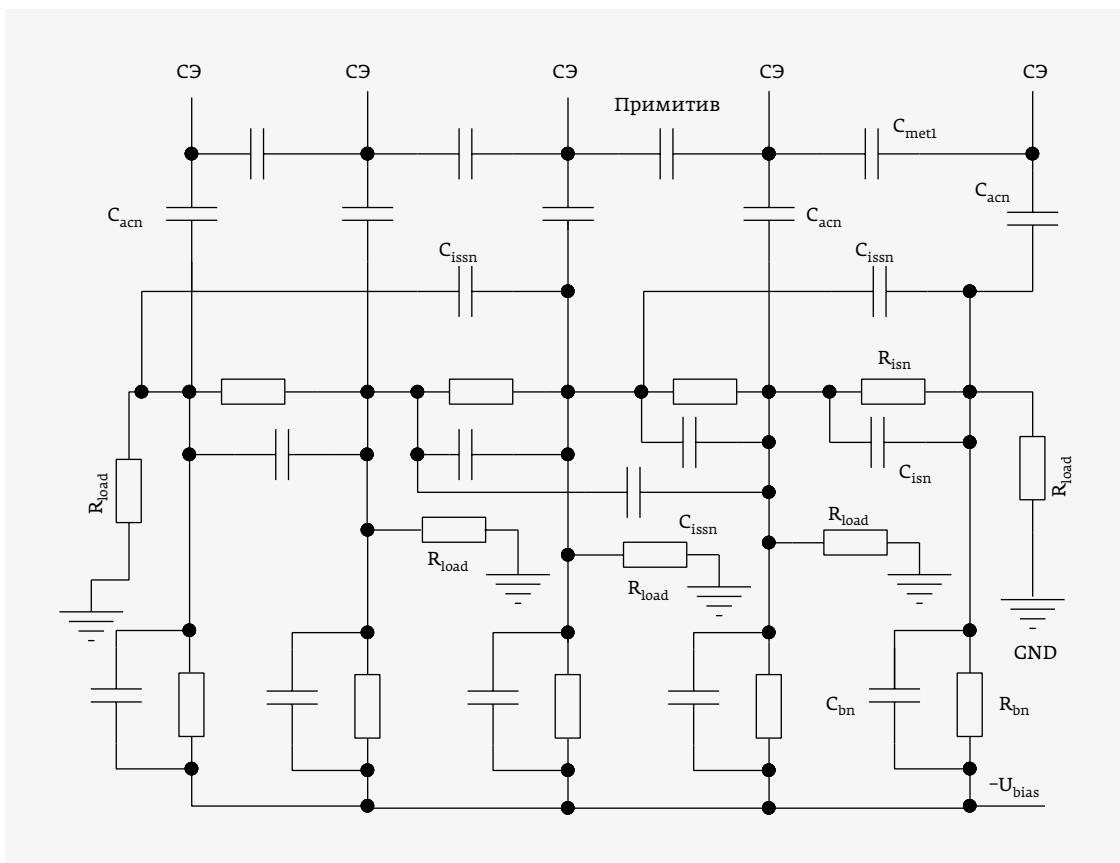


Рис. 3. Структура примитива n-стороны схемы модели поперечного сечения детектора

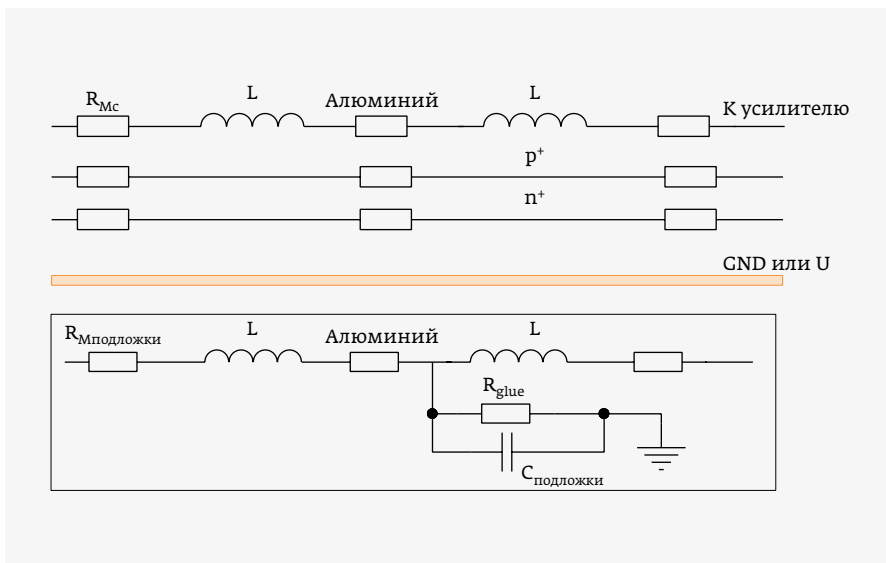


Рис. 4. Схема модели р-стороны продольного сечения одностороннего или двухстороннего детекторов (в рамке – возможный вариант схемы обратной стороны одностороннего детектора)

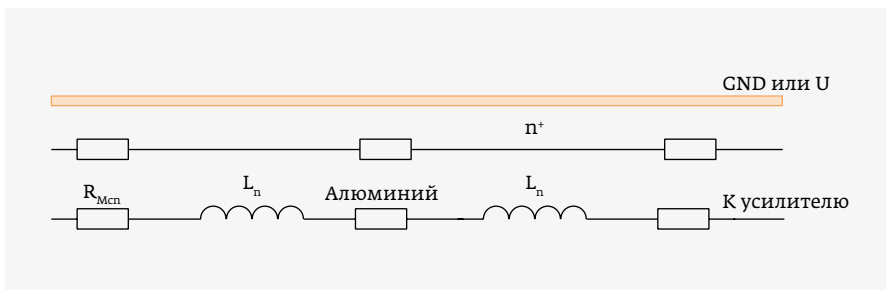


Рис. 5. Схема модели n-стороны продольного сечения двухстороннего детектора

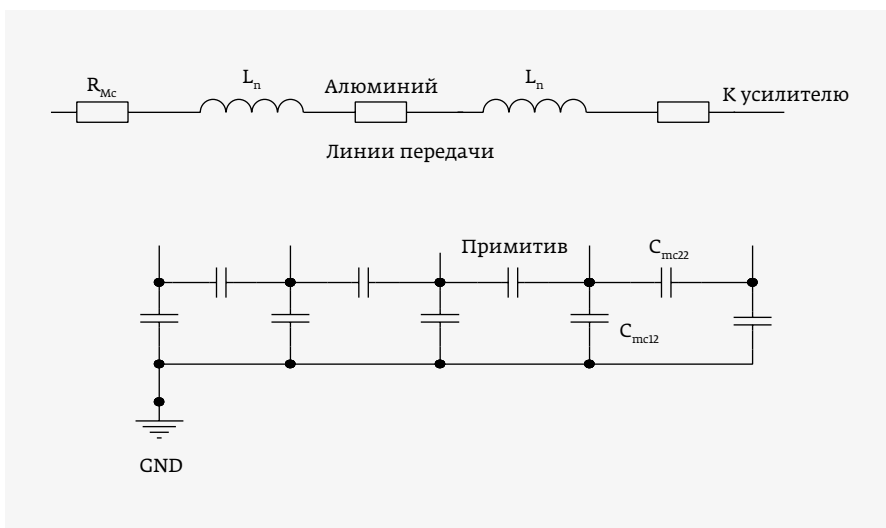


Рис. 6. Схема второго слоя металлизации

также возможно моделирование тока утечки [1]. С помощью R_b и C_b моделируется работа схемы с учетом элементов кремниевой пластины или сопротивления контакта на n-сторону. При значениях R_b и C_b , равных нулю формируется схема, в которой величины R_b и C_b , входящие в оценочные формулы из [1], определяют параметры диода.

На n-стороне (см. рис. 3) также введены элементы R_{bn} , C_{bn} и R_{load} ; p-n-переход на n-стороне отсутствует, значения элементов должны соответствовать расчетным [1] или измеренным. Значение сопротивления R_{load} для обеих сторон определяется при проектировании схемы смещения детектора.

В продольной схеме примитива для р-стороны (см. рис. 4) элементы R_{Mc} , L , слой p^+ и n^+ соединяют примитивы схемы поперечного сечения. Для моделирования двухстороннего детектора слой n^+ исключается – такое представление р-стороны упрощает схему детектора, при этом обеспечивается требуемая точность моделирования СЭ.

Если исключить диод на рис. 2, упростив схему до RC-типа, то изображения схем поперечного сечения двух сторон детектора будут идентичными. Отличие состоит только в значениях элементов схемы, однако использование диода позволяет более точно приблизить модель к реальному детектору.

На рис. 4 показана схема для одностороннего детектора, который соединяется с линией питания токопроводящим клеем. При таком условии и полной металлизации обратной стороны емкость на подложку (например, металлизированную керамику) может составлять от единиц до сотен пФ, а тепловые шумы сопротивления клея R_{glue} влияют на суммарный шум СЭ.

Для двухстороннего детектора схема продольного сечения n-стороны (рис. 5) не имеет принципиальных отличий от схемы р-стороны, за

исключением случаев, когда $R_{Mc} \neq R_{Mcн}$, при этом имплантация p^+ меняется на n^+ .

При моделировании необходимо учитывать шумы сопротивлений соединений сигнальных выводов детектора с платой модуля (например, при помощи микросварки), вводя в схему эквивалентный резистор.

Для включения в модель второго слоя металлизации подходит несколько способов. Можно использовать стандартную SPICE-модель передающих линий [1]. При отсутствии такой модели линии в схеме (см. рис. 6) должны учитываться емкости второго слоя C_{mc22} , емкости переходных соединений двух слоев C_{mc12} и активные сопротивления линий R_{Mc} , $R_{Mcн}$ второго слоя металлизации, а также индуктивности L , если требуется высокая точность моделирования.

Введение в модель детектора второго слоя металлизации зависит от сложности его топологии и активного сопротивления линий. Если сопротивлением и индуктивностями линий двух слоев можно пренебречь, то в первом приближении к выходу детектора можно подключить суммарные сосредоточенные емкости C_{mc22} и C_{mc12} [1].

Более высокую точность дает моделирование распределенной структуры второго слоя, если разделить емкостную цепочку C_{mc22} на примитивы (как это делается при моделировании детектора [1]), оставив сосредоточенными емкости C_{mc12} .

В случае, когда линии передачи отличаются высоким сопротивлением, создается распределенная структура, состоящая из линий сопротивлений R_{Mc} , $R_{Mcн}$ (при необходимости индуктивности L) и емкостей C_{mc22} . Входы структуры второго слоя соединяются в точках переходных отверстий с первого на второй слой.

Емкости C_{mc12} соединяются с контактными площадками второго слоя, имитируя наихудшие условия для моделирования шумов СЭ.

Наряду со свойствами детекторов необходимо учитывать, что в зависимости от конструкции модуля в него могут входить следующие элементы:

- блок детекторов, то есть объединение нескольких пластин в общий детектор, для чего сегменты на пластинах последовательно соединяются один с другим;
- кабели, передающие сигналы детекторов в СЭ;
- адаптеры, обеспечивающие согласование шагов контактных площадок детекторов с контактами СЭ;
- электрические микросоединения, например микросварка, токопроводящий клей;
- схемы смещения детекторов, расположенные на платах;

- элементы СЭ, которые влияют на полное входное сопротивление Z СЭ;

- паразитные электрические элементы модуля.

Соответственно, в схему модуля необходимо ввести:

- емкость между проводниками плоского кабеля C_{icab} (если используется плоский кабель между детектором и СЭ), для расчета которой можно использовать формулу погонной емкости C_{icab0} [1] или стандартную SPICE-модель;
- при экранировании однослойного кабеля к емкости C_{icab} следует добавить емкость между экраном и проводником (в зависимости от типа экранировки) исходя из удельной емкости, которую можно рассчитать по формуле: $C_{bcab0} = \epsilon_0 \epsilon w_{met} / t_d$, где w_{met} – ширина проводника кабеля, t_d – толщина диэлектрика между проводником и экраном, или использовать стандартную SPICE-модель;
- при наличии дополнительных емкостных элементов между детектором и СЭ следует использовать C_{coup} – полную емкость перехода «детектор – СЭ».

Индуктивности могут быть введены в схему детектора вследствие того, что при длине детектора более 10 см или при последовательном соединении сегментов детекторов полная длина эквивалентного стрипа выходных проводников модуля детекторов образует подобие длинных линий, и индуктивности начинают оказывать влияние на параметры сигнала, поступающего на вход СЭ. Собственная индуктивность проводника L_{wt} прямоугольного сечения $w_{met} \cdot t$ и длиной l [2] равна:

$$L_{wt} = 0,2l \left(\ln \left(\frac{2l}{w_{met} + t} + 0,2235 \frac{w_{met} + t}{2l} \right) + 1/2 \right) \approx \approx 0,2l \left(\ln \frac{2l}{w_{met} + t} + 1/2 \right), \text{ [Гн]}. \quad (1)$$

Используя (1), можно оценить индуктивность L выходного проводника детектора для стороны p и L_n – индуктивность выходного проводника для стороны n . Если схема детекторной части модуля делится на примитивы, то в продольном направлении схема детекторной части, соединяющей примитивы, имеет вид, как на рис. 7, а для стороны n используются значения $R_{Mcн}$ и L_n . Отметим, что более точное моделирование кабелей и проводников

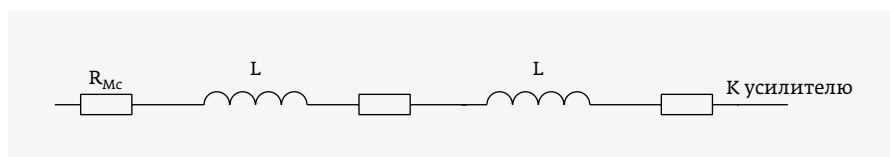


Рис. 7. Продольная часть линии связи детектора с индуктивностями

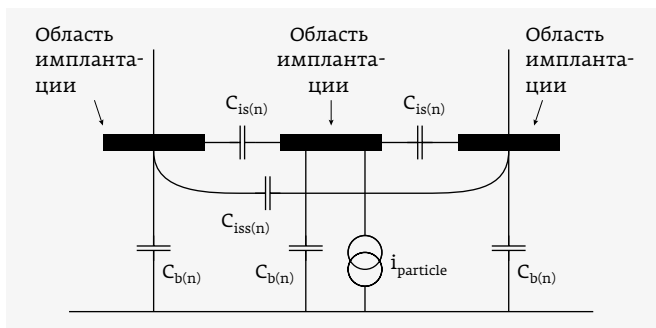


Рис. 8. Подключение источника тестового импульса к детектору

в модуле обеспечивают стандартные библиотеки SPICE (модели линий передачи сигналов).

МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ МОДУЛЯ КРЕМНИЕВЫХ ДЕТЕКТОРОВ

Подключение к схеме детектора виртуального тестового генератора, импульс тока которого имитирует прохождение частицы через детектор, должно быть выполнено так, чтобы имитировать возникновение импульса от реальной частицы. Это обеспечивается путем соединения генератора ($i_{particle}$) с областью имплантации на обеих сторонах детектора (рис. 8). Виртуальной точкой схемы детектора, соответствующей подключению к области имплантации детектора, является точка соединения межстриповых емкостей C_{is} и емкостей на обратную сторону C_b для стороны p (см. рис. 8), для стороны n – точка соединения C_{isn} и C_{bn} .

Применение примитивов в схеме детектора позволяет подавать тестовые импульсы в определенные примитивы, тем самым имитируя координаты пролетающих через детектор частиц.

Анализируя отклики сигналов детектора и СЭ, можно исследовать аппаратные эффекты, возникающие при попадании частиц в один или несколько каналов СЭ. Для двухсторонних детекторов или набора детекторов, расположенных друг за другом, возможно моделирование псевдотрека частицы или нескольких частиц в физической установке.

Формы тестовых импульсов для моделирования детектора могут различаться. Если время формирования СЭ много больше длительности импульса тока детектора, используются импульсы псевдопрямоугольной формы с конечным временем фронта и спада. Это относится к случаям, когда не требуется определение времени события или его высокая точность, которая зависит от формы, длительности фронта отклика детектора и параметров входного усилителя СЭ.

Когда время формирования СЭ сравнимо с длительностью импульса детектора по «подшве» импульса детектора и/или требуется определить время моделируемого события с высокой точностью, необходимо, чтобы виртуальный тестовый генератор формировал импульс, форма которого была аналогична форме реального импульса. Это связано с тем, что на входе СЭ возникают искажения импульса тестового генератора, проходящего через схему детектора (изменение формы, уменьшение амплитуды и изменения длительности фронта импульса детектора). Искажения зависят от имитации координаты попадания частицы в детектор или номера примитива схемы, что характеризует расстояние от точки пролета имитируемой частицы до входа СЭ и схемы входного усилителя СЭ. В этом случае детектор работает подобно фильтру нижних частот, характеристики которого определяются конечной величиной сопротивлений и емкостями линий связи для подключения детектора к СЭ, а также сопротивлениями и емкостями детектора.

Наибольшие искажения сигналов возникают, если частица попадает в детектор на максимальном расстоянии от

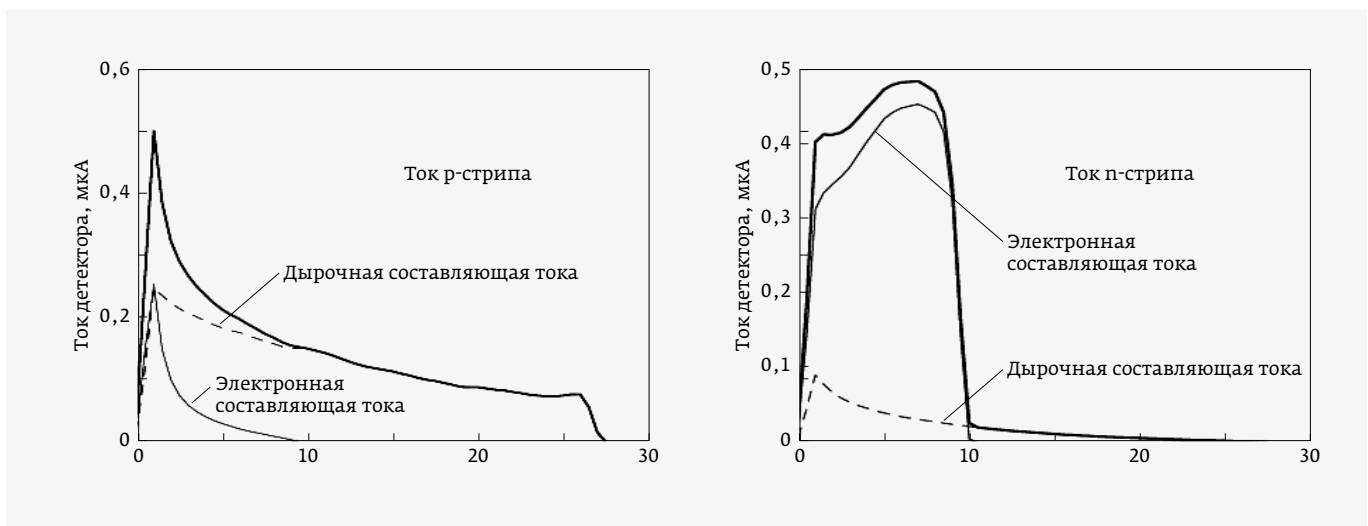


Рис. 9. Форма импульсов тока двух сторон стрипового детектора

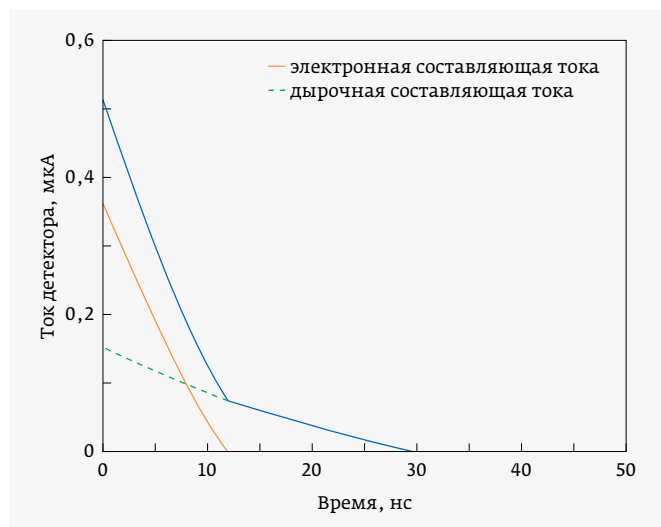


Рис. 10. Форма импульсов тока падового детектора

входа СЭ. Формы импульсов тока, возникающие в детекторе под воздействием частиц (и которые должен формировать виртуальной тестовой генератор), на сторонах р и п стрипового детектора могут различаться [3]. На длительность импульса влияет толщина детектора из-за конечного времени сбора носителей (электронов и дырок), определяемых их скоростью дрейфа. Формы импульсов тока [3] для сторон р и п стрипового детектора толщиной 300 мкм, полученные расчетным путем, приведены на рис. 9.

Формы импульсов тока стрипового детектора согласуются с экспериментальными данными [4]. Форма импульса тока падового детектора представлена на рис. 10 [3].

Формирование сигналов (см. рис. 9, 10) при помощи моделей генераторов, которые входят в состав библиотек SPICE (Spectre), представляет определенную сложность,

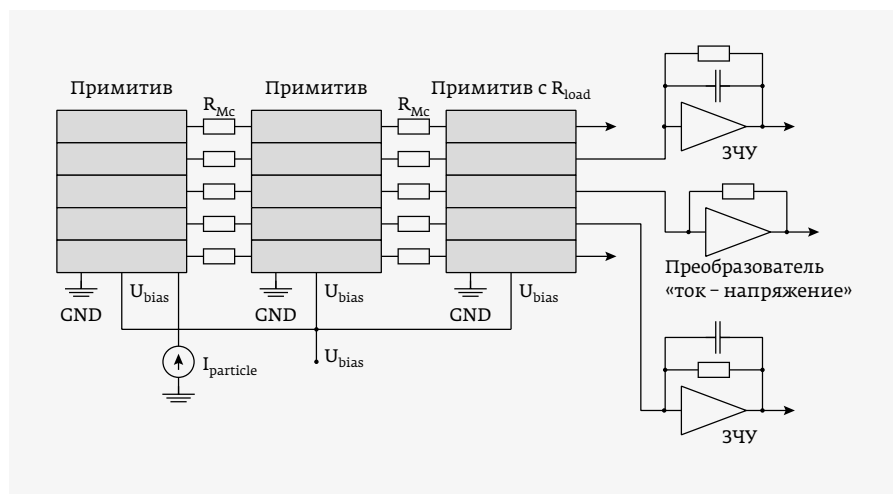


Рис. 12. Схема соединения примитивов, тестового генератора, источника смещения и нагрузки детектора с входными каскадами СЭ



Рис. 11. Детектор и плоский гибкий кабель эксперимента D0

поэтому форма сигналов аппроксимируется. Для р-стороны стрипового и падового детекторов применяются:

- экспоненциальная аппроксимация (используется модель генератора экспоненциальных сигналов): тестовые импульсы описываются двумя экспонентами — первая экспонента отличается малой постоянной времени и формирует короткий фронт импульса, вторая отвечает за длинный спад импульса;
- кусочно-линейная аппроксимация: применяется модель генератора, в параметрах которого задаются длительность и наклон линейаризованных участков, время изменения наклона линейного участка.

Импульс на стороне п аппроксимируется, как импульс трапецидальной формы. Для двухстороннего детектора площади тестовых импульсов, подключаемых к сторонам детектора, должны быть равны, поскольку они определяются зарядом, выделившимся в детекторе при его ионизации.

Созданная модель детектора или модуля для анализа СЭ должна быть проверена на предмет предъявленных к ней требований. Для этого необходимо на первом этапе проверить модель в идеальных условиях. Выходной сигнал детектора — это импульс тока, поэтому следует подключить выход детектора к цепи, обеспечивающей протекание этого тока. В качестве такой цепи используется эквивалент входного

каскада СЭ. Для получения формы импульса тока детектор нагружается на виртуальный идеальный преобразователь тока в напряжение, который без искажений конвертирует импульс тока в выходной импульс напряжения.

Наиболее часто в качестве головного каскада СЭ используется зарядочувствительный усилитель (ЗЧУ). Предельно достижимые характеристики сигнала по амплитуде и времени при использовании ЗЧУ получают путем подключения виртуального идеального операционного усилителя. ЗЧУ интегрирует ток детектора, протекающий через емкость обратной связи, и время нарастания до максимума сигнала на его

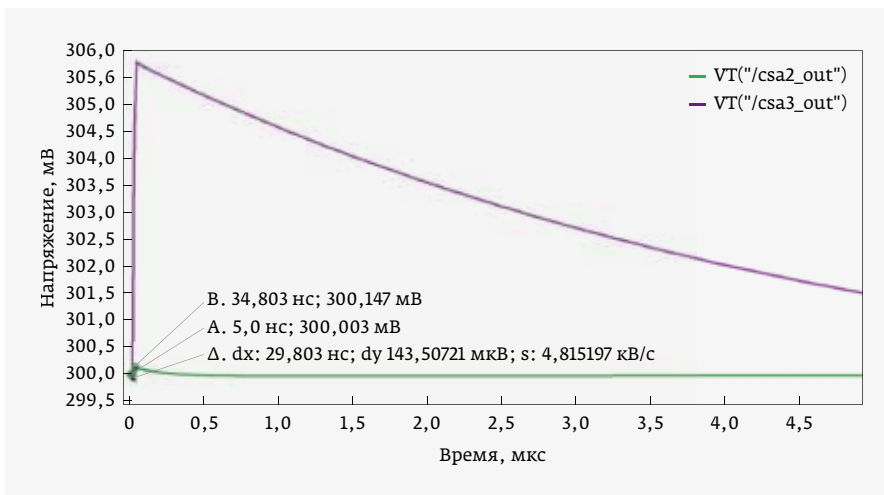


Рис. 13. Перекрестная помеха в соседних стрипах на выходе ЗЧУ

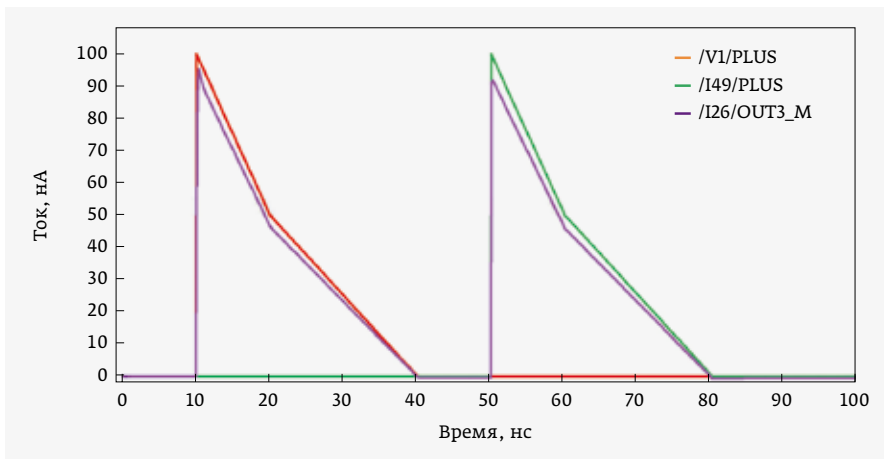


Рис. 14. Искажение формы тока при прохождении сигнала детектора на вход СЭ

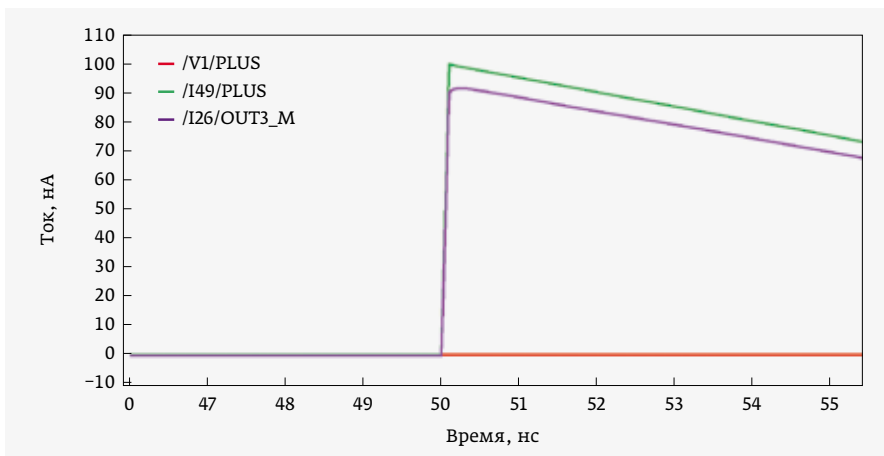


Рис. 15. Фронт импульса тока детектора при имитации частицы, прошедшей рядом со входом СЭ

выходе равно длительности импульса тока «по подошве», то есть пока протекающий через детектор ток не становится равным нулю. Это увеличивает время нарастания сигнала на выходе ЗЧУ по сравнению с импульсом на выходе преобразователя тока в напряжение. Импульс ЗЧУ характеризуется длительным спадом, который позволяет формировать и фильтровать сигналы в последующих каскадах. Когда работоспособность модели в идеальных условиях доказана (значения сигналов соответствуют ожидаемым значениям), выполняется проверка, имитирующая реальные условия работы детектора в модуле.

На втором этапе в схему вводят элементы модуля, например кабель (рис. 11), к детектору подключается схема ЗЧУ СЭ и оптимизируется модель реального ЗЧУ СЭ, то есть согласуются параметры ЗЧУ СЭ с параметрами детектора и элементами модуля. Иными словами, выполняется моделирование, максимально полно отражающее работу детектора и головного каскада СЭ. После предварительного моделирования детекторного блока можно подключать модель детекторной части к полномасштабной СЭ.

Для моделирования детекторной части автором использовалась схема, состоящая из примитивов, тестового генератора, источника смещения и нагрузки детектора, подключенных к входным каскадам СЭ – ЗЧУ и преобразователю «ток – напряжение» (рис. 12). Результаты моделирования в среде Cadence Spectre с параметрами детектора для эксперимента D0, представленные на рис. 13–17, иллюстрируют работу детектора с идеальными головными каскадами СЭ. Форма импульса тока детектора получена при помощи линейно-ломанной аппроксимации.

На рис. 13 показаны перекрестные помехи в соседних каналах, которые составляют ~3% (сигнал зеленого цвета).

Рис. 14 иллюстрирует изменение формы и амплитуды тока детектора

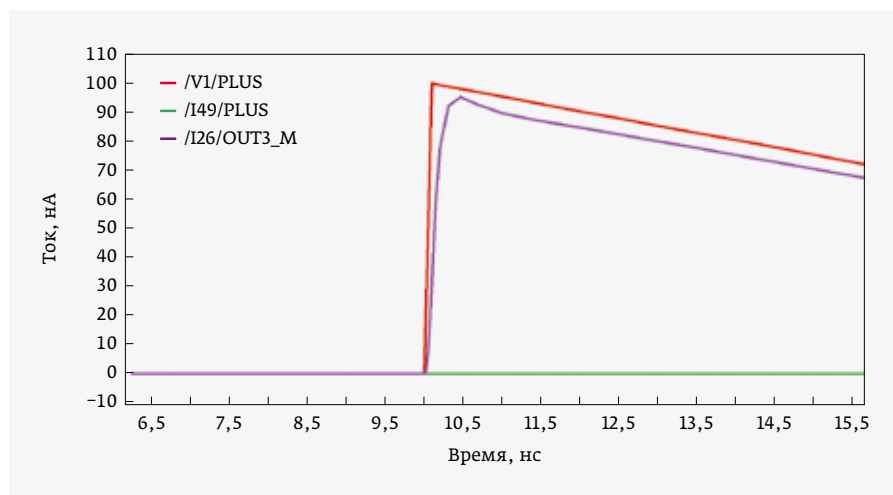


Рис. 16. Фронт импульса тока при имитации частицы, прошедшей на максимальном удалении от усилителя

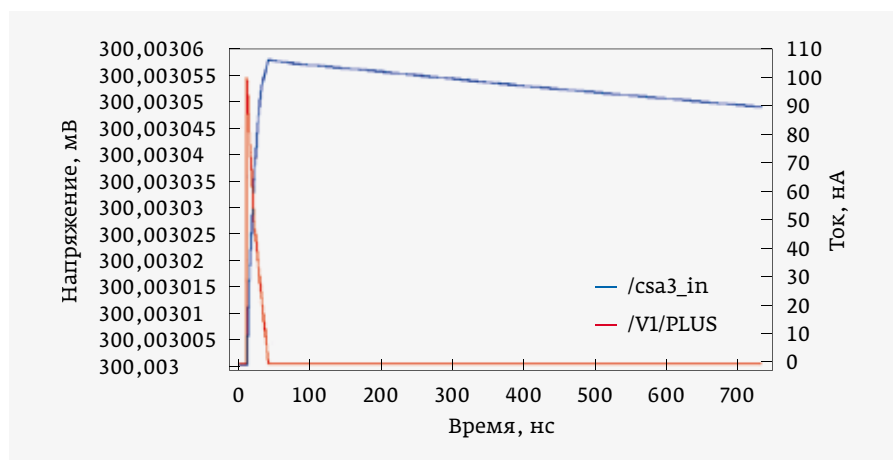


Рис. 17. Форма импульса тока и выходной сигнал ЗЧУ

при имитации попадания частицы рядом с усилителем (см. рис. 14 слева) и при максимальном удалении от него (см. рис. 14 справа). Падение амплитуды тока на 5%, возникшего рядом с усилителем, соответствует соотношению делителя, состоящего из переходной емкости C_{ac} [1] и суммарной емкости структуры детектора. Падение амплитуды сигнала, возникшего на максимальном удалении от входа СЭ, дополнительно на 5% связано с сопротивлением выходных алюминиевых линий детектора.

Влияние распределенной электрической структуры детектора в области фронта сигнала, в том числе сопротивления алюминиевых проводников, представлено на рис. 15 и 16. При попадании частицы в детектор рядом с усилителем видны только потери сигнала, при этом фронт сигнала модели генератора тока и фронт сигнала детектора совпадают. Если частица пролетает детектор на максимальном удалении от усилителя, то искажение фронта составляет 0,5 нс

(см. рис. 16). Очевидно, что для блока детекторов, состоящего из соединенных последовательно нескольких детекторов, искажения будут более существенными.

На рис. 17 показаны выходные сигналы преобразователя «ток – напряжение», ЗЧУ и увеличение времени нарастания сигнала на выходе идеального ЗЧУ (малиновый цвет) из-за процесса интегрирования импульса тока в ЗЧУ по сравнению с идеальным преобразователем «ток – напряжение».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрены особенности параметров кремниевых детекторов, размещенных в конструктиве – модуле кремниевых детекторов, которые следует принимать во внимание при моделировании СЭ. Предложена обобщенная эквивалентная схема детектора или блока детекторов с учетом дополнительных элементов, влияющих на характеристики сигналов детекторов. Представлена методика моделирования детекторов для проверки корректности применяемой эквивалентной схемы конкретного детектора. Рассмотрены формы тестовых импульсов и их аппроксимации, которые имитируют первичные сигналы, возникающие в детекторе при пролете частиц ионизирующих излучений. Приведен анализ результатов моделирования в программе SPICE (пакет Cadence Spectre) электрической схемы детекторов с идеальными головными каскадами СЭ – зарядочувствительным усилителем и преобразователем «ток – напряжение».

грамме SPICE (пакет Cadence Spectre) электрической схемы детекторов с идеальными головными каскадами СЭ – зарядочувствительным усилителем и преобразователем «ток – напряжение».

ЛИТЕРАТУРА

1. **Воронин А. Г.** Моделирование кремниевых детекторов при разработке считывающей электроники. Часть 1. // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2018. № 9. С. 114–124.
2. **Калантаров П. Л., Цейтлин Л. А.** Расчет индуктивностей. – Л.: Энергоатомиздат, 1986.
3. **Spieler H.** Semiconductor Detector Systems. – John Wiley Oxford University Press, New York U. S.A. 2005.
4. **Klingenberg R. et al.** Prediction of charge collection efficiency in hadron-irradiated pad and pixel silicon detectors. – Nuclear Instruments and Methods. 2006. V-A 568. P. 34–40.