

Моделирование кремниевых детекторов при разработке считывающей электроники

Часть 1

А. Воронин, к. ф-м. н.¹

УДК 539.1.074 | ВАК 05.27.00

Разработка считывающей электроники для детектирующих систем на основе кремниевых детекторов требует учета множества факторов, связанных с технологическими и конструктивными особенностями этих устройств. При выборе оптимального схемотехнического решения нужно принимать во внимание структуру детектора, его свойства и дефектность при изготовлении, влияние паразитных элементов, разброс параметров. В статье рассматриваются основные типы кремниевых детекторов для регистрации ионизирующих излучений и эквивалентные электрические схемы, приводятся выражения для оценки элементов схем с учетом конструктивно-технологических особенностей устройств. На основе анализа теоретических и экспериментальных данных предложена обобщенная трехмерная модель кремниевого детектора для разработки считывающей электроники, в частности специализированных интегральных микросхем (СИМС).

Кремниевый детектор представляет собой полупроводниковое устройство (аналог ионизационной камеры), которое можно рассматривать как генератор входного сигнала для считывающей электроники (СЭ) сигналов детектора. В большинстве публикаций (в частности [1, 2, 3]), связанных с проблемами моделирования кремниевых детекторов, исследуются, главным образом, параметры детектора как отдельного прибора, без учета моделирования совместно с полномасштабной СЭ. В первой части настоящей статьи рассмотрим эквивалентные электрические схемы кремниевых детекторов различной структуры, приведем выражения для оценки емкостных и резистивных элементов схем, сравним эти оценки с экспериментальными данными. Во второй части статьи представим конструктивно-технологические особенности модуля кремниевого детектора, обобщенную трехмерную модель двухстороннего стрипового АС-детектора и результаты моделирования СЭ в популярном симуляторе аналоговых схем SPICE (пакет Cadence Spectre) с использованием этой модели.

Для получения параметров эквивалентной электрической схемы детектора и ее элементов требуется

комплексный подход к анализу структуры детектора, его топологии, свойств материалов, применяемых для производства детекторов, технологии изготовления. Из всего многообразия кремниевых детекторов [4, 5] можно сформировать восемь групп, объединенных общими свойствами, и представить в виде разновидностей моделей детекторов как генераторов сигнала для СЭ. Группирование выполнено по следующим критериям:

- геометрия сегментов детектора: падовые и стриповые детекторы (рис. 1 и 2);
- стороны съема сигнала детектора: односторонние и двухсторонние детекторы (см. рис. 1 и 2);
- способ съема сигнала по постоянному (DC-детекторы) или переменному (АС-детекторы) току (см. рис. 1 и 2);
- количество слоев выходных металлизированных проводников: детекторы с одним или несколькими слоями металлизации (рис. 3).

На рис. 1 показаны структуры односторонних падового и стрипового DC-детекторов. Структуры детекторов изготавливаются на высококочистом высокоомном (4–10 кОм·см) n-кремнии. Основным элементом при регистрации излучения – p-n-переход, работающий в режиме обратного смещения, который в детекторе реализуется посредством создания области p⁺. Кроме того, область

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

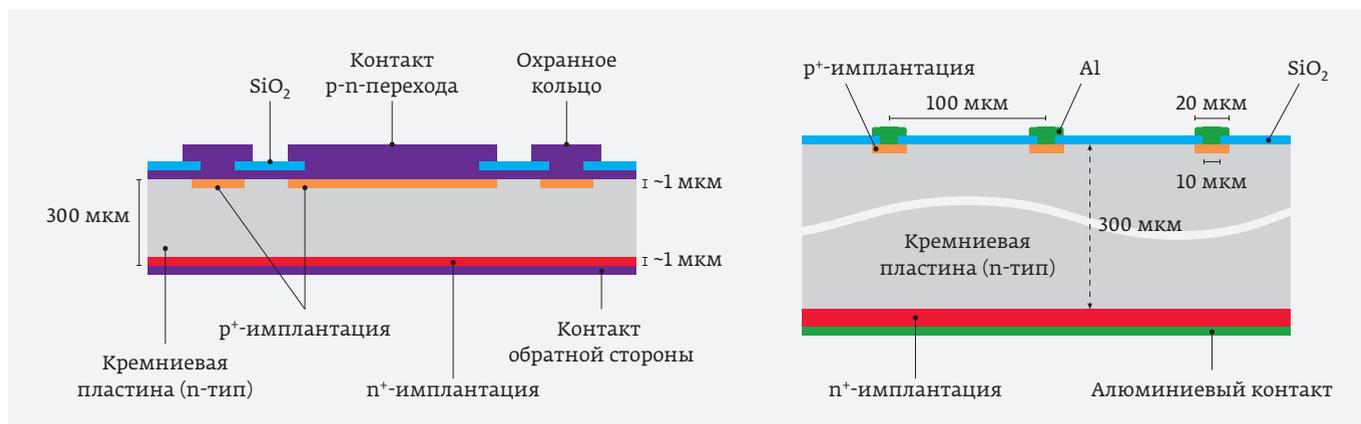


Рис. 1. Односторонний DC-детектор: падовый (слева) и стриповый (справа)

p^+ образует низкоомный контакт р-п-перехода с проводником для подключения СЭ. На противоположной (омической) стороне формируются слой n^+ и слой металлизации для подключения к СЭ. Дополнительным элементом, снижающим обратный ток детектора, служат охранные кольца (см. рис. 1).

На рис. 2 показаны структуры одностороннего и двухстороннего стриповых АС-детекторов. Область p^+ и слой металлизации разделены диэлектриком (например, окисью кремния). Таким образом, между областью p^+ и металлизацией образуется конденсатор, обеспечивающий протекание импульса тока на вход усилителя с отсутствием постоянной составляющей. Выводы детектора [6] могут подключаться к СЭ при помощи двух слоев металлических проводников (см. рис. 3).

Эквивалентная схема кремниевого детектора [4], за исключением краев или дефектных зон, представляет собой регулярную структуру (рис. 4). В схему могут входить следующие элементы: конденсаторы, резисторы, индуктивности, полупроводниковые диоды. Очевидно, что для

различных видов кремниевых детекторов и технологии их изготовления должны использоваться разные эквивалентные схемы и значения элементов.

Технология производства детекторов определяет их электрические свойства (характеристики слоев изоляции, пассивации, р-п-переходов и т. д.). Например, в конденсаторах электрическое поле распространяется в кремнии, оно также может распространяться в воздухе и слое пассивации. В этом случае необходимо разделить конденсатор на составляющие или использовать эквивалентную диэлектрическую проницаемость, отличную от диэлектрической проницаемости кремния.

Возможные способы получения параметров эквивалентной электрической схемы детектора:

- экспериментальные измерения [1];
- аналитические выражения, в частности [7];
- программы приборно-технологического моделирования (например, TCAD);
- сведения, передаваемые производителем;
- сочетание перечисленных способов.

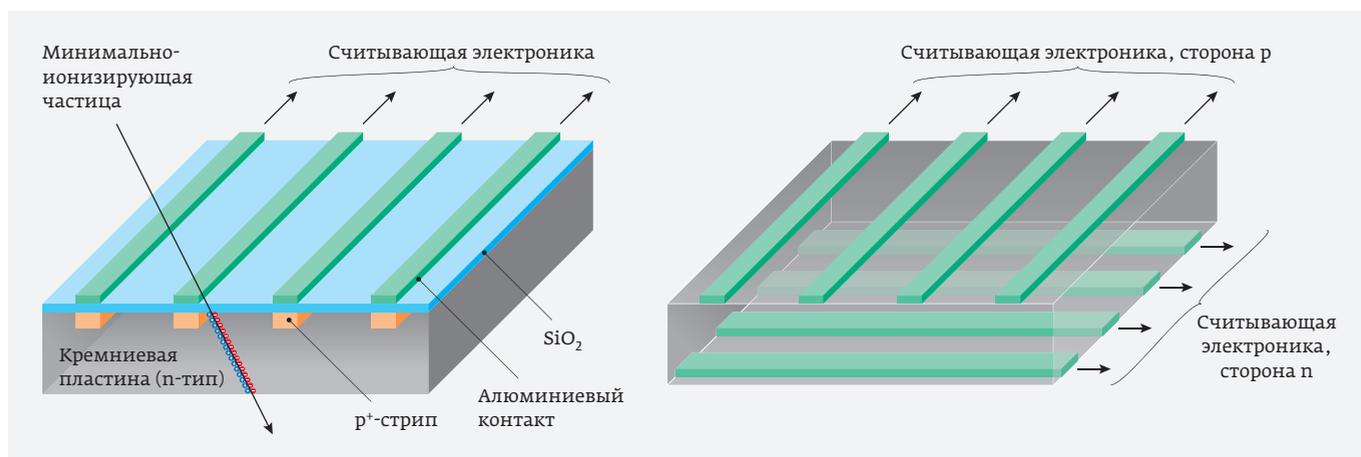


Рис. 2. Стриповый АС-детектор: односторонний (слева) и двухсторонний (справа)

Моделирование детекторов с дефектами, которые учитываются в эквивалентной схеме, позволяет выявлять эффекты, возникающие в СЭ из-за этих дефектов. Можно смоделировать разрывы металлизации проводника, повышенный обратный ток в отдельных полосках, разбросы параметров стрипов, возникающие из-за технологических особенностей процесса изготовления (искажения геометрии элементов и разбросы параметров в слоях). Возможно также моделирование облученного детектора на основе измеренных характеристик либо с использованием соответствующих библиотек.

Эквивалентная схема конкретного детектора создается на основе анализа полупроводниковой структуры детектора и ее электрических эквивалентов. Ключевое влияние на свойства детекторов и, как следствие, на сигналы, поступающие на СЭ, оказывают емкостные составляющие. В детекторах главную роль играют следующие емкости: емкость на обратную сторону C_b и суммарная межстриповая емкость $C_{is\sigma}$ (межсегментная – для падовых детекторов) [5] (см. рис. 4). Стриповая емкость и емкость на обратную сторону позволяют оценивать уровень шума, определять амплитуды и потери сигналов, приведенные к входам СЭ, а также оценивать форму сигнала во входных каскадах СЭ. Емкости C_b , $C_{is\sigma}$ и переходная емкость C_{ac} от детектора к входу СЭ считаются базовыми при измерениях качества детекторов [8].

Детектор для целей разработки СЭ может быть представлен в виде моделей двух видов: упрощенной – емкости для одного канала или более точной трехмерной распределенной структуры – для нескольких каналов. Соответственно, моделирование кремниевого детектора может выполняться также двумя способами:

- упрощенное моделирование схемы на сосредоточенных

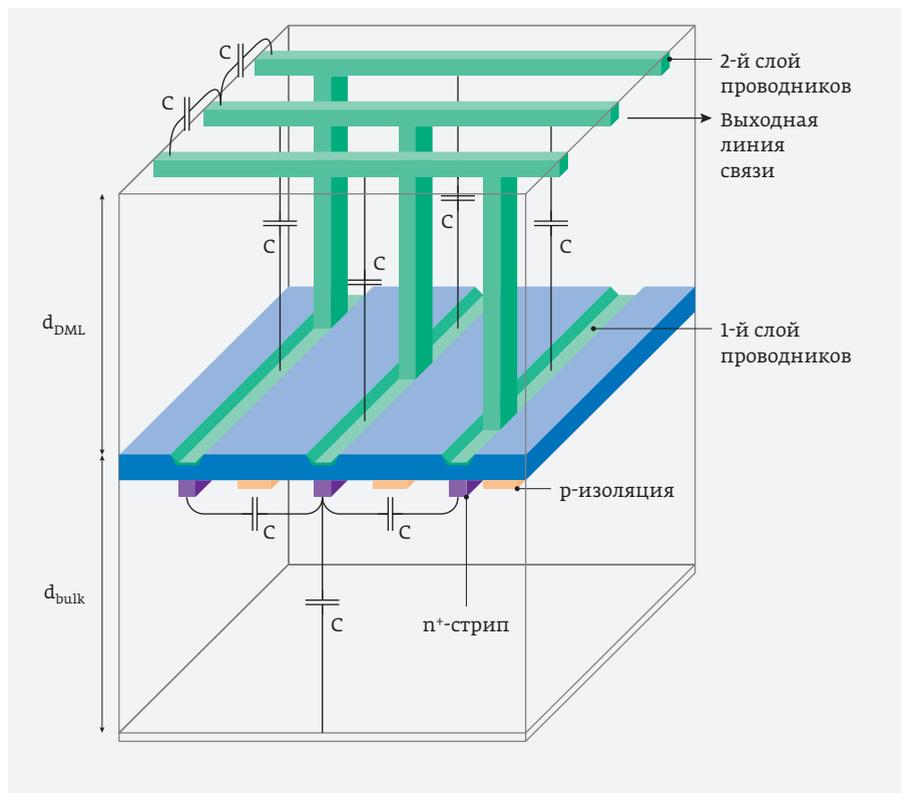


Рис. 3. Двухслойные металлизированные проводники на кремниевом детекторе

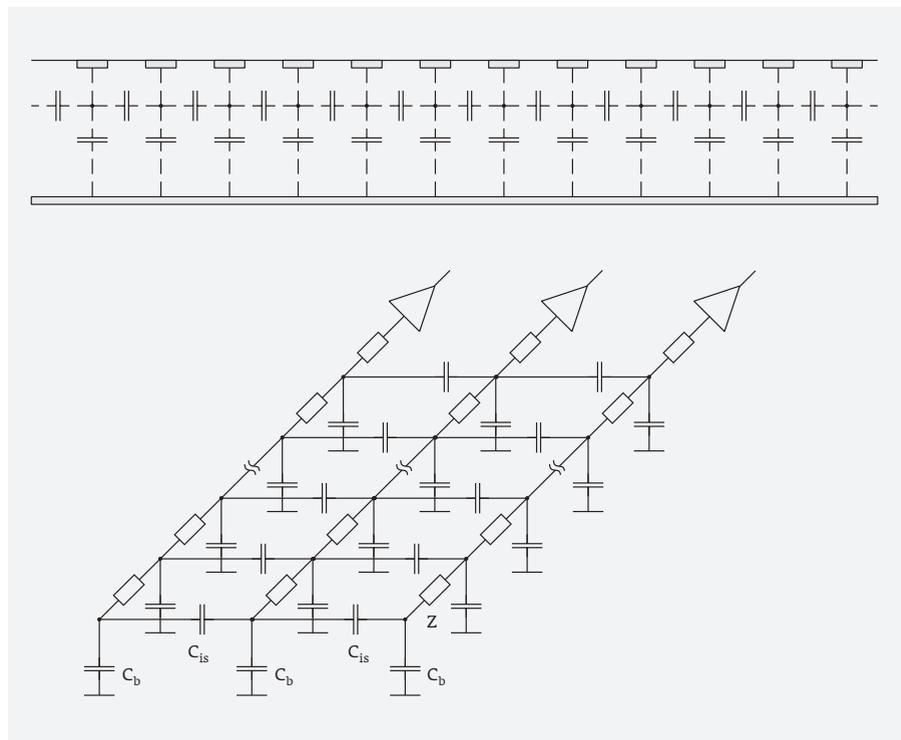


Рис. 4. Примеры эквивалентной схемы кремниевого детектора

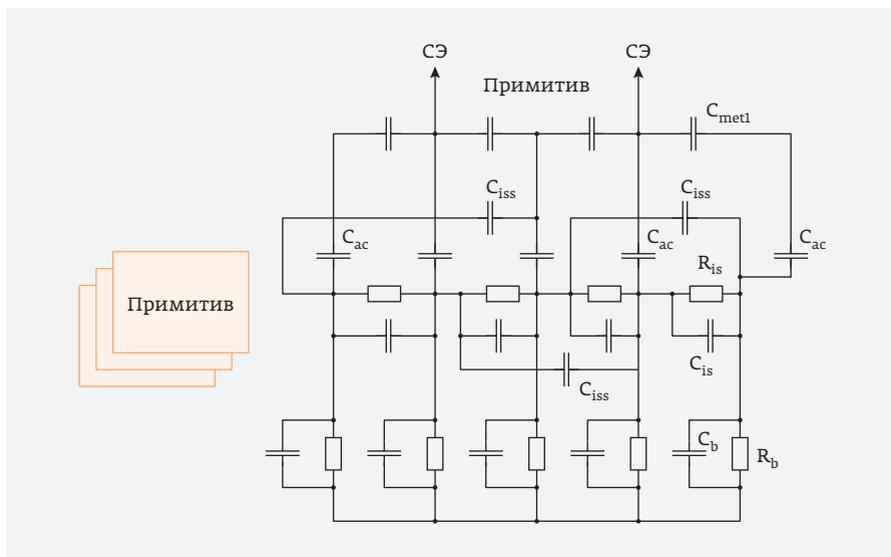


Рис. 5. Вид поперечного примитива модели одностороннего детектора

элементах в одно- или двумерном измерениях для нескольких каналов (см. рис. 4);

- трехмерное моделирование схемы (см. рис. 4). Для такого моделирования необходимо разделить схему структуры детектора на части – примитивы. Например, на рис. 4 примитивом является

элементах в одно- или двумерном измерениях для нескольких каналов (см. рис. 4);

С учетом данных на рис. 5 и 6 выделим две группы элементов схемы:

одна плоскость, содержащая емкости C_b и C_{is} . Такое деление, необходимое для обеспечения сходимости при вычислении параметров модели с помощью программы, учета свойств распределенных элементов, позволяет моделировать воздействие излучения на детектор в пространстве. Второй примитив схемы содержит элементы, соединяющие первые примитивы между собой (Z на рис. 4). Если в детекторе имеются сосредоточенные элементы, то они добавляются в схему, например сопротивление нагрузки на входе СЭ.

Трехмерную резистивно-емкостную (RC) модель одностороннего стрипового детектора из [9] можно представить в двух перпендикулярных плоскостях отдельными рисунками, добавив составляющие межстриповой емкости C_{iss} «через стрип», не учтенные в [9], получить схемы детектора, как показано на рис. 5 и 6.

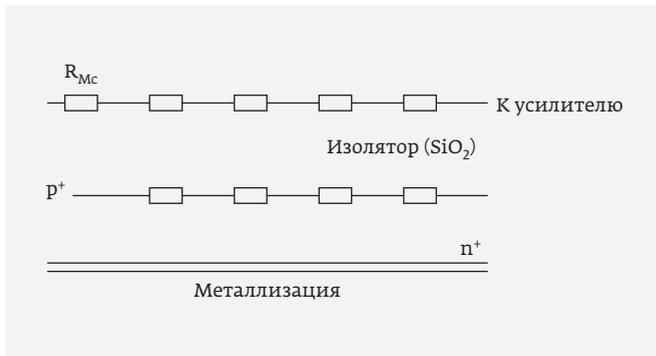


Рис. 6. Вид продольного примитива модели одностороннего детектора

- первая содержит элементы в объеме кремния, образованные сегментами обеих сторон детектора – R_b и C_b ;
- вторая группа содержит расположенные на поверхности пластины кремния планарные элементы, которые образуют достаточно сложную электрическую структуру: C_{is} – межстриповая емкость соседних стрипов, C_{iss} – межстриповая емкость «через стрип», C_{metl} – емкость между проводниками на поверхности детектора, C_{ac} – переходная емкость для подключения к СЭ, R_{is} – межстриповое сопротивление, R_b – сопротивление толщины обедненного кремния при поданном обратном смещении на детектор, слой p^+ , имеющий сопротивление R_{p^+} , слой металлизации и слой n^+ .

Для моделирования схемы слой металлизации и слой n^+ считают общим проводом, их сопротивление приравнивается к нулю (см. рис. 4, 5, 6). Два способа моделирования предполагают различные величины элементов: при моделировании на сосредоточенных элементах требуется знание суммарных эквивалентных значений величин элементов; при моделировании трехмерных моделей необходимо выделить составляющие элементов схемы и их величины.

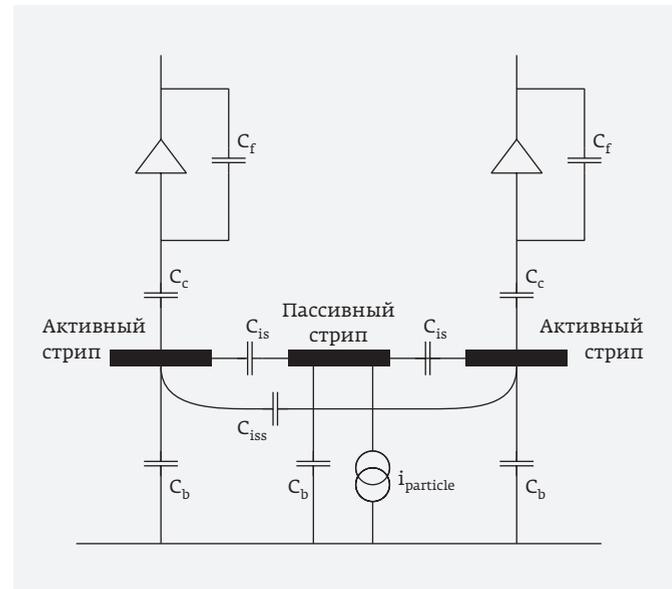


Рис. 7. Схема с емкостным делением заряда (ЕДЗ)

Во многих случаях для параметров детектора характерна квазилинейная зависимость по одной из координат, в частности по длине детектора. В случае линейной аппроксимации удобно пользоваться удельными величинами параметров, которым присвоим индекс «0». Линейная аппроксимация величин параметров выглядит следующим образом:

$$C = A + B(w, p, d) + \Sigma\delta, \quad (1)$$

где w, p, d – параметры, характеризующие геометрию элементов, $\Sigma\delta$ – ошибка аппроксимации, в которую входят ошибка линеаризации, ошибки, связанные с конструкцией и технологией изготовления детектора (разбросы параметров при изготовлении).

Схема RC-модели второй стороны (n-стороны) [2] двухстороннего детектора практически совпадает со схемой одностороннего детектора и может отличаться, в основном, величинами элементов. Для элементов n-стороны используем индекс n.

Полные емкости эквивалентной схемы кремниевого детектора можно выразить через их составляющие. Полная емкость сегмента одностороннего (C_d) либо двухстороннего (C_{dn}) детектора (используется как модель сегмента (стрипа) в виде сосредоточенного конденсатора) может быть выражена как сумма трех основных составляющих:

$$C_d = C_b + 2C_{is\Sigma} + C_{coup}; \quad C_{dn} = C_{bn} + 2C_{is\Sigma n} + C_{coup}, \quad (2)$$

где C_b, C_{bn} – емкость между сегментами на двух сторонах детектора; $C_{is\Sigma}, C_{is\Sigma n}$ – суммарные межсегментные

емкости для каждой стороны, C_{coup} – емкость подключения «детектор-СЭ».

Рассмотрим подробнее элементы выражения (2).

ЕМКОСТИ C_b , C_{bn} , ОБРАЗОВАННЫЕ В ОБЪЕМЕ КРЕМНИЯ МЕЖДУ СТОРОНАМИ ДЕТЕКТОРА

Для емкостей, образованных в объеме кремния между сторонами детектора (body capacitance) C_b , C_{bn} , характерна зависимость от напряжения смещения детектора. Детектор, как правило, работает в режиме полного обеднения, которое определяется с помощью вольт-фарадной характеристики. При увеличении смещения выше напряжения полного обеднения величины емкостей C_b , C_{bn} остаются постоянными [5] и равными емкостям в точке полного обеднения.

Для падового и стрипового детекторов оценка емкости C_b и удельной емкости C_{b0} (типичное значение $C_{b0}=0,1$ пФ/см) сегмента в рабочем режиме (формула для плоского конденсатора) [5]:

$$C_b = \epsilon \frac{S}{d}; \quad C_{b0} = \epsilon \frac{p}{d}, \quad (3)$$

где ϵ – диэлектрическая проницаемость кремния ($\epsilon_0=8,8510^{-2}$ [пФ/см]), S – площадь сегмента, p – шаг сегментов, d – толщина пластины кремния.

Оценка емкостей C_{bn} и C_{bn0} для n-стороны двухстороннего детектора при шагах p и p_n (p_n – шаг стрипов на стороне n):

$$C_{bn} = \epsilon \frac{S}{d}; \quad C_{bn0} = \epsilon \frac{p_n}{d}. \quad (4)$$

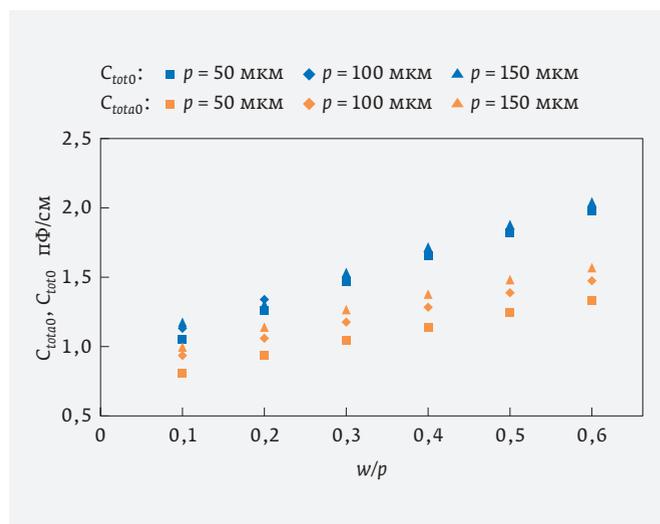


Рис. 8. Удельные емкости C_{tot0} и C_{tot} обычного подключения детектора и подключения ЕДЗ-детектора

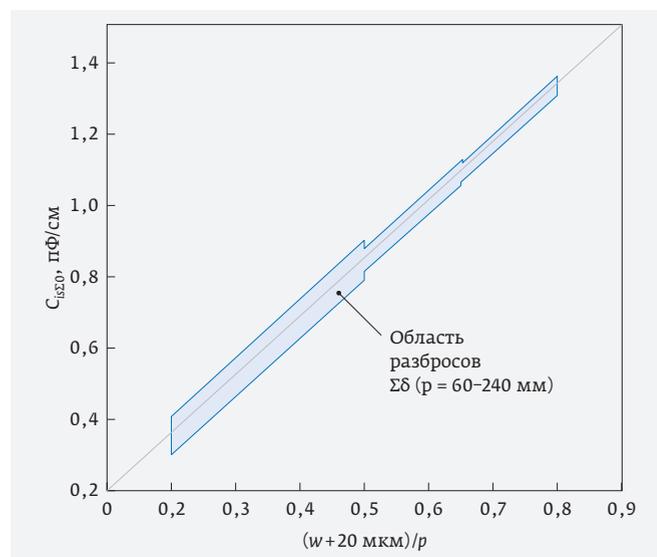


Рис. 9. Общая межстриповая емкость C_{iss}

ЕМКОСТЬ C_{tot} И МЕЖСЕГМЕНТНЫЕ СОСТАВЛЯЮЩИЕ C_{ist} , C_{is} И C_{iss} НА p-СТОРОНЕ ДЕТЕКТОРА

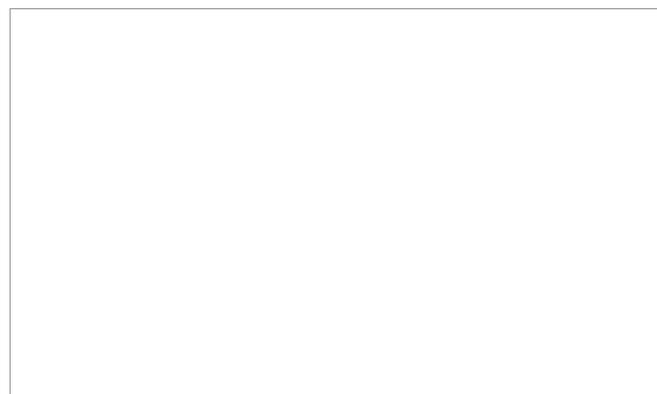
Для емкостных составляющих, образованных внутри пластины кремния, выражение (2) будет иметь вид:

$$C_d = C_{tot} = C_b + 2C_{is} + 2C_{iss}; \quad C_{dn} = C_{totn} = C_{bn} + 2C_{isn} + 2C_{issn}. \quad (5)$$

Для стороны p линейная аппроксимация удельной суммарной емкости C_{tot0} , с учетом четырех соседних (по два справа и слева) стрипов с удельными емкостями C_{is0} , C_{iss0} и C_{b0} в кремнии (без учета металлизации), равна [7]:

$$C_{tot0} = 2C_{is0} + 2C_{iss0} + C_{b0} = 0,971 \pm 0,027 + (1,731 \pm 0,075)w/p \approx 2C_{is0} + 2C_{iss0} + \epsilon p/d \text{ [пФ/см]}, \quad (6)$$

где C_{is0} – удельная емкость между основным и первым соседним стрипом, C_{iss0} – удельная емкость «через стрип», w – ширина имплантации, p – шаг стрипов.



В [7] показано, что ошибка оценки $\Sigma\delta$ достигает $\pm 15\%$.

Оценка удельной емкости C_{iso} между соседними стрипами с использованием результатов измерений (типичное значение $C_{iso} = 1$ пФ/см):

$$C_{iso} = 0,23 \pm 0,03 + 0,87 \pm 0,02 w/p \text{ [пФ/см]}. \quad (7)$$

Емкость C_{iso} может быть получена также из формулы (6):

$$C_{iso} = (C_{tot0} - 2C_{tot0} - C_{bo}) / 2. \quad (8)$$

Емкость C_{isso} для стороны p^+ и r до 60 мкм:

$$C_{isso} = 0,162 - 0,0027p \text{ [пФ/см]}. \quad (9)$$

Полная межстриповая емкость, удельная емкость C_{isto} в кремнии подразумевает учет емкостей всех стрипов на детекторе. В [7] показано, что при моделировании детектора емкости «через три» и более стрипов не вносят вклад в оценку C_{isto} : $C_{isto} \approx C_{iso} + C_{isso}$.

ЕМКОСТИ C_{tot0} , C_{da} НА p -СТОРОНЕ ДЕТЕКТОРА

Подключение стрипового детектора по схеме с емкостным делением заряда (ЕДЗ) показано на рис. 7 [10]. Основное ее преимущество – уменьшение каналов СЭ при сохранении шага стрипов p . Схема такого типа использовалась в эксперименте D0 [5].

Емкость C_{tot0} , отражающая суммарную емкость стрипа с учетом емкости C_{iss} , подключенной к неактивному стрипу (с учетом C_b), равна:

$$C_{tot0} = C_b + 2[C_{iss} + C_{is}(C_b + C_{is} + C_{iss}) / (2C_{is} + C_{iss} + C_b)]. \quad (10)$$

Сравним выражения для удельных емкостей C_{tot0} и C_{tot0} (рис. 8) для обычной схемы подключения всех стрипов детектора к СЭ (6):

$$C_{tot0} = 2C_{iso} + 2C_{isso} + C_{bo};$$

$$C_{tot0} \approx C_{bo} + 2[C_{isso} + C_{is}(C_{bo} + C_{is}) / (2C_{is} + C_{bo})]. \quad (11)$$

На рис. 8 [7] показано, что емкость детектора, включенного по схеме ЕДЗ, меньше емкости при обычном подключении детектора, что снижает шум в канале СЭ.

Полная емкость C_{da} , подключенная к активному стрипу с учетом (2) и использованием (10, 11) для расчета $C_{is\Sigma}$:

$$C_{da} = C_b + 2C_{is\Sigma} + C_{coup}. \quad (12)$$

ЕМКОСТИ C_{met1} И C_{ac} , ОБРАЗОВАННЫЕ ОДНОСЛОЙНОЙ МЕТАЛЛИЗАЦИЕЙ НА p -СТОРОНЕ ДЕТЕКТОРА

Емкость C_{met1} образуется между соседними проводниками на поверхности пластины, которые являются выходами сегментов детектора. Электрическое поле в области C_{met1} распространяется в воздухе и пассивации SiO_2 , а в области C_{is} – в кремнии и диэлектрике SiO_2 (для DC-детектора емкости C_{ac} отсутствуют).

Оценка C_{met10} может быть получена с использованием отношения диэлектрических проницаемостей материалов:

$$C_{met10} \approx C_{iso} \epsilon_1 / \epsilon_2 = 0,31 C_{iso} \text{ [пФ/см]}, \quad (13)$$

где $\epsilon_1 = 0,5(\epsilon_{SiO_2} + \epsilon_{воз}) = 2,45$; $\epsilon_2 = 0,5(\epsilon_{SiO_2} + \epsilon_c) = 7,8$; $\epsilon_1 / \epsilon_2 = 0,31$.

Удельная переходная емкость C_{aco} [7] в AC-детекторе равна:

$$C_{aco} \approx \epsilon_0 \epsilon_i w/t, \text{ [пФ/см]}, \quad (14)$$

где ϵ_i , t – относительная диэлектрическая постоянная изолятора и его толщина.

МЕЖСТРИПОВАЯ ЕМКОСТЬ $C_{is\Sigma}$ И ЕЕ СОСТАВЛЯЮЩИЕ НА p -СТОРОНЕ ДЕТЕКТОРА, ЕМКОСТЬ C_{MI}

Суммарная межстриповая емкость сегмента (стрипа) стороны p^+ – $C_{is\Sigma}$ – состоит из C_{iso} (7, 8), C_{isso} (9), C_{met10} (12); кроме того, иногда учитывают перекрестную емкость C_{MI} , образованную выходным проводником и областью p^+ между соседними стрипами:

$$C_{is\Sigma} \approx 2C_{is} + 2C_{iss} + 2C_{met1} + 2C_{MI}. \quad (15)$$

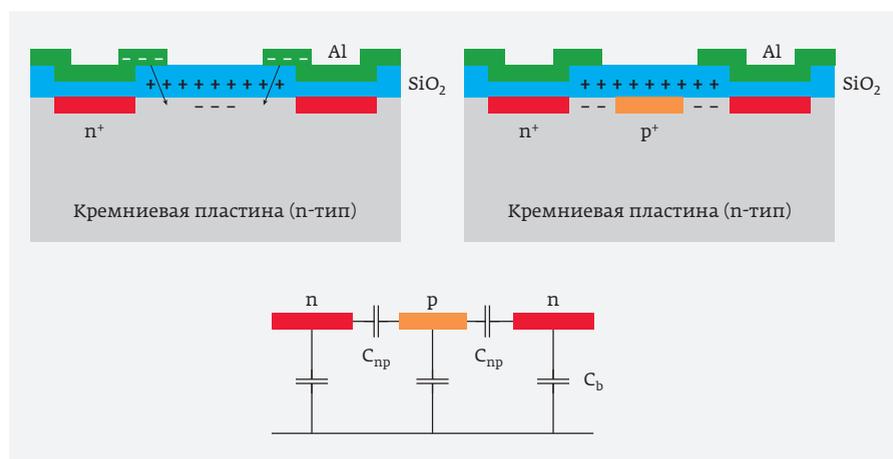


Рис. 10. Изоляция p^+ -стрипов, структура и межстриповые емкости на стороне n

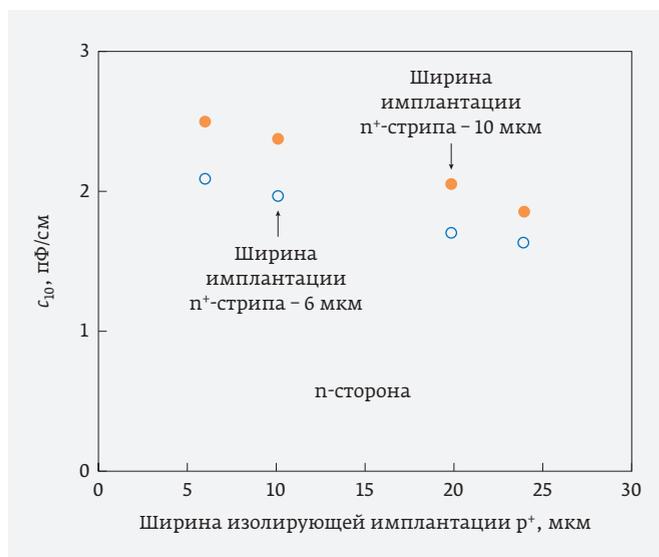


Рис. 11. Экспериментальная зависимость C_{10} от ширины p^+ -изоляции

Для стрипового детектора оценка $C_{is\Sigma 0}$ для AC- и DC-детекторов в диапазоне $p=60-240$ мкм равна [4]:

$$C_{is\Sigma 0} = 0,03 + 1,62(w + 20 \text{ мкм}) / p \text{ [пФ / см]}. \quad (16)$$

Зависимость $C_{is\Sigma 0}(w/p)$ показана на рис. 9.

С использованием [11] зависимость $C_{MIO}(w_{over})$, где w_{over} – перекрытие ширины проводника и области p^+ , выглядит следующим образом:

- на участке $w_{over} = 0-5$ мкм:

$$C_{MIO} \approx 0,03 + 0,006w, \text{ [пФ / см]}, \quad (17)$$

- для $w_{over} = 5-30$ мкм:

$$C_{MIO} \approx 0,06 \text{ [пФ / см]}. \quad (18)$$

ЕМКОСТИ n-СТОРОНЫ С ОДНИМ СЛОЕМ МЕТАЛЛИЗАЦИИ

На n -стороне двухстороннего стрипового детектора отсутствует p - n -переход и вводится изоляция p^+ -стрипов друг от друга. Изоляция может осуществляться двумя основными способами: заграждающим полем или введением p^+ -имплантации (рис. 10).

Вид эквивалентной схемы n -стороны RC-модели детектора практически не отличается от схемы p -стороны (см. рис. 5). Величины

элементов схемы n -стороны могут отличаться от значений на p -стороне для аналогичных элементов: C_{b0} , C_{isn} , C_{issn} , C_{acn} , C_{metln} , C_{totn} , C_{istn} , $C_{is\Sigma n}$ (индекс n обозначает принадлежность элемента к стороне n), которые могут быть получены с использованием эмпирических формул для стороны p .

Удельная суммарная емкость C_{totn} в кремнии равна:

$$C_{totn0} = 2C_{isn0} + 2C_{issn0} + C_{bn0}. \quad (19)$$

Суммарная межстриповая емкость C_{istn} определяется следующим образом:

$$C_{istn} = C_{isn} + C_{issn}, \quad (20)$$

где C_{isn} и C_{issn} – межстриповые емкости на стороне n детектора (в кремнии).

Полная емкость C_l , подключенная к одному сегменту детектора с учетом C_{bn} (4), а также C_{metln} :

$$C_l = C_{bn} + 2C_{is\Sigma n} = C_{bn} + 2C_{isn} + 2C_{issn} + 2C_{metln}. \quad (21)$$

При этом удельная емкость C_{10} равна [12] (экспериментальные данные приведены на рис. 11):

$$C_{10} = (\epsilon_{eq} / 7,9)(0,94 + 1,62w_{p-wp^+} / p)k, \quad (22)$$

где: $\epsilon_{eq} = 7,89$ (Si-SiO₂), 6,5 (Si-воздух), 2,2 (воздух-полиимид), 2,45 (воздух-SiO₂); $w_{p-wp^+} = p - wp^+$ или $w = w_{metl}$ для изоляции p^+ -стрипов полем; k – коэффициент, учитывающий влияние ширины имплантации p^+ при расчете C_{10} (22).

Удельная межстриповая емкость $C_{is\Sigma n0}$ из (21) равна:

$$C_{is\Sigma n0} = (C_{10} - C_{bn0}) / 2 = C_{isn0} + C_{issn0} + C_{metln0}. \quad (23)$$

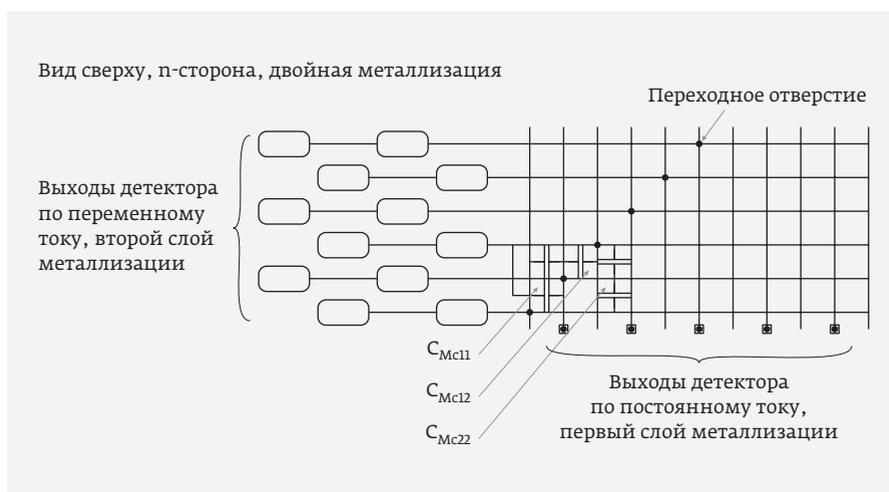


Рис. 12. Емкости двойной металлизации

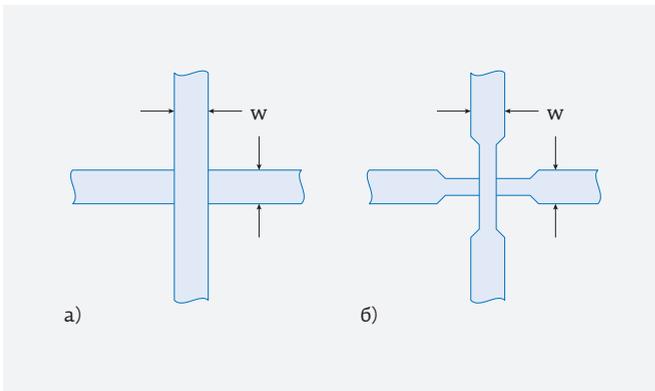


Рис. 13. Пересечение двух проводников на поверхности детектора

Для определения составляющих C_{isn0} , C_{issn0} , C_{metIn0} применим соотношения для р-стороны (9, 13) и получим оценки составляющих межстриповых емкостей C_{isn0} , C_{issn0} , C_{metIn0} для п-стороны ($C_{metI0} \approx 0,1-0,3$ пФ/см, C_{isn0} , $C_{issn0} \approx 0,1-0,2$ пФ/см).

Переходная емкость C_{acn0} между имплантацией p^+ и выходным проводником п-стороны рассчитывается аналогично (14):

$$C_{acn0} \approx \epsilon_0 \epsilon_i w_{p^+} / t, \text{ [пФ/см]}, \quad (24)$$

где ϵ_i , t – относительная диэлектрическая постоянная изолятора и его толщина на п-стороне.

Соответствие вычислений параметров по приведенным выражениям было проверено путем их сравнения с измеренными значениями для стрипового АС-детектора эксперимента D0 [5, 8].

ЕМКОСТИ ДВУХСЛОЙНОЙ МЕТАЛЛИЗАЦИИ

C_{MC11} , C_{MC22} , C_{MC12} , C_{MC21}

Детектор с двумя слоями металлизации можно рассматривать как единую структуру, содержащую элементы собственно детектора и элементы выходных линий [14, 16]. Формула (22), определяющая полную емкость стрипа, может быть использована для вычисления емкостей детектора со вторым слоем металлизации (на п-стороне) путем выбора правильного значения ϵ_{eq} . Это применимо для модели детектора со сосредоточенными элементами.

На рис. 12 показаны емкости линий первого и второго слоев металлизации.

Использование второго слоя металлизации определяется конструкцией кремниевой системы, при этом варианты топологии структуры металлизации могут быть весьма разнообразными. Можно рассматривать структуру выходных проводников второго слоя отдельно, то есть по схеме «детектор с одним слоем металлизации + второй слой металлизации». Аналитические выражения,

описывающие систему проводников на подложке кремния, включают в себя емкостные, резистивные и индуктивные составляющие и определяются топологией проводников.

Для моделирования выходных линий детектора целесообразно применять модели TLine-соединений, представленные в библиотеках SPICE (Spectre), поскольку модели СЭ (СИМС) также создаются в среде SPICE. Таким образом модели детектора и СЭ совместимы.

Можно выделить (см. рис. 12) три составляющие емкости между проводниками для двухслойной металлизации:

- C_{Mc11} – емкость между линиями передачи первого слоя металлизации (обобщенное обозначение C_{met1} и C_{met1n});
- C_{Mc22} – емкость между линиями передачи второго слоя (C_{Mc22} или C_{Mc22n});
- C_{Mc12} – емкости между первым и вторым слоями (C_{Mc12} или C_{Mc12n}).

Для оценки C_{Mc11} и C_{Mc22} применим известное из курса микроэлектроники выражение C_{Mc} для емкости между двумя проводниками прямоугольного сечения, расположенными на подложке из кремния (для $\epsilon_0 = 8,8510^{-2}$ пФ/см):

$$C_{Mc0} = 0,12 \epsilon / \lg(2a / (2w_{met} + t)), \text{ [пФ/см]}, \quad (25)$$

где a – расстояние между линиями, w_{met} – ширина проводника, l – длина проводника, t – толщина диэлектрика.

Для емкости одного пересечения между слоями металлизации C_{Mc210} используется формула плоского конденсатора (рис. 13а):

$$C_{Mc210} = \epsilon_0 \epsilon w_{met}^2 / t. \quad (26)$$

Емкости пересечения между слоями металлизации C_{Mc21} могут быть более узкими в зоне пересечения для уменьшения емкости перекрытия (рис. 13б). Полная емкость C_{Mc21} , подключенная к стрипу и общему проводу, равна емкости C_{Mc210} , умноженной на количество пересечений. Если ширина проводников в двух слоях не одинакова, то в (26) площадь квадрата w_{met}^2 изменяем на площадь прямоугольника $w_{met1} \cdot w_{met2}$.

РЕЗИСТИВНЫЕ СОСТАВЛЯЮЩИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СХЕМ

Для большей части резистивных составляющих кремниевое детектора характерно высокое сопротивление в режиме полного обеднения [5], поэтому они вносят относительно малый вклад в результаты моделирования. Однако исключение резисторов может снизить точность или повлиять на сходимость при моделировании.

Межстриповое сопротивление R_s между соседними стрипами для стороны p^+ может иметь значение

от нескольких МОм до ТОм. Межстриповое сопротивление R_{isr} для стороны n^+ составляет от 2 МОм до 20 ГОм [13].

При разделении схемы на примитивы для каждого из них используются значения резисторов, полученные путем умножения на количество примитивов величин сопротивлений R_{is} или R_{isr} , измеренных или полученных от производителя или из литературных источников [1, 2, 3, 13].

Сопротивления выходного проводника R_{Mc} , R_{Mcn} для сторон p^+ и n^+ равны:

$$R_{\text{Mc}}, R_{\text{Mcn}} = \rho_{\text{met}}(w_{\text{met}}, t) \cdot l_{\text{met}}, [\text{Ом}], \quad (27)$$

где $\rho_{\text{met}}(w_{\text{met}}, t)$ – линейное удельное сопротивление проводника шириной w_{met} , толщиной t и площадью $w_{\text{met}} \cdot t$; l_{met} – длина проводника.

Сопротивление имплантации стрипов $R_{\text{p+}}$ на p -стороне и $R_{\text{n+}}$ на n -стороне рассчитывается аналогично R_{Mc} , R_{Mcn} .

Эквивалентное сопротивление между сегментами на двух сторонах детектора R_{b} , R_{bn} для сторон p и n при полном обеднении детектора сравнимо с хорошим диэлектриком [5]. Если учитывать ток утечки p - n -перехода сегмента I_l на уровне, например 1 нА, тогда эффективные сопротивления R_{b} , R_{bn} определяются как I_l / U_{bias} (U_{bias} – напряжение смещения сегмента детектора) и будут составлять несколько ГОм. При разделении схемы на примитивы для каждого из них используется величина, полученная путем умножения значений сопротивлений R_{b} , R_{bn} на количество примитивов.

* * *

Приведенные в статье выражения для емкостных и резистивных составляющих элементов эквивалентных электрических схем позволяют оценить параметры модели кремниевых детекторов различных структур. Сравнение оценок параметров модели с экспериментальными данными, полученными путем тестирования изготовленных образцов кремниевых детекторов, подтвердили

точность этих выражений. Во второй части статьи рассмотрим обобщенную трехмерную модель двухстороннего стрипового АС-детектора с двойной металлизацией, особенности ее применения с учетом конструктивно-технологических параметров модуля кремниевых детекторов, а также результаты моделирования канала СЭ в программе SPICE (Spectre) с использованием этой модели.

Автор выражает особую признательность за помощь в написании статьи д. ф-м. н. М. М. Меркину.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Bacchetta N., Bisello D. et al.** SPICE analysis of signal propagation in Si microstrip detectors. – IEEE Transaction on Nuclear Science. 1995. Vol. 42. P. 459–466.
2. **Bacchetta N., Bisello D. et al.** A SPICE model of the ohmic side of double-sided Si microstrip detectors. – IEEE Transaction on Nuclear Science. 1997. Vol. 44. P. 728–735.
3. **Barberis E., Cartiglia N., LeVier C. et al.** Capacitances in silicon microstrip detectors. – Nuclear Instruments and Methods. 1994. Vol. A 342. P. 90–95.
4. **Spieler H.** Semiconductor Detector Systems. – John Wiley Oxford University Press, New York U. S. A., 2005.
5. **Меркин М. М.** Разработка, создание и применение кремниевых детекторов в физике высоких энергий и физике космических лучей. – Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. – НИИЯФ МГУ, 2012.
6. **Miyata H., Aso T., Sakurakichi K. et al.** Load capacitance of single-sided silicon strip detectors with double-metal layers. – Nuclear Instruments and Methods. 1996. Vol. A383. P. 110–115.
7. **Bacchetta N., Bisello D. et al.** SPICE evaluation of the S/N ratio for Si microstrip detectors. – IEEE Transaction on Nuclear Science. 1997. Vol. 46. P. 1261–1273.
8. **Еромолов П. Ф., Воронин А. Г., Зверев Е. Г., Карманов Д. Е. и др.** Методика массового тестирования односторонних микростриповых детекторов // Приборы и техника эксперимента. 2002. № 2. С. 54–67.
9. **Воронин А. Г., Меркин М. М., Силаев А. С.** Spice модель кремниевого микрополоскового детектора. – Научная сессия МИФИ. 2010. Сборник научных трудов. 2010. Т. 1. С. 157–158.
10. **Krammer M., Pemegger H.** Signal collection and position reconstruction of silicon strip detectors with 200 μm readout pitch. – Nuclear Instruments and Methods. 1997. Vol. A 397. P. 232–242.
11. **Passeri D. et al.** Analysis and test of overhanging-metal microstrip detectors. – IEEE Nuclear Science Symposium. 2000 Conference Record. Vol. 1. P. 3/28–3/30.
12. **Husson D.** Capacitance Modelling for Double-sided Si detectors with Double-Metal Readout. – IEEE Transaction on Nuclear Science. 1994. Vol. 41. P. 811–816.
13. **Seidel S. C., Bruner N. L., Frautschi M. A., Hoeferkamp M. R., Patton A.** Studies of double-sided silicon microstrip detectors. – Nuclear Instruments and Methods. 1996. Vol. A 383. P. 128–136.