ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА, 2023, № 1, с. 41–55

ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 53.082

ПРИМЕНЕНИЕ СХЕМЫ ЕМКОСТНОГО ДЕЛЕНИЯ СИГНАЛА ДЛЯ УМЕНЬШЕНИЯ ЧИСЛА КАНАЛОВ СЧИТЫВАНИЯ МНОГОКАНАЛЬНЫХ КРЕМНИЕВЫХ ДЕТЕКТОРОВ С *p–n*-ПЕРЕХОДОМ

© 2023 г. А. В. Горбунов[a,*], Д. Е. Карманов[a]

[a] *НИИ ядерной физики им. Д.В. Скобельцына Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, 1, стр. 2*

**e-mail: gorbunov.av18@physics.msu.ru, gorbunovav@my.msu.ru*

Поступила в редакцию 13.06.2022 г.
После доработки 28.06.2022 г.
Принята к публикации 21.08.2022 г.

Рассматривается электронная схема, позволяющая в определенных случаях существенно уменьшать число каналов считывания в кремниевых координатных датчиках на основе матрицы *p–i–n*-структур (стриповых или падовых) без потери точности измерения координаты. Электронная схема представляет собой цепочку внешних конденсаторов, соединяющую структуры датчика. При срабатывании одной из структур сигнал распространяется по цепочке конденсаторов емкостного делителя до ближайших каналов считывания. По изменению величины сигнала можно определить исходный номер сработавшей структуры.

Проведено математическое моделирование предложенной схемы для типичных параметров детектора и считывающей электроники. Математическая модель позволила оптимизировать параметры схемы в зависимости от параметров датчика и электроники считывания. Результаты моделирования подтверждены экспериментальными измерениями на нескольких макетах прибора.

Показано, что для определенных условий применения, когда сигнал в детекторе достаточно велик, например при регистрации ядер с зарядом $Z > 6$, можно, используя стандартные малошумящие операционные усилители, добиться точного восстановления номера сработавшей структуры в цепочке из не менее чем тридцати структур, считывая только две крайние структуры.

DOI: 10.31857/S0032816223010160, **EDN:** JWQGFQ

1. ЗАДАЧА УМЕНЬШЕНИЯ ЧИСЛА КАНАЛОВ СЧИТЫВАНИЯ В ПОЛУПРОВОДНИКОВОМ КООРДИНАТНО-ЧУВСТВИТЕЛЬНОМ ДЕТЕКТОРЕ ИОНИЗИРУЮЩИХ ЧАСТИЦ НА ОСНОВЕ МАТРИЦЫ *p–n*-ПЕРЕХОДОВ

В настоящее время кремниевые детекторы с *p–n*-переходом, изготовленные по планарной технологии, являются одним из наиболее распространенных типов координатно-чувствительных датчиков ионизирующих частиц. В датчиках этого типа координата попадания частицы определяется по положению сработавшего чувствительного элемента.

Обычно считывание каждой структуры такого детектора происходит индивидуально. В этом случае необходимо каждую структуру подключать к собственному каналу считывающей электроники, что, очевидно, повышает сложность внешней многоканальной электроники, а также ее энергопотребление. Уменьшение числа выходных каналов считывания дискретного координатного детектора с сохранением его координатной чувствительности является одной из важных проблем при разработке регистрирующих приборов с детекторами этого типа.

Уменьшение числа выходных каналов в стриповых дискретных координатных детекторах может быть достигнуто реализацией идеи деления сигнала на некотором делителе. Конкретные варианты реализации этой идеи рассмотрены в работах [1–3]. Предлагалось проводить считывание не каждого, а n-го стрипа, где $n = 2–10$ в разных предложениях. Предполагается, что сигнал из несчитываемых стрипов будет достигать ближайших считываемых, распространяясь по цепочкам межстриповых сопротивлений R_b (рис. 1, правая часть) или межстриповых емкостей C_b (рис. 1, левая часть). В первом случае реализуется резистивный делитель сигнала, во втором случае работает емкостный делитель. В обоих случаях процесс в простейшем приближении можно описывать как деление заряда (индуцированного частицей в

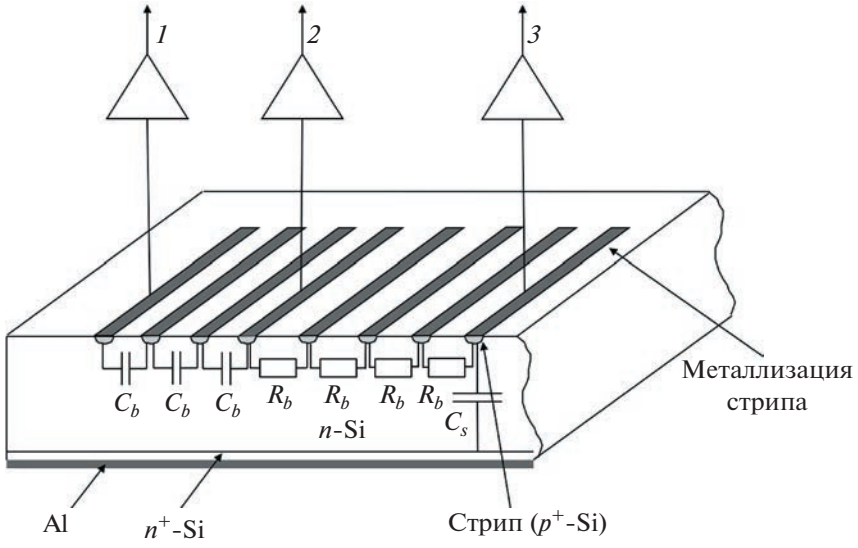

Рис. 1. Два условных варианта схемы деления сигнала в стриповом детекторе. Стрип между каналами *1* и *2* считывается за счет емкостного деления сигнала, стрипы между каналами *2* и *3* – за счет резистивного деления.

стрипе) между последовательно соединенными резисторами или конденсаторами.

Для резистивного деления сигнала в стриповых детекторах предполагалось использовать паразитные сопротивления между длинными и близко расположенными p–n-переходами соседних стрипов или формировать специально межстриповые резисторы из легированного поликремния. Однако такой подход не получил развития, так как схема с резистивным делением фактически представляет собой линию задержки с постоянной времени $\tau = R_bC_b$ и сигналы на концах делителя оказываются разной длительности, что сильно осложняет измерение их амплитуды.

Рациональнее применить для деления сигнала вместо резисторов межстриповые емкости. Емкостный делитель не формирует *RC*-цепей, что снимает проблему задержки распространения сигнала. В [4] подробно рассмотрены возможности реализации идеи емкостного деления сигнала в стриповых детекторах и возникшие при этом сложности. В конечном итоге в макетах и реализованных приборах максимальное число промежуточных несчитываемых стрипов не превышало шести [3]. В частности, в наиболее крупном приборе, в конструкции которого реализована идея емкостного делителя, – кремниевом трекере эксперимента D0 (ФермиЛаб, США) [5] – использованы датчики всего с одним промежуточным несчитываемым стрипом.

Такое ограничение связано с тем, что при создании конкретных устройств использовались межстриповые емкости C_b, реализованные в конструкции самого детектора. Фактически используется емкость между областями легирования (а также между областями металлизации) соседних стрипов, а технологически эта емкость не может превышать ~1–2 пФ/см. Расчеты и макетирование, проведенные в работе [4], показали, что в этих условиях количество неподключаемых (“плавающих”) стрипов ограничено, так как с увеличением их числа величина сигнала, достигающего усилителя, падает, поскольку на каждом шаге деления заряда часть его остается на емкостях собственно стрипов C_s. Для передачи сигнала с “плавающих” стрипов оптимальна ситуация, когда $C_b/C_s \gg 1$. Однако это трудно реализовать, особенно для стриповых детекторов с относительно большим шагом.

В данной работе предлагается новый подход к способу реализации межстриповых емкостей емкостного делителя. Суть предложения крайне проста – использовать не технологические межстриповые емкости между структурами детектора, а подключить к структурам детектора внешнюю схему, в которой между соседними структурами установить дискретные миниатюрные керамические конденсаторы. Такой подход позволяет радикально увеличить емкости C_b (см. рис. 1) и минимизировать потери сигнала на емкостях структур C_s, что в свою очередь должно позволить увеличить количество несчитываемых “плавающих” структур.

К плюсам этого решения можно отнести еще и то, что при использовании внешней по отношению к датчику схемы делителя можно организовывать емкостное деление между структурами (стрипами или падами) как различной произвольной формы, так и на разных кремниевых пластинах.

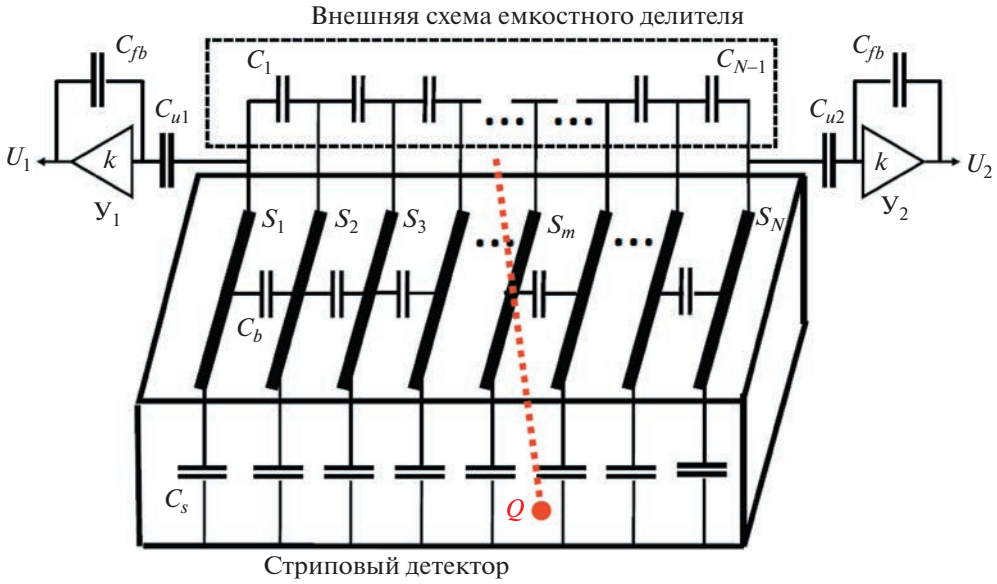

Рис. 2. Схема стрипового детектора с подключенной внешней схемой емкостного делителя. В стрип S_m попадает ионизирующая частица и создает ионизационный заряд Q.

С другой стороны, у такого подхода есть и очевидный минус: размеры даже миниатюрных керамических конденсаторов не позволяют располагать их плотнее, чем с шагом в доли миллиметра, т.е. подход применим только для координатных систем, использующих датчики с шагом также не менее сотен микрометров. Однако задачи, удовлетворяющие этому условию, существуют. Так, координатные датчики с разрешением в доли миллиметра полезны как часть калориметрических систем (в том числе в системах, измеряющих энерговыделение в тонких слоях, – dE/E-телескопах), где использование этих датчиков позволяет уточнить наклон трека частиц по отношению к калориметрическим датчикам и, соответственно, правильно нормировать энерговыделение на длину трека. Важно отметить [1], что идеи емкостного деления заряда работоспособны только при условии применения для считывания сигнала усилителей с определенными свойствами. Для емкостного делителя все расчеты [4] основаны на том соображении, что входная емкость усилителя велика и неизменна (много больше емкостей C_s и, по крайней мере, не меньше C_b, см. рис. 1). Только в этом случае можно рассматривать процесс стекания заряда, индуцированного частицей, из несчитываемого стрипа в усилитель как деление заряда между емкостями делителя. Для считывания сигналов с кремниевых детекторов, как правило, используется зарядочувствительный усилитель (ЗЧУ) [6], для которого это условие выполняется.

Рассмотрим более подробно, как именно восстанавливается номер сработавшего канала датчика в схеме емкостного деления (см. рис. 2). Здесь и далее в статье используются следующие обозначения:

– S_1–S_N – стрипы (структуры) детектора;

– C_b – емкости между структурами детектора (далее считаем, что между структурами одного датчика они одинаковы);

– C_{s1}–C_{sN} – емкости структур детектора на заднюю сторону (далее считаем, что эти емкости также одинаковы: $C_s = C_{s1}$–C_{sN});

– R_1–R_N – резисторы смещения структур детектора (далее считаем, что эти резисторы также одинаковы: $R = R_1$–R_N);

– C_1–C_{N-1} – внешние керамические конденсаторы схемы емкостного делителя (далее считаем, что емкости всех конденсаторов делителя одинаковы: $C = C_1$–C_{N-1});

– У$_1$–У$_3$ – зарядочувствительные усилители считывания сигналов;

– C_{u1}, C_{u2}, C_{u3} – внешние керамические конденсаторы на входах зарядочувствительных усилителей У$_1$–У$_3$ (далее считаем, что емкости этих конденсаторов также одинаковы: $C_u = C_{u1}$–C_{u3});

– C_{fb} – емкости обратной связи усилителей У$_1$–У$_3$;

– Q – заряд, создаваемый ионизирующей частицей в треке, прошедшем через структуру m детектора;

– U_1, U_2, U_3 – сигналы на выходах усилителей, созданные зарядом Q.

По величинам сигналов U_1 и U_2 (см. рис. 2) можно определить номер m структуры, а значит, и координату прохождения ионизирующей частицы. В простейшем приближении, не учитываю-

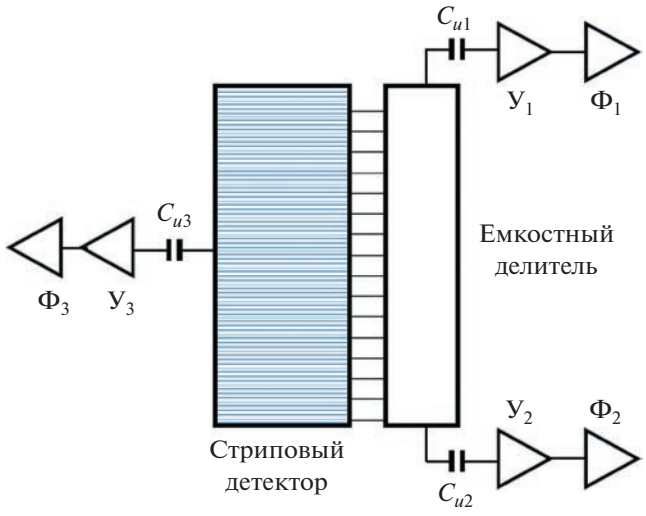

Рис. 3. Блок-схема моделируемого устройства емкостного делителя. У$_1$–У$_3$ – усилители; Ф$_1$–Ф$_3$ – формирователи сигнала.

щем потери сигнала на емкостях C_s структур детектора, выражение для m дается формулой (1):

$$m = (N-1)\frac{U_1}{U_1+U_2}, \quad (1)$$

где N – число стрипов.

Ее уточнением является формула, полученная с учетом соотношения емкостей делителя C_1 и входных емкостей усилителей C^*:

$$m = \left(N-1+2\frac{C}{C^*}\right)\frac{U_1}{U_1+U_2} - \frac{C}{C^*}. \quad (2)$$

Далее предполагается, что входная емкость усилителя C^* определяется последовательным включением емкостей C_u и входной емкостью ЗЧУ kC_{fb}: $C^* = \dfrac{C_u k C_{fb}}{(C_u + kC_{fb})}$. В формулах (1) и (2) не учитываются потери сигнала на емкостях структур C_s. Аналитический расчет с учетом C_s возможен (см. [4]), однако он не дает общего результата, в который число стрипов N входило бы как параметр.

Из (2) легко получить оценку ошибки определения величины m (т.е. координаты), связанной с точностями измерений U_1 и U_2:

$$\sigma_m = \frac{\sqrt{(\sigma_{U_1}U_2)^2 + (\sigma_{U_2}U_1)^2}}{(U_1+U_2)^2}\left(N-1+2\frac{C}{C^*}\right). \quad (3)$$

Отсутствие аналитического выражения для зависимости $m(U_1, U_2)$ с учетом C_s не позволяет выбрать оптимальное значение величин емкостей C делителя. Простое соображение, что емкость C должна быть “как можно больше”, некорректно, так как при бесконечном увеличении емкостей делителя сигнал перестает изменяться от одной ячейки делителя к другой. Кроме того, в этом случае усилители на концах делителя начинают “чувствовать друг друга”, формально это означает, что на входе усилителя 1 непосредственно появляется очень большая входная емкость C^* усилителя 2 (и наоборот). При этом известно [6], что шум на выходе ЗЧУ растет пропорционально величине емкости на его входе. Таким образом, при предельно больших величинах емкостей делителя схема будет давать большие шумы (σ_{U_1} и σ_{U_2}), а сигналы U_1 и U_2 будут слабо зависеть от величины m. С другой стороны, уменьшая емкости делителя, мы приходим к ситуации, когда для большого числа стрипов N сигнал из внутренних ячеек делителя ($m \approx N/2$) полностью остается на емкостях структур C_s и не доходит до усилителей: $U_1 \approx U_2 \approx 0$.

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕАЛЬНОЙ СХЕМЫ ДЕЛИТЕЛЯ НА ВНЕШНИХ КОНДЕНСАТОРАХ

Основная задача моделирования схемы делителя – выбрать емкости конденсаторов делителя так, чтобы для заданной величины ионизационного сигнала Q номер m сработавшей ячейки делителя можно было определить с точностью до одной ячейки ($\sigma_m < 1$) и при этом количество ячеек (т.е. количество несчитываемых структур) должно быть максимальным.

Моделирование выполнено с помощью пакета программного обеспечения “Altium Designer 20”.

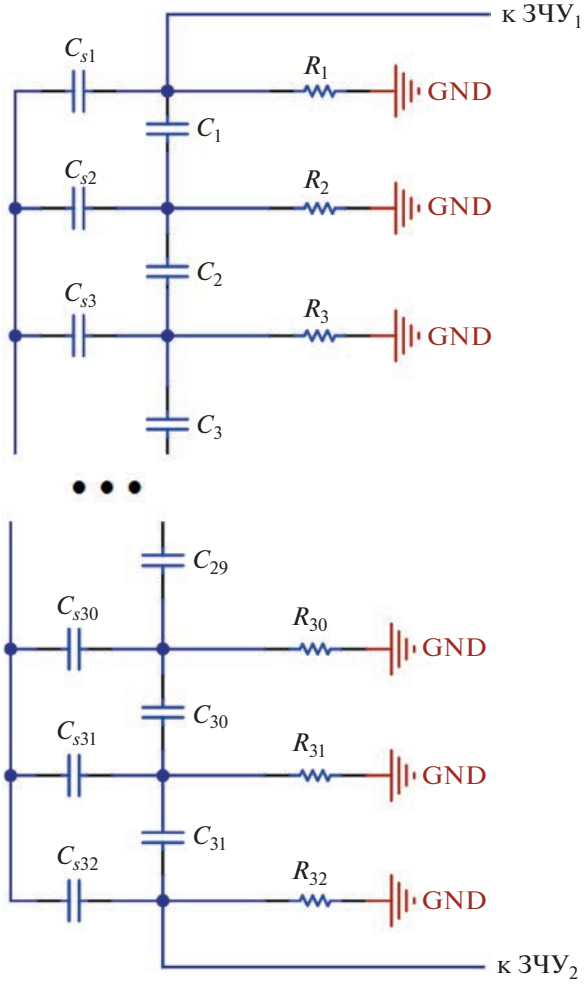

Рис. 4. Емкостный делитель в варианте параллельного подключения резисторов смещения структур детектора. ЗЧУ – зарядочувствительный усилитель.

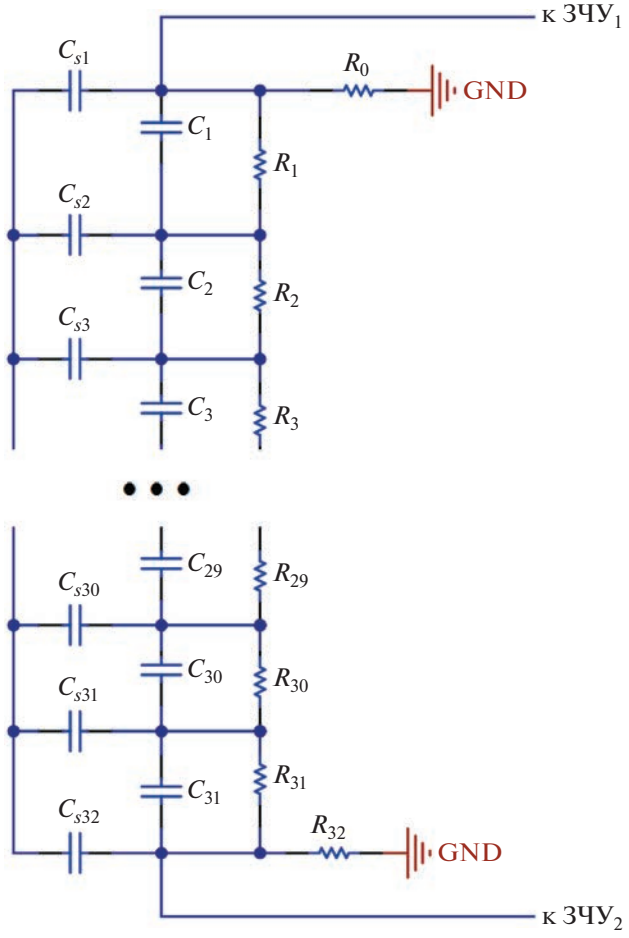

Рис. 5. Емкостный делитель в варианте последовательного подключения резисторов смещения.

Моделируемое устройство представляет собой стриповый детектор, к каждому стрипу которого подключен канал емкостного делителя, а к концам делителя и к задней стороне детектора – каналы считывания. Каждый из трех каналов считывания включает в себя схему ЗЧУ (усилители $У_1$–$У_3$) и частотный фильтр (формирователи сигнала $Ф_1$–$Ф_3$). Упрощенная блок-схема устройства представлена на рис. 3. Схема смещения детектора учитывалась в моделировании частично (см. далее).

Для реализации ЗЧУ и формирователей использовалась разработанная и испытанная ранее схема “ЗЧУ + формирователь” на быстрых малошумящих операционных усилителях, описанная в [7], эта часть схемы в ходе моделирования не изменялась. В качестве формирователя сигнала ЗЧУ использовался *RC-CR* частотный фильтр как наиболее простой в реализации. Параметры резисторов и конденсаторов в частотном фильтре выбраны таким образом, чтобы постоянные времени интегрирования и дифференцирования были равны 3 мкс. Для кремниевых детекторов такое время формирования считается близким к оптимальному по уровню шумов [8].

В моделируемом устройстве используется три канала считывания. Канал 3, подключенный к задней стороне детектора, вообще говоря, не должен влиять на схему емкостного деления. Однако его, желательно, учесть в моделировании, так как он использовался на этапе создания прототипа устройства. Третий канал дает сигнал, амплитуда которого не зависит от места попадания ионизирующих частиц в детектор, что позволяет удобно настроить порог срабатывания компаратора, сигнал которого используется для запуска считывания данных с каналов 1 и 2.

Пакет моделирования “Altium Designer 20” не дает возможности использовать подробную модель кремниевого стрипового детектора. Из-за этого для целей данной работы в схеме емкостно-

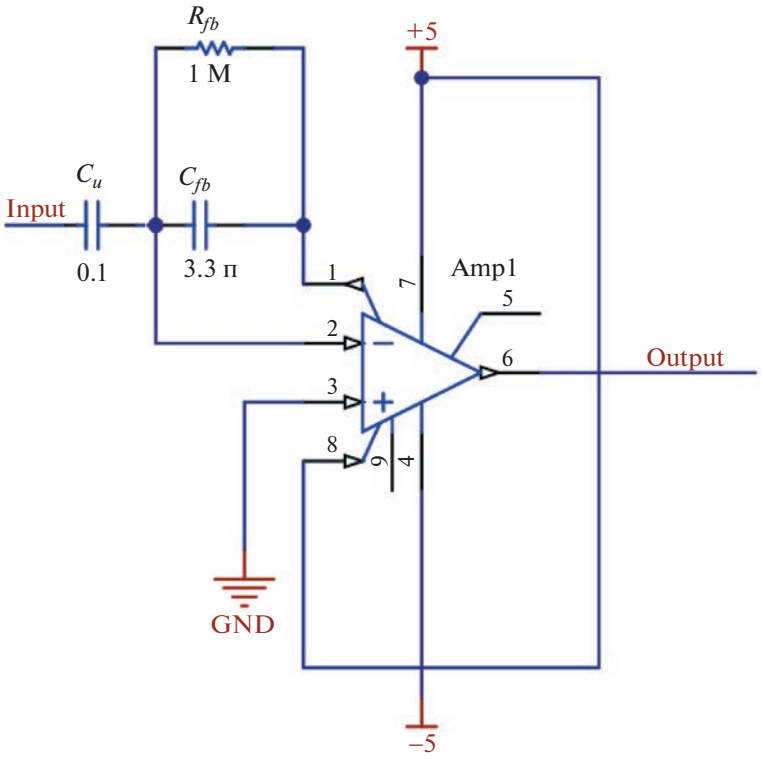

Рис. 6. Принципиальная схема моделируемого зарядочувствительного усилителя (схемы одинаковы для $У_1$, $У_2$, $У_3$). Amp1 – операционный усилитель ADA4817-1ARDZ; R_{fb} – резистор обратной связи ЗЧУ; C_{fb} – конденсатор обратной связи ЗЧУ.

го делителя в емкостях C_1–C_{N-1} делителя учтены сравнительно малые межструктурные емкости C_b детектора, а также в схему добавлены некоторые элементы принципиальной схемы детектора:

– C_{s1}–C_{sN} – емкости структур на обратную сторону детектора;

– R_1 –R_N – резисторы смещения структур детектора.

Резисторы смещения структур являются источником шумов для схем считывания и могут включаться в схему делителя двумя способами. Принципиальные схемы делителей с указанными добавлениями элементов детектора показаны на рис. 4 и 5, схемы как раз и различаются по способу подключения резисторов смещения. На схемах указанное число каналов детектора $N = 32$, однако рассматривался и вариант с $N = 12$.

Резисторы смещения R моделировались в двух вариантах: с сопротивлениями 510 кОм и 30 МОм (сопротивления резисторов для всех N структур одинаковы). Выбор номиналов продиктован тем соображением, что вклад в шум этих резисторов падает с ростом их сопротивления, а номинал 30 МОм близок к максимально доступному номиналу миниатюрных резисторов.

Емкости структур детектора C_{s1}–C_{sN} моделировались также в двух вариантах: 10 и 20 пФ. По порядку величины это типичные значения для стриповых кремниевых детекторов размером в несколько сантиметров и с шагом около сотни микрометров.

Емкости проходных конденсаторов C_{u1}–C_{u3} составляли при моделировании 100 и 1000 нФ. Принципиальные схемы ЗЧУ и формирователя представлены на рис. 6 и 7.

Сигнал от ионизирующей частицы моделировался как короткий прямоугольный импульс тока длительностью 40 нс, подаваемый в ячейку m емкостного делителя (в точку соединения конденсаторов C_s, C_{m-1} и C_m на рис. 4 и 5), при этом величина инжектируемого заряда Q определялась амплитудой токового импульса. Типичный вид сигнала на выходах схемы “усилитель + формирователь” представлен на рис. 8.

На первом этапе моделирования качественно исследовались зависимости выходных сигналов U_1 и U_2 с каналов регистрации 1 и 2 от номера ячейки делителя m, в которую инжектировался заряд. Моделирование проводилось с величинами емкостей конденсаторов в цепи делителя C: 1, 10, 100, 1000 нФ. Для дальнейшего рассмотрения удобно представлять сигналы U_1 и U_2 с “плеч” делителя в виде соотношения $U_1/(U_1 + U_2)$.

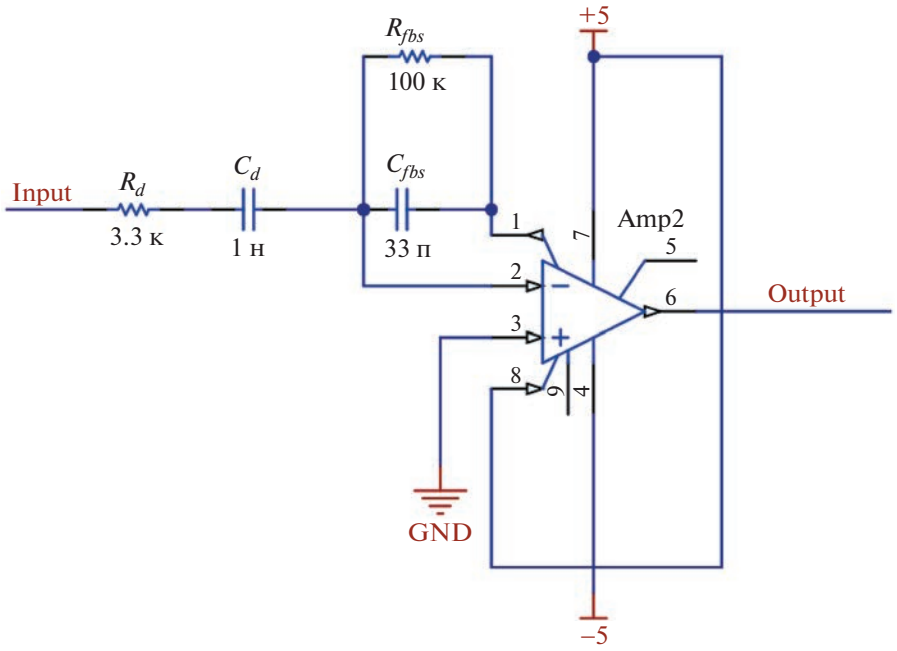

Рис. 7. Принципиальная схема моделируемого частотного фильтра (схемы одинаковы для Φ_1, Φ_2, Φ_3). C_d – конденсатор формирователя, связанный с дифференциатором; R_d – резистор формирователя, связанный с дифференциатором; R_{fbs} – резистор формирователя, связанный с интегратором; C_{fbs} – конденсатор формирователя, связанный с интегратором.

На втором этапе моделирования исследовались шумы в каналах регистрации (после формирователя) при различных емкостях конденсаторов делителя, различных сопротивлениях резисторов R_0–R_N и для различных емкостей C_s структур детектора.

На третьем этапе исследовалась зависимость координатного разрешения от величины входного заряда Q.

Отметим, что здесь и далее рассматриваются амплитуды сигналов (U_1, U_2 и U_3) и шумы (σ_{U1}, σ_{U2} и σ_{U3}) в каналах 1, 2 и 3 после схем формирователя.

Результаты первого этапа моделирования для $N = 32$ представлены на рис. 9. Видно, что лучшие условия для восстановления координаты достигаются при емкостях делителя C в диапазоне 10–100 нФ. В этом диапазоне зависимость $U_1/(U_1 + U_2)$ от m линейна с хорошей точностью, что позволяет использовать для определения номера m ячейки формулу (2). При малых значениях емкости линейность зависимости пропадает, а при больших – зависимость от m линейная, но пологая. Для $N =$ $= 12$ характер зависимостей слабо изменяется. Такое поведение совпадает с предварительным рассмотрением, сделанным ранее в разд. 1. Отметим, что формы зависимостей на рис. 9 не зависят от величины инжектируемого сигнала и от уровня шумов в каналах 1 и 2.

На втором этапе моделирования исследовались шумы в каналах 1, 2 и 3 при значениях емкостей делителя C 10 и 100 нФ, которые выше были признаны более оптимальными. Моделировалось несколько вариантов схемы делителя с различными параметрами элементов. Для расчетов шумов в “Altium Designer 20” необходимо инжектировать в какую-либо ячейку делителя некоторый за-

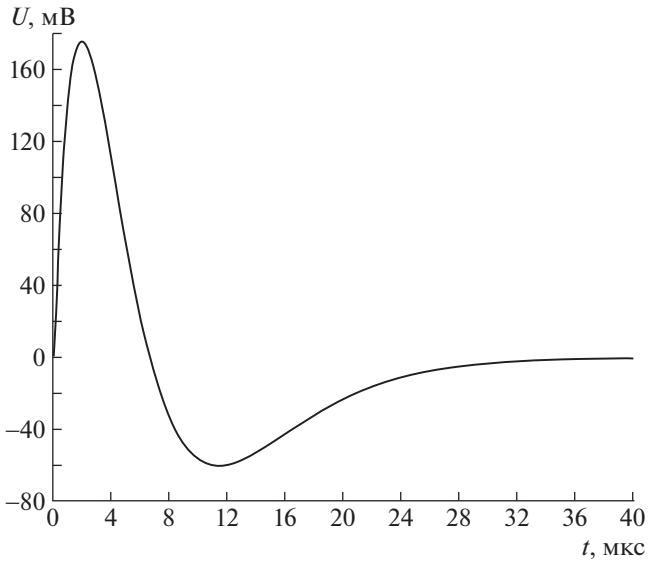

Рис. 8. Типичный результат моделирования формы и амплитуды импульса на выходах схемы “усилитель + формирователь” емкостного делителя.

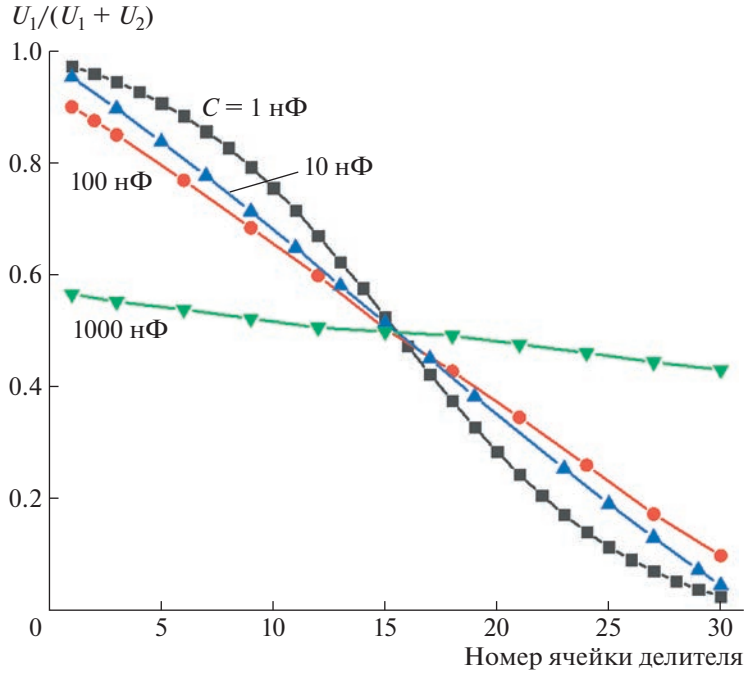

Рис. 9. Расчетные зависимости $U_1/(U_1 + U_2)$ от m для разных емкостей конденсаторов делителя.

ряд Q, однако его величина и конкретная ячейка делителя не влияют на результат. Также нужно выбрать полосу частот, в которой будет проводиться интегрирование частотной плотности шумов. В нашем случае полоса была ограничена 100 МГц, что далеко превосходит полосу пропускания частотных фильтров Φ_1–Φ_3, и частотная плотность шумов в этой полосе мала. Результаты расчетов шумов представлены в табл. 1–3. Согласно данным табл. 1:

– шумы в каналах 1 и 2 делителя больше для *бóльших* емкостей делителя C и уменьшаются с увеличением N, т.е. фактически шум в каналах делителя уменьшается при меньшей последовательной емкости всех ячеек делителя;

– шум канала 3 (с задней стороны датчика) заметно меньше, чем в каналах 1, 2, и не зависит от емкостей делителя.

Таким образом, можно сделать вывод, что оптимальная величина конденсаторов делителя — это *минимальная величина*, при которой зависимость $U_1/(U_1 + U_2)$ от m *сохраняет линейность*. Для наших параметров этому условию лучше соответствует емкость делителя 10 нФ как для $N = 12$, так и для $N = 32$.

Из результатов табл. 2 видно, что для достаточно больших сопротивлений резисторов смещения, $R \geq 500$ кОм, схема подключения (последовательная или параллельная) практически не влияет на шумы каналов считывания делителя, а сами шумы с ростом сопротивления резисторов смещения от 510 кОм до 30 МОм не изменяются. Согласно результатам табл. 3, при увеличении емкости C_s структур детектора с 10 до 20 пФ шумы ожидаемо возрастают, однако для выбранных величин C_s это увеличение незначительно (по сравнению с влиянием на шум величины емкостей делителя).

На третьем этапе моделирования для оптимальной величины емкости конденсаторов делителя $C = 10$ нФ и для двух вариантов числа структур в датчике ($N = 12$ и 32) исследовалась зависимость точности восстановления номера сработавшей структуры σ_m от величины инжектируемого в датчик заряда Q. В ходе расчетов заряд Q инжектиро-

Таблица 1. Расчетные величины шумов σ_U, мВ, на выходах каналов 1, 2, 3 при $C_s = 10$ пФ

Количество ячеек делителя N	$C = 10$ нф			$C = 100$ нф		
	σ_{U_1}	σ_{U_2}	σ_{U_3}	σ_{U_1}	σ_{U_2}	σ_{U_3}
12	11.29	11.29	1.80	38.36	38.36	1.81
32	5.35	5.35	3.82	26.83	26.83	4.05

вался в центральную ячейку делителя ($m \approx N/2$). Величина Q изменялась от 100 до 1000 фКл. Для каждого значения Q по результатам моделирования получены сигналы U_1 и U_2, после чего по формуле (3) определялась величина σ_m. Дисперсии σ_{U_1} и σ_{U_2} берутся из уже выполненных расчетов шумов (см. табл. 1), так как шумы не зависят от величины сигнала. Остальные параметры схемы были выбраны следующими: $R = 510$ кОм (схема последовательная), $C_s = 10$ пФ. Результаты расчетов представлены на рис. 10. Видно, что для $N = 12$ схема позволяет определять координату частицы с точностью до одной структуры датчика (т.е. $\sigma_m < 0.5$) при уровне сигналов >110 фКл, а для $N = 32$ такая точность достигается только для сигналов >140 фКл. Для типичного кремниевого датчика толщиной 300 мкм сигналы такой величины создаются релятивистскими частицами с зарядами $Z > 5$ (для $N = 12$) и $Z > 6$ (для $N = 32$).

В заключение был исследован вопрос зависимости точности восстановления номера сработавшей структуры от номера сработавшей ячейки делителя. Для этого заряд Q инжектировался последовательно во все ячейки делителя, для каждой точки инжекции проводился расчет величин сигналов U_1 и U_2, дисперсии σ_{U_1} и σ_{U_2}, как и ранее, брались из расчетов шумов, после чего по формуле (3) рассчитывалась величина σ_m для каждой ячейки инжекции. Величина Q составила 110 фКл для $N = 12$ и 140 фКл для $N = 32$. На рис. 11 представлены полученные результаты в виде зависимости σ_m от номера ячейки m, в которую инжектировался заряд. Расчет сделан как для величины $C = 10$ нФ, близкой к оптимальной, так и для бóльшей величины, $C = 100$ нФ, где шумы значительно выше. Видно, что ошибка минимальна в середине емкостного делителя и максимальна на краях, однако эти изменения не превышают 10% для делителей с $C = 10$ нФ как для $N = 12$, так и для $N = 32$.

3. ПРОТОТИП КООРДИНАТНО-ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ПРИБОРА С ПРИМЕНЕНИЕМ СХЕМЫ ЕМКОСТНОГО ДЕЛИТЕЛЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЕГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Представленные в разд. 2 результаты моделирования в целом подтверждают работоспособность предложенной выше схемы емкостного деления. Однако интересно проверить качество работы на “живом” приборе. Для этого создан прототип координатно-чувствительного прибора с применением схемы емкостного делителя. В основе созданного прибора многоканальные кремниевые датчики:

– падовая матрица из 12-ти независимых кремниевых датчиков площадью по 1 см^2;

– стриповый датчик размером 6 × 6 см с 32-мя стрипами шагом около 2 мм.

Датчики смонтированы на текстолитовых платах, где размещены также конденсаторы C емкостного делителя и резисторы смещения R для каждого канала. Реализована схема с последовательным подключением резисторов смещения (см. рис. 5). Фотография платы с 32-канальным стриповым датчиком и схемой делителя представлена на рис. 12. Общий вид прототипа с платой электроники и подключенной к ней детекторной матрицей с 12-ю падовыми датчиками представлен на рис. 13. Как и в моделировании, электроника считывания включает в себя 3 канала (два канала считывают сигнал с концов схемы делителя, третий канал подключен к задней стороне детектора). Каждая схема считывания содержит ЗЧУ и частотный фильтр с параметрами, представленными в разд. 2. Сигналы U_1, U_2 с двух каналов, подключенных к делителю, подаются далее на устройства аналоговой памяти (УВХ – устройство выборки-хранения), с которых поступают на внешний АЦП. АЦП осуществляет измере-

Таблица 2. Расчетные величины шумов для различных сопротивлений резисторов R смещения структур и двух вариантов подключения этих резисторов (см. рис. 4 и 5)

Схема включения	σ_{U_1}, мВ, при R	
	510 кОм	30 МОм
Последовательно	26.83	26.83
Параллельно	26.86	26.83

Примечание. Остальные параметры схемы: $N = 32$, C_{u1}–C_{u3} = = 1000 нФ, $C_s = 10$ пФ. Результаты для каналов 1 и 2 совпадают. Шум канала 3 заметно меньше и не показан

Таблица 3. Расчетные величины шумов для различных емкостей C_s на обратную сторону детектора

Количество ячеек делителя N	σ_{U_1}, мВ, при C_s, пФ	
	10	20
12	11.29	11.48
32	5.35	6.30

Примечание. Другие параметры схемы: $R = 510$ кОм (схема подключения резисторов – последовательная). Результаты для каналов 1 и 2 совпадают

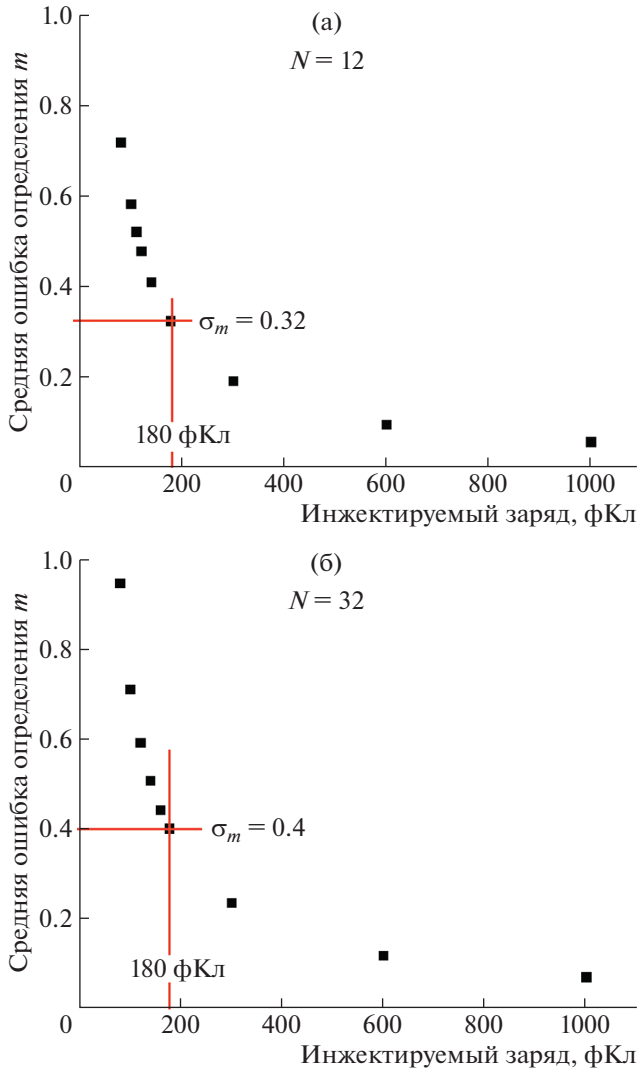

Рис. 10. Расчетная зависимость σ_m от величины инжектируемого заряда Q для $N = 12$, $m = 6$ (**а**) и $N = 32$, $m = 15$ (**б**). Емкость конденсаторов делителя $C = 10$ нФ. Выделена величина $Q = 180$ фКл, соответствующая сигналу от α-источника, который использовался при экспериментальных работах с макетом прибора.

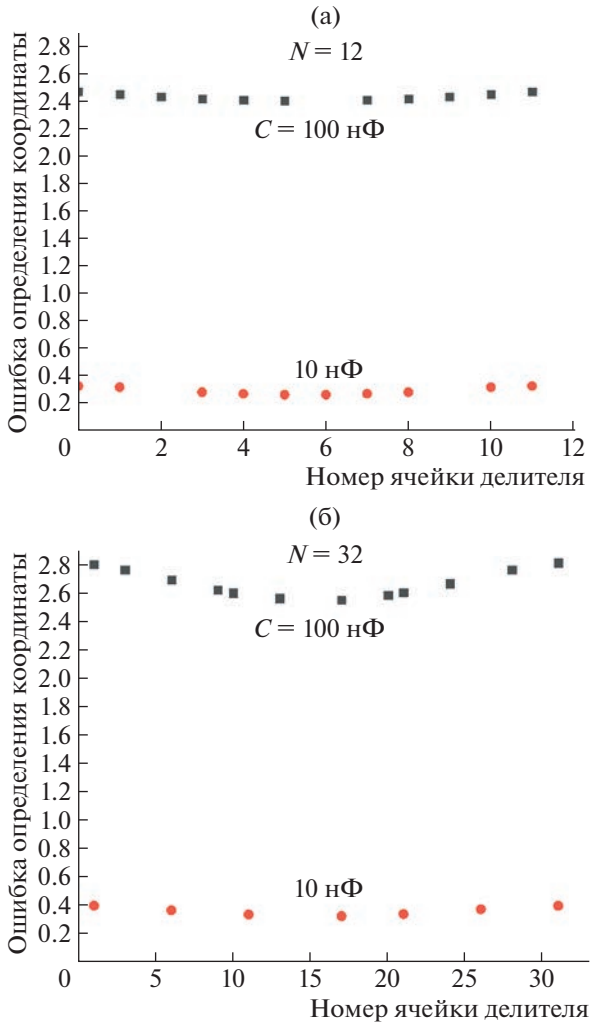

Рис. 11. Расчетная зависимость σ_m от m для $N = 12$ (**а**) и $N = 32$ (**б**). Емкости делителя C равны 10 и 100 нФ.

ние амплитуды сигналов U_1, U_2 в момент достижения ими максимума (см. рис. 8). Момент оцифровки определяется по срабатыванию компаратора, подключенного к третьему каналу. Данные с АЦП записываются в компьютер для анализа. Блок-схема прототипа представлена на рис. 14.

В схеме для 12-ти падовых датчиков использованы следующие величины резисторов и конденсаторов:

– C_1–C_{11} = 10 и 100 нФ;

– $R = R_0$–R_{12} = 510 кОм (схема последовательная).

Величина емкости падовых датчиков была измерена непосредственно на датчиках и составила C_s = 24 пФ в рабочем состоянии при полном обеднении.

В схеме для 32-канального стрипового датчика использованы следующие величины резисторов и конденсаторов:

– C_1–C_{31} = 10 и 100 нФ;

– $R = R_0$–R_{32} = 510 кОм (схема последовательная).

Величина емкости стрипов была измерена непосредственно и составила C_s = 32 пФ в рабочем состоянии полного обеднения.

Для исследования координатного разрешения в прототипе использовался α-источник с энергией частиц ~4 МэВ, который коллимировался таким образом, чтобы в каждом положении источника засвечивался только один пад или стрип датчика. Альфа-частицы источника полностью

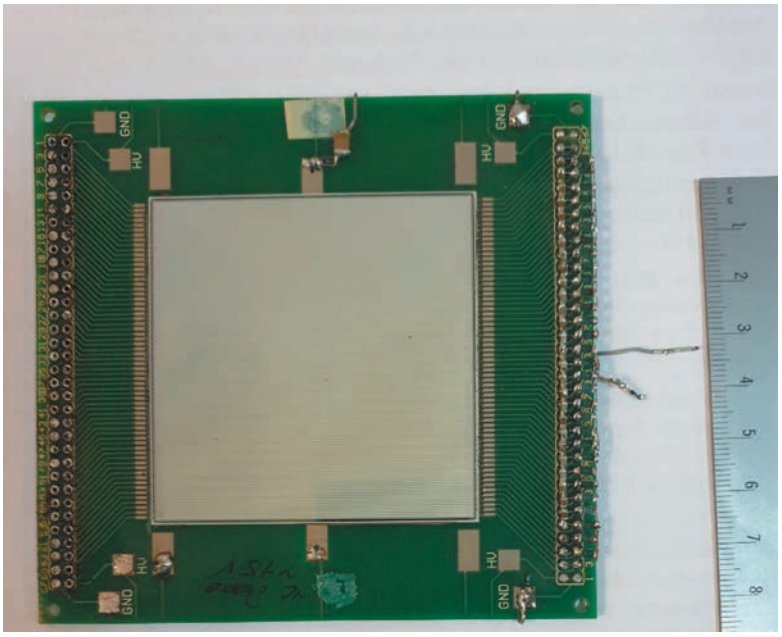

Рис. 12. 32-канальный стриповый датчик со схемой делителя на детекторной плате. Элементы схемы делителя и резисторы смещения подключены вдоль правого края платы.

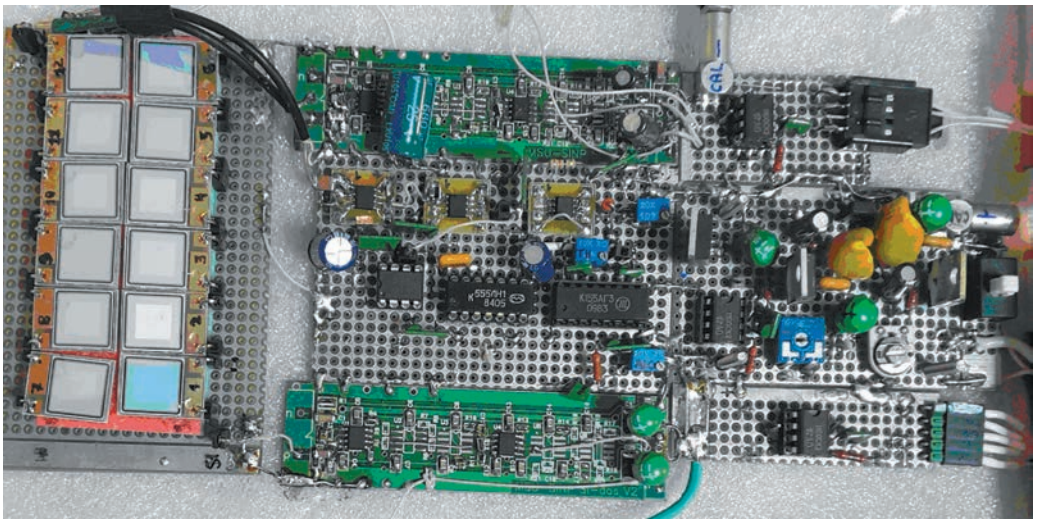

Рис. 13. Общий вид прототипа координатно-чувствительного прибора с применением схемы емкостного делителя с подключенной матрицей из 12-ти независимых падовых кремниевых датчиков (слева). Элементы схемы делителя и резисторы размещены снизу, под платой матрицы.

поглощаются в датчике, инжектируя в него заряд ~180 фКл.

Для каждой структуры (т.е. в каждом положении источника) регистрировалось около 1000 частиц. На падовой матрице облучение проводилось для восьми положений источника (т.е. для восьми структур), на 32-канальном стриповом датчике – для семи структур.

Облучались следующие структуры:

– для матрицы из 12-ти падовых структур: 1, 2, 4, 6, 8, 10, 11, 12;

– для 32-канального стрипового датчика: 1, 5, 10, 16, 21, 26, 30.

Непосредственный результат с α-источником – это 7 файлов данных (по количеству положений источника) для облучения падовой матрицы дат-

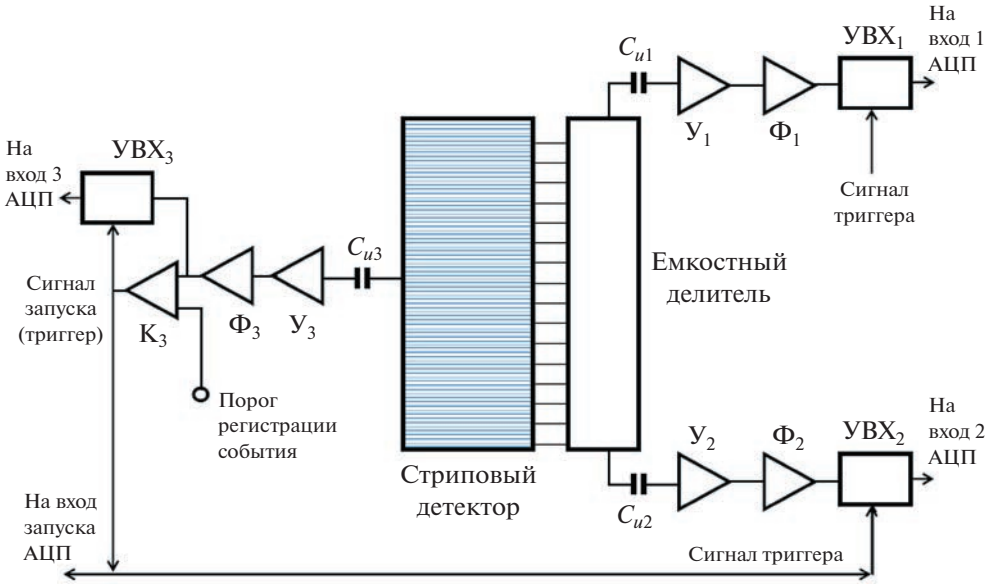

Рис. 14. Упрощенная блок-схема прототипа координатно-чувствительного прибора с применением схемы емкостного делителя. УВХ – устройство выборки-хранения; $У_1$–$У_3$ – усилители; $Ф_1$–$Ф_3$ – формирователи сигнала.

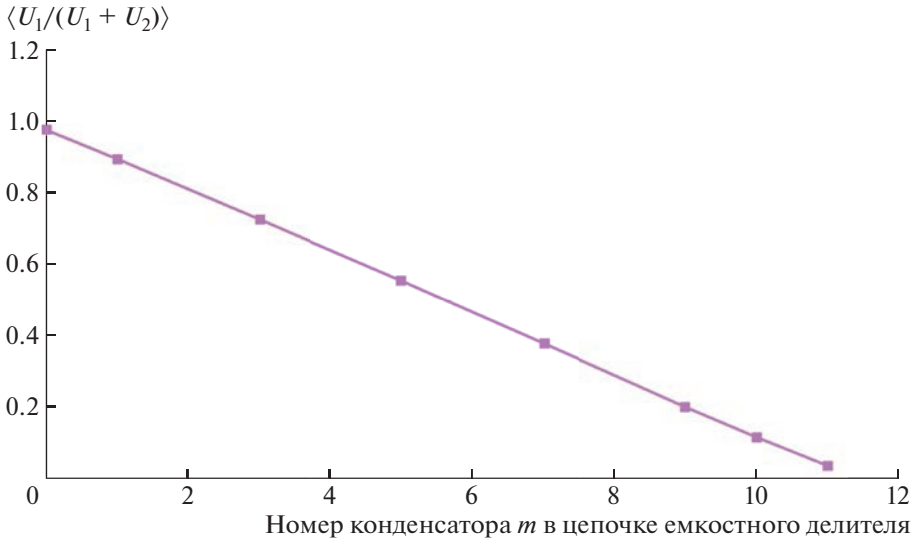

Рис. 15. Экспериментальные точки зависимости $\langle U_1/(U_1 + U_2)\rangle$ от m для матрицы из 12-ти падовых датчиков ($N = 12$) с емкостями делителя $C = 10$ нФ.

чиков и 8 файлов для стрипового датчика. Каждый файл содержит амплитуды U_1 и U_2 с концов схемы делителя для примерно 1000 событий.

В несколько упрощенном виде процедура обработки этих данных выглядит следующим образом.

1. Для каждого события в каждом файле рассчитывается величина $U_1/(U_1 + U_2)$.

2. Для каждого файла по всем событиям вычисляется среднее значение этой величины $\langle U_1/(U_1 + U_2)\rangle$.

3. По всем файлам одного типа (т.е. для падовой матрицы и для стрипового датчика) строится график зависимости средней величины $\langle U_1 / (U_1 + U_2)\rangle$ в файле от номера m облученной структуры дат-

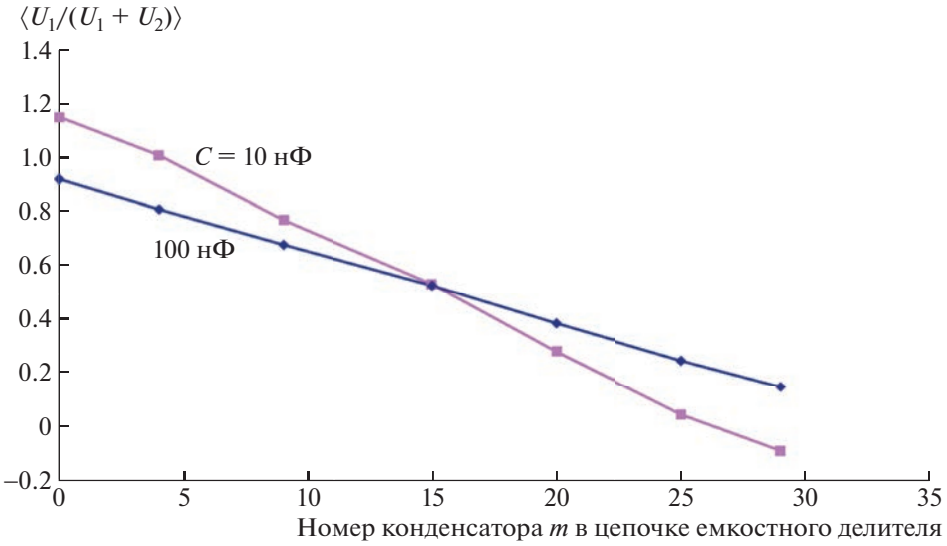

Рис. 16. Экспериментальные точки зависимости $\langle U_1/(U_1 + U_2)\rangle$ от m для матрицы из 32-канального стрипового датчика ($N = 32$) с емкостями делителя $C = 10$ и 100 нФ.

чика, данные облучения которой содержатся в этом файле.

4. Проводится аппроксимация полученной зависимости линейной функцией вида (2), в ходе аппроксимации варьируется параметр C^*.

5. Далее по формуле (2) для каждого события в каждом файле из величины $U_1/(U_1 + U_2)$ определяется m.

6. В каждом файле по всему массиву найденных значений m рассчитывается средняя величина $\langle m\rangle$ и ее среднеквадратическое отклонение σ_m.

Графики зависимостей $\langle U_1/(U_1 + U_2)\rangle$ от m для матрицы из 12-ти падовых датчиков и для 32-канального стрипового датчика представлены на рис. 15 и 16 соответственно. Видно, что и для $C =$ $= 10$ нФ, и для $C = 100$ нФ зависимость линейная, кроме того, для $C = 100$ нФ она более пологая, чем для $C = 10$ нФ, что качественно соответствует результатам моделирования на рис. 9. Для $C = 10$ нФ результаты определения экспериментальных значений $\langle m\rangle$ и σ_m представлены на рис. 17. Также экспериментальные значения σ_m, усредненные по всем положениям источников, приведены в табл. 4, здесь же для сравнения даны и усредненные по всем ячейкам делителя модельные значения σ_m. Фактически, при регистрации α-частиц с энергией ~4 МэВ в 12-канальной падовой матрице схема емкостного делителя с оптимальными емкостями позволила правильно определить номер сработавшего канала для более чем 95% α-частиц. В остальных событиях сдвиг восстановленного канала от реального не превышал одного канала. Для 32-канального стрипового датчика ситуация хуже, хотя и в этом случае “промах” более чем на один канал наблюдался менее чем в 20% событий. Частотное распределение экспериментальных величин “промахов” для эксперимента с матрицей из 12-ти падовых детекторов представлено на рис. 18.

Таблица 4. Расчетные и экспериментальные величины ошибки восстановления ячейки m емкостного делителя для матрицы из 12-ти падовых датчиков и для 32-канального стрипового датчика

Количество ячеек делителя N (емкость конденсаторов делителя)	σ_m	
	Экспериментальные результаты	Результат моделирования (см. рис. 11)
12 ($C = 10$ нФ)	0.2	0.3
12 ($C = 100$ нФ)	1.6	2.5
32 ($C = 10$ нФ)	0.7	0.4
32 ($C = 100$ нФ)	2.0	2.7

4. ВЫВОДЫ

Выполненная работа позволяет сделать вывод, что в определенных условиях возможно существенное сокращение числа каналов считывания падовых или стриповых кремниевых детекторов при использовании схемы емкостного деления сигнала.

Показано, что для точного подбора оптимальной величины конденсаторов емкостного делителя можно использовать профессиональные программы моделирования параметров электрони-

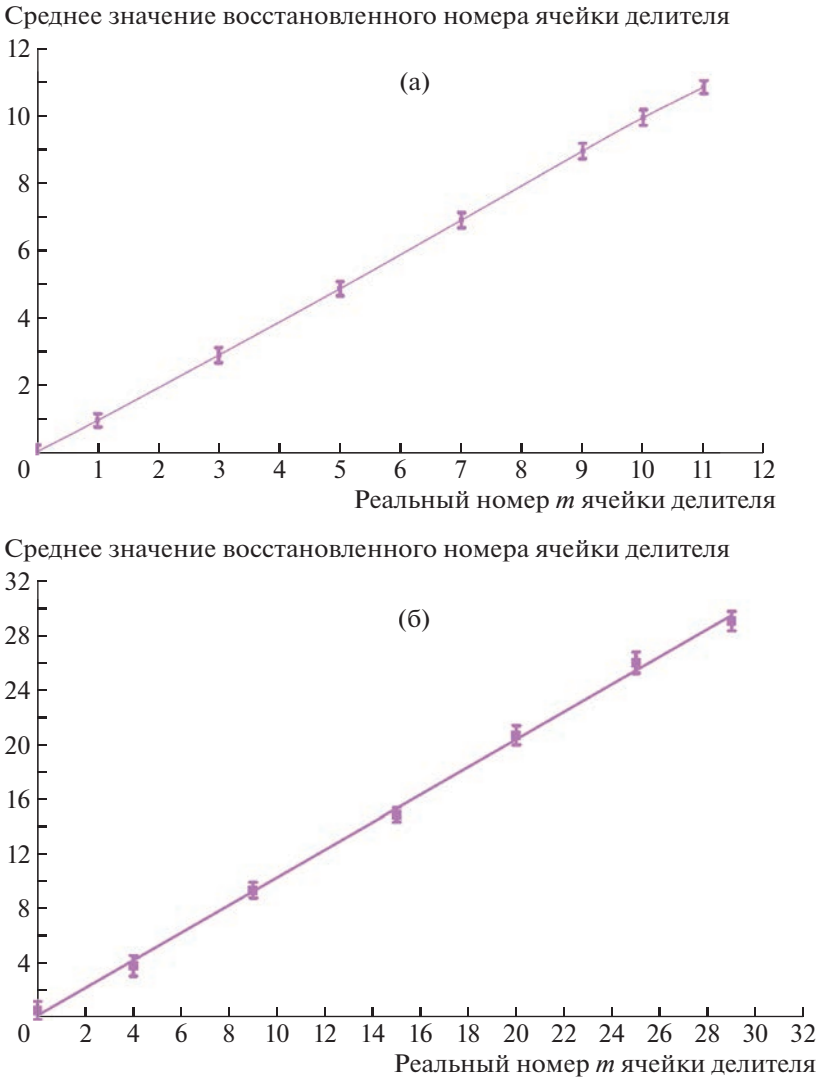

Рис. 17. Экспериментальные зависимости восстановленного значения $\langle m \rangle$ от реального m (по горизонтали): **а** – для матрицы из 12-ти падовых датчиков ($N = 12$) с емкостями делителя $C = 10$ нФ; **б** – для матрицы из 32-канального стрипового датчика ($N = 32$) с емкостями делителя $C = 10$ нФ.

ки. Это позволяет рассчитать величину сигналов и шумов в каналах регистрации на концах схемы деления и, используя простые аналитические выражения (2) и (3), с достаточной для задачи оптимизации точностью определить ожидаемые ошибки восстановления координаты для конкретной схемы.

Показано, что для емкостных делителей с числом каналов $N = 12$ и 32 при емкости одного канала датчика ~20 пФ оптимальная емкость конденсаторов делителя составляет около 10 нФ. Можно полагать, что вообще оптимальная величина емкости конденсаторов делителя должна превышать емкость структур датчика не менее чем на 2 порядка. В этих условиях шумы в каналах регистрации на концах схемы деления оказываются значительно выше, чем при индивидуальном подключении одного канала регистрации к одному каналу детектора. Этот результат ухудшает координатное разрешение схемы и ограничивает, с одной стороны, максимальное число каналов в схеме деления, а с другой – минимальный уровень энерговыделения в отдельном канале детектора, с которым схема способна обеспечить хорошее координатное разрешение. В частности, показано, что для емкостных делителей с числом каналов $N = 12$ и 32 координатное разрешение в один канал достижимо для уровня сигнала выше 110 пКл для $N = 12$ и выше 140 пКл для $N = 32$.

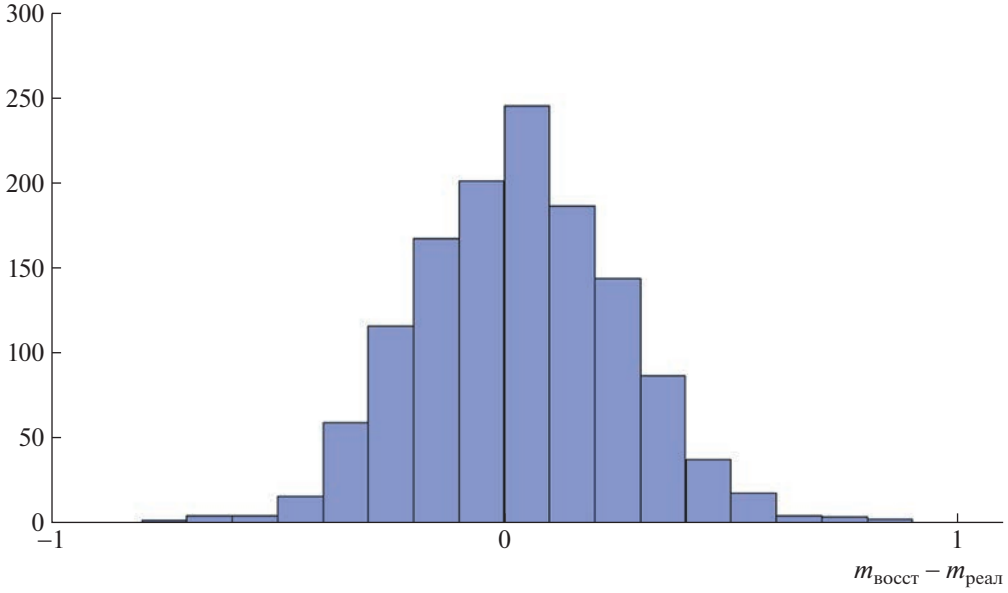

Рис. 18. Частотное распределение разности восстановленных номеров структур, в которые попадали α-частицы, и реальных (по положению коллиматора) для матрицы из 12-ти падовых детекторов (емкости делителя $C = 10$ нФ).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Сандуковский В.Г., Савельев В.И.* // Физика элементарных частиц и атомного ядра. 1991. Т. 22. Вып. 6. С. 1347.
2. *Laegsgaard E.* // Nucl. Instrum. and Methods. 1979. Т. 162. № 1–3. С. 93. https://doi.org/10.1016/0029-554X(79)90708-0
3. *England J., Hyams B., Hubbeling L., Vermeulen J., Weilhammer P.* // Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res. 1981. Т. 185. №. 1–3. P. 43. https://doi.org/10.1016/0029-554X(81)91192-7
4. *Башинджагян Г.Л., Короткова Н.А.* // ПТЭ. 2006. № 3. С. 27.
5. D0 Collaboration. *Abazov V.M. et al.* // Nucl. Instrum. And Methods. 2006. V. A565. P. 463. https://doi.org/10.1016/j.nima.2006.05.248
6. *Lutz G.* Semiconductor radiation detectors. Berlin: Springer, 1999. https://doi.org/10.1007/978-3-540-71679-2
7. *Воронин А., Елин В., Кудряшов И., Меркин М.* // Электроника: Наука, технология, бизнес. 2016. № 3. С. 54.
8. *Акимов Ю.К., Игнатьев О.В., Калинин А.И., Кушнирук В.Ф.* Полупроводниковые детекторы в экспериментальной физике. М.: Энергоатомиздат, 1989.