

## ПРИМЕНЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ

УДК 621.382

### ИСПЫТАНИЕ 32-КАНАЛЬНОЙ ИНТЕГРАЛЬНОЙ МИКРОСХЕМЫ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ СИГНАЛОВ КРЕМНИЕВЫХ ДЕТЕКТОРОВ

© 2012 г. Э. В. Аткин\*, Ю. А. Волков\*, А. Г. Воронин,  
Д. В. Дементьев, И. И. Ильющенко\*, Д. Е. Карманов, А. Д. Клюев\*,  
И. А. Кудряшов, А. А. Лобанов, Д. М. Подорожный, В. В. Шумихин\*

НИИ ядерной физики им. Д.В. Скобельцына Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова  
Россия, 119992, Москва, Воробьевы горы, 1, стр. 2

\*Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”  
Россия, 115409, Москва, Каширское ш., 31

Поступила в редакцию 10.02.2009 г.

После доработки 21.10.2011 г.

Испытана 32-канальная интегральная микросхема для микрополосковых кремниевых детекторов проекта “Нуклон” для исследования ионизирующего излучения в условиях космического пространства. Микросхема позволяет регистрировать сигналы релятивистских частиц и ядер с зарядом от  $Z = 1$  до  $Z > 50$  с кремниевых детекторов. Приводятся структурная схема микросхемы и ее основные экспериментальные характеристики. Потребляемая мощность не превышает 1.5 мВт/канал, динамический диапазон регистрируемых сигналов не менее 100 пКл.

#### ВВЕДЕНИЕ

В экспериментальных исследованиях космических лучей на высотных (космических) аппаратах начинают широко использоваться кремниевые детекторы с интегральной электроникой считывания. Сферой применения кремниевых детекторов являются трековые системы, системы измерения заряда частиц космических лучей и калориметрические системы.

Основными параметрами, определяющими качество каждой из этих систем, являются отношение сигнал/шум и динамический диапазон входных сигналов. Трековые системы не требуют большого динамического диапазона сигналов (как правило, достаточно регистрации нескольких однозарядных частиц), с другой стороны, необходимо высокое отношение сигнал/шум (более 10). В случае измерения заряда динамический диапазон сигналов возрастает до тысяч однозарядных частиц, а требования к шумам могут быть снижены до отношения сигнал/шум 5–7. В калориметрии требования к динамическому диапазону еще выше – десятки тысяч однозарядных частиц.

Проект Роскосмоса “Нуклон”, предназначенный для изучения космических лучей, имеет две кремниевые подсистемы:

– систему определения заряда пролетающей частицы;

– калориметрическую систему, выполненную как комбинацию калориметра и аппаратуры кинематического метода определения энергии KLEM.

Базовые технические требования, которым должна удовлетворять микросхема считывания

сигналов с детекторов, были получены исходя из поставленной физической задачи и возможности ее использования на космическом аппарате:

- динамический диапазон – не менее 100 пКл;
- время формирования максимума сигнала – не более 3 мкс;
- соотношение сигнал/шум для емкости детектора 100 пФ – не менее 2.5;
- потребление – не более 3.5 мВт/канал;
- частота считывания аналогового сигнала на выходе – не менее 3 МГц.

Разработанная 32-канальная специализированная интегральная микросхема (с.и.м.с.) является развитием ранее созданной микросхемы [1] и позволяет обеспечить решение физических задач проекта “Нуклон”. Указанный динамический диапазон еще не реализован ни в одной серийной интегральной схеме, выполненной для работы с кремниевыми детекторами.

#### СТРУКТУРНАЯ СХЕМА И ОПИСАНИЕ ОСНОВНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ С.И.М.С.

Разработанная микросхема предназначена для считывания и обработки сигналов с микрополосковых кремниевых детекторов калориметрической системы в широком динамическом диапазоне сигналов. Микросхема имеет аналоговую и цифровую части, ее структура приведена на рис. 1.

Аналоговая часть состоит из 32 рабочих каналов считывания сигналов с кремниевых детекторов и двух тестовых, расположенных у краев кристалла для снижения технологического разброса

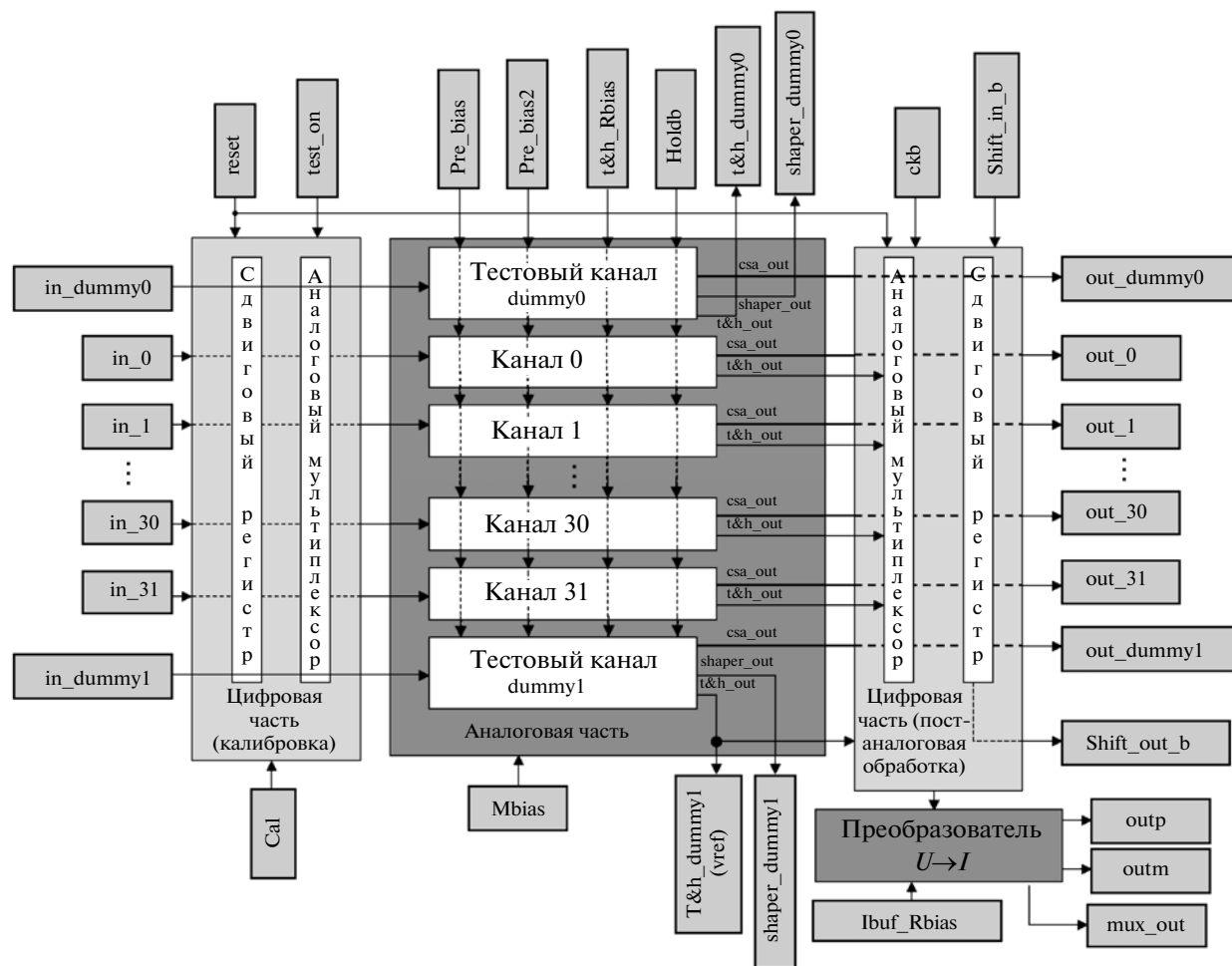


Рис. 1. Структура микросхемы.

параметров основных каналов и имеющих идентичную основным каналам структуру. У тестовых каналов на внешние контактные площадки дополнительно выведены промежуточные наиболее характерные сигналы для более детального исследования отдельных узлов аналоговой части с.и.м.с.

Цифровая часть с.и.м.с. выполняет две основные функции: 1) постаналоговой обработки, выполняемой межканальным мультиплексором и управляющим сдвиговым регистром; 2) калибровки каналов.

В микросхеме также используются дополнительные аналоговые блоки для установки термостабильных опорных потенциалов и выходной каскад, выполненный по схеме преобразования “напряжение–ток” ( $U \rightarrow I$  на рис. 1).

На рис. 2 показана структура аналогового канала считывания сигналов.

На входе каждого канала установлен зарядочувствительный усилитель (з.ч.у.), который преобразовывает сигнал микрополоскового детектора (в форме импульсов тока или заряда) в выход-

ное напряжение. Режим з.ч.у. оптимизирован для работы с положительным зарядом, поступающим от детектора. При этом как входной, так и выходной режимные потенциалы з.ч.у. находятся около +1.15 В (определяется напряжением питания (+1.65 В) и пороговым напряжением “затвор-исток”  $U_{зи}$  входного транзистора 0.50 В). Выходные сигналы з.ч.у. имеют отрицательную полярность.

Принципиальной особенностью разработанной схемы з.ч.у. следует считать разделение полного динамического диапазона (от шумов до насыщения) на два поддиапазона. Точка перегиба передаточной характеристики находится при значении входного заряда около 3 пКл. Это, с одной стороны, позволяет в области малых амплитуд обеспечить более высокий наклон передаточной характеристики и тем самым достигнуть удовлетворительного отношения сигнал/шум, а с другой – в области больших сигналов обеспечить меньший наклон и тем самым расширить динамический диапазон “сверху” до 100 пКл. Переключение поддиапазонов в разработанной схеме происхо-

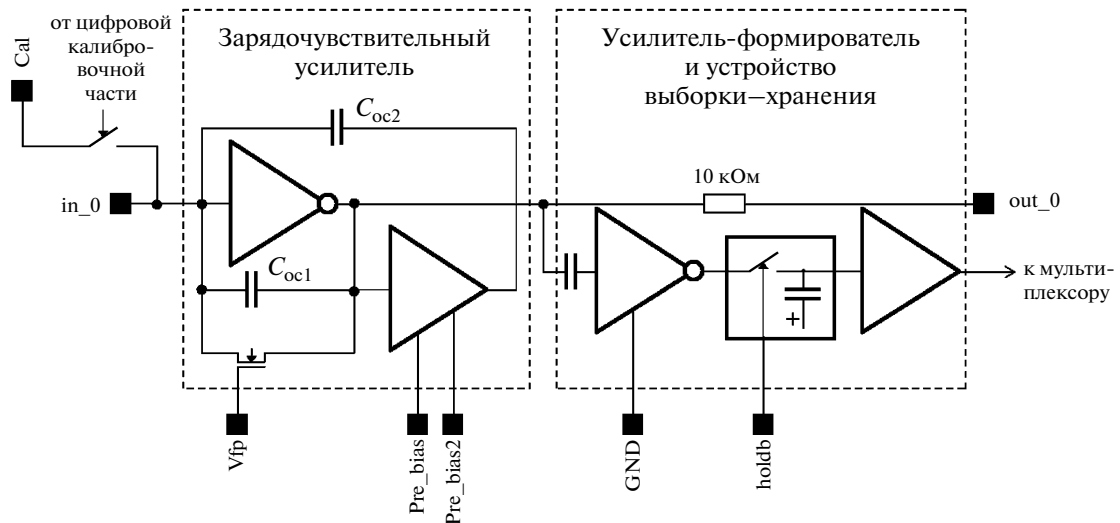


Рис. 2. Структура аналогового канала.

дит автоматически, более подробно работа з.ч.у. описана в [2].

Второй каскад после з.ч.у. является усилителем-формирователем, представляющим собой полосовой  $CR-RC$  активный фильтр 1-го порядка. Время достижения максимума сигнала на выходе формирователя составляет около 3 мкс. Основное назначение фильтра состоит в укорочении длительности сигнала до единиц микросекунд и тем самым в повышении нагрузочной способности канала до 100 кГц. Вторая функция усилителя-формирователя – улучшение соотношения сигнал/шум в канале.

Следующим блоком аналогового канала с.и.м.с. является устройство выборки-хранения (у.в.х.), предназначенное для фиксации амплитудного значения на выходе усилителя-формирователя по внешнему управляющему логическому сигналу. Схема выборки-хранения построена на основе

ключа на комплементарных транзисторах. Для хранения сигналов у.в.х. используется емкость 1 пФ. В качестве буферного повторителя использована схема однокаскадного операционного усилителя со 100%-ной обратной связью.

Для более удобной обработки информации в микросхеме реализована возможность последовательного считывания 32-х аналоговых каналов через дифференциальный токовый выход. Сигнал с токового выхода может считываться как относительно земли, так и относительно опорных потенциалов.

В рабочем режиме входы з.ч.у. подключаются к детектору по переменному току (через разделительный конденсатор).

Микросхема имеет возможность внешних регулировок для измерения и оптимизации параметров, в частности смещения з.ч.у. ( $Pre\_bias$ ,  $Pre\_bias2$ ,  $Vfp$ ).

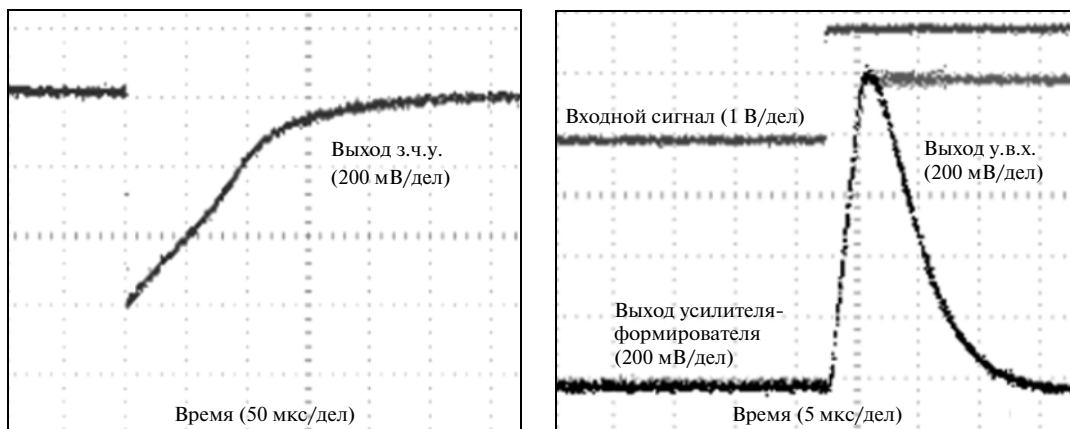


Рис. 3. Типовые осциллограммы в аналоговом канале.

Типовые осциллограммы, отражающие обработку сигналов в каждом канале микросхемы, приведены на рис. 3. При пролете ионизирующей частицы генерированный детектором сигнал (импульс тока) поступает в канал, в котором интегрируется на емкости обратной связи з.ч.у. На выходе з.ч.у. формируется отклик, амплитуда которого пропорциональна входному заряду. Затем сигнал обрабатывается усилителем-формирователем для его укорочения и улучшения отношения сигнал/шум. При подаче внешнего управляющего сигнала у.в.х. запоминает амплитуду с выхода усилителя-формирователя. Управляющий сигнал должен быть подан в момент, когда амплитуда на выходе усилителя-формирователя достигла своего максимума. Это происходит примерно через 3 мкс после пролета ионизирующей частицы. Сигнал с у.в.х. может быть считан через управляемый сдвиговым регистром выходной мультиплексор и выходной каскад. Более подробное описание работы аналогового канала приведено в [2].

Схема цифровой части с.и.м.с. имеет два режима работы: рабочий (основной) режим считывания-мультиплексирования детекторных сигналов и калибровочный тестовый режим, при котором осуществляется подача тестового воздействия через калибровочную емкость последовательно на каждый из входов 32-х з.ч.у. с.и.м.с.

В рабочем режиме по управляющему сигналу начинается цикл считывания. За каждый такт цикла в выходной каскад последовательно пере-

даются данные из рабочих каналов. По завершении считывания 32-х каналов вырабатывается логический сигнал его завершения, переводящий микросхему в режим регистрации входных сигналов.

В тестовом режиме на входы з.ч.у. 32-х рабочих каналов последовательно подается сигнал через внешнюю калибровочную емкость. Для этого в с.и.м.с. предназначена специальная внешняя контактная площадка. Выходная логическая схема при этом работает так же, как и в рабочем режиме.

### КОНСТРУКТИВНО-ТОПОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ С.И.М.С.

С.и.м.с. спроектирована с использованием системы автоматизированного проектирования компании Cadence (пакеты IC package 5.1.41, Neocell 3.4, Neocircuit 3.4, SOC Encounter 5.2). Для верификации использован программный пакет Calibre компании Mentor Graphics.

С.и.м.с. изготовлена через Европейскую организацию Europractice ([www.europractice-ic.com](http://www.europractice-ic.com)) по к.м.о.п.-технологии с проектными нормами 0.35 мкм компании On-Semi (Бельгия). Площадь топологии микросхемы составляет  $4.0 \times 4.0$  мм<sup>2</sup>. В рамках данной технологии для межсоединений используется пять слоев металла и два слоя поликремния.

Топология отдельного аналогового канала выполнена в виде прямоугольника шириной 80 и длиной 3000 мкм. Для обеспечения большого ди-

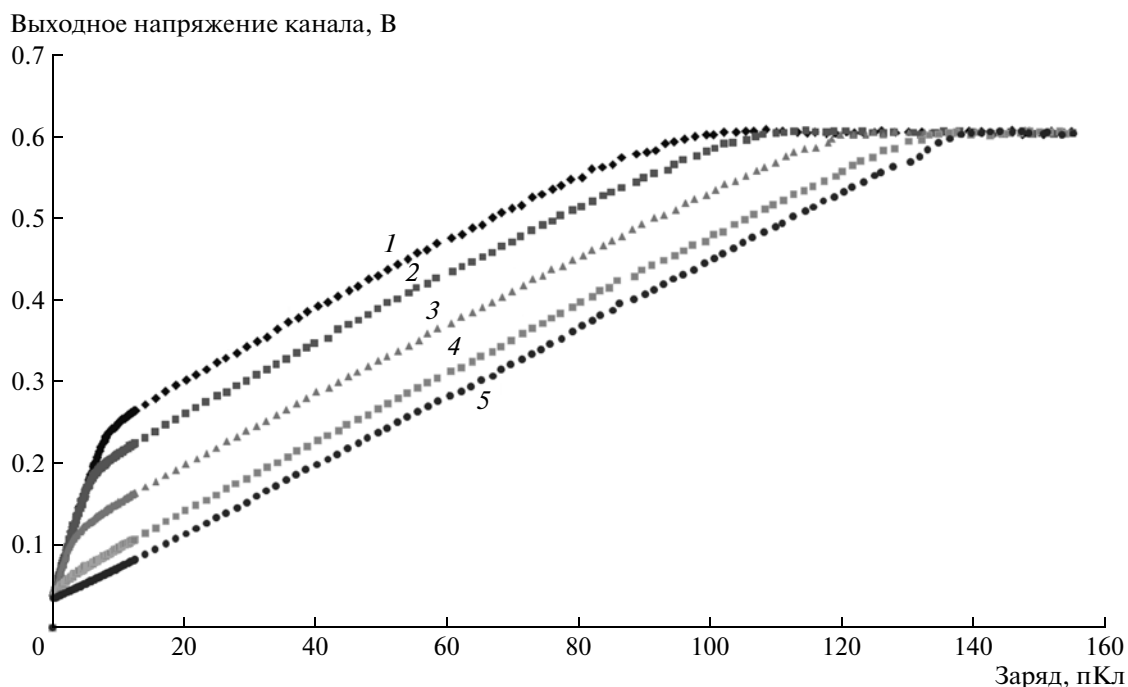


Рис. 4. Семейство передаточных характеристик микросхемы при изменении напряжения смещения Pre\_bias: 1 – 1.15, 2 – 1.35, 3 – 1.65, 4 – 1.9 и 5 – 2.15 В.

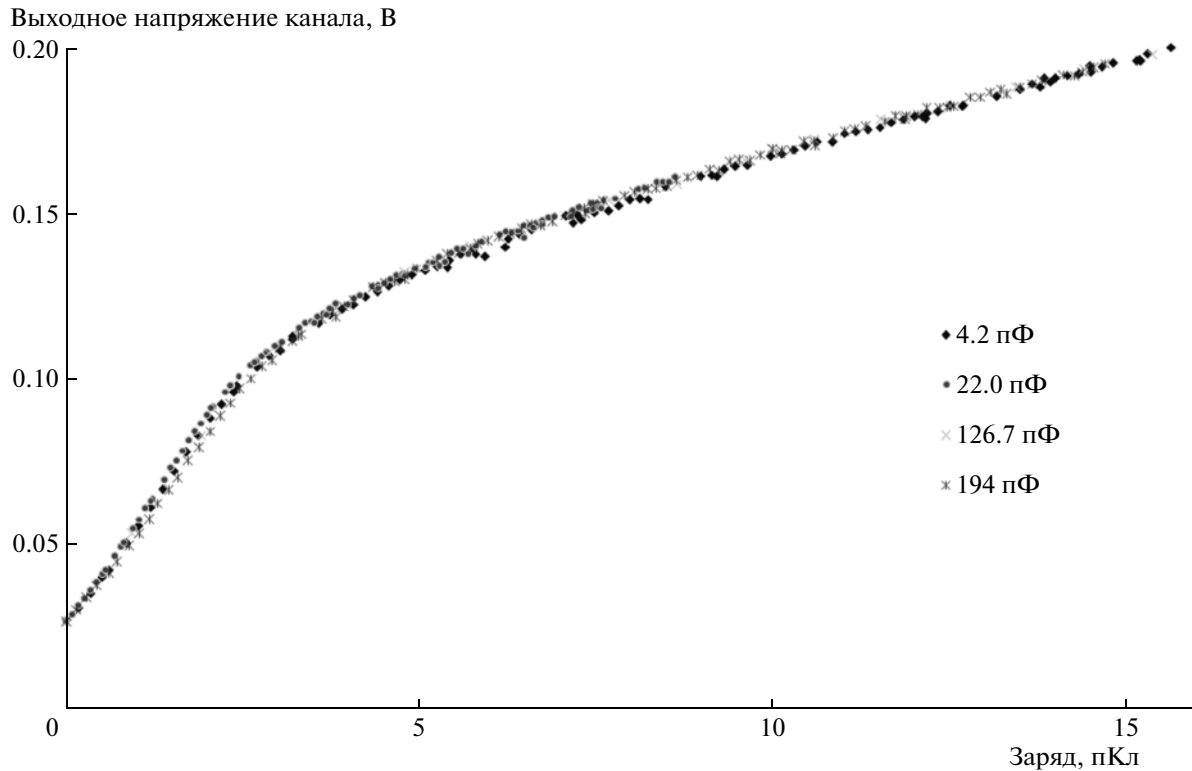


Рис. 5. Семейство передаточных характеристик при изменении емкости детектора.

намического диапазона сигналов в обратной связи з.ч.у. каждого канала микросхемы использована емкость номиналом 66 пФ.

Микросхема имеет 114 выводов, большинство из которых содержат элементы электростатической защиты.

#### ЛАБОРАТОРНОЕ ТЕСТИРОВАНИЕ

Для проведения лабораторных испытаний интегральные микросхемы были размещены в керамические корпуса типа CLCC84.

Ниже представлены основные параметры с.и.м.с.: полярность входного сигнала — положительная; количество каналов — 32; динамический диапазон — до 140 пКл; нелинейность для диапазона до 3000 м.и.ч. — 3%, более 3000 м.и.ч. — 10% (1 м.и.ч. = 3.6 фКл = 22500 электронов); усиление для диапазона малых сигналов — 130 мВ/пКл, для диапазона больших амплитуд — 20 мВ/пКл; отношение сигнал/шум для емкости 100 пФ (на сигнале 1 м.и.ч.) — 2.5; постоянная времени усилителя-формирователя 3 мкс; емкость детектора не более 100 пФ; частота считывания аналогового канала не менее 3 МГц; напряжение питания — двухполярное  $\pm 1.65$  В; потребляемая мощность — 1.5 мВт/канал.

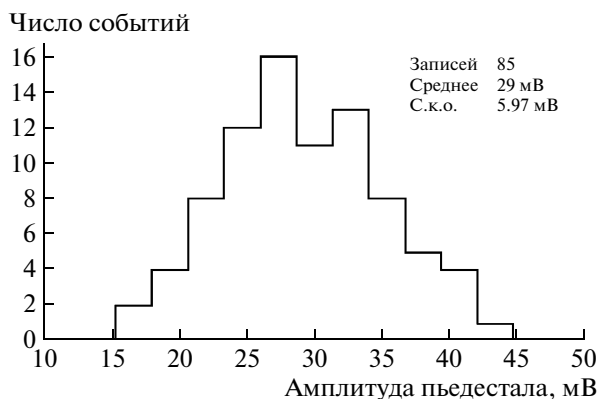
В с.и.м.с. имеется возможность изменения (программирования) формы передаточной харак-

теристики с помощью внешних потенциалов. Так, на рис 4. показано семейство передаточных характеристик микросхемы, измеренное при изменении напряжения смещения з.ч.у. (Pre\_bias) для емкости детектора 80 пФ.

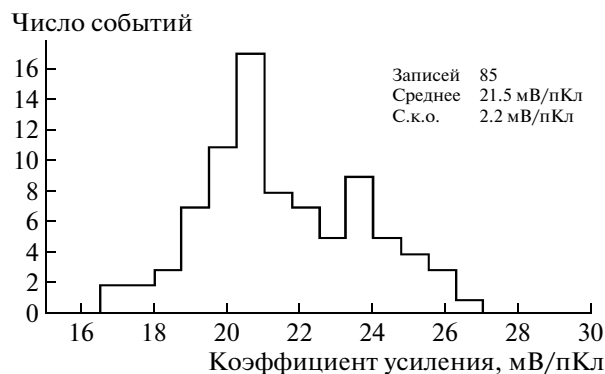
Как было сказано ранее, изменение смещения Pre\_bias приводит к изменению параметров з.ч.у. — варьируются значения динамического диапазона и положение точки перегиба передаточной характеристики. В таблице приведены результаты измерений положения точки перегиба при изменении режима работы з.ч.у.

Как видно из таблицы, динамический диапазон изменяется от 100 до 140 пКл, а точка перегиба — от 2 до 8 пКл. Это позволяет настроить аналоговый канал для работы с малым сигналом — увеличить отношение сигнал/шум за счет увеличения коэффициента усиления з.ч.у. в области малых сигналов (кривая 1) или подстроить з.ч.у.

Форма передаточной характеристики (рис. 4)	Динамический диапазон, пКл	Положение точки перегиба, пКл
1	100	8
2	105	6
3	120	4
4	135	2
5	140	—



**Рис. 6.** Амплитудное распределение базовой линии (пьедесталов).



**Рис. 7.** Разброс коэффициента усиления при малых сигналах.

для работы с большими сигналами в широком динамическом диапазоне (кривая 5).

Для проекта “Нуклон” наиболее близкой к требуемой является форма передаточной характеристики 3.

Суммарная потребляемая мощность с.и.м.с. не превышает 50 мВт, что соответствует 1.5 мВт/канал.

Семейство передаточных характеристик микросхемы при изменении эквивалентной емкости детектора измерена в диапазоне 2–200 пКл и показана на рис. 5. Изменение коэффициента передачи максимально в точке перегиба и составляет 9% для емкостей 22 и 200 пФ. В области большого сигнала (более 80 пКл) изменение коэффициента передачи не превышает 2%.

При измерениях шумовых свойств микросхемы получено отношение сигнал/шум 2.5 на выходе аналогового канала микросхемы (выход у.в.х.), что соответствует моделированию. За минимальный сигнал принято значение 3.6 фКл. Наклон шумовой характеристики составляет 0.3 мВ/пКл.

Проведены исследования разбросов базовой линии (пьедесталов), коэффициентов передачи на участке с большим и малым усилением. Испытания проводились на 85 каналах, принадлежащих 8 образцам микросхем.

На рис. 6 приведены статистические данные разброса базовой линии (пьедесталов). Статистический разброс пьедесталов составил не более 20%.

Разброс базовой линии влияет на точность определения амплитудного значения сигнала, поскольку пьедестал вычитается из значения сигнала, полученного при оцифровке. Для повышения точности определения амплитудного значения необходимо измерение пьедесталов в режиме проведения калибровки в каждом канале микросхемы.

На рис. 7 приведены статистические данные разброса коэффициента передачи микросхемы в области малого сигнала. Статистический разброс

коэффициентов передачи составил не более 10% (с учетом вычитенных пьедесталов).

Учитывая, что статистические данные по коэффициентам передачи и пьедесталам для разных каналов и разных образцов микросхем имеют достаточно большую величину (20% и 10%), процесс калибровки позволяет значительно увеличить точность измерений амплитуд сигналов.

В процессе тестирования был исследован калибровочный режим микросхемы, позволивший повысить точность определения максимального значения сигнала до 7%.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для регистрации сигналов кремниевых детекторов в рамках проекта Роскосмоса “Нуклон” создана 32-канальная специализированная интегральная микросхема, которая удовлетворяет основным техническим параметрам, заложенным при ее проектировании. Лабораторное тестирование подтвердило соответствие основных электрических параметров расчетным. Удалось достичь динамического диапазона микросхемы 120 пКл при соотношении сигнал/шум в 2.5 раза для частиц минимальной энергии. Параметры достигнуты при потреблении 1.5 мВт/канал. По совокупности параметров разработанная микросхема не имеет известных аналогов.

Апробирование микросхемы подтвердило возможность использования ее для более широкого круга калориметрических применений, где требуется широкий динамический диапазон при работе от емкостных (до 100 пФ) детекторов (сенсоров).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аткин Э.В., Волков Ю.А., Воронин А.Г. и др. // ПТЭ. 2010. № 2. С. 62.*
2. *Аткин Э.В., Воронин А.Г., Клюев А.Д. и др. // Микроэлектроника. 2011. № 1. С. 57.*