

ЭЛЕКТРОНИКА
И РАДИОТЕХНИКА

УДК 621.389

ОПИСАНИЕ ПРОТОТИПА СЧИТЫВАЮЩЕЙ
ЭЛЕКТРОНИКИ ДЛЯ ЕМКОСТНЫХ ДЕТЕКТОРОВ

©2024 г. Э. В. Аткин ^{a,*}, Д. Д. Норманов ^a, С. И. Ямалиев ^a,
А. Р. Серазетдинов ^a, А. А. Солин ^{b,**}, Е. А. Усенко ^{c,***}

^aНациональный исследовательский ядерный университет “МИФИ”

Россия, 115409, Москва, Каширское ш., 31

^bИнститут ядерных проблем Белорусского государственного университета

Беларусь, 220006, Минск, ул. Бобруйская, 11

^cИнститут ядерных исследований Российской академии наук

Россия, 117312, Москва, пр. 60-летия Октября, 7а

*e-mail: evatkin@mephi.ru

**e-mail: solin@hep.by

***e-mail: Eugueni.oussenko@cern.ch

Поступила в редакцию 07.12.2023 г.

После доработки 17.05.2024 г.

Принята к публикации 06.06.2024 г.

Представлено описание прототипа считывающей электроники для емкостных детекторов на основе специализированной интегральной микросхемы (СИМС), разработанной специально для съема и предварительной обработки сигналов с плоских резистивных камер эксперимента SPD на строящемся коллайдере НИКА ОИЯИ (г. Дубна). Восьмиканальная микросхема оптимизирована для работы с детекторами, имеющими характеристический импеданс считывающих электродов в диапазоне 35–110 Ом при приведенном ко входу эквивалентном малом шумовом заряде не более 2500 электронов. В СИМС предусмотрены регулировки порога по величине приведенного ко входу заряда в диапазоне 10–450 фКл, гистерезиса пороговой характеристики в диапазоне 0–12%, а также времени расширения сигнала в диапазоне 0.5–100 нс. Схема была оптимизирована для уменьшения джиттера по переднему фронту (менее 10 пс) и энергопотребления (менее 25 мВт на один канал). Представлены структурная и электрическая схемы, показаны результаты моделирования ключевых сложно-функциональных блоков и общий вид топологии спроектированной СИМС.

1. ВВЕДЕНИЕ

Современное поколение экспериментов на ускорительных комплексах требует увеличения числа каналов считывающей электроники и в целом повышения степени интеграции в первую очередь из-за значительно возросшей гранулярности детекторов. Это сопровождается ужесточением требований по многим аспектам, в том числе к

функциональной сложности накамерной электроники, что может быть в полной мере реализовано только с использованием специализированных интегральных схем.

В данной статье представлена разработка специализированной интегральной микросхемы (СИМС) для создания накамерной электроники эксперимента SPD (Spin Physics Detector) на строящемся коллайдере НИКА.

Развитие проектов и процессов проектирования полупроводников позволяет совершить важные сдвиги в развитии электроники. При этом разработка процессов КМОП (комплементарная структура металл–оксид–полупроводник) и передовых технологий разварки кристаллов с низким уровнем паразитных связей является одним из таких важных достижений, обеспечивающих переход к современным многоканальным электронным системам считывания.

Данная СИМС будет использоваться при создании накамерной электроники для плоских резистивных камер, времяпролетных измерений, а также для других применений. Микросхема оптимизирована для работы с детекторами, имеющими характеристический импеданс считывающих электродов в диапазоне 35–110 Ом, а также приведенный ко входу эквивалентный шумовой заряд не более 2500 электронов. В СИМС предусмотрены регулировки порога в диапазоне 10–450 фКл по значению приведенного ко входу заряда, а также времени расширения сигнала в диапазоне 0.5–100 нс. Схема была оптимизирована для уменьшения джиттера по переднему фронту (менее 10 пс) и энергопотребления (менее 25 мВт на один канал).

В задачи СИМС входят выполнение аналогового дифференциального считывания заряда с детектора частиц и дискриминация сигнала постоянным порогом, растяжение длительности импульса с сохранением пропорциональности ширины импульса от величины входного заряда, формирование выходных сигналов в различных стандартах, в том числе в уровнях LVDS (низковольтная дифференциальная передача сигналов), а также выработка сигнала ИЛИ по всем восьми каналам. В считывающей электронике, предназначенной для амплитудных измерений, существуют несколько известных подходов к измерению заряда — аналоговое пиковое детектирование, использование высокоскоростного сканирующего АЦП и использование метода преобразования заряда во временной интервал. В представленной микросхеме используется последний метод, который дает возможность измерения амплитуды сигнала по его длительности. При этом передний фронт импульса несет точную временную информацию, а ширина импульса пропорциональна входному заряду [1, 2].

2. СТРУКТУРА МИКРОСХЕМЫ

В рамках продолжения работ по разработке микросхем для электроники физического эксперимента [3–6] представленная СИМС предназначена для съема и предварительной

обработки сигналов с плоских резистивных камер (RPC) детекторов для эксперимента SPD на строящемся коллайдере тяжелых ионов НИКА, ОИЯИ (г. Дубна). Она содержит 8 каналов усилителей-дискриминаторов с функцией преобразования заряда во временной интервал.

В состав СИМС вошли следующие блоки (см. рис. 1):

- 1) ref tia - блок управления входным импедансом;
- 2) BGR - блок формирования опорных потенциалов для 8 каналов;
- 3) IBGR - блок задания дополнительного опорного тока для 8 каналов (в связи с наличием свободного пространства он сделан путем конфигурации bgr 600_900_1300_1400);
- 4) блок LVDS OR - блок сборки сигналов по логике ИЛИ.

Рис. 1. Структура микросхемы.

Структурная схема отдельного канала представлена на рис. 2. Канал состоит из блоков предусилителя (preamp), дифференциальных усилительных каскадов (2х), блока расширителя импульсов (stretch), блока драйвера стандарта LVDS, блока гистерезиса (hysteresis) и бита или (bit or).

Рис. 2. Структурная схема одного канала.

Канал предназначен для работы с катод-анодным разностным сигналом без средней точки (заземления), для него предусмотрена подстройка входного сопротивления с учетом волнового сопротивления RPC (около 50–60 Ом). Дискриминатор спроектирован со встроенным программируемым гистерезисом. Сигналы с дискриминатора поступают на расширитель выходного импульсного сигнала по заднему фронту с программированием по длительности.

3. ОСОБЕННОСТИ СЛОЖНО-ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ БЛОКОВ

Ключевой особенностью схемы предусилителя и его реализации в составе канала является возможность подстройки входного сопротивления каналов схемы путем изменения сопротивления внешнего резистора. Таким образом достигается лучшее согласование сигналов в усилительном тракте и обеспечивается компромисс по отношению сигнал/шум. На рис. 3 приведена зависимость эквивалентного шумового заряда (в тысячах электронов) от входной емкости детектора. Зависимость описывается формулой

$$ENC = 1.956 + 102 \cdot \text{эл.} / \text{пФ}.$$

Рис. 3. Эквивалентный шумовой заряд в зависимости от емкости детектора.

Факторами, влияющими на эквивалентный шумовой заряд, являются режимы работы входных транзисторов и транзисторов источника тока в трансимпедансном усилителе.

Блок подстройки входного сопротивления обеспечивает возможность согласования входного сопротивления усилительного тракта и сопротивления источника сигнала (см. рис. 4). Функциональным аналогом является схема, разработанная в ЦЕРН [1]. Для диапазона изменений сопротивления внешнего резистора от 40 до 80 Ом зависимость входного сопротивления канала имеет линейный характер, что позволяет согласовать его с сопротивлением источника сигнала. Блок подстройки представляет из себя линейный регулятор, ко входу которого подключается внешний резистор с сопротивлением, эквивалентным входному сопротивлению канала, а на выходе этого регулятора выдаются выходные режимные потенциалы источника тока трансимпедансного усилителя.

Рис. 4. Зависимость входного сопротивления от сопротивления регулирования.

Схема расширителя устроена таким образом, чтобы была возможность плавного регулирования времени расширения сигнала от 0.5 до 100 нс. Она представляет собой дифференциальный вариант схемы, представленной в одном из последних прототипов микросхемы PADI [7]. Таким образом, можно добиться фиксированного расширения сигнала при всем динамическом режиме работы предусилителя (см. рис. 5).

Рис. 5. Зависимость длительности импульса на выходе усилительных каскадов

За счет плавной регулировки этого тока через внешний потенциал происходит расширение сигнала в указанном диапазоне (см. рис. 6). Также предусмотрена возможность его отключения, в таком случае сигнал после каскадов усилителей, минуя расширитель, идет на вход LVDS -блока.

Рис. 6. Диаграмма сигналов на выходе расширителя двух каналов.

Блок ИЛИ собирает выходные сигналы блоков bitOR с восьми каналов СИМС. Таким образом, при наличии сигнала хотя бы в одном канале на выход ИЛИ будет передан импульс этого канала. В случае одновременного срабатывания нескольких каналов СИМС на выходе ИЛИ первый из пришедших импульсов сформирует передний фронт, а задний фронт сформирует сработавший канал с наибольшим зарядом.

Соответствие выходных уровней СИМС стандарту LVDS (или другим стандартам) осуществляется выбором соответствующих значений внешних сопротивлений нагрузки выходного каскада СИМС, а также заданием расчетного значения тока выходного каскада. Величина тока выходного каскада управляется внешним напряжением на соответствующем выводе СИМС. Блоки LVDS позволяют регулировать выходной ток в широком диапазоне, таким образом, схема может работать как в стандарте LVDS, так и в стандарте CML (Current Mode Logic).

На рис. 7 показаны типовые диаграммы сигналов в основных точках.

Рис. 7. Форма типовых сигналов в канале микросхемы.

4. СИГНАЛЬНЫЙ ОТКЛИК И ПАРАМЕТРЫ СИМС

На вход микросхемы поступает заряд. Его величина соответствует площади под левым графиком рис. 8, поделенной на входное сопротивление. На правом графике изображен отклик предусилителя.

Рис. 8. Диаграммы сигналов на входе канала и на выходе предусилителя при проведении временного шумового анализа.

На рис. 9 представлена топология микросхемы с контактными площадками. На ней обозначены все сложно-функциональные блоки, а именно, источники напряжения и тока (BGR, IBGR) для аналоговых каналов и выходных интерфейсов и аналоговые каналы усилителя-дискриминатора. Размер макета (без контактных площадок) 3450×1500 мкм². Основные параметры микросхемы приведены в табл. 1.

Рис. 9. Топология всей микросхемы SPD NINO.

Таблица 1. Характеристики спроектированной СИМС

Параметр	Значение
Технология	КМОП, 180 нм, АО “Микрон”
Напряжение питания, В	1.8
Число каналов	8
Время нарастания переходной характеристики, пс	500
Диапазон входных зарядов, фКл	10–2000
Собственный временной джиттер, пс	< 10
Шум при $C_{дет} = 0$, е	< 2000
Диапазон изменения входного гистерезиса, %	0–12
Межканальный кросс-ток, дБ	< 45
Ширина импульсов на входе расширителя, нс	0.5–3
Диапазон расширения импульсов на выходе, нс	0.5–100
Выходной каскад	Парафазный, открытые стоки
Размер кристалла микросхемы, мм ²	2×4
Потребляемая мощность чипа, мВт	204

Моделирование импульсного отклика каналов после получения одинаковых сигналов на входах всех восьми каналов в типовом случае представлено на рис. 10. Экстракция показала, что один сигнальный отклик выбивается. Это могло быть следствием краевых эффектов. Влияние краевых эффектов можно уменьшить, разместив реплики аналоговых каналов по краям. На рис. 10 красным отмечен сигнал на выходе при моделировании электрической схемы, а синим – на выходе экстрагированной топологии. Голубым отмечен экстрагированный выход восьмого канала, который отстает на 10 пс от остальных семи каналов.

Рис. 10. Импульсный отклик на LVDS-выходе каналов микросхемы.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлены результаты проектирования специализированной интегральной микросхемы SPD NINO. Микросхема предназначена для дифференциального съема и предварительной обработки сигналов от RPC-детекторов. Представлены разработанные схемы узлов и результаты их моделирования в пакете сквозного проектирования Cadence Virtuoso. Микросхема изготовлена на фабрике по КМОП-технологии с проектной нормой 180 нм АО “Микрон”.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение от 11.03.24 г. №075-02-2024-1525) в рамках реализации федерального проекта “Подготовка кадров и научного фундамента для электронной промышленности” государственной программы “Научно-технологическое развитие Российской Федерации”. Производство интегральной микросхемы было выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках федерального проекта “Подготовка кадров и научного фундамента для электронной промышленности” по государственному заданию на выполнение научно-исследовательской работы “Разработка методики прототипирования электронной компонентной базы на отечественных микроэлектронных производствах на основе сервиса MPW (FSMR-2023-0008)”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Anghinolfi F., Jarron P., Krummenacher F., Usenko E., Williams M.C.S.* // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2004. V. 51. №. 5. P.1974. <http://doi.org/10.1109/TNS.2004.836048>
2. *Wong W.S., Aloyz J., Ballabriga R. et al.* // Radiat. Meas. 2020. V. 131. P. 106230. <http://doi.org/10.1016/j.radmeas.2019.106230>
3. *Atkin E., Azarov D., Ivanov P., Normanov D., Serazetdinov A., Shumikhin V.* // Russ. Microelectron. 2022. V. 51. P. 111. <http://doi.org/10.1134/S1063739722020032>
4. *Shumikhin V., Atkin E., Azarov D., Ivanov P., Normanov D., Serazetdinov, A.* // J. Phys. Conf. Ser. 2020. V. 1690. № 1. P. 012068. <http://doi.org/10.1088/1742-6596/1690/1/012068>
5. *Atkin E., Azarov D., Ivanov P., Normanov D., Serazetdinov A., Shumikhin V.* // J. Phys. Conf. Ser. 2020. V. 1690. P. 012072. <http://doi.org/10.1088/1742-6596/1690/1/012072>
6. *Atkin E., Bulbakov I., Malankin E., Ivanov P., Normanov D., Petrovskiy S., Shumikhin V., Ivanov V., Voronin A., Samsonov V.* // IEEE 30th International Conference on Microelectronics (MIEL). 2017. P. 225. <http://doi.org/10.1109/MIEL.2017.8190108>

7. *Ciobanu M., Marghitu O., Constantinescu V. et al. // IEEE Trans Nucl Sci. 2021. V. 68. № 6. P. 1325. <http://doi.org/10.1109/TNS.2021.3073487>*

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис. 1. Структура микросхемы.

Рис. 2. Структурная схема одного канала.

Рис. 3. Эквивалентный шумовой заряд в зависимости от емкости детектора.

Рис. 4. Зависимость входного сопротивления от сопротивления регулирования.

Рис. 5. Зависимость длительности импульса на выходе усилительных каскадов (зеленый) и расширителя (синий) в зависимости от входного заряда.

Рис. 6. Диаграмма сигналов на выходе расширителя двух каналов.

Рис. 7. Форма типовых сигналов в канале микросхемы.

Рис. 8. Диаграммы сигналов на входе канала и на выходе предусилителя при проведении временного шумового анализа.

Рис. 9. Топология всей микросхемы SPD NINO.

Рис. 10. Импульсный отклик на LVDS-выходе каналов микросхемы.

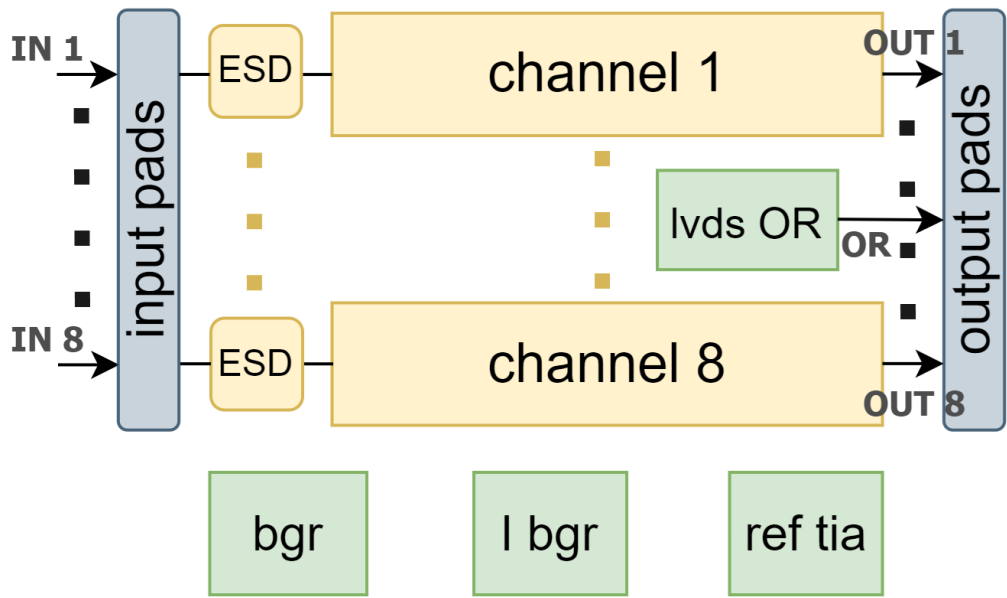


Рис. 1.

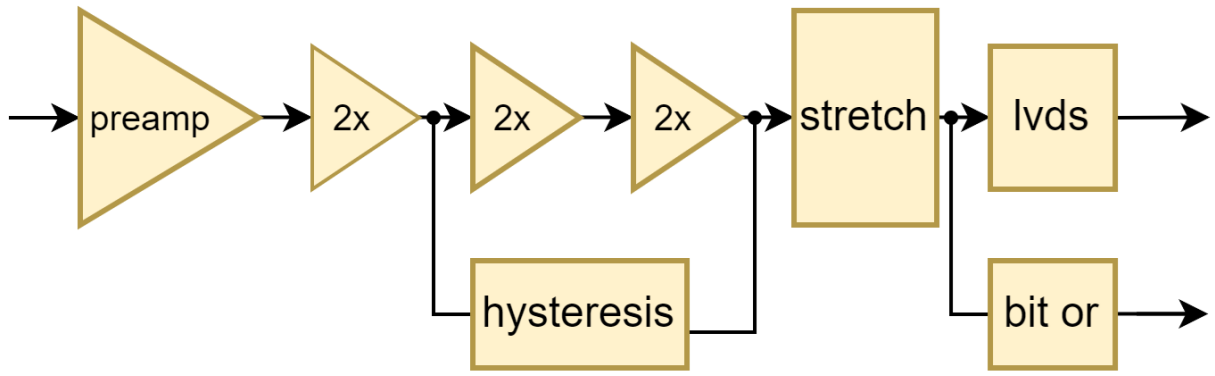


Рис. 2.

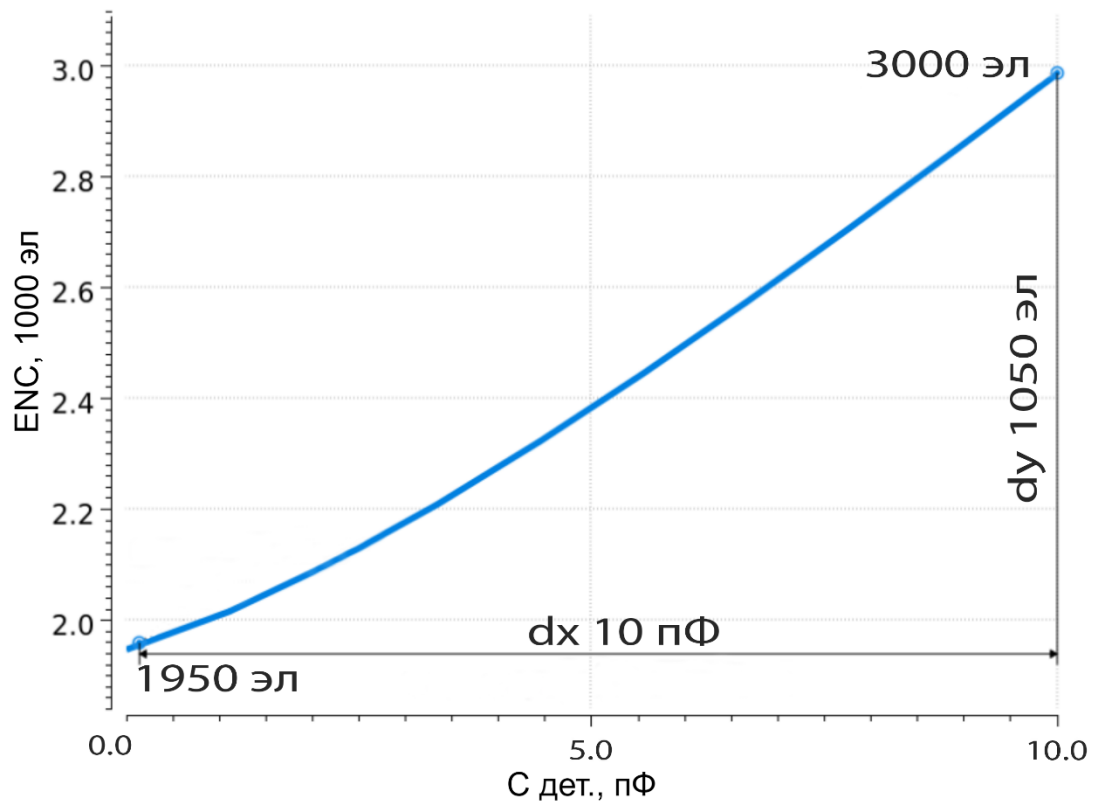


Рис. 3.

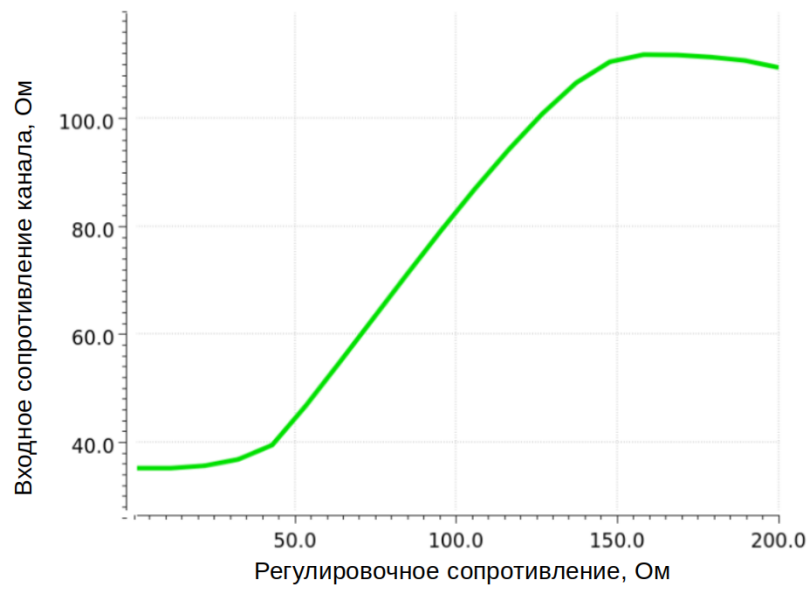


Рис. 4.

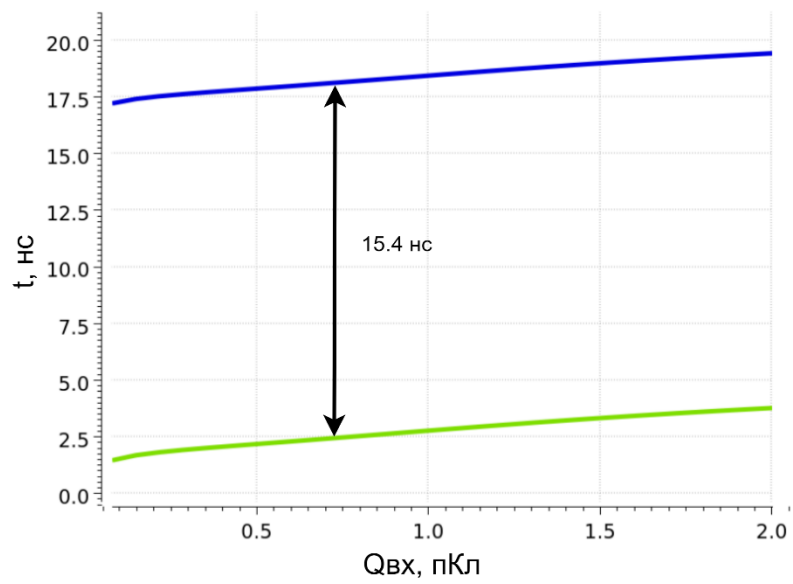


Рис. 5.

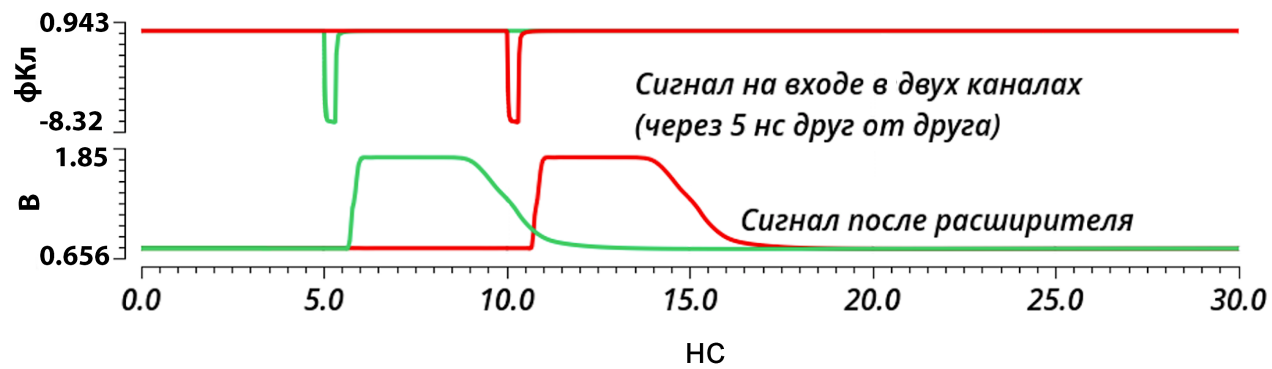


Рис. 6.

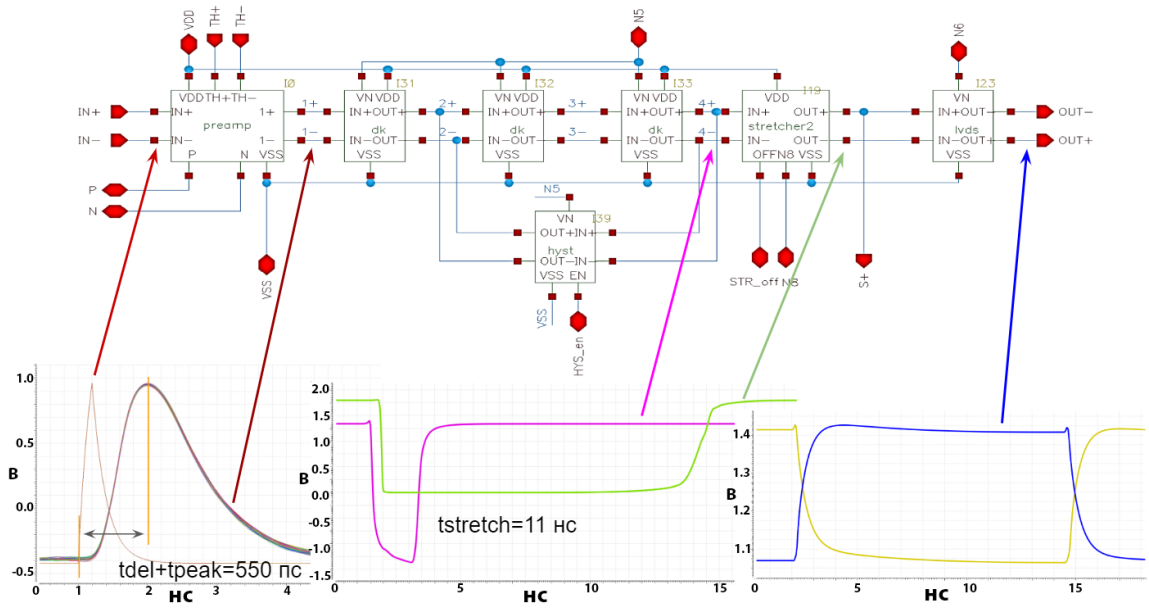


Рис. 7.

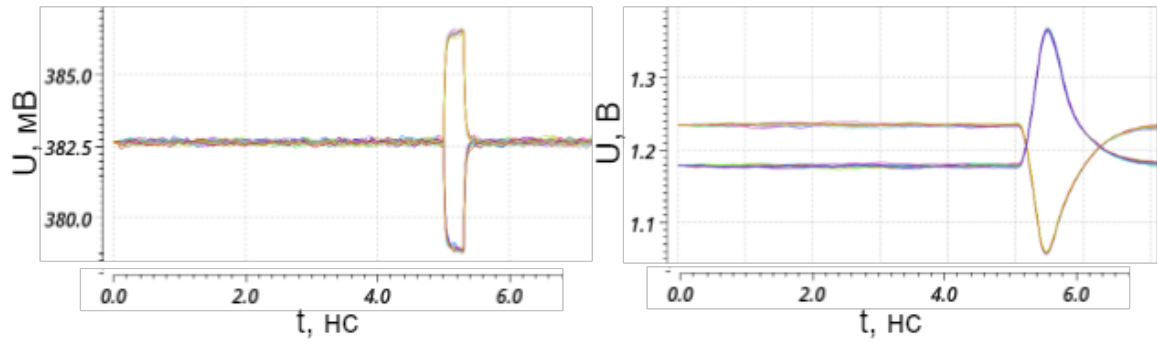


Рис. 8.

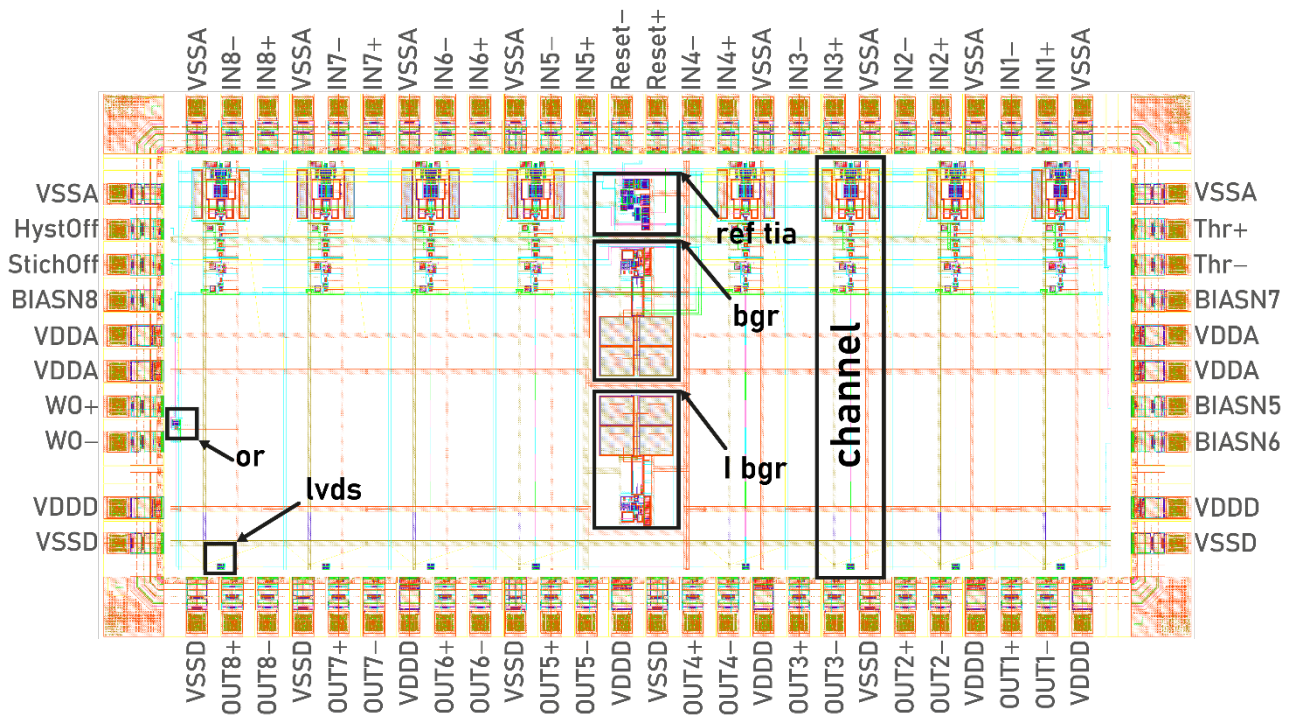


Рис. 9.

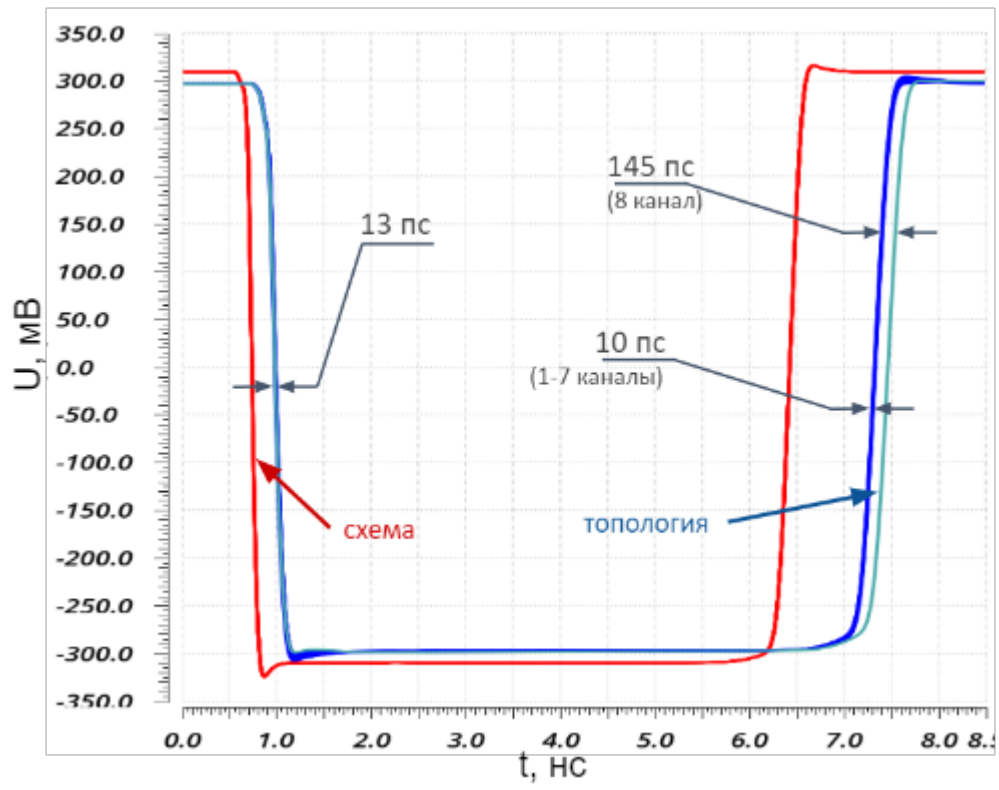


Рис. 10.

Для связи с авторами:

Аткин Эдуард Викторович

E-mail: evatkin@mephi.ru

Ямалиев Салават

E-mail: sala2000.0000@gmail.com

Солин Александр Викторович

E-mail: solin@hep.by

Усенко Евгений Анатольевич

E-mail: Eugueni.oussenko@cern.ch

Тел.: 8-962-975-57-66 (моб.)

E-mail: e.usenko180@outlook.com

(со старой карточки)

~~Для переводчика:~~

Prototype readout electronics for capacitive detectors

~~A description of a prototype of reading electronics for capacitive detectors based on a specialized integrated circuit designed specifically for the removal and preprocessing of signals from flat resistive chambers of the SPD experiment at the NIKA JINR collider under construction (Dubna) is presented~~