

УДК 621.375.4

КМОП-зарядочувствительный усилитель для пиксельного детектора

Ю. Б. Рогаткин

НИЦ «Курчатовский институт» - НИИСИ, Москва, Россия, ryb@cs.niisi.ras.ru;

Аннотация. Разработан зарядочувствительный усилитель в архитектуре аналоговой части электроники для пиксельного детектора регистрации заряженных частиц. Разработанный зарядочувствительный усилитель позволяет снизить влияние тока утечки детектора, а также осуществлять регулировку соотношения заряда к выходному напряжению, установочного напряжения, рабочего тока и потребляемой мощности. Усилитель обладает низкими шумами и сверхнизкой мощностью потребления.

Ключевые слова: зарядочувствительный усилитель, пиксельный детектор

1. Введение

В последние два десятилетия получило широкое развитие область разработки передовых гибридных пиксельных детекторов, позволяющих точно обнаруживать отдельные рентгеновские фотоны или частицы в каждом конкретном случае [1]. Эти технологии находят широкое применение в различных научных областях, включая медицинскую визуализацию, рентгеновские камеры на синхротронах, анализ материалов на основе рентгеновских лучей, электронную микроскопию и другие. Результатом данных разработок является Medipix — семейство гибридных пиксельных детекторов для счёта фотонов и отслеживания частиц. Такие детекторы состоят из двух основных частей: полупроводникового детектора и считывающей микросхемы. Две части — отдельные компоненты, их можно разрабатывать и оптимизировать отдельно друг от друга. В основе Medipix1 заложен принцип архитектуры подсчета одиночных фотонов с шагом пикселя 170 мкм и возможностью получения рентгеновских изображений без помех благодаря использованию интерфейса обработки импульсов при установке порога обнаружения значительно выше уровня фонового шума [2]. Medipix2 показал возможность получения спектроскопических изображений с небольшим шагом пикселя в 55 мкм, используя двойные пороговые значения на пиксель [3]. В Medipix3 реализуется меж пиксельный алгоритм непосредственно на пикселе размером 55 мкм. Это позволило устранить искажение

энергетического спектра, вызванное диффузией заряда [6, 7]. Medipix4 позволяет обрабатывать специализированную интегральную схему с четырех сторон с минимальной мертвой зоной [8]. Падающая частица в активных пиксельных детекторах цифровых систем регистрации элементарных частиц индуцирует электрический заряд, величина которого описывает параметры частицы в детекторе. Поскольку электрический заряд, создаваемый одной частицей, относительно слаб, сигнал детектора сначала усиливается непосредственно в зоне облучения и только затем передается дальше. Поэтому одной из основных составляющих считывающей электроники, расположенной в непосредственной близости от детектора, является зарядочувствительный усилитель.

2. Зарядочувствительный усилитель

Разработанный зарядочувствительный усилитель (ЗЧУ) предназначен для архитектуры подсчета одиночных фотонов или частиц с шагом пикселя 75 мкм и построен на основе дифференциального интегрирующего усилителя с цепью отрицательной обратной связи для автоматической компенсации тока утечки детектора. Упрощенная принципиальная схема ЗЧУ представлена на рисунке 1. Имеется возможность подстройки коэффициента усиления зарядочувствительного усилителя путем подачи цифрового сигнала на вход “gain<1:0>”. Входы “vfbk”, “vbp2” и “vbn1” нужны для задания режима по постоянному

току. Вход подключения к детектору – “bump”, выход ЗЧУ – “vout_pr”. Принцип автоматической обратной связи для компенсации токов утечки детектора описан в работе [8]. Дифференциальный КМОП-усилитель на транзисторах T3 и T4 обеспечивает быстрый возврат к нулю через транзисторы обратной связи, а управляемые транзисторы T3 и T15 компенсирует утечку постоянного тока детектора. Преимущество такой конфигурации в том, что она позволяет компенсировать положительные токи постоянного тока (накопление дырок), превышающие $I_{T2}/2$, при этом отрицательные токи (накопление электронов) должны быть равны или меньше $I_{T2}/2$.

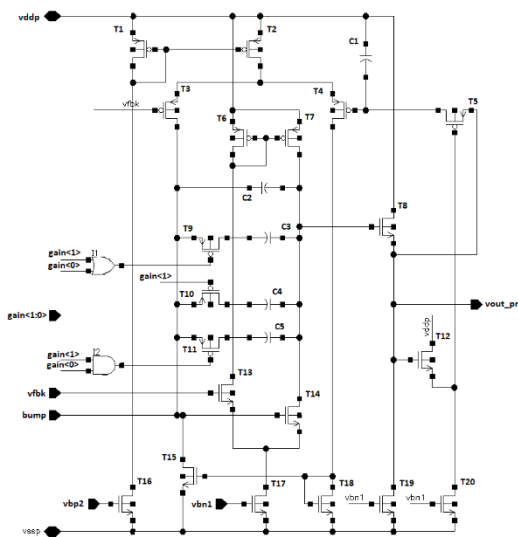


Рис. 1. Упрощенная принципиальная схема ЗЧУ

Изменение коэффициента усиления достигается путем включения дополнительных интегрирующих конденсаторов C3, C4 и C5 в цепь отрицательной обратной связи основного дифференциального усилителя на транзисторах T13 и T14.

Для исключения влияния импульсного выходного сигнала ЗЧУ на работу отрицательной обратной связи автоматической компенсации тока утечки детектора предусмотрен ФНЧ на транзисторе T5 и конденсаторе C1. Задание режима по постоянному току при работе ЗЧУ в составе пиксельной матрицы может обеспечиваться либо путем подачи сигналов с устанавливающих цифро-аналоговых преобразователей [9], либо с помощью специальной схемы задания режима как описано в работе [10].

3. Результаты расчетов и моделирования

ЗЧУ был спроектирован в рамках КМОП технологии с проектными нормами в несколько десятков нанометров. Вид топологии ЗЧУ представлен на рисунке 2. Размеры собственно ЗЧУ без учета конденсатора ФНЧ C1, который выполнен в верхних металлах и не препятствует размещению других элементов под ним, составляет $16 \text{ мкм} \times 14 \text{ мкм}$.

Ниже приведены результаты моделирования с учетом паразитных элементов экстрагированных из топологии ЗЧУ.

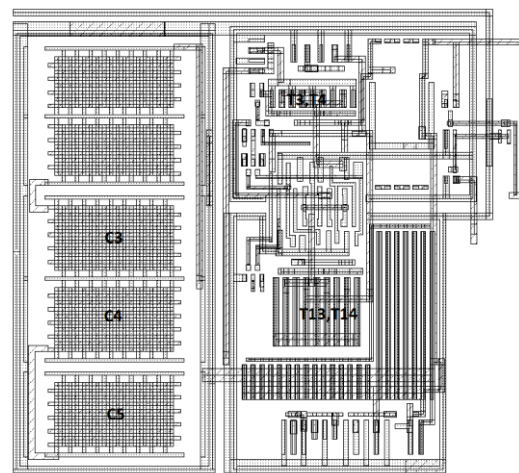


Рис. 2. Топология зарядочувствительного усилителя

3.1. Шумовые характеристики ЗЧУ

Одним из важных параметров ЗЧУ является эквивалентный заряд шума (ENC) на входе усилителя — это заряд сигнала, который создаёт на выходе амплитуду, равную среднеквадратичному шуму. Значение ENC зависит от емкости детектора C_{det} , от тока утечки детектора $I_{leakage}$, от емкости входного полевого транзистора C_{in} а также включает как тепловой, так и мерцающий шум. Необходимо обратить внимание на минимизацию емкости ЗЧУ и тока утечки детектора, поскольку ENC существенным образом зависит от этих параметров. Проблемы с током утечки становятся критическими, особенно после облучения, при котором ток утечки достигает нескольких наноампер. В данной работе ЗЧУ проектировался с возможностью работы от детекторов с током утечки от 0 до 50 нА. В этом диапазоне токов утечки и рациональном выборе параметров входного

транзистора при емкости детектора до 50 фФ расчетная плотность шумов не превышает 5,6 нВ2/Гц в полосе частот от 0 до 1кГц.

3.2. Влияние токов утечки на усилительные характеристики ЗЧУ

Обеспечена возможность работы ЗЧУ с детекторами, имеющими ток регистрации события как втекающего, так и вытекающего направления. На рисунке 3 представлены результаты моделирования зависимости выходного сигнала ЗЧУ от входного сигнала, пересчитанного в Ke^- . При моделировании на вход ЗЧУ подавался прямоугольный сигнал тока длительностью 10 нс. Величине входного сигнала в 1 Ke^- соответствует ток амплитудой 16 нА. На рисунке 3 представлены зависимости для различных направлений тока детектора и различных величинах тока утечки.

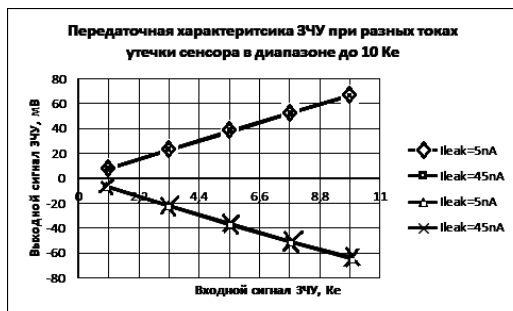


Рис. 3. Зависимость выходного сигнала ЗЧУ от входного заряда

Из анализа результатов, представленных на рисунке 3 видно, что изменение тока утечки детектора от 5 нА до 45 нА с одной стороны не влияет на усилительные свойства ЗЧУ, а с другой стороны - зависимости для различных направлений тока детектора отличаются только полярностью и имеют практически одинаковый вид.

3.3. Усилительные характеристики ЗЧУ

Разработанный ЗЧУ предназначен для работы в четырех диапазонах усиления при величине входного заряда до 10 Ke^- , до 20 Ke^- , до 30 Ke^- и до 40 Ke^- . При максимальном усилении ЗЧУ ($\text{gain}<1:0>=11$) ток детектора изменялся от 16 нА, что соответствует входному заряду 1 Ke^- , до 160нА. Коэффициент усиления ЗЧУ при этом составил 6,71 мВ/ Ke^- . Моделировались передаточные характеристики ЗЧУ с различными величинами усиления при токе утечки детектора 5 нА, как наиболее характерном для современных детекторов. Результаты представлены на рисунке 4.

Значения коэффициентов усиления в разных диапазонах сведены в таблице 1.

Таблица 1

Диапазон входного заряда, Ke^-	Значение кода $\text{gain}<1:0>$	Коэффициент усиления, мВ/ Ke^-
до 10	1 1	6,71
до 20	1 0	3,44
до 30	0 1	2,31
до 40	0 0	1,74

В таблице 1 и далее при анализе данного материала следует учитывать особенности используемой при проектировании технологии. В качестве конденсаторов использовались металлические конденсаторы crtmom . Особенностью данных конденсаторов является наличие определенного дискрета в выборе величины емкости. Поскольку данные конденсаторы широко использовались и в ряде случаев определяли основные характеристики блоков аналоговой части пикселя, точно «выставить» требуемые величины параметров было весьма проблематично. Так из таблицы 2 видно, что коэффициент усиления меняется не совсем пропорционально диапазону входного заряда. Диапазон изменяется в 4 раза, а коэффициент усиления изменяется в 3,86 раза. Однако, данное обстоятельство может учитываться при работе с ИМС.

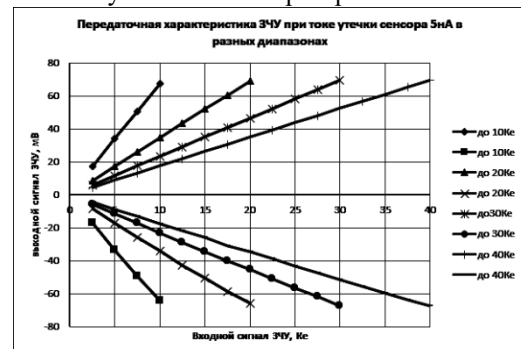


Рис. 4. Зависимости выходного сигнала ЗЧУ от входного заряда в разных диапазонах усиления

Расчетная нелинейность передаточной характеристики ЗЧУ в диапазоне до 10 Ke^- не превышает 0,7%, а в диапазоне до 40 Ke^- - 1,8%.

На рисунках 5 и 6 представлена форма выходного сигнала ЗЧУ при разных значениях входного сигнала.

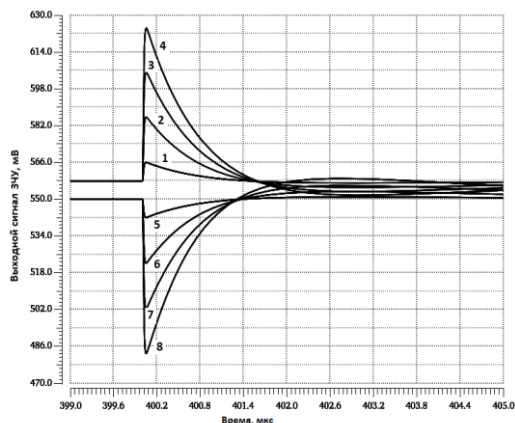


Рис.5. Выходной сигнал ЗЧУ при токе утечки детектора 5 нА: кривые 1-4 для вытекающего тока детектора, кривые 5-8 для втекающего; кривые 1,5 соответствуют току 19 нА, кривые 2,6 – 66 нА, кривые 3,7-113 нА и кривые 4,8-160 нА

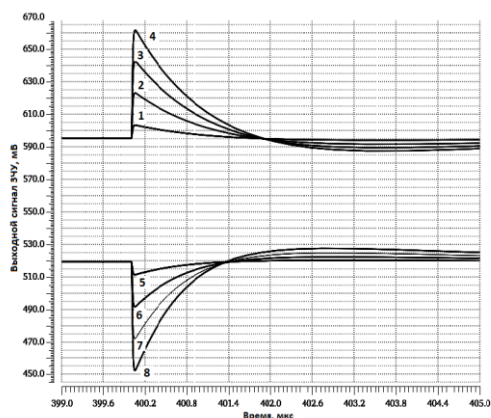


Рис. 6. Выходной сигнал ЗЧУ при токе утечки детектора 45 нА: кривые 1-4 для вытекающего тока детектора, кривые 5-8 для втекающего; кривые 1,5 соответствуют току 19 нА, кривые 2,6 – 66 нА, кривые 3,7-113 нА и кривые 4,8-160 нА

На рисунке 7 приведена форма выходного сигнала ЗЧУ в разных диапазонах усиления.

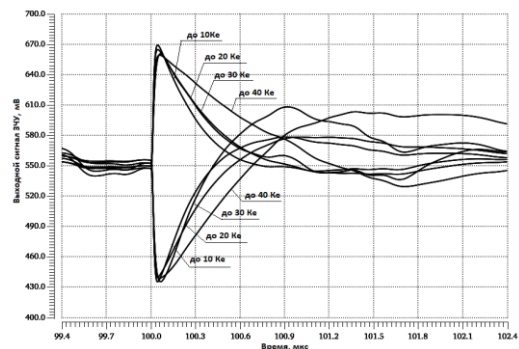


Рис7. Выходной сигнал ЗЧУ в разных диапазонах усиления

4. Заключение

Была разработана архитектура аналоговой электроники пиксельного детектора, позволяющая снизить ток утечки детектора и шумы ЗЧУ, а также регулировать соотношение заряда к выходному напряжению, установочное напряжение, рабочий ток и потребляемую мощность. Была разработана топология ЗЧУ по технологическим нормам в несколько десятков нанометров со схемой компенсации тока утечки, потребляющая сверхнизкую мощность около 1,5 мкВт. Другими основными параметрами ЗЧУ являются следующие: двуполярный выходной сигнал со временем достижения максимума около 20 нс и максимальном коэффициенте передачи 6,71 мВ/Ке⁻. Усредненная по диапазонам усиления нелинейность передаточной характеристики ЗЧУ не превышает 1,0%, а эквивалентный уровень шума в диапазоне до 10 Ке⁻ с емкостью детектора Cdet = 50 фФ составляет около 115 е⁻.

Работа выполнена в рамках темы № FNEF-2024-0003 «Методы разработки аппаратно-программных платформ на основе защищенных и устойчивых к сбоям систем на кристалле и сопроцессоров искусственного интеллекта и обработки сигналов».

CMOS charge-sensitive amplifier for pixel Detector

Y. B. Rogatkin

Abstract. A charge-sensitive amplifier has been developed in the architecture of the analog part of electronics for a pixel detector for detecting charged particles. The developed charge-sensitive amplifier reduces the effect of the detector leakage current, as well as adjust the ratio of charge to output voltage, setting voltage, operating current and power consumption. The amplifier has low noise and ultra-low power consumption.

Keywords: charge-sensitive amplifier, pixel detector

Литература

1. E.H. Heijne, History and future of radiation imaging with single quantum processing pixel detectors, *Radiation Measurements* 140 (2021) 106436.
2. M. Campbell, E. Heijne, G. Meddeler, E. Pernigotti and W. Snoeys, A readout chip for a 64/spl times/64 pixel matrix with 15-bit single photon counting, *IEEE Transactions on Nuclear Science* 45 (1998) 751.
3. X. Llopart, M. Campbell, R. Dinapoli, D. San Segundo and E. Pernigotti, Medipix2: A 64-k pixel readout chip with 55-/spl mu/m square elements working in single photon counting mode, *IEEE Transactions on Nuclear Science* 49 (2002) 2279.
4. M. Chmeissani, M. Maiorino, G. Blanchot, G. Pellegrini, J. Garcia, M. Lozano et al., Charge sharing measurements of pixilated cdte using medipix-ii chip, in *Proceedings of the 21st IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference (IEEE Cat. No.04CH37510)*, vol. 1, pp. 787–791 Vol.1, 2004, DOI.
5. L. Tlustos, Performance and limitations of high granularity single photon processing X-ray imaging detectors: дис. ... канд.– Vienna, Tech. U., Atominst., 2005. .
6. R. Ballabriga, M. Campbell and X. Llopart, ASIC developments for radiation imaging applications: The medipix and timepix family, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 878 (2018) 10.
7. R. Ballabriga, M. Campbell, E.H.M. Heijne, X. Llopart and L. Tlustos, The medipix3 prototype, a pixel readout chip working in single photon counting mode with improved spectrometric performance, *IEEE Transactions on Nuclear Science* 54 (2007) 1824.
8. F. Kruppenacher, *Nucl. Instr. and Meth. A* 305 (1991) 527.
9. Design challenges of hybrid pixel detectors for spectral imaging. Xavier Llopart1, On behalf of the Medipix4. Collaboration. 1. EP Department, CERN, 1211 Geneva 23, Switzerland.
10. Ю.Б.Рогаткин. Двухкаскадный операционный усилитель для аналого-цифрового преобразователя конвейерного типа. "Нано- и микросистемная техника" №4, 2025 г. с. 201-208.

Поступила в редакцию / Received: 17.03.2026.

Поступила после рецензирования / Revised: 28.03.2026.

Принята к печати / Accepted: 31.03.2026.