

УДК 621.396.9

СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ ИНТЕГРАЛЬНАЯ МИКРОСХЕМА ДЛЯ КООРДИНАТНЫХ СЧЁТНЫХ ДЕТЕКТОРОВ

© А. А. Глушак^{1,2,3,4,5,6}, В. М. Аульченко¹, В. В. Жуланов^{1,2},
Л. И. Шехтман^{1,2,4,6}

¹Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 11

²Новосибирский государственный университет,
630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2

³Центр коллективного пользования СКИФ Института катализа им. Г. К. Борескова,
630090, г. Новосибирск, просп. Морской, 2

⁴Томский государственный университет,
634050, г. Томск, просп. Ленина, 36

⁵Новосибирский государственный технический университет,
630073, г. Новосибирск, просп. К. Маркса, 20

⁶Институт химии твёрдого тела и механохимии СО РАН,
630128, г. Новосибирск, ул. Кутателадзе, 18
E-mail: A.A.Glushak@inp.nsk.su

Представлена разработка многоканальной специализированной интегральной микросхемы (ASIC) для регистрации и обработки сигналов с микрополосковых сенсоров в координатных детекторах синхротронного излучения, разрабатываемых в ИЯФ СО РАН для оснащения экспериментальных станций ЦКП СКИФ. Микросхема содержит 64 независимых канала регистрации фотонов с 4 порогами разделения по энергиям. Диапазон регистрируемых энергий составляет от 3 до 60 кэВ. Подробно описана структура и основные параметры электроники канала регистрации для прямого счёта фотонов.

Ключевые слова: синхротронное излучение, координатный рентгеновский детектор, микрополосковый сенсор, канал регистрации, усилитель сигналов.

DOI: 10.15372/AUT20240107

EDN: LTMNUA

Введение. Более полувека синхротронное излучение (СИ) применяется в исследованиях динамики физических и химических процессов [1–4]. Короткие вспышки излучения, генерируемые в источниках СИ со строго определённой периодичностью и с малой длительностью (~ 1 нс), позволяют проводить измерения с высоким временным и пространственным разрешениями.

Эти исследования основаны на регистрации координатного распределения интенсивности излучения, прошедшего через исследуемый объект, параметры которого меняются в результате физического воздействия или химической реакции. В таких экспериментах используются координатные рентгеновские детекторы, позволяющие фиксировать состояния исследуемого объекта через определённые временные интервалы, называемые кадрами. Длительность кадров должна быть существенно короче характерных времён исследуемого процесса и может варьироваться от десятков минут для медленных процессов и до десятков наносекунд для ударно-волновых процессов и детонаций.

На данный момент лучшие результаты в экспериментах с использованием СИ достигаются с помощью многоканальных детекторов с координатным разрешением ~ 50 мкм, работающих либо в счётном, либо в интегрирующем режимах. Детекторы в счётном режиме регистрируют срабатывания от каждого фотона, попавшего в детектор, с энергиями

выше установленных значений. Такие детекторы используются для относительно медленных процессов, например, в экспериментах по малоугловому рассеянию.

Интегрирующие детекторы применяются для исследования сверхбыстрых процессов. Особенность таких экспериментов состоит в том, что для обеспечения высокой статистической точности измерения интенсивности потока квантов, прошедших через исследуемый образец, необходимо за весьма короткое время экспозиции (время кадра) зарегистрировать сигналы от большого их количества. Так, для обеспечения статистической точности $\sim 0,1\text{--}0,3\%$ необходимо за время кадра длительностью 20–50 нс зарегистрировать $\geq 10^5$ фотонов. Сделать это можно только в интегрирующем режиме работы электроники, при котором в отличие от счётного режима регистрируется суммарный сигнал от всех фотонов, попавших в детектор за время кадра.

В Институте ядерной физики СО РАН координатные рентгеновские детекторы разрабатываются, изготавливаются и используются более 25 лет. Примером может служить газовый однокоординатный детектор ОД-3М [5], который основан на технологии многопроволочных пропорциональных камер и имеет пространственное разрешение 180 нм для энергии фотонов 8 кэВ. Для обеспечения пространственного разрешения меньше 100 мкм в широком диапазоне энергии фотонов, а также быстродействия до 1 МГц/канала необходимо применение координатных микрополосковых сенсоров с шагом полосок 50 мкм и апертурой 50 мкм на основе кремния или арсенида галлия в сочетании с многоканальными специализированными интегральными микросхемами, обеспечивающими нужные параметры по быстродействию, отношению сигнал/шум и скорости записи. Именно это реализуется в новых координатных рентгеновских детекторах счётного (SciCODE) и интегрирующего типов (DIMEX-Si), разрабатываемых для использования на станции 1-3 «Быстропротекающие процессы» ЦКП СКИФ [6–7].

Цель представленной работы заключается в разработке 64-канальной интегральной микросхемы SciCODE64 для использования в качестве элемента электроники регистрации в счётных детекторах для обработки сигналов с микрополосковых сенсоров на основе кремния с шагом полосок 50 мкм.

Специализированная интегральная микросхема SciCODE64. Архитектура специализированной интегральной микросхемы базируется на результатах разработки и тестирования её 8-канального прототипа SICOD8A [8]. Разработка выполнена по технологии КМОП 180 нм. На кристалле размером $3 \times 5 \text{ мм}^2$ размещены 64 идентичных канала регистрации, структура которых описана ниже.

Структура электронного канала микросхемы SciCODE64 представлена на рис. 1. Канал включает в себя усилитель, четыре компаратора с управляемыми порогами, четыре 8-разрядных счётчика, считающих число срабатываний компараторов в течение заданного интервала (времени кадра), четыре 6-разрядных цифро-аналоговых преобразователя (ЦАП) и два последовательных регистра ввода-вывода для установки индивидуальных порогов и считывания содержимого счётчиков. По окончании времени кадра информация со счётчиков переписывается в выходной сдвиговый регистр и далее сохраняется во внешней памяти. Установка порогов компараторов осуществляется с помощью четырёх внешних напряжений, называемых глобальными порогами и подаваемых на четыре компаратора всех каналов, и индивидуальных напряжений от внутренних ЦАП, которые позволяют выполнять индивидуальную подстройку порогов всех компараторов по отдельности.

Усилитель является важнейшей частью канала регистрации, определяющий его основные характеристики — уровень собственных шумов и быстродействие. Усилитель состоит из входного зарядочувствительного предусилителя (ЗЧУ) и следующего за ним формирующего усилителя с регулируемым коэффициентом усиления.

Зарядочувствительный предусилитель представляет собой усилитель с интегрирующей отрицательной обратной связью. Его схема показана на рис. 2.

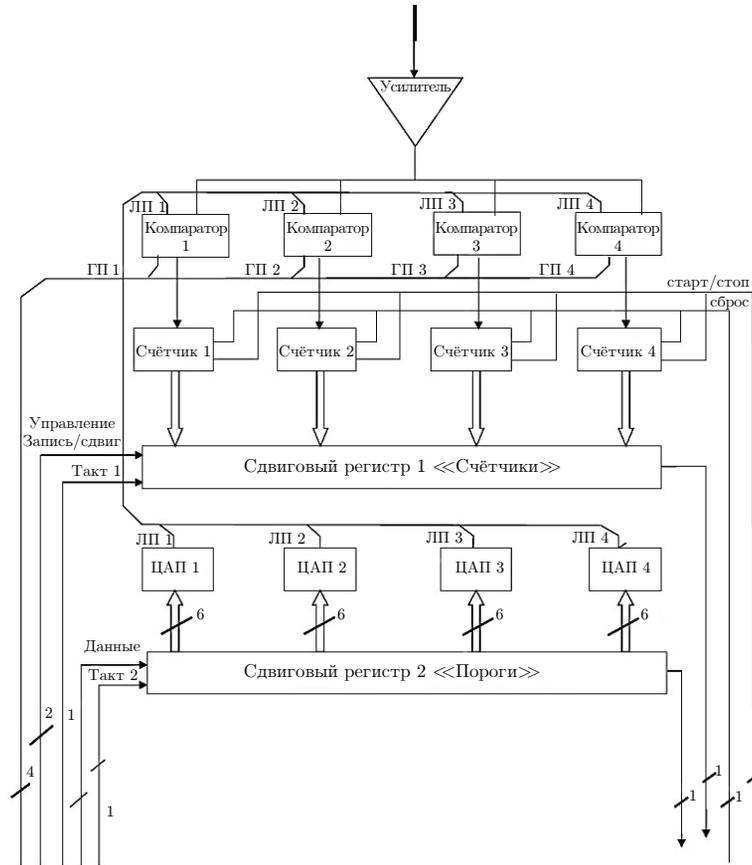


Рис. 1. Электронный канал регистрации ASIC SciCODE64

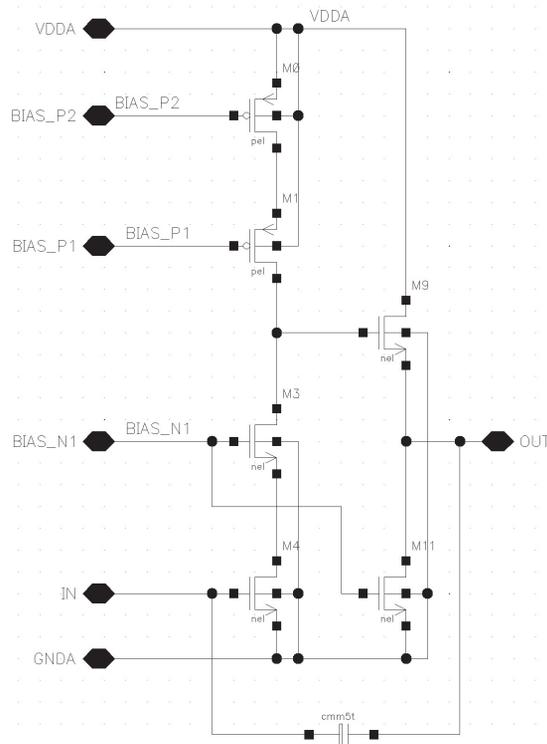


Рис. 2. Схема зарядочувствительного предусилителя

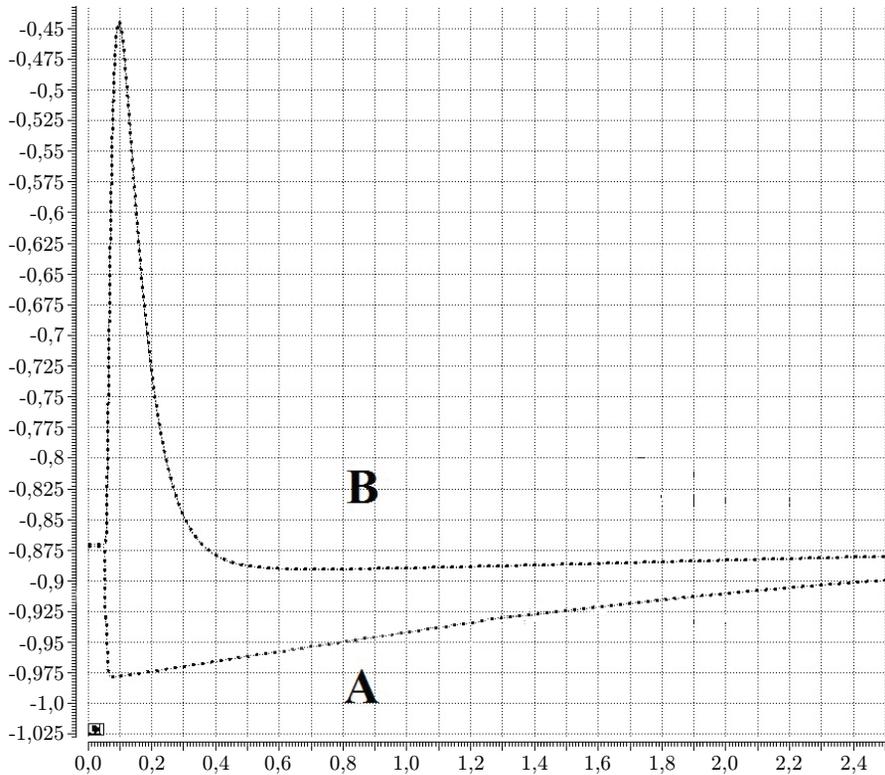


Рис. 3. Формы сигналов на выходах ЗЧУ (А) и формирующего усилителя (В)

Простейшая интегрирующая цепь ЗЧУ состоит из параллельно соединённых сопротивления и ёмкости, через которые осуществляется отрицательная обратная связь. Основной параметр ЗЧУ — эквивалентный шумовой заряд (ENC) — определяет отношение сигнал/шум, который растёт с увеличением ёмкости и уменьшается с ростом сопротивления цепи обратной связи. Величина $ENC = 250 \bar{e}$, соответствующая сигналу от кванта с энергией ~ 1 кэВ, достигается при $C_{oc} = 50$ фФ и $R_{oc} = 40$ МОм.

Возможность увеличения сопротивления ограничена средним входным током, создаваемым как регистрируемыми сигналами, так и током утечки источника сигналов, поскольку приводит к смещению рабочих точек транзисторов. Так, например, средний входной ток канала при загрузке квантами с энергией 30 кэВ и средней частотой 1 МГц, предельной по заявляемым параметрам, составляет 1,2 нА, что при $R_{oc} = 40$ МОм вызывает смещение среднего уровня потенциала на выходе интегрирующего предусилителя ≈ 50 мВ и является существенным при напряжении питания 1,8 В. На рис. 3 показан вид сигналов после ЗЧУ и формирующего усилителя.

Значительно ослабить влияние среднего входного тока позволяет использование вместо пассивного сопротивления так называемой схемы активного разряда, принципиальная схема которого представлена в [9].

Входным сигналом $U(t)$ для схемы активного разряда является сигнал с выхода ЗЧУ. На выходе схемы в простейшем случае создаётся ток вида $I(t) = -SU(t)$, который подаётся на интегрирующую ёмкость для её разряда. Параметр S имеет размерность проводимости, а его величина определяет постоянную времени интегрирования ЗЧУ:

$$U(t) = \frac{Q(t)}{C_{int}} e^{-tS/C_{int}}, \quad (1)$$

где $Q(t)$ — заряд на интегрирующей ёмкости, а $C_{int}/S = \tau_{int}$ в терминах обычной RC-цепи; $R = 1/S$.

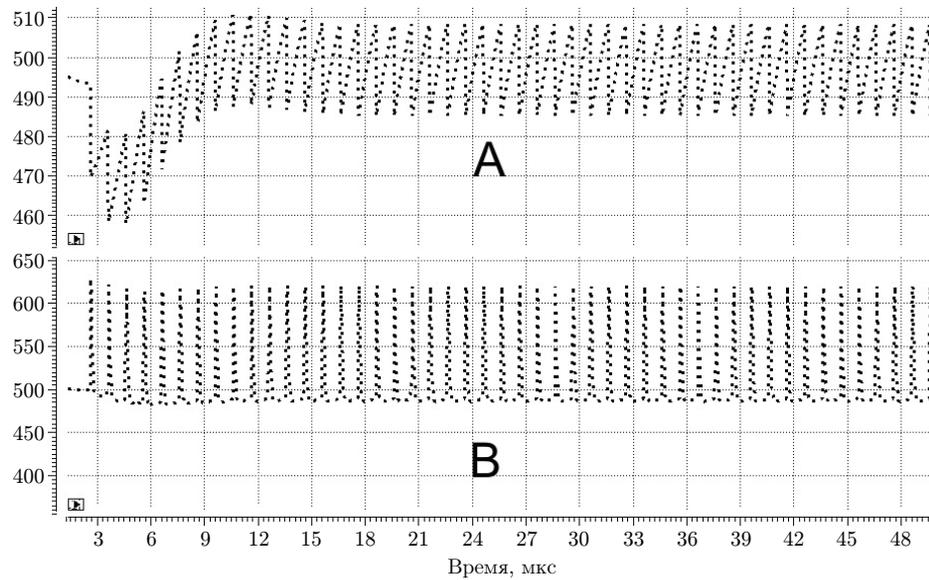


Рис. 4. Выходные сигналы интегрирующего предусилителя (А) и формирующего усилителя (В) при токе утечки сенсора 30 нА

При использовании сенсоров с током утечки, сравнимым или заметно превышающим средний ток от входных сигналов, должна быть использована более сложная функция отклика схемы активного разряда:

$$S(t) = S_1 + S_2(1 - e^{-t/\tau_{\text{leak}}}). \quad (2)$$

Здесь параметр S_1 по-прежнему определяет время интегрирования ЗЧУ для $t \ll \tau_{\text{leak}}$, а новый параметр S_2 вместе с τ_{leak} — реакцию на изменение тока утечки. Для этого должны быть выполнены дополнительные условия:

$$\begin{cases} S_2 \gg S_1, \\ S_1 \gg S_2(1 - e^{-t/\tau_{\text{leak}}}) \quad \text{для } 0 \leq t \sim \tau_{\text{int}}. \end{cases} \quad (3)$$

На рис. 4 показан вид сигналов на выходах предусилителя (А) и формирующего усилителя (В) для вида $S(t)$ при токе утечки 30 нА. Переходной процесс на интервале от 0 до 10 мкс связан с тем, что ток утечки при моделировании включается в момент времени $t = 0$.

Дополнительной важной функцией схемы активного разряда является стабилизация по постоянному току потенциала на выходе ЗЧУ, что необходимо для нормальной работы каскадов усилителя.

Формирующий усилитель. Формирующая часть тракта усиления, упрощённая блок-схема которого представлена на рис. 5, состоит из двух каскадов. Первый каскад формирующего усилителя с коэффициентом усиления ~ 5 и второй каскад с регулируемым коэффициентом усиления от 1 до 2 охвачены времязависимой отрицательной обратной связью, что позволяет формировать сигнал на входе компараторов по длительности на уровне 300 нс по основанию, снижая суммарный коэффициент передачи усилителей до единицы для времён больше этой величины. После этого сформированные сигналы подаются на компараторы канала, пороги которых регулируются внешними напряжениями.

Цифро-аналоговые преобразователи. Шестиразрядные ЦАП построены на усилителях с резистивной отрицательной обратной связью и R-2R матрицах с ключами коммутации, управляемыми от сдвигового регистра «Пороги».

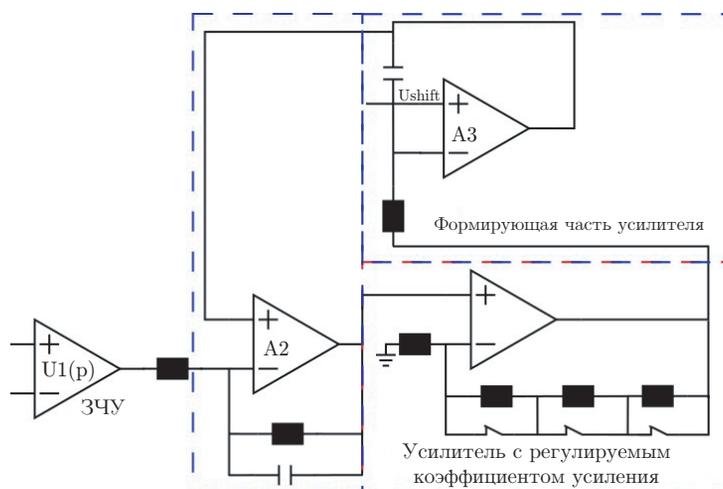


Рис. 5. Формирующая часть канала регистрации

Двоичные счётчики. Восемьразрядные двоичные счётчики, служащие для счёта числа срабатываний компараторов, построены на D-триггерах с дополнительными ключами для переписи данных в выходной сдвиговый регистр «Счётчик».

Управление работой микросхемы. В компараторах используются два типа управляемых порогов: глобальные и индивидуальные. Четыре глобальных порога подаются на 4 компаратора, точная подстройка порогов срабатывания каждого из них осуществляется с помощью индивидуальных порогов. Пороговые значения компараторов каждого канала изменяются с помощью цифро-аналоговых преобразователей, которые добавляют величину индивидуального порога к глобальному.

Сдвиговый регистр «Счётчик» служит для считывания и вывода данных со счётчиков. В сдвиговый регистр «Пороги» заносятся данные для управления ЦАП индивидуальных порогов, коэффициентами усиления, включением/выключением подачи тестового сигнала и выводом сигнала формирующего усилителя для наблюдения с помощью осциллографа.

Управление сдвиговыми регистрами и считывание данных осуществляется с помощью внешней программируемой логической интегральной схемы.

Заключение. Разработана интегральная 64-канальная микросхема для считывания сигналов с полосок микрополосковых координатных сенсоров рентгеновских детекторов счётного типа, разрабатываемых в ИЯФ СО РАН для оснащения экспериментальных станций на синхротроне СКИФ. Микросхема выполнена по технологии КМОП 180 нм на кристалле размером 3×5 мм². Напряжение питания +1,8 В, потребляемый ток 150 мА.

Финансирование. Разработка принципиальной схемы и топологии SciCODE64 частично поддержана грантом Российского научного фонда (№ 23-72-00060). Работы по изготовлению микросхемы выполнены при частичной поддержке гранта по Постановлению Правительства Российской Федерации № 220 от 09 апреля 2010 г. (Соглашение 075-15-2022-1132 от 01.07.2022 г.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Titov V. M., Pruuél E. R., Ten K. A. et al. Experience of using synchrotron radiation for studying detonation processes // Combust. Explos. Shock Waves. 2011. **47**, N 6. P. 615–626.

2. **Прууэл Э. Р., Тен К. А., Толочко Б. П. и др.** Реализация возможностей синхротронного излучения в исследованиях детонационных процессов // ДАН. Сер. Техническая физика. 2013. **448**, № 1. С. 38–42.
3. **Sharafutdinov M. R., Korchagin M. A., Shkodich N. F. et al.** Phases transformations in the Ni–Al system investigation by synchrotron radiation diffraction // Proc. of the XVI Int. Synchrotron Radiation Conf. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A. Novosibirsk, Russia, 10–14 July, 2007. **575**, Iss. 1–2. P. 149–151.
4. **Фетисов Г. В.** Синхротронное излучение. Методы исследования структуры веществ. М.: Физматлит, 2007. 672 с.
5. **Aulchenko V. M., Baru S. E., Dubrovin M. S. et al.** The OD-3 fast one-coordinate X-ray detector // Proc. of the 7th Int. Wire Chamber Conf. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A. Vienna, Austria, 13–17 Feb., 1995. **367**, Iss. 1–3. P. 79–82.
6. **Студенников А. А., Рубцов И. А., Прууэл Э. Р. и др.** Проект станции 1-3 «Быстропротекающие процессы» на источнике синхротронного излучения ЦКП СКИФ // Сб. тез. Междунар. конф. «Забабахинские научные чтения». Снежинск, Россия, 27 сент.–1 окт., 2021. С. 73–74.
7. **Рубцов И. А., Тен К. А., Прууэл Э. Р. и др.** Концептуальный проект станции 1-3 «Быстропротекающие процессы» // Технологическая инфраструктура Сибирского кольцевого источника фотонов «СКИФ»: сб. ст. Т. 1. 2022. С. 115–135.
8. **Aulchenko V., Glushak A., Shekhtman L. et. al.** One-dimensional detector for diffraction experiments at a synchrotron radiation beam // Phys. Part. Nucl. Lett. 2022. **19**, N 5. P. 493–496.
9. **Glushak A. A., Aulchenko V. M., Shekhtman L. I., Zhulanov V. V.** Development of Specialized Integrated Circuits for Coordinate X-Ray Detectors // Proc. of the IEEE XVI Int. Scientific and Technical Conference Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE). Novosibirsk, Russia, 10–12 Nov., 2023. P. 50–53.

Поступила в редакцию 15.07.2023

После доработки 26.10.2023

Принята к публикации 26.12.2023
