

УДК 53.087.65

РАЗРАБОТКА СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОЙ ИНТЕГРАЛЬНОЙ СХЕМЫ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ СИГНАЛОВ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ ПО ИЗУЧЕНИЮ БЫСТРОПРОТЕКАЮЩИХ ПРОЦЕССОВ

© В. М. Аульченко, В. В. Жуланов, Л. И. Шехтман

*Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 11
Новосибирский государственный университет,
630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2
E-mail: L.I.Shekhtman@inp.nsk.su*

Представлена разработка новой интегральной схемы, предназначенной для считывания сигналов в кремниевом микрополосковом детекторе в условиях экспериментов по наблюдению быстропротекающих процессов на пучке синхротронного излучения. Первые варианты такой схемы были установлены в прототипе детектора на основе микрополоскового кремниевого сенсора и тестировались на интенсивном пучке синхротронного излучения на накопителе ВЭПП-4М в Институте ядерной физики СО РАН. Результаты первых измерений показывают, что основные задачи этой разработки достигнуты: временное разрешение, частота смены кадров удовлетворяют первоначальным спецификациям, а максимальный регистрируемый сигнал в линейном режиме работы позволяет существенно увеличить регистрируемый поток фотонов по сравнению с предыдущей версией детектора, базирующейся на газовой технологии. Главной проблемой, обнаруженной при испытаниях прототипа, является сравнительно высокий уровень шума, который будет понижен в следующей версии интегральной схемы благодаря оптимизации некоторых схемных решений.

Ключевые слова: синхротронное излучение, микрополосковый кремниевый детектор, быстропротекающие процессы, специализированная интегральная схема.

DOI: 10.15372/AUT20200111

Введение. Высокая эффективность использования синхротронного излучения (СИ) для исследования динамики быстрых физических и химических процессов, убедительно продемонстрированная в последние годы в ряде работ [1–3], обусловлена тем, что короткие импульсы излучения, генерируемые в источниках СИ отдельными электронными сгустками, позволяют проводить исследования с высоким временным и координатным разрешением при наличии соответствующих детекторов. Наилучшие параметры здесь достигнуты при использовании многоканальных координатных детекторов с физическими регистрирующими каналами в виде полосковых структур, работающих в интегрирующем режиме, когда регистрируется и запоминается величина суммарного сигнала от всех фотонов, попавших в данный канал в течение одной вспышки СИ.

Результат измерения представляется в виде серии кадров (frames), содержащих информацию о величинах сигналов в каналах в последовательные моменты времени, соответствующие вспышкам СИ. Распределение величин сигналов по каналам и кадрам характеризует динамику координатного распределения интенсивности регистрируемого излучения, а минимальный интервал между кадрами, ограниченный условием не смешивания сигналов от соседних сгустков электронов, определяет количество измерений, которые могут быть сделаны за время развития процесса. При этом временное разрешение каждого измерения определяется длительностью вспышек СИ (от десятков пикосекунд до единиц наносекунд).

Детектор DIMEX (Detector for Imaging of Explosions) на протяжении 15 лет используется в экспериментах по изучению взрывных процессов на пучке синхротронного излучения в Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН (г. Новосибирск).

Детектор представляет собой ионизационную камеру высокого давления, наполненную смесью Хе—СО₂ (3 : 1) при абсолютном давлении $7 \cdot 10^5$ Па [4–9]. Для считывания сигналов применяется полосковая структура с шагом 0,1 мм, выполняющая функцию анода.

При размере регистрирующего канала $0,1 \times 0,5$ мм детектор обеспечивает регистрацию потока ~ 5000 фотонов/канал/сгусток с разрешением $\sim 0,2$ мм при частоте кадров до 10 МГц. Максимальный регистрируемый поток, определяющий статистическую точность измерения величин сигналов (в данном случае $\sim 1,5$ %), ограничивается объёмным зарядом ионов в газе, а координатное разрешение — диффузией электронов.

Детектор DIMEX применяется в двух экспериментальных методиках: измерение малоуглового рентгеновского рассеяния от исследуемого образца и рентгенография образца (получение проекционного рентгеновского изображения), требованиям которых параметры детектора удовлетворяют в разной степени.

Методика рентгенографии взрывающегося образца предъявляет жёсткие требования к детектору. Структура ударной волны, являющейся основным объектом исследования при рентгенографии, такова, что требуемое пространственное разрешение должно быть лучше 0,1 мм, т. е. в 2–4 раза выше, чем в существующем детекторе, а точность измерения сигнала на всём изображении должна быть не хуже по крайней мере 1 %. Поскольку диапазон изменения сигнала на изображении может достигать ~ 10 , то, необходимо увеличить динамический диапазон по меньшей мере в 10 раз и довести его до 10^5 фотонов/канал. Частоту измерений (смены кадров) также желательно увеличить и довести до ~ 20 МГц.

Для достижения вышеперечисленных параметров была начата разработка нового детектора на базе кремниевого сенсора с шагом полосок 50 мкм и соответствующей многоканальной специализированной микросхемы ASIC (Application Specific Integrated Circuit) регистрирующей электроники [10, 11]. Планируется, что финальная версия ASIC будет содержать 64 регистрирующих канала.

Специализированная интегральная схема DMXS6A. Загрузка 10^5 фотонов/канал с энергией 20 кэВ в кремний даёт сигнал $\sim 5 \cdot 10^8$ электронов или $8 \cdot 10^{-11}$ Кл, что при длительности импульса тока ~ 3 –5 нс соответствует амплитуде импульса ~ 20 мА.

С учётом многоканальности ASIC сигналы такой амплитуды не могут быть поданы прямо на её входы. Необходимо существенное их ослабление непосредственно на координатном сенсоре или вблизи него при сохранении количества регистрируемых за один кадр фотонов. С этой целью все сигнальные полоски через резисторы ~ 400 Ом соединяются с охранным кольцом сенсора, находящимся под постоянным потенциалом, и далее сигналы с них через резисторы 10 кОм подаются на входы интегральной схемы (ИС), специально разработанной для этой задачи.

Структура одного канала 6-канального прототипа интегральной схемы для работы с кремниевым координатным сенсором при больших нагрузках представлена на рис. 1. Канал содержит преобразователь импульсов напряжения в пропорциональные импульсы тока, схему компенсации постоянного тока преобразователя, четыре интегратора с коммутатором на входе и аналоговую память на восемь ячеек в каждом интеграторе. Такая структура канала с интеграторами обусловлена тем, что число фотонов, зарегистрированных в данном канале, пропорционально заряду, протёкшему в канале за время вспышки СИ.

Рабочий цикл одного интегратора состоит из фазы интегрирования, минимальная длительность которой составляет 20 нс, фазы запоминания величины выходного напряжения интегратора в очередной ячейке аналоговой памяти и фазы сброса, после чего процесс повторяется. Минимальная длительность полного цикла интегратора составляет 80 нс.

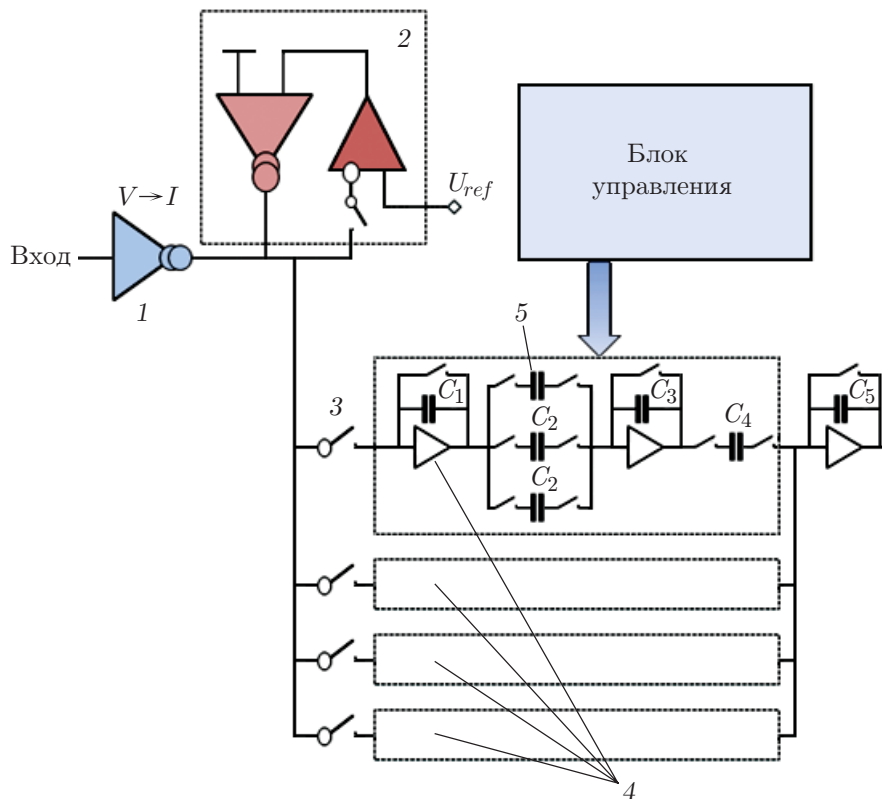


Рис. 1. Блок-схема структуры канала ИС DMXS6A: 1 — входной преобразователь напряжения в ток, 2 — устройство компенсации постоянного тока, 3 — коммутатор между входным преобразователем и интеграторами, 4 — четыре интегратора со сбросом, 5 — аналоговые ячейки памяти

Интеграторы через входной коммутатор подключаются ко входу поочередно со сдвигом на время фазы интегрирования, обеспечивая таким образом непрерывное измерение сигнала с минимальной длительностью кадра 20 нс.

Этот процесс повторяется циклически до окончания заданного времени измерения или до момента заполнения аналоговой памяти, глубина которой в DMXS6A составляет 32 кадра. Схема компенсации отключается на всё время измерения и не реагирует на сигналы, поступающие на вход канала. Интеграторы всех каналов ASIC работают синхронно под управлением общей схемы контроля.

Измерение параметров ASIC DMXS6A. Микросхемы (16 штук) были использованы в качестве регистрирующей электроники в прототипе детектора на основе кремниевого координатного сенсора с шагом полосок 50 мкм [10–12]. На рис. 2 представлен внешний вид прототипа с изображением топологии ИС DMXS6A на вставке. В центре находится кремниевый микрополосковый сенсор, 96 полосок которого в центральной части соединены с разъёмами с двух сторон. Платы электроники, содержащие восемь микросхем DMXS6A каждая, соединяются с центральной платой сенсора через разъёмы. Платы электроники располагаются таким образом, что сенсор можно облучать узким пучком СИ под малым углом в диапазоне $1,5\text{--}10^\circ$ (рис. 3). Это необходимо для увеличения эффективности регистрации. Кроме ИС DMXS6A, на платах электроники расположены также восемь АЦП, позволяющих проводить параллельную оцифровку данных со всех регистрирующих чипов одновременно. Управление работой плат регистрирующей электроники, накопление данных и связь с компьютером осуществляются с помощью материнской платы, расположенной под этими платами.

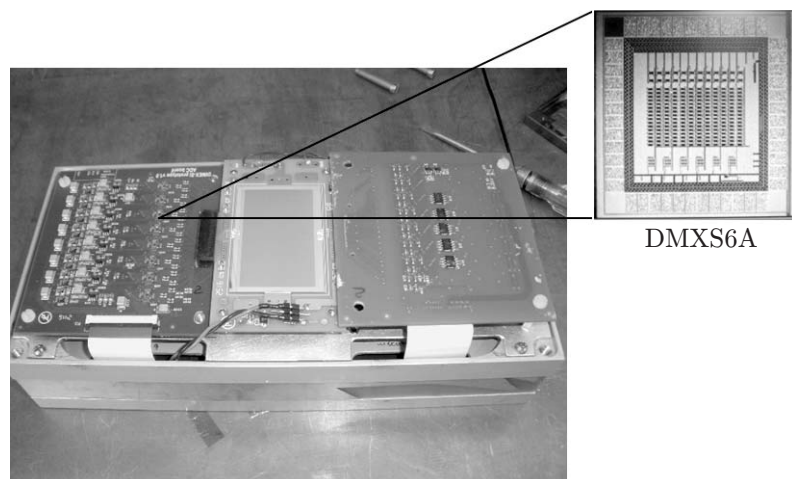


Рис. 2. Прототип детектора на основе кремниевого микрополоскового сенсора с электроникой на базе ИС DMXS6A

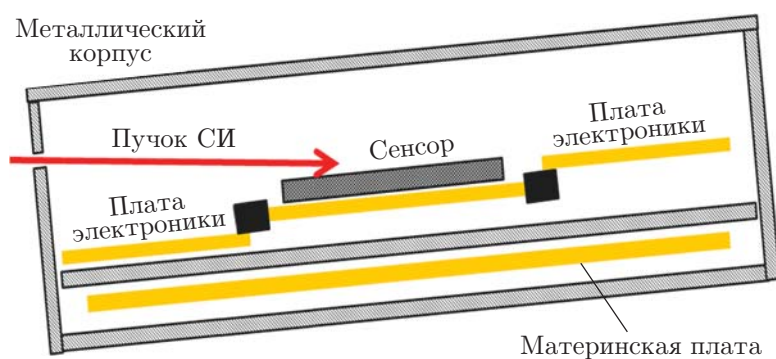


Рис. 3. Схема расположения прототипа детектора на пучке СИ

Временное разрешение. Прототип детектора был установлен на канале № 8 в бункере СИ ВЭПП-4М и облучался «белым» пучком из 7-полюсного вигглера [13–15]. На рис. 4 приведены зависимости сигнала в одном из каналов детектора от времени при двух режимах работы: длительности кадра 25 и 50 нс.

Во время этих измерений накопитель работал в режиме одного сгустка, время оборота которого составляет около 1250 нс. Циклы измерений в детекторе синхронизируются с фазой высокочастотного (ВЧ) ускоряющего напряжения в накопителе и тем самым со вспышками СИ. На рис. 4 видно, что при длительности кадра 25 нс внутри последовательности из 32 кадров есть только один кадр, в котором регистрируется сигнал, поскольку полная длительность такой последовательности составляет 800 нс. При этом в соседних кадрах сигнал не превышает уровня шума. При длительности кадра 50 нс в последовательности из 32 кадров присутствуют уже два кадра, содержащих сигнал, полная длительность такой последовательности составляет 1600 нс. Результаты измерений, представленные на рис. 4, демонстрируют способность ИС DMXS6A полностью регистрировать сигнал в пределах одного цикла длительностью 25 нс, причём видно, что сигналы от соседних сгустков не будут смешиваться при расстоянии между сгустками не менее 50 нс.

Для более точного измерения временного разрешения детектора было проведено измерение зависимости сигнала в двух соседних кадрах от смещения между пролётом сгустка (фазой ВЧ-накопителя) и началом измерения. На рис. 5 видно, как при смещении начала измерения относительно пролёта сгустка в накопителе сигнал смещается из одного кад-

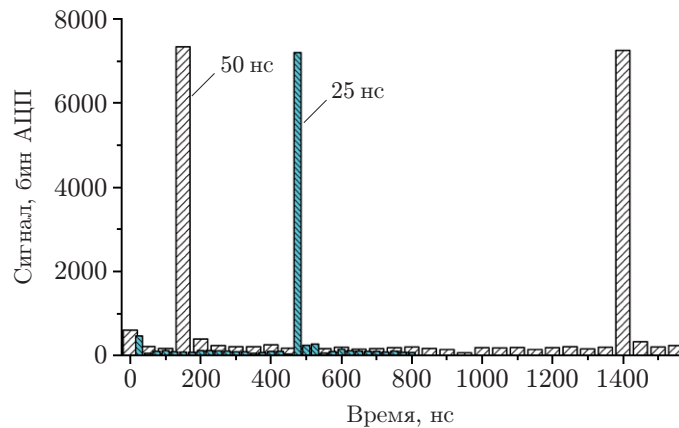


Рис. 4. Зависимости сигнала в одном канале детектора от времени. Измерения проводились в режиме длительности кадра 25 и 50 нс

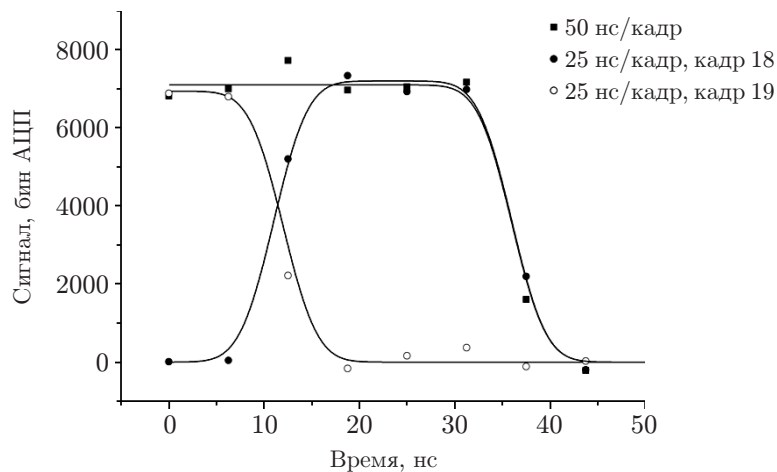


Рис. 5. Зависимости сигнала в двух соседних кадрах от смещения начала измерения по отношению к фазе ВЧ-накопителя

ра в другой. При этом никакого перемешивания сигналов не происходит, в то время как сигнал в одном кадре максимальный, в соседнем кадре он равен нулю. Измерения проводились при смещении времени начала измерения с шагом 6,25 нс, результаты измерений аппроксимировались функцией $\text{erf}(t)$ (интеграл от функции Гаусса):

$$\text{erf}(t) = \int_0^t a \exp\left(-\frac{(x-b)^2}{2\sigma^2}\right) dx \quad (1)$$

или линейной комбинацией функций erf . Диапазон перехода между соседними кадрами равен примерно 12 нс. Он определяется в основном временными параметрами интегратора в DMXS6A, поскольку длительность излучения СИ (длина сгустка) в ВЭПП-4М составляет менее 100 пс, а время сбора носителей в кремниевом сенсоре толщиной 320 мкм при напряжении смещения 300 В не превышает 1 нс. Фактически это время соответствует временному разрешению детектора.

Кроме того, на рис. 5 видно, что при длительности кадра 25 нс временной промежуток, в течение которого регистрируется максимальный сигнал, составляет не менее 15 нс. Этот

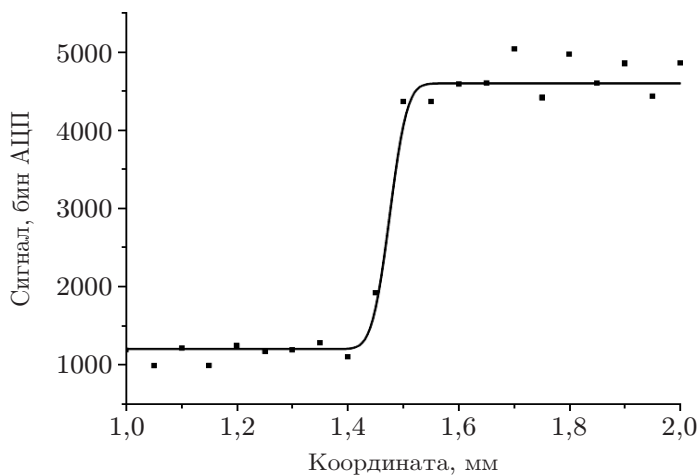


Рис. 6. Изображение края стальной пластины толщиной 3 мм

результат означает, что сигнал будет уверенно регистрироваться в одном кадре и при длительности кадра 20 нс. Дополнительное свидетельство того, что интегратор в DMXS6A полностью интегрирует сигнал за время экспозиции кадра 25 нс, следует из сравнения максимального сигнала при длительности кадра 50 и 25 нс. Максимальный сигнал при этих условиях совпадает с точностью до статистических погрешностей.

Связь между каналами. Координатное разрешение. Поскольку сигнал в детекторе представляет собой короткий и значительный по величине импульс тока в большом числе каналов (как правило, более 100), актуальным является вопрос о возможной связи между каналами на входе и внутри ИС DMXS6A. Ответ на этот вопрос был получен при измерении координатного разрешения детектора, которое проводилось методом «непрозрачного края». Для этого пластина из стали толщиной 3 мм с точно обработанным краем была прикреплена к входному окну детектора перпендикулярно плоскости пучка. Изображение края пластины представлено на рис. 6. Точки на рисунке соответствуют величинам сигнала в каналах детектора. Результат измерения аппроксимирован функцией erf (интеграл от функции Гаусса) с шириной на полувысоте примерно 45 мкм.

Также видно, что переход от зоны с полным ослаблением пластиной до зоны открытого пучка составляет чуть более одного канала детектора (50 мкм) и для выделения влияния электроники из всех эффектов, вызывающих пространственное размазывание сигнала (геометрические факторы, диффузия носителей, пробеги вторичных частиц), требуется измерение с лучшей статистической точностью, а также сравнение с моделированием. В любом случае данное измерение показывает, что влияние на соседний канал не превышает величины $\sim 10\%$.

Максимальный сигнал. Быстродействие детектора. Максимальный сигнал, который может быть зарегистрирован детектором в линейном режиме работы, является одним из важных параметров. Для измерения этой величины детектор облучался однородным пучком СИ. Для изменения потока излучения менялась ширина пучка СИ в направлении, перпендикулярном плоскости пучка (высоте пучка). Зависимость сигнала в одном канале детектора от расчётного поглощённого потока СИ от одного сгустка показана на рис. 7. Поток СИ был рассчитан программой ХОР [16]. Расчётная средняя энергия в спектре поглощённого излучения равна 17 кэВ.

Отклонение от линейного режима работы появляется при потоке около 25000 фотонов/канал/сгусток. Простая оценка сигнала в интеграторе показывает, что напряжение на ёмкости обратной связи при таком потоке фотонов со средней энергией 17 кэВ будет

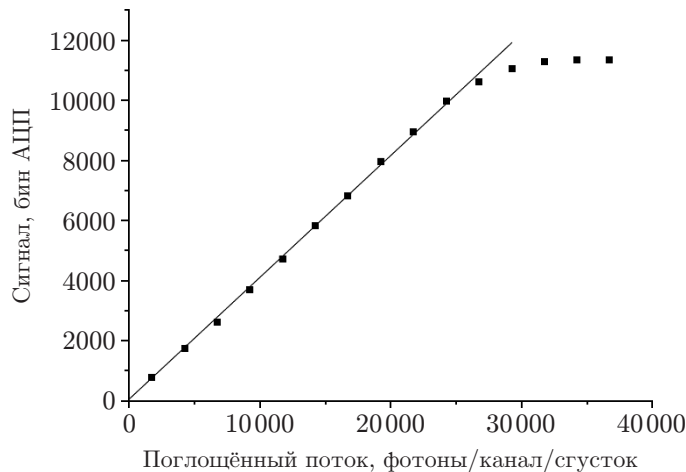


Рис. 7. Зависимость сигнала в одном канале детектора от расчётного поглощённого потока СИ

составлять величину около 1 В, что близко к напряжению питания ИС. Таким образом, наблюдаемая нелинейность связана с насыщением интеграторов, и предельный регистрируемый поток может быть увеличен при соответствующем росте коэффициента деления сигнала во входном делителе.

Шумы. Одна из основных целей разработки специализированной ИС для считывания сигнала в детекторе DIMEX — это существенное расширение динамического диапазона. Для этого необходимо увеличить максимальный поток фотонов, при котором электроника регистрации работает в линейном режиме при сохранении низкого уровня шума. Собственный шум канала регистрации не должен превышать статистические флуктуации максимального регистрируемого потока фотонов. При максимальном потоке 10^5 фотонов/канал/сгусток собственный шум электроники должен быть существенно меньше величины статистических флуктуаций, эквивалентной примерно 300 фотонам. Отношение шума к сигналу будет определяться статистическими флуктуациями и составит $300/10^5 \approx 3 \cdot 10^{-3}$. Для измерения собственных шумов электроники проводилось измерение сигнала без облучения. В полученных данных была скорректирована постоянная неоднородность каналов и медленные изменения пьедесталов от фильма к фильму (под фильмом понимается набор из 32 кадров длительностью 25 нс/кадр, измеренных подряд). Гистограмма распределения величин шумовых сигналов приведена на рис. 8.

На рисунке распределение шумовых сигналов имеет вид, существенно отличный от гауссовой формы. Предположительно, центральное ядро, которое аппроксимируется функцией Гаусса с $\sigma = 10$, связано с шумом интегратора, тогда как широкие «хвосты» распределения, которые приводят к значительному росту среднеквадратичного отклонения (rms) всего распределения, скорее всего, обусловлены другими источниками. При максимальном сигнале, ограниченном величиной ~ 10000 бин АЦП, отношение шум/сигнал составляет 0,015, что в 5 раз выше поставленной цели 0,003.

В процессе поиска возможных источников повышенных шумов проводились дополнительные расчёты и моделирование шумовых параметров входного преобразователя, схемы компенсации и интегратора. В результате установлено, что доминирующим источником шумов является схема компенсации по причине неудачного схемного решения: во время измерения выход широкополосного усилителя в схеме компенсации оставался подключённым к входному преобразователю напряжения в ток при разомкнутой цепи обратной связи. В схему компенсации были внесены необходимые изменения и разработана вторая версия

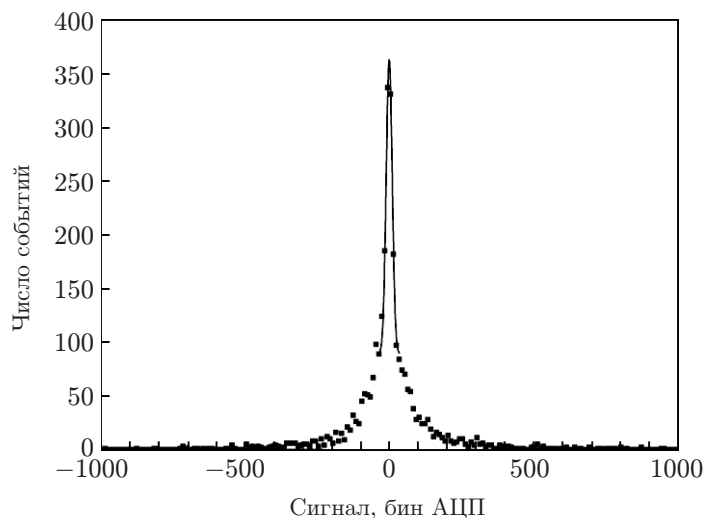


Рис. 8. Гистограмма распределения шумовых сигналов. Ядро распределения аппроксимировано функцией Гаусса с $\sigma = 10$, среднеквадратичное отклонение для этого распределения равно 155

микросхемы DMXS6B, получение от изготовителя и исследование образцов которой планируется нами в ближайшее время.

Заключение. Разработана интегральная схема для считывания сигнала в кремниевом микрополосковом детекторе в условиях высоких нагрузок в экспериментах по изучению быстропротекающих процессов на пучке СИ. Первый прототип такой ИС включает в себя шесть каналов, каждый из которых содержит преобразователь напряжения в ток, схему компенсации постоянного тока, четыре интегратора с коммутатором и 32 ячейками аналоговой памяти. Такая схема позволяет считывать сигналы от вспышек СИ, регистрируемых кремниевым сенсором с частотой до 25 МГц, и записывать их в ячейки аналоговой памяти для последующей оцифровки и записи в компьютер. Первые измерения, проведенные на детекторе с электроникой на основе ИС DMXS6A, показали, что такая микросхема позволяет работать с частотой записи до 25 МГц и обеспечивает временное разрешение около 12 нс. Влияние соседних каналов друг на друга не превышает 10 %, и пространственное разрешение определяется в основном шагом полосок сенсора 50 мкм. Максимальный сигнал, который может быть измерен в линейном режиме, соответствует потоку фотонов $\sim 25\,000$ фотонов/канал/сгусток, что существенно превышает аналогичную величину для предыдущей версии детектора, основанной на газовой технологии. Кроме того, в отличие от газового детектора, где ограничение на максимальный регистрируемый поток связано с низкой подвижностью ионов в газе, в кремниевом детекторе это ограничение обусловлено насыщением сигнала в интеграторе ИС и может быть преодолено соответствующим изменением делителя на входе канала микросхемы. Существенной проблемой, обнаруженной при первых измерениях с новой интегральной схемой, является высокий уровень шума. Возможный источник повышенного шума был найден моделированием шумовых параметров канала ИС, и изменения топологии, необходимые для уменьшения уровня шума, были сделаны. В настоящее время новая версия микросхемы ожидается.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аульченко В. М., Жуланов В. В., Кулипанов Г. Н. и др. Исследование быстропротекающих процессов рентгенодифракционными методами в Сибирском центре синхротронного и терагерцового излучения // УФН. 2018. 188, № 6. С. 577–594.

2. **Прууэл Э. Р., Тен К. А., Толочко Б. П. и др.** Реализация возможностей синхротронного излучения в исследованиях детонационных процессов // ДАН. 2013. **448**, № 1. С. 38–42.
3. **Titov V. M., Prueel E. R., Ten K. A. et al.** Experience of using synchrotron radiation for studying detonation processes // Combust., Explos. Shock Waves. 2011. **47**, Iss. 6. P. 615–626.
4. **Aulchenko V., Evdokov O., Ponomarev S. et al.** Development of fast one-dimensional X-ray detector for imaging of explosions // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. 2003. **513**, Iss. 1–2. P. 388–393.
5. **Aulchenko V., Zhulanov V., Shekhtman L. et al.** One-dimensional detector for study of detonation processes with synchrotron radiation beam // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. 2005. **543**, Iss. 1. P. 350–356.
6. **Aulchenko V. M., Evdokov O. V., Shekhtman L. I. et al.** Detector for imaging of explosions: Present status and future prospects with higher energy X-rays // Journ. Instrum. 2008. **3**. P. 05005.
7. **Aulchenko V. M., Evdokov O. V., Shekhtman L. I. et al.** Current status and further improvements of the detector for imaging of explosions // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. 2009. **603**, Iss. 1. P. 73–75.
8. **Аульченко В. М., Евдоков О. В., Жогин И. Л. и др.** Детектор для изучения взрывных процессов на пучке синхротронного излучения // Приборы и техника эксперимента. 2010. № 2. С. 1–16.
9. **Aulchenko V. M., Baru S. E., Evdokov O. V. et al.** Fast high resolution gaseous detectors for diffraction experiments and imaging at synchrotron radiation beam // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. 2010. **623**, Iss. 1. P. 600–602.
10. **Shekhtman L. I., Aulchenko V. M., Kudryavtsev V. N. et al.** Upgrade of the detector for imaging of explosions // Phys. Proc. 2016. **84**. P. 189–196.
11. **Aulchenko V., Prueel E., Shekhtman L. et al.** Development of the microstrip silicon detector for imaging of fast processes at a synchrotron radiation beam // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. 2017. **845**. P. 169–172.
12. **Shekhtman L. I., Aulchenko V. M., Zhulanov V. V., Kudashkin D. V.** Upgrading a detector for studying fast processes on a beam of synchrotron radiation // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2019. **83**, N 2. P. 220–224.
13. **Piminov P. A., Baranov G. N., Bogomyagkov A. V. et al.** Synchrotron radiation research and application at VEPP-4 // Phys. Proc. 2016. **84**. P. 19–26.
14. **Baranov G., Vobly P., Levichev E. et al.** Hybrid magnet wiggler for SR research program at VEPP-4M // Phys. Proc. 2016. **84**. P. 126–130.
15. **Tolochko B. P., Kosov A. V., Evdokov O. V. et al.** The synchrotron radiation beamline 8-b at VEPP-4 collider for SAXS, WAXS and micro tomography investigation of fast processes at extreme condition of high temperature and pressure with nanosecond time resolution // Phys. Proc. 2016. **84**. P. 427–433.
16. **ESRF** — The European Synchrotron. URL: <http://www.esrf.eu/Instrumentation/software/data-analysis/хор2.4>. (дата обращения: 26.12.2019).

Поступила в редакцию 21.11.2019

После доработки 02.12.2019

Принята к публикации 02.12.2019