

КОНФЕРЕНЦИИ И СИМПОЗИУМЫ

Детекторы и интегральные схемы орбитальных телескопов

В.В. Левин, А.В. Кривченко, М.В. Кузнецова,
А.А. Лутовинов, И.А. Мереминский, А.А. Ротин

Развитие рентгеновской астрономии невозможно без развития технологии рентгеновских детекторов. В настоящее время полупроводниковые детекторы рентгеновского излучения обеспечивают наилучшие характеристики с точки зрения временного и энергетического разрешения. В работе представлено описание трёх типов полупроводниковых детекторов, их чувствительных элементов и специализированных интегральных схем обработки сигналов для проектов "Спектр-РГ", "Гамма-400" и космического эксперимента "Монитор всего неба".

Ключевые слова: детектор рентгеновского излучения, CdTe, теллурид кадмия, стриповый детектор, кремниевый детектор

PACS numbers: 29.40. – n, 85.60.Gz, 95.55. – n

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2023.04.039587>

Содержание

1. Введение (404).
 2. Детектор для комплекса научной аппаратуры "Монитор всего неба" (404).
 3. Детектор для телескопа ART-XC им. М.Н. Павлинского (408).
 4. Детектор для проекта "Гамма-400" (410).
 5. Заключение (415).
- Список литературы (415).

1. Введение

В Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН) с 2008 по 2018 гг. выполнена разработка нескольких типов детекторов рентгеновского излучения для использования в рентгеновских телескопах и спектрометрах космического назначения.

Для комплекса научной аппаратуры космического эксперимента "Монитор всего неба" (КНА МВН) [1, 2], планируемого к установке на российском сегменте Международной космической станции (МКС), разработан пиксельный детектор Д1 на основе кристалла CdTe (теллурида кадмия) и интегральной схемы (ИС) VA32TA. Детектор предназначен для спектрометрии рентгенов-

ского излучения в диапазоне энергий от 4 до 120 кэВ и может использоваться в спектрометрах, не имеющих пространственного разрешения. Пикселизация кристалла (32 пикселя с размером $3,7 \times 3,7$ мм) сделана только для улучшения шумовых характеристик. В состав КНА МВН входят четыре детектора Д1.

Для рентгеновского телескопа ART-XC им. М.Н. Павлинского [3], установленного на космическом аппарате "Спектр-РГ" [4], разработан двусторонний стриповый детектор СД01 на основе кристалла CdTe и ИС VA64TA1. Детектор предназначен для спектрометрии и построения изображения в фокальной плоскости рентгеновской зеркальной системы. Детектор содержит 48×48 элементов изображения с размером 595×595 мкм и работает в диапазоне энергий от 4 до 118 кэВ (рабочий диапазон энергий телескопа от 4 до 30 кэВ). В состав телескопа ART-XC им. М.Н. Павлинского входят семь детекторов СД01.

Для космического проекта "Гамма-400" [5] разработана конструкция быстродействующего кремниевого детектора на основе полупроводниковых структур DeрFET и ИС SWP1 и CAMEX PIXEL 64L. В рамках эскизного проекта изготовлен и испытан макет детектора со структурой 32×32 пикселя размером 150 мкм.

Далее приводится краткое описание особенностей конструкции и функционирования всех трёх типов детекторов.

2. Детектор для комплекса научной аппаратуры "Монитор всего неба"

Общий вид детектора Д1 приведён на рис. 1. Детектор состоит из керамического корпуса, термоэлектрического модуля, керамической платы, чувствительного элемента (ЧЭ) и ИС VA32TA.

Основные технические характеристики детектора Д1: — габаритные размеры по основанию корпуса 60×48 мм;

В.В. Левин^(а), А.В. Кривченко^(б), М.В. Кузнецова^(с),
А.А. Лутовинов^(д), И.А. Мереминский^(е), А.А. Ротин^(ф)

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт космических исследований Российской академии наук,
ул. Профсоюзная 84/32, 117997 Москва, Российская Федерация
E-mail: ^(а) vvl@cosmos.ru, ^(б) krivchenko.a@gmail.com,

^(с) maria_kuznetsova@cosmos.ru, ^(д) aal@cosmos.ru,

^(е) i.a.mereminskiy@gmail.com, ^(ф) alexeydfg@yandex.ru

Статья поступила 21 апреля 2023 г.

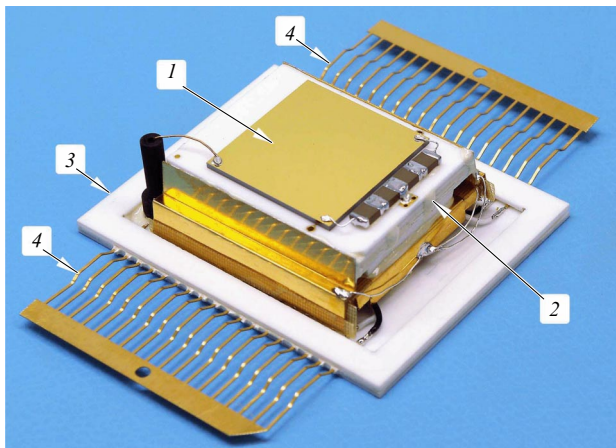


Рис. 1. Детектор Д1 (1 — кристалл CdTe; 2 — керамическая плата; 3 — корпус; 4 — выводная рамка).

- высота 17,5 мм;
- масса 60 г;
- потребляемая мощность 200 мВт;
- энергетический диапазон от 4 до 120 кэВ;
- "мёртвое" время не более 0,7 мс;
- энергетическое разрешение (полная ширина на половине высоты (ПШПВ) на энергии 13,9 кэВ, одиночные события) не более 1,8 кэВ;
- геометрическая чувствительная площадь 4,38 см²;
- количество пикселей 32;
- размер пикселя 3,7 × 3,7 мм;
- рабочая температура от –30 до –20 °С.

В качестве ЧЭ в детекторе используется полупроводниковый кристалл из сверхчистого CdTe (Ascogad, Япония) [6]. Размер кристалла 24 × 24 × 1 мм. Конфигурация электродов на кристалле выполнена фирмой Ascogad по заказу ИКИ РАН. Общий вид кристалла CdTe приведён на рис. 2. Верхний электрод кристалла — сплошной. Его структура Au/Pt/CdTe обеспечивает омический (невыпрямляющий) контакт электрода к материалу кристалла. Именно со стороны верхнего электрода на детектор падает излучение. Нижний электрод используется для подключения кристалла к зарядочувствительному усилителю (ЗЧУ). Структура нижнего электрода Au/Ti/Al/CdTe. Данная структура образует выпрямляющий контакт (барьер Шоттки) электрода к материалу кристалла [7]. На нижнем электроде методом фотолитографии сформированы 32 контактные площадки и охранное кольцо. Цель разбиения нижнего электрода на отдельные элементы — уменьшить паразитную ёмкость одного ЧЭ, подключаемого к ЗЧУ. Таким образом весь объём кристалла разбивается на 32 элементарных ЧЭ (пикселя) размером 3,7 × 3,7 мм, каждый из которых имеет в 32 раза меньшую электрическую ёмкость по сравнению с ёмкостью целого кристалла эквивалентной площади. Недостатком данного подхода является увеличение сложности изготовления кристалла (и, соответственно, увеличение его стоимости), возникновение эффекта деления заряда между отдельными ЧЭ, необходимость вместо одного канала обработки сигналов с кристалла использовать 32 канала, увеличение потребляемой мощности всего детектора. Достоинствами же такого решения является улучшение шумовых характеристик детектора и повышение его надёжности. Повышение надёжно-

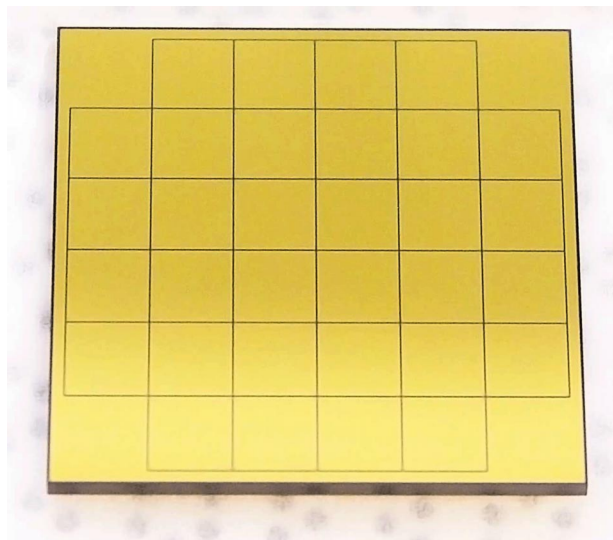


Рис. 2. Кристалл CdTe детектора Д1 (вид снизу, размер 24 × 24 × 1 мм).

сти детектора достигается за счёт того, что при отказе одного из 32 спектрометрических трактов обработки сигналов будет потеряна только 1/32 всей чувствительной площади детектора, а не весь детектор. Охранное кольцо необходимо для уменьшения вклада тока утечки, протекающего по боковой поверхности кристалла, в общий ток утечки элементарного ЧЭ.

Керамический корпус изготовлен из керамики ADS-96R (96 % Al₂O₃, CoorsTek, Великобритания). Его назначение: защита элементов детектора от воздействия окружающей среды при наземной эксплуатации, отвод тепла и уменьшение механических напряжений в термоэлектрическом модуле и керамической плате из-за разницы в коэффициентах теплового линейного расширения между керамикой и алюминиевым сплавом АМг6, из которого изготавливается корпус прибора.

Керамическая плата состоит из трёх слоёв керамики ADS-96R. Проводящие и изолирующие слои на плате, а также резисторы выполнены по толстоплёночной технологии. С одной стороны платы устанавливается кристалл CdTe, с другой стороны — кристалл ИС VA32TA и конденсаторы. Подключение контактных площадок на нижней стороне кристалла CdTe к контактным площадкам на керамической плате осуществляется с помощью электропроводного клея методом "перевернутого кристалла". Подключение контактных площадок ИС VA32TA выполнено по технологии ультразвуковой микросварки алюминиевой проволокой. При проектировании керамической платы особое внимание было уделено минимизации длины связей между контактными площадками кристалла CdTe и входами ИС VA32TA. Плата устанавливается на термоэлектрический модуль (элемент Пельтье), который приклеивается к корпусу. Термоэлектрический модуль используется для охлаждения детектора в наземных условиях. При эксплуатации детектора в условиях космического полёта требуемая температура кристалла CdTe обеспечивается системой обеспечения теплового режима КНА МВН [8].

После монтажа в блок детектор закрывается герметичной защитной крышкой. Гермообъём под крышкой в наземных условиях заполняется сухим азотом. Корпус

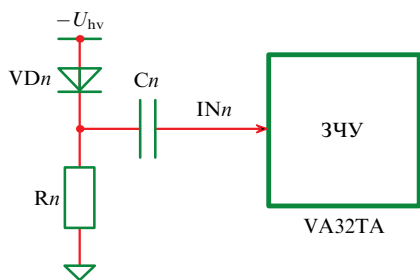


Рис. 3. Схема подключения ЧЭ ко входу ЗЧУ в ИС VA32TA (n — номер элементарного ЧЭ).

крышки содержит следующие слои: 1 мм олова (внешний слой), 1 мм меди, 2 мм алюминиевого сплава АМг6 (внутренний слой). Такая трёхслойная защита материалами с последовательно уменьшающимися атомными номерами используется для последовательного уменьшения энергии флюоресцентных рентгеновских фотонов, возникающих в материале крышки. В состав крышки также входит рентгенопрозрачное, вакуумплотное бериллиевое окно толщиной 100 мкм и диаметром 36 мм (АО "Композит"), являющееся входным окном детектора.

Схема подключения ЧЭ ко входу ЗЧУ приведена на рис. 3. В детекторе используется так называемая схема включения "по переменному току". Такая схема включения по своим шумовым характеристикам проигрывает схеме включения "по постоянному току" из-за наличия дополнительного резистора, однако преимуществом данной схемы является то, что она может работать в широком диапазоне токов утечки ЧЭ. Эта возможность позволяет использовать в детекторе как ЧЭ на кристаллах CdTe с барьером Шоттки, так и ЧЭ на "собственных" кристаллах CdTe, имеющих на два порядка больший ток утечки. Кроме того, повышается надёжность детектора, так как изменение тока утечки кристалла возможно как от изменения его электрофизических свойств с течением времени, так и от эксплуатации в условиях воздействия тяжёлых заряженных частиц в космическом пространстве. Применяемая схема способна автоматически парировать эти изменения в достаточно широких пределах.

ИС VA32TA (Ideas, Норвегия) [9, 10] представляет собой 32-канальную систему обработки сигналов полупроводниковых детекторов. ИС изготовлена по КМОП-процессу с топологической нормой 0,35 мкм (AMS, Австрия). Размер кристалла ИС $7,035 \times 3,385 \times 0,725$ мм. Структурная схема одного канала обработки сигнала полупроводникового детектора приведена на рис. 4. Канал состоит из ЗЧУ, медленного усилителя-формирователя (МУФ), устройства выборки и хранения (УВХ), быстрого усилителя-формирователя (БУФ), фильтра нижних частот (ФНЧ) и дискриминатора (Д). БУФ обеспечивает две постоянные времени формирования (37,5 или 75 нс). Постоянная времени формирования МУФ может перестраиваться в диапазоне от 0,75 до 1,5 мкс. Так как в ИС используются усилители-формирователи со структурой CR-RC, то время пика (т.е. время достижения максимума сформированного сигнала) в два раза больше постоянной времени формирования. Потребляемая одним каналом мощность составляет 6,25 мВт.

Для настройки и хранения конфигурации микросхемы используется конфигурационная память ёмкостью 199 бит. Для защиты от одиночных сбоев каждый триггер

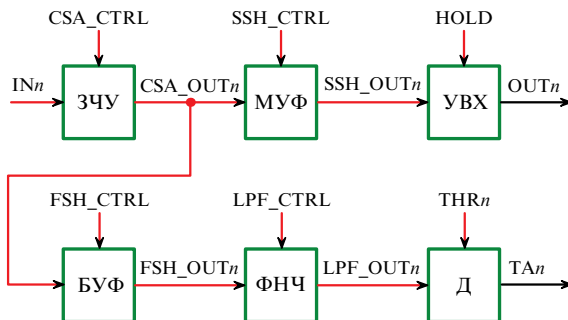


Рис. 4. Структурная схема одного канала обработки сигнала в ИС VA32TA.

гер построен по архитектуре с тройным модульным резервированием [11]. В случае возникновения одиночного сбоя в одном из триггеров конфигурационной памяти ИС генерирует сигнал "SEU", по которому внешний контроллер управления должен заново переписать конфигурацию ИС. Конфигурационная память позволяет:

- управлять величиной резистора обратной связи ЗЧУ;
- управлять постоянными времени формирования быстрого и медленного усилителей-формирователей;
- устанавливать общий для всех каналов порог дискриминатора;
- подстраивать порог дискриминатора в каждом из 32 каналов;
- разрешать (запрещать) выдачу триггерного сигнала от любого канала;
- управлять полярностью входного сигнала.

Кроме конфигурационной памяти ИС имеет несколько входов для подачи опорных напряжений, позволяющих изменять настройки аналоговых блоков ИС и частично дублирующих функции конфигурационной памяти. Использование внешних опорных напряжений позволяет изменять параметры блоков ИС в более широких пределах, чем при использовании конфигурационной памяти, однако приводит к необходимости использования внешних цифро-аналоговых преобразователей, что усложняет систему.

Особенностью данной ИС является отсутствие пикового детектора в каналах обработки сигналов. Это приводит к определённым сложностям получения информации о том, в каком из каналов произошла регистрация фотона. В общем виде алгоритм работы с детектором включает следующие этапы.

Перед началом наблюдений внешним контроллером производится:

- подача на детектор необходимых опорных напряжений;
- загрузка конфигурационной памяти ИС;
- тестирование детектора.

Тестирование детектора заключается в генерации искусственного триггерного сигнала, запоминании текущих амплитуд сигналов в УВХ и последующей их оцифровке. Задача этой процедуры — определить величину постоянной составляющей сигнала в каждом канале и её разброс. Так как выходной сигнал каналов хорошо описывается нормальным распределением, то для каждого канала по ансамблю выборок определяется математическое ожидание и дисперсия. Математическое ожидание соответствует постоянной составляющей (или подиуму)

выходного сигнала, а дисперсия несёт информацию о величине шумового напряжения выходного сигнала. С использованием величины дисперсии вычисляются программные пороги регистрации. Определённые значения подиумов и программных порогов запоминаются внешним контроллером.

Работа с детектором (т.е. проведение наблюдений) осуществляется по следующему алгоритму. Если в одном из каналов выходное напряжение БУФ (сигнал "FSH_OUT*n*") после прохождения ФНЧ (сигнал "LPF_OUT*n*") превысит пороговое напряжение (сигнал "THR*n*", аппаратный порог данного канала), то канал выдаст сформированный по длительности триггерный сигнал (сигнал "TA*n*"). Сигналы "TA*n*" всех каналов объединены в ИС по схеме "монтажное ИЛИ", и активный уровень любого из них приводит к выдаче общего для всей ИС сигнала "ТА" во внешний контроллер. После получения триггерного сигнала "ТА" контроллер выдерживает паузу, равную времени пика МУФ, и выдаёт сигнал "HOLD", фиксирующий текущее значение напряжения УВХ во всех каналах ИС. Далее с использованием выходного мультиплексора ИС производится оцифровка 32 сохранённых в УВХ амплитуд сигналов. После получения цифровых значений амплитуд сигналов контроллер управления начинает их программную обработку. Для каждой полученной амплитуды сигнала производятся следующие операции:

- определяется смещённая амплитуда сигнала вычитанием из амплитуды сигнала значения подиума, определённого на этапе тестирования;
- смещённая амплитуда сравнивается со значением программного порога;
- если смещённая амплитуда больше или равна программному порогу, то она используется для дальнейшего поиска сработавшего канала.

Далее все смещённые амплитуды сигналов, успешно прошедшие проверку на первом этапе, сравниваются между собой, и определяется номер канала ИС, в котором зарегистрирован максимальный сигнал. В случае, если максимальное значение зафиксировано более чем в одном канале, сработавшим считается канал ИС с наименьшим номером. В результате время регистрации фотона, номер сработавшего канала N_0 и амплитуда сигнала E_0 в нём сохраняются в блоке данных, описывающем событие. Кроме указанной информации, в том же блоке сохраняются амплитуды сигналов $E_1 - E_4$ в четырёх каналах (ЧЭ), окружающих сработавший канал (ЧЭ). Схема расположения ЧЭ по площади кристалла CdTe приведена на рис. 5а. Схема расположения ЧЭ $N_1 - N_4$, окружающих сработавший ЧЭ N_0 , приведена на рис. 5б. Сохранение амплитуд сигналов в соседних ЧЭ необходимо для корректного восстановления энергии фотона в случае деления заряда между ЧЭ, имеющими общую границу. На квадратной сетке со сработавшим ЧЭ граничат восемь других ЧЭ, однако площадь контакта центрального ЧЭ с диагональными очень мала, поэтому для уменьшения объёма генерируемой телеметрической информации мы приняли решение дополнительно сохранять только амплитуды соседних ЧЭ, ортогональных к сработавшему. При этом, в зависимости от задачи, можно сохранять и девять амплитуд, и все 32 амплитуды.

Разработанный алгоритм работы с детектором за счёт использования программных порогов, пропорциональных величине шумового напряжения, позволяет

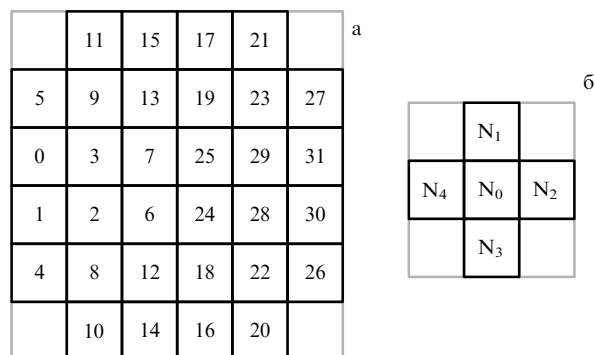


Рис. 5. (а) Номера ЧЭ на кристалле CdTe (если смотреть "сквозь" кристалл в сторону источника излучения); (б) расположение ЧЭ, амплитуды сигнала в которых сохраняются в блоке данных для дальнейшей обработки.

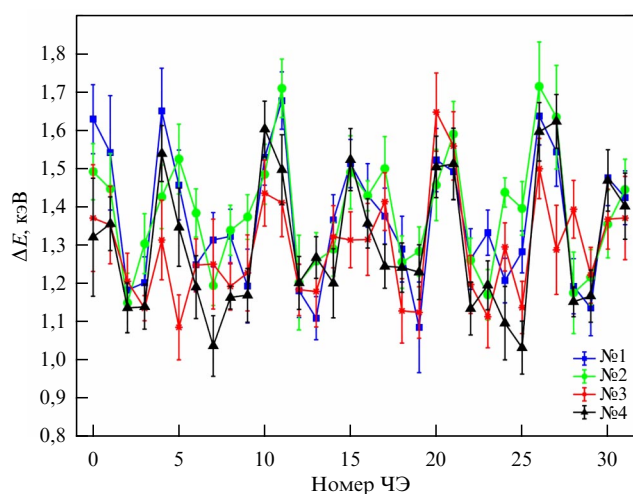


Рис. 6. Зависимость величины энергетического разрешения ΔE (ПШПВ на энергии 13,9 кэВ) от номера ЧЭ для четырёх детекторов Д1 (-21°C , -100 В).

автоматически не допускать увеличения генерируемой телеметрической информации и перегрузки телеметрической системы в случае увеличения шума в одном из каналов.

Энергетическое разрешение детектора определялось по спектру калибровочного источника фотонного излучения ^{241}Am . На рисунке 6 показана зависимость величины энергетического разрешения (ПШПВ на энергии 13,9 кэВ) от номера ЧЭ (канала ИС). Для определения энергетического разрешения использовались только одиночные события, т.е. такие события, для которых амплитуды $E_1 - E_4$ меньше программного порога, и энергия фотона определяется только через амплитуду E_0 . Ухудшение энергетического разрешения в отдельных ЧЭ связано с тем, что эти ЧЭ располагаются на периферии кристалла и имеют общую границу с охранным кольцом (см. рис. 5). Взаимодействие фотона с материалом детектора на границе ЧЭ и охранный кольца приводит к делению образовавшегося заряда между такими элементами. То обстоятельство, что в данном случае доля заряда (амплитуды сигнала), собранная охранным кольцом, неизвестна и значение энергии фотона рассчитывается только по величине амплитуды сигнала E_0 , а ЧЭ собрал не весь образовавшийся заряд, приводит к зани-

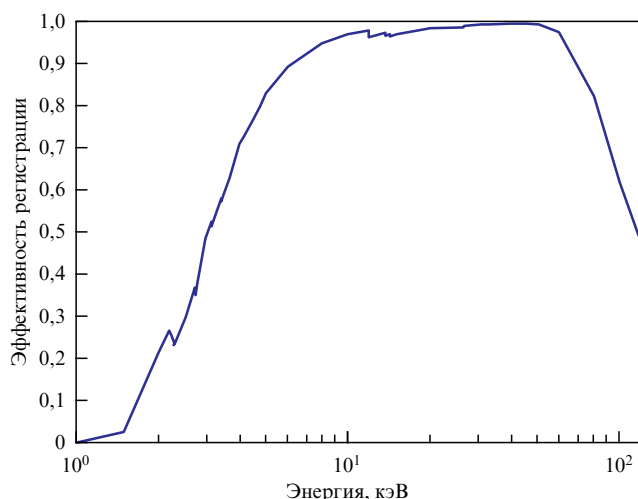


Рис. 7. Зависимость эффективности регистрации фотонов кристаллом CdTe от энергии (перед кристаллом слой Be (100 мкм) и Au (82 нм)).

жению значения энергии фотона. В результате для подобных событий происходит уширение линий в спектре в сторону низкой энергии, что и приводит к ухудшению энергетического разрешения в периферических ЧЭ.

Зависимость эффективности регистрации фотонов кристаллом CdTe от энергии приведена на рис. 7. Эффективность рассчитана в предположении, что перед кристаллом находится бериллиевое окно толщиной 100 мкм и толщина металлизации на кристалле эквивалентна 82 нм золота.

В настоящее время лётный образец КНА МВН поставлен в ПАО «РКК "Энергия"», прошёл испытания на комплексном стенде и готов к отправке на МКС. Запуск КНА МВН к МКС на транспортно-грузовом корабле "Прогресс" планируется в 2024 г.

3. Детектор для телескопа ART-XC им. М.Н. Павлинского

Общий вид детектора СД01 приведён на рис. 8. Детектор состоит из ЧЭ, кристаллодержателя, керамического корпуса, двух керамических плат, ИС VA64TA1 и гибких печатных плат.

Основные технические характеристики детектора СД01:

- габаритные размеры по основанию корпуса 123×104 мм;
- высота 19,3 мм;
- масса 130 г;
- потребляемая мощность 28 мВт;
- энергетический диапазон от 3 до 118 кэВ;
- "мёртвое" время не более 0,9 мс;
- энергетическое разрешение (ПШПВ на энергии 13,9 кэВ, одиночные события) не более 1,8 кэВ;
- количество стрипов 48×48 ;
- размер элементарного ЧЭ (пикселя) $0,595 \times 0,595$ мм;
- геометрическая чувствительная площадь $8,11$ см²;
- рабочая температура от -30 до -20 °С.

В качестве ЧЭ в детекторе СД01 используется также полупроводниковый кристалл CdTe (Astogad, Япония), отличающийся от кристалла детектора Д1 конфигурацией электродов. Размер кристалла $29,95 \times 29,95 \times$

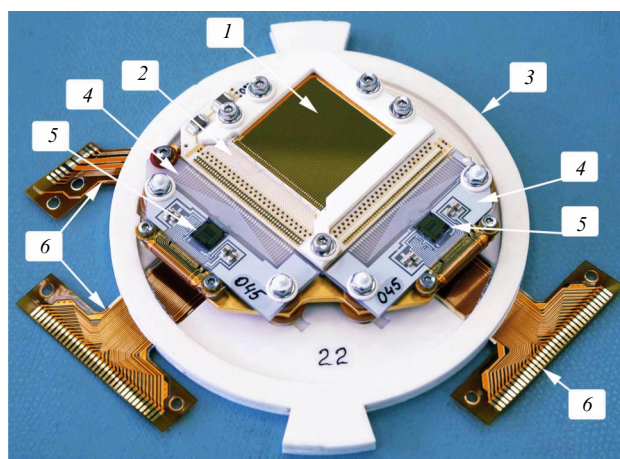


Рис. 8. Детектор СД01 (1 — ЧЭ; 2 — кристаллодержатель; 3 — керамический корпус; 4 — керамическая плата; 5 — ИС VA64TA1; 6 — гибкая печатная плата).

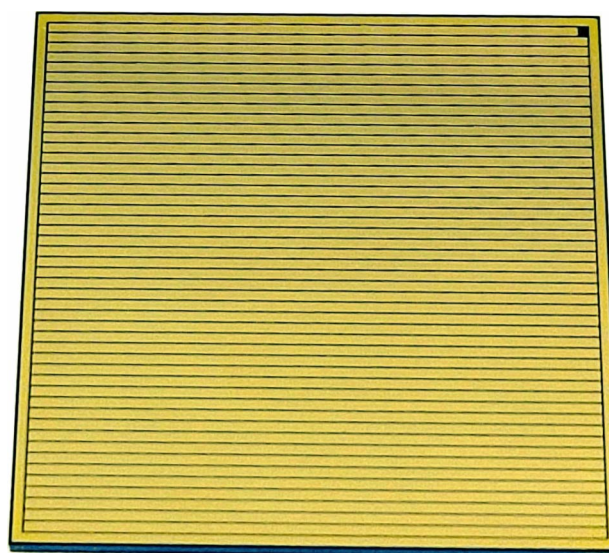


Рис. 9. Кристалл CdTe для детектора СД01 (вид сверху, размер $29,95 \times 29,95 \times 1,00$ мм).

$\times 1,00$ мм. Общий вид кристалла приведён на рис. 9. Электроды на кристалле имеют двустороннюю стриповую конфигурацию. С верхней стороны кристалла рисунок электродов состоит из 48 параллельных стрипов (полосок), окружённых охранным кольцом. С нижней стороны кристалла сделан такой же рисунок, только повернутый на 90 градусов относительно рисунка с верхней стороны. Ширина стрипов составляет 520 мкм, шаг стрипов — 595 мкм. Электроды с верхней стороны имеют структуру Au/Pt/CdTe (омический контакт), с нижней — Au/Ti/Al/CdTe (выпрямляющий контакт). Толщина металлизации кристалла с верхней стороны (со стороны облучения), измеренная методом полного интерференционного контраста, составляет 82 нм. Для того чтобы отличать стороны кристалла друг от друга, с верхней стороны кристалла сделан "ключ" (крайний стрип укорочен с одной стороны).

Принцип работы двустороннего стрипового детектора заключается в следующем. Нижние стрипы находятся под нулевым потенциалом, а на верхние стрипы подаётся высокое напряжение отрицательной поляр-

ности. В результате внутри кристалла CdTe возникает практически однородное электрическое поле. В месте пересечения двух стрипов образуется виртуальный элементарный ЧЭ (пиксель). Рентгеновский фотон, взаимодействуя с материалом детектора, генерирует электронно-дырочные пары. Электроны дрейфуют в сторону ближайшего нижнего стрипа, дырки — в сторону ближайшего верхнего. В результате между двумя указанными стрипами протекает электрический ток, интегрируемый подключёнными к ним ЗЧУ. Амплитуда сигнала на выходе ЗЧУ пропорциональна энергии фотона, а номера стрипов говорят о номере элементарного ЧЭ, в котором произошло взаимодействие фотона с материалом кристалла. Особенностью двусторонних стриповых детекторов является то, что один и тот же сигнал измеряется двумя независимыми каналами обработки, а так как шумы в каналах не коррелированы между собой, это позволяет улучшить энергетическое разрешение детектора.

Кристаллодержатель изготовлен из трёх слоёв керамики ADS-96R. Проводящий рисунок, изолирующие слои и высокоомные резисторы выполнены по толстоплёночной технологии. Кристаллодержатель обеспечивает крепление кристалла CdTe, предохраняющее его от механических нагрузок, и подключение проводников к стрипам. Кристаллодержатель через переходную платину устанавливается на термоэлектрический модуль, который используется для охлаждения кристалла во время наземных испытаний. При штатной эксплуатации детектора температура кристалла поддерживается в рабочем диапазоне системой обеспечения теплового режима телескопа ART-XC [12].

Керамические платы изготовлены по тонкоплёночной технологии на керамике ВК-100 (АО "Поликор"). Платы имеют разную топологию проводящего рисунка и поэтому не взаимозаменяемы. На платы устанавливаются кристаллы ИС VA64TA1 и фильтрующие конденсаторы. Соединение проводников на керамических платах с проводниками на гибких печатных платах осуществляется микросваркой золотой проволокой.

Гибкие печатные платы герметично клеиваются в керамический корпус и используются для подключения детектора к блоку управления. В состав детектора также входят три термодатчика, позволяющих контролировать температуру кристаллодержателя и корпуса детектора. Так же как и детектор Д1, детектор СД01 после монтажа в блок закрывается герметичной крышкой с бериллиевым окном и трёхслойной защитой.

Для обработки сигналов от кристалла CdTe используются две ИС VA64TA1 (Ideas, Норвегия) [13]. Одна ИС обслуживает нижнюю сторону кристалла, вторая — верхнюю. ИС изготовлена по КМОП-процессу с топологической нормой 0,35 мкм (AMS, Австрия). Размер кристалла ИС $6,985 \times 6,020 \times 0,725$ мм. Структура канала ИС VA64TA1 полностью совпадает со структурой канала в ИС VA32TA (см. рис. 4). ИС VA64TA1 является развитием архитектуры ИС VA32TA с пониженной потребляемой мощностью и имеет от неё следующие отличия:

- количество каналов обработки сигналов 64;
- постоянная времени формирования БУФ 300 нс;
- постоянная времени формирования МУФ от 1,5 до 2,5 мкс;

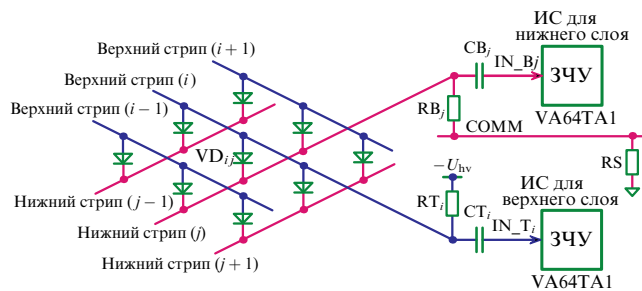


Рис. 10. Схема подключения ЧЭ ко входам ЗЧУ в ИС VA64TA1 (i — номер стрипа с верхней стороны, j — номер стрипа с нижней стороны, VD_{ij} — элементарный ЧЭ на пересечении стрипов i и j).

- потребляемая мощность одного канала 0,22 мВт;
- размер конфигурационной памяти 360 бит.

Главным изменением в ИС VA64TA1 стало увеличение постоянной времени формирования в БУФ, что уменьшило шумы на выходе БУФ и позволяет работать с более низким энергетическим порогом. Схема подключения элементарного ЧЭ к ИС VA64TA1 приведена на рис. 10. Благодаря тому что ИС может работать со входными сигналами как отрицательной, так и положительной полярности, можно использовать ИС одного и того же типа для обслуживания верхних и нижних стрипов кристалла CdTe.

Для двусторонних стриповых детекторов возможно применение схемы подключения к ЗЧУ "по постоянному току" как для нижних стрипов, так и для верхних. Однако использование схемы "по постоянному току" для верхних стрипов связано с большими техническими сложностями, поэтому обычно для нижнего слоя выбирают схему включения "по постоянному току", а для верхнего — "по переменному току". В детекторе СД01 мы реализовали схему "по переменному току" и для верхнего, и для нижнего слоя по причинам, описанным в предыдущем разделе. Кроме того, использование схемы "по переменному току" для нижнего слоя стрипов позволяет легко организовать измерение тока утечки кристалла CdTe. Для этого все резисторы смещения RB_j (где j — номер нижнего стрипа) объединяются цепью "СОММ" и через токоизмерительный резистор RS подключаются к нулевому потенциалу. Падение напряжения на резисторе RS , пропорциональное току, протекающему через кристалл CdTe, легко измеряется. Контроль тока утечки кристалла является очень желательной функцией, так как зависимость величины тока утечки от времени после подачи питания на кристалл позволяет судить о стабильности его электрофизических характеристик.

Поиск сработавшего канала (стрипа) осуществляется внешним контроллером по тому же алгоритму, что и для детектора Д1. Так как ИС, обслуживающих детектор, две, то для уменьшения времени обработки события оцифровка амплитуд сигналов осуществляется параллельно двумя аналого-цифровыми преобразователями (АЦП). В результате работы алгоритма поиска определяется номер верхнего стрипа i и номер нижнего стрипа j , в которых наблюдается максимальная амплитуда сигнала. Контроллер, обслуживающий детектор, сохраняет в блоке данных время события, номера стрипов i и j , а также амплитуды сигнала в трёх нижних стрипах ($E_{\text{Вот}}(j-1)$, $E_{\text{Вот}}(j)$ и $E_{\text{Вот}}(j+1)$) и в трёх верхних стрипах ($E_{\text{Тор}}(i-1)$, $E_{\text{Тор}}(i)$ и $E_{\text{Тор}}(i+1)$). Знание энерго-

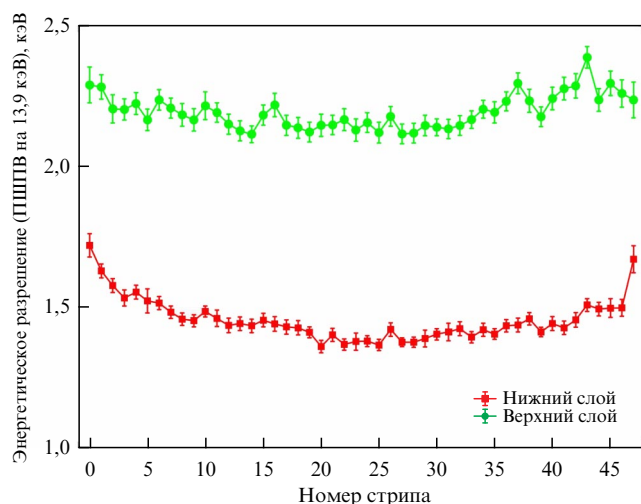


Рис. 11. Зависимость энергетического разрешения от номера стрипа для нижнего и верхнего слоёв детектора СД01 (-20°C , -100 В).

выделения в области 3×3 стрипа позволяет классифицировать события как одиночные, двойные и тройные и корректно восстанавливать значения энергии фотона в случае деления заряда между стрипами.

Кроме стандартного блока данных, контроллер может генерировать расширенный блок данных, содержащий все амплитуды сигналов в нижнем и верхнем слоях, что позволяет зарегистрировать полное энерговыделение во всём кристалле. Однако этот режим очень затратный по количеству генерируемой детектором информации и используется только для проверки детектора и для проведения специфических исследований (например, для регистрации заряженных частиц).

Калибровки детекторов СД01 проводились на Наземном испытательном комплексе (ИКИ РАН) [14] и на установке PANTER X-ray test facility (Max Plank institute for extraterrestrial physics, Германия). Типовая зависимость энергетического разрешения от номера стрипа для нижнего и верхнего слоёв приведена на рис. 11. Для построения таких зависимостей были использованы спектры источника ^{241}Am с отбором только одиночных (в нижнем или верхнем слое) событий. Ухудшение энергетического разрешения от центральных к периферийным стрипам связано с постепенно увеличивающейся длиной связи между входом ЗЧУ и стрипом и, соответственно, увеличивающейся паразитной ёмкостью на входе ЗЧУ. Разница в энергетическом разрешении между нижним и верхним слоями связана с двумя факторами. Первый фактор — наличие дополнительного тока утечки конденсаторов, работающих в верхнем слое под высоким напряжением, приводящего к увеличению шумов электроники. Второй фактор связан с тем, что в СdТе производство подвижности на время жизни дырок на два порядка меньше, чем у электронов. Поэтому линии в спектре, набранном в верхнем слое, работающем с дырочной составляющей индуцированного сигнала, уширяются в сторону низких энергий. Ещё один эффект, ухудшающий энергетическое разрешение в крайних стрипах, связан с тем, что для них половина двойных событий происходит на границе стрипа с охранным кольцом, и эти события классифицируются как одиночные, что также приводит к уширению спектральных линий в сторону низких энергий.

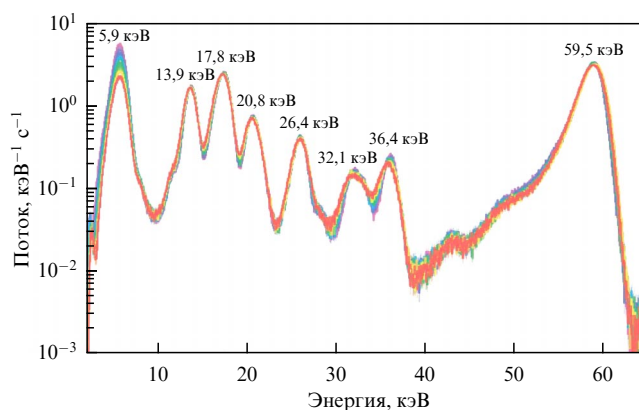


Рис. 12. Спектры комбинированного калибровочного источника ^{55}Fe и ^{241}Am , набранные детектором СД01 за период с декабря 2019 г. (фиолетовый цвет) по сентябрь 2023 г. (красный цвет).

Эффективность регистрации фотонов кристаллом детектора СД01 совпадает с эффективностью детектора Д1 (см. рис. 7).

Семь детекторов СД01 в составе телескопа ART-XC им. М.Н. Павлинского на космическом аппарате "Спектр-РГ" 13 июля 2019 г. были запущены ракетой-носителем "Протон-М" с разгонным блоком ДМ-03 в точку либрации Лагранжа L2 системы Земля – Солнце. С 18 июля 2019 г. началась калибровка детекторов и с 25 августа 2019 г. телескоп перешёл к наблюдениям небесных объектов в штатном режиме.

Для контроля параметров детекторов СД01 в полёте периодически (примерно один раз в два месяца) проводится их калибровка от комбинированных образцовых источников излучения ^{55}Fe и ^{241}Am . Типовое время калибровки составляет один час. В сутки калибруется только один детектор, остальные шесть детекторов в то же время продолжают обзор небесной сферы. Это сделано для того, чтобы во время калибровки не прерывать программу наблюдений телескопа. Таким образом, калибровка всех детекторов занимает семь суток. С использованием калибровочных данных для каждого стрипа определяется передаточная функция "канал АЦП – энергия", которая впоследствии используется для обработки наблюдательных данных на период до следующей калибровки.

На рисунке 12 показаны все спектры комбинированного калибровочного источника, набранные одним детектором с декабря 2019 г. по сентябрь 2023 г. Каждый спектр представляет собой сумму спектров по всем элементарным ЧЭ (пикселям), при этом для определения энергии каждого фотона значения энергии, зарегистрированные в верхнем и нижнем слое, складываются с минимизацией дисперсии. Уменьшение высоты пика на энергии 5,89 кэВ происходит из-за распада изотопа ^{55}Fe (период полураспада 2,737 года). Небольшое уменьшение высоты остальных пиков связано с постепенным ухудшением энергетического разрешения из-за радиационных повреждений кристалла СdТе. В целом все детекторы СД01 демонстрируют высокую стабильность своих характеристик.

4. Детектор для проекта "Гамма-400"

Благодаря меньшей энергии образования электрон-дырочной пары, лучшим характеристикам подвижности

и времени жизни носителей заряда, более совершенным кристаллам и лучше отработанной технологии изготовления кремниевые детекторы превосходят детекторы из CdTe по энергетическому разрешению. Современные кремниевые детекторы со структурами SDD (Silicon Drift Detector), CCD (Charge Coupled Device) и DepFET (Depleted Field Effect Transistor) вплотную подошли к теоретическому пределу энергетического разрешения кремниевого детектора — 118 эВ (ПШПВ на энергии 5,89 кэВ).

Кремниевые дрейфовые детекторы (SDD) [15] имеют прекрасное энергетическое и временное разрешение, однако требуют отдельного канала обработки сигнала на каждый пиксель изображения. Это затрудняет их использование в качестве фокальных детекторов с высоким пространственным разрешением, однако они находят своё применение в спектрометрах без пространственного разрешения в пределах поля зрения, таких как, например, в проектах NICER [16] и LOFT [17].

Детекторы на основе CCD широко используются в рентгеновских астрофизических телескопах на борту обсерваторий: "Chandra", "XMM/Newton", "Swift" (телескоп XRT), "Спектр-РГ" (телескоп eRosita) и др. Матрицы рентгеновских CCD зарекомендовали себя как высоконадёжные изделия для космических применений. Например, детекторы телескопа eRosita [18], построенные на pnCCD с матрицей 384×384 пикселей с размером 75 мкм, имеют энергетическое разрешение 128 эВ (ПШПВ на энергии 5,89 кэВ). Однако их основным недостатком является большое время обработки одного кадра (порядка 50 мс). Поэтому из-за эффекта наложения событий (pile-up) при работе в полнокадровом режиме эти детекторы сложно использовать для наблюдения ярких или быстропеременных источников. По сравнению с CCD детекторы на основе полупроводниковых структур DepFET способны обеспечить на два порядка большее быстродействие при том же размере матрицы и сохранении такого же энергетического разрешения. Именно поэтому детектор на основе DepFET был выбран для прибора WFI [19] в новом рентгеновском телескопе Athena (Европейское космическое агентство).

Полупроводниковая структура DepFET [20] работает в режиме бокового обеднения (sideward depletion). Структура ЧЭ DepFET и его эквивалентная схема приведены на рис. 13. Структура изготавливается на подложке из высокоомного кремния n-типа. С двух сторон подложки формируются p^+ -контакты, представляющие собой p - n -переходы к n -подложке. Дополнительная n^+ -область размещается за пределами ЧЭ DepFET и обеспечивает омический контакт к n -подложке. Потенциалы на n^+ -контакт и два p^+ -контакта подаются таким образом, чтобы p - n -переходы были обратно смещены и их внутренние области пространственного заряда перекрылись, обеспечив режим обеднения по всей толщине подложки (т.е. на n^+ подаётся положительное напряжение, а на p^+ — отрицательное).

Если на контакты p^+ подать одинаковый отрицательный потенциал относительно n^+ -контакта, то максимум потенциала окажется точно посередине подложки. Если же подать на нижний p^+ -контакт более отрицательное напряжение, чем на верхний p^+ -контакт, то геометрическое положение максимума потенциала будет смещаться по направлению к верхней стороне подложки, одновременно уменьшаясь по величине относительно

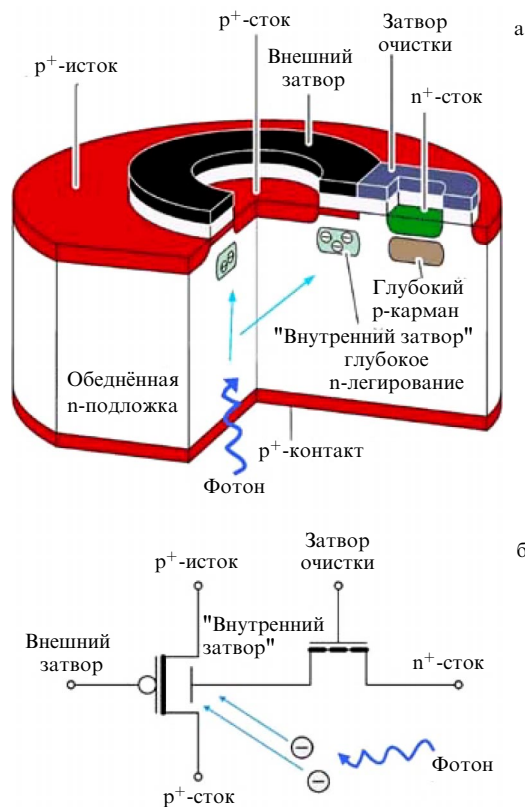


Рис. 13. (а) Модель ЧЭ DepFET и (б) его эквивалентная электрическая схема.

потенциала n^+ -контакта. Для компенсации такого негативного эффекта вводится дополнительное глубокое легирование n-типа. Наличие дополнительного легирования позволяет поднять величину потенциала в данной области практически до величины потенциала n^+ -контакта. Изменяя распределение донорной примеси, можно управлять положением (по плоскости и глубине) этого потенциального максимума, создающего в подложке потенциальную яму для электронов. Таким образом, все свободные электроны, образовавшиеся за счёт тепловой генерации или поглощения фотона, будут дрейфовать в направлении потенциальной ямы и оставаться там, пока не рекомбинируют. Все образовавшиеся свободные дырки будут дрейфовать в направлении p^+ -контактов.

Нижний p^+ -контакт делается очень тонким и представляет собой входное окно ЧЭ для регистрации фотонов. Верхний p^+ -контакт, разделённый поликремниевым затвором (внешний затвор), образует p -канальный МОП-транзистор. Подача отрицательного потенциала на внешний затвор относительно p^+ -стока формирует под затвором p -канал и обеспечивает протекание тока между стоком и истоком транзистора. Однако накопление электронов в потенциальной яме непосредственно под каналом МОП-транзистора, т.е. появление там отрицательного потенциала относительно потенциала p^+ -истока, приводит к такому же результату — формированию канала и протеканию тока между истоком и стоком. Из-за способности модулировать проводимость канала транзистора область глубокого n -легирования называют "внутренний затвор". Предположим, что в начальный момент времени в потенциальной яме нет электронов и на электроды транзистора поданы постоянные напряжения. Это обес-

печивает протекание постоянного тока стока. По мере заполнения потенциальной ямы электронами ток стока начнёт увеличиваться, и увеличение тока стока будет пропорционально количеству электронов, попавших в потенциальную яму. Изменяя изменение тока стока, можно определить количество накопленных электронов.

По мере накопления электронов в потенциальной яме ширина канала будет увеличиваться и достигнет максимума, после чего поступление дополнительных электронов перестанет модулировать проводимость канала и структура потеряет свои усилительные свойства. Для того чтобы убирать электроны из потенциальной ямы, в ЧЭ DepFET встроены второй МОП-транзистор — транзистор сброса. Для создания этого транзистора и его изоляции от основного транзистора структуры формируется р-карман. Транзистор сброса образуется n^+ -сточком, поликремниевым затвором и областью глубокого n -легирования (исток) и представляет собой n -канальный МОП-транзистор. Подавая положительный потенциал на n^+ -сток и затвор транзистора сброса, можно полностью убрать заряд с внутреннего затвора, вернув структуре усилительные свойства.

ЧЭ DepFET обладает рядом замечательных свойств, делающих его "идеальной" структурой для детектирования рентгеновского излучения:

- одновременное генерирование сигнала и его усиление без промежуточных связей;
- сверхмалая величина ёмкости внутреннего затвора на уровне единиц фемтофард;
- возможность длительного хранения накопленных электронов;
- возможность многократного, неразрушающего измерения накопленного заряда;
- хорошая эффективность на низких энергиях за счёт очень тонкого и однородного входного окна;
- возможность формировать матрицы ЧЭ без наличия границ между ними;
- возможность детектировать излучение, когда основной транзистор и транзистор сброса закрыты.

Размеры основного МОП-транзистора стремятся сделать как можно меньше для уменьшения величины ёмкости внутреннего затвора и получения максимального усиления, но одновременно уменьшается размер ЧЭ. Для того чтобы сделать размер ЧЭ больше размера основного МОП-транзистора, необходимо обеспечить дрейф электронов в потенциальную яму не только в вертикальном, но и в горизонтальном направлении. Это достигается созданием с верхней (приборной) стороны подложки системы концентрических электродов (колец) вокруг МОП-транзистора. Подавая на данные кольца определённое распределение потенциала, можно сформировать электрическое поле в горизонтальном направлении таким образом, чтобы все электроны двигались в направлении центра к внутреннему затвору. Получается гибридная структура SDD и DepFET. Для структур размером 100 мкм используется одно дрейфовое кольцо, для 150 мкм — два и т.д.

Возможность накопления заряда, когда оба транзистора ЧЭ находятся в выключенном состоянии, позволяет организовать ЧЭ DepFET в двумерную матрицу, тем самым резко снизив необходимое количество внешних каналов обработки сигнала. Электрическая схема матрицы с размером 3×3 ЧЭ DepFET приведена на рис. 14. На истоки всех транзисторов в матрице (сигнал "DF_SOURCE") подаётся одинаковое постоянное напря-

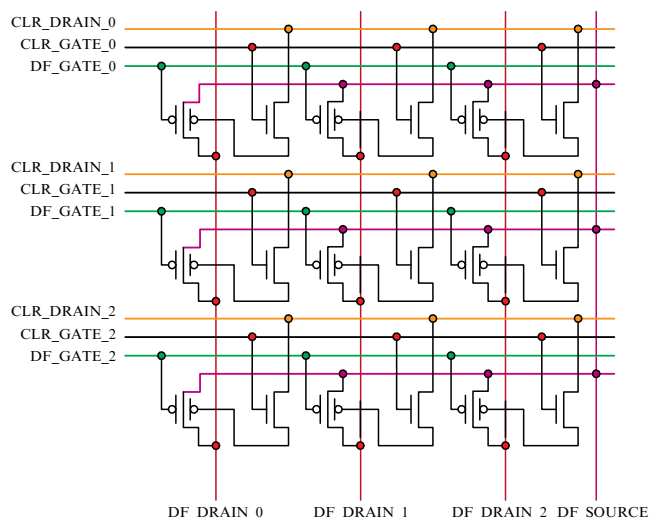


Рис. 14. Электрическая схема матрицы размером 3×3 ЧЭ DepFET.

жение. Линии столбцов (сигналы "DF_DRAIN") подключаются к усилителям считывания. Работа с матрицей осуществляется построчно. Каждая строка управляется тремя сигналами. Сигналом "DF_GATE" включаются основные транзисторы ЧЭ в одной строке. Так как транзисторы во всех остальных строках выключены, то к каждой линии столбца оказывается подключён сток только одного транзистора, что позволяет измерить его ток и определить количество накопленного на внутреннем затворе заряда. Это так называемая первая выборка. Далее включается транзистор сброса (сигналами "CLR_DRAIN" и "CLR_GATE"), и накопленный заряд убирается из внутреннего затвора. Затем снова измеряется ток стока в отсутствие накопленного заряда, т.е. делается вторая выборка. По разнице значений первой и второй выборки оценивается количество накопленных электронов и энергия зарегистрированного фотона. По завершении работы с текущей строкой все транзисторы в данной строке переводятся в выключенное состояние и представленный алгоритм повторяется для следующей строки. Такой способ опроса матрицы называется методом "вращающегося затвора".

Для управления матрицей ЧЭ DepFET необходимо использовать два типа ИС. ИС первого типа называется "коммутатор" (switcher). Её назначение — подача управляющих сигналов на строки матрицы для выбора активной строки и сброса элементов DepFET. Характерным представителем этого типа ИС является ИС Switcher-A [21] для прибора WFI. Второй тип ИС — многоканальные времявариантные усилители-формирователи. Представителями данного типа ИС являются ИС серии CAMEX [22]. ИС указанной серии предназначены как для работы с детекторами на основе CCD (например, ИС CAMEX 128JD, используемая в телескопе eRosita [23]), так и на основе DepFET (например, CAMEX PIXEL 64L).

Время считывания одного кадра равно времени обработки строки, умноженному на количество строк. Для уменьшения времени считывания и увеличения быстродействия детектора используют следующие подходы. Кадр делится на два полукадра, и каждый полукадр обрабатывается своим комплектом ИС параллельно, что увеличивает скорость считывания в два раза. Второй подход — это обработка не одной строки, а двух строк

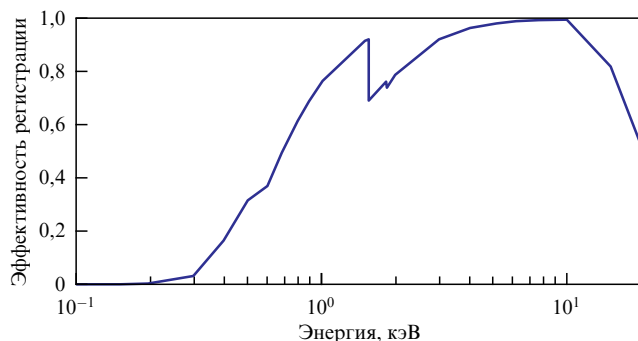


Рис. 15. Эффективность регистрации фотонов кремниевым детектором толщиной 725 мкм (внешний фильтр: Al (100 нм) и лавсан (300 нм); оптический фильтр на кристалле: Al (200 нм), Si₃N₄ (40 нм) и SiO₂ (30 нм)).

одновременно, что также увеличивает скорость считывания в два раза и также требует удвоения количества каналов обработки сигналов. Применяя оба подхода одновременно, можно уменьшить время считывания кадра в четыре раза, однако за такое быстродействие придётся заплатить четырёхкратным увеличением количества каналов обработки сигналов и практически четырёхкратным увеличением потребляемой детектором мощности.

В рамках эскизного проекта "Гамма-400" ИКИ РАН было предложено использование детектора на основе матрицы элементов DepFET в качестве фокального детектора для телескопа с рентгеновской оптикой, аналогичной оптике телескопа ART-XC им. М.Н. Павлинского. Основные параметры детектора:

- размер матрицы 192 × 192 ЧЭ;
- диаметр ЧЭ 150 мкм;
- толщина кристалла 725 мкм;
- линейный размер чувствительной области 28,8 × 28,8 мм;
- энергетическое разрешение 150 эВ (ПШПВ на энергии 5,89 кэВ);
- динамический диапазон 20 кэВ;
- время считывания кадра 432 мкс (при считывании двух строк одновременно);
- потребляемая детектором мощность 5 Вт;
- рабочая температура кристалла от –100 до –80 °С.

Изготовителем матрицы ЧЭ DepFET и ИС управления и обработки сигналов планировалась компания PNSensor (Германия).

Расчётная эффективность регистрации фотонов кремниевым детектором толщиной 725 мкм приведена на рис. 15. В данной характеристике учтено наличие перед детектором внешнего защитного окна и оптического блокирующего фильтра на кристалле детектора. Структура защитного окна: Al (100 нм) и лавсан (300 нм). Структура оптического фильтра на кристалле: Al (200 нм), Si₃N₄ (40 нм) и SiO₂ (30 нм).

В рамках эскизного проекта по заказу ИКИ РАН фирмой PNSensor был изготовлен макет детектора с матрицей 32 × 32 ЧЭ DepFET размером 150 мкм. Общий вид макета приведён на рис. 16. В состав макета входит матрица ЧЭ DepFET, ИС SWP1 (64-канальный "коммутатор") и ИС CAMEX PIXEL 64L (64-канальный усилитель-формирователь). Матрица ЧЭ DepFET в макете обеспечивает считывание двух строк одновременно, тем самым точно имитируя алгоритм работы полноценного детектора.

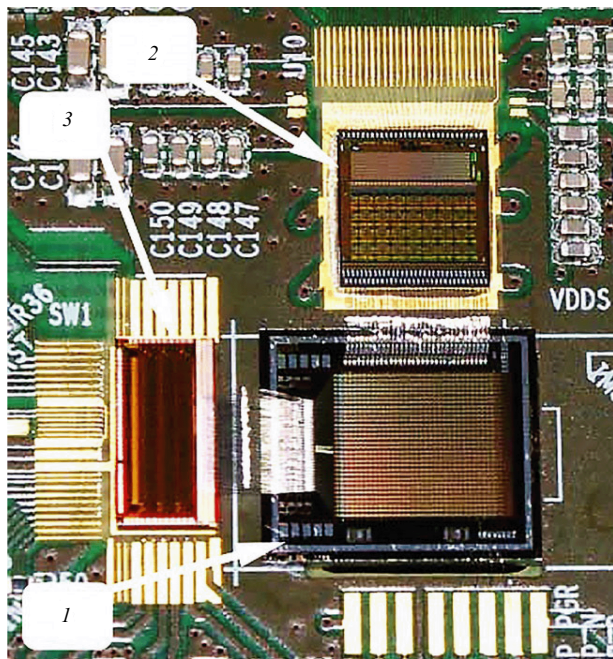


Рис. 16. Макет детектора (PNSensor, Германия): 1 — матрица ЧЭ DepFET 32 × 32; 2 — ИС CAMEX PIXEL 64L; 3 — ИС SWP1.

Блок управления и гермоконтейнер для испытаний детектора были разработаны и изготовлены ИКИ РАН. Общий вид изготовленных блоков показан на рис. 17. Испытания проводились в климатической камере. Во время испытаний макет детектора помещался в гермоконтейнер, который заполнялся азотом с точкой росы ниже –45 °С.

Для калибровки детектора использовался комбинированный источник излучения ⁵⁵Fe и ²⁴¹Am. Весь поток данных (т.е. полные кадры 32 × 32 ЧЭ) записывался на жёсткий диск персонального компьютера для последующей обработки. Обработка накопленных данных осуществлялась после завершения наблюдений (постфактум). Алгоритм обработки следующий. На первом этапе с использованием всех полученных кадров для каждого ЧЭ (пикселя) строился сырой амплитудный спектр. В сыром спектре идентифицировались положения спектральных линий с известной энергией, и полученные точки на кривой "канал АЦП – энергия" аппроксимировались квадратичной функцией. В результате получались 32 × 32 функции для перехода от каналов АЦП к энергии. На втором этапе осуществлялось преобразование всех накопленных кадров из единиц измерения "канал АЦП" в электронвольты. На третьем этапе для первого кадра производились следующие операции:

- поиск пикселя, в котором амплитуда сигнала превысила заданное значение порога (в энергетических единицах);
- сохранение кластера размером 3 × 3 пикселя вокруг найденного пикселя.

После нахождения всех кластеров в пределах кадра, которые являются кандидатами в событие, проводился поиск пересечений между кластерами и объединение двух (или более) пересекающихся кластеров в один. Далее для каждого кластера проводилась операция классификации событий. Событие считалось "одиночным", если в пределах всего кластера амплитуда сигнала только в одном пикселе находится выше порога, при этом энергия фо-

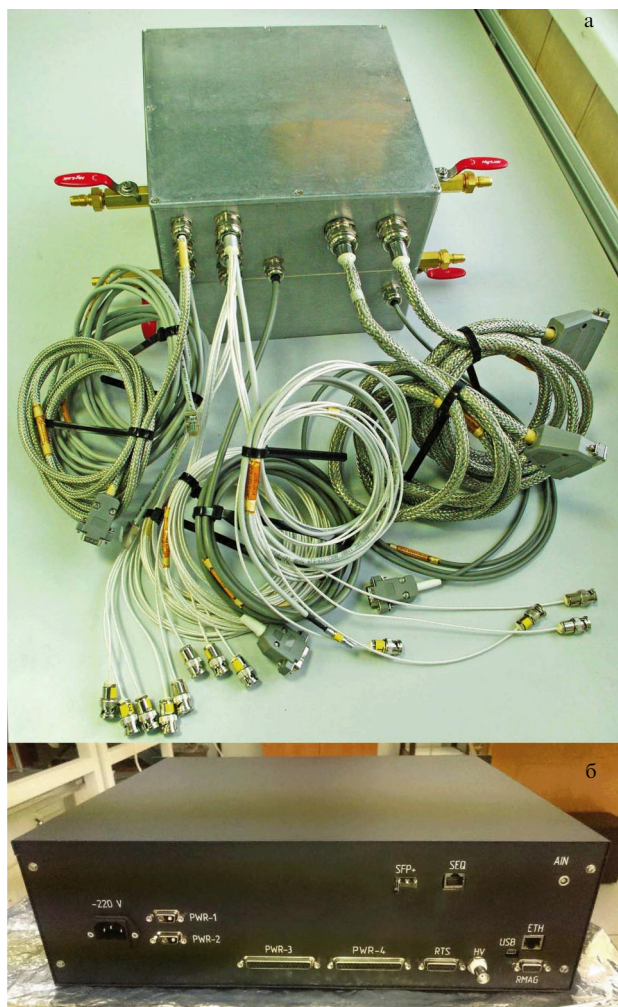


Рис. 17. (а) Гермоконтейнер для детектора и (б) блок управления детектором.

тона считается равной энергии, зарегистрированной в данном пикселе. Событие считается "двойным", если амплитуда выше порога зафиксирована только в двух смежных пикселях в пределах кластера. Тогда энергия фотона вычисляется как сумма амплитуд в двух пикселях. Координатой регистрации фотона считается номер пикселя с большей амплитудой. Событие считается "тройным", если амплитуда сигнала в трёх смежных пикселях, расположенных буквой "Г", превышает порог. Энергия фотона вычисляется теперь как сумма амплитуд в трёх пикселях. Координатой регистрации фотона также считается номер пикселя с большей амплитудой. Кластеры с другими конфигурациями энерговыделения для построения спектров калибровочного источника не использовались, так как, по нашему мнению, они не могут генерироваться фотонами рабочего энергетического диапазона. Из всех найденных в пределах кадра событий формировался список, содержащий для каждого события: время кадра, номер пикселя, энергию фотона и тип события. Далее по этому алгоритму выполнялась обработка всех накопленных кадров. На четвёртом этапе, используя полученные списки событий, выполнялось построение трёх амплитудных спектров (одиночных, двойных и тройных событий) в каждом пикселе. Результат работы данного алгоритма приведён на рис. 18, показывающем результат суммирования всех спектров по всем пикселям детектора.

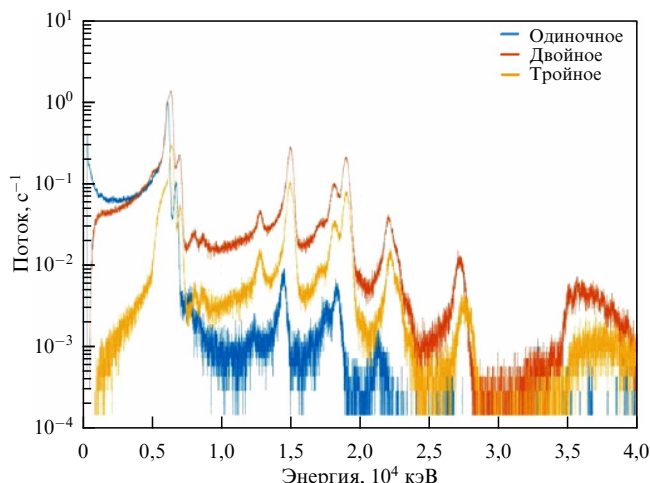


Рис. 18. Спектры комбинированного источника рентгеновского излучения ^{55}Fe и ^{241}Am (приведены отдельно спектры одиночных, двойных и тройных событий) (-41°C , -400 В).

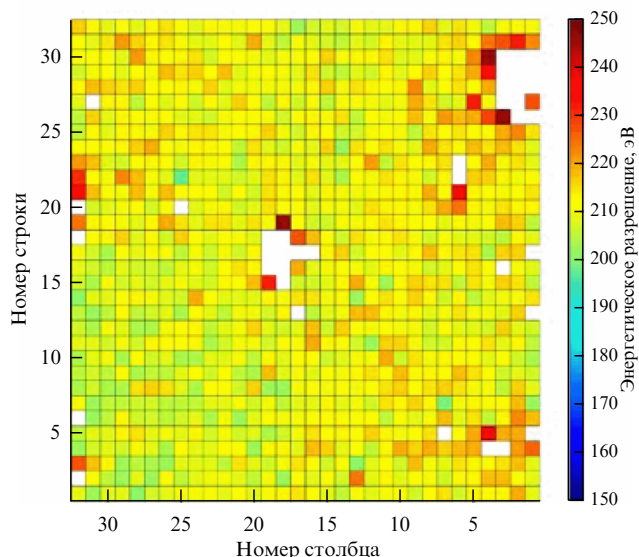


Рис. 19. Распределение энергетического разрешения по пикселям детектора (ПШПВ на энергии 5,89 кэВ) (-41°C , -400 В).

Очевидной проблемой данных спектров является смещение положения максимумов одноимённых пиков друг относительно друга, поэтому их нельзя просто сложить для получения итогового спектра. То есть данный результат тоже нужно считать промежуточным. Следующей итерацией необходимо для каждого пикселя определить три новые передаточные функции энергия – энергия, приводящие спектры одиночных, двойных и тройных событий к единой энергетической шкале. После этого уже можно будет получить итоговый спектр.

Оценка энергетического разрешения детектора приведена на рис. 19. Белым цветом обозначены пиксели, уровень шума в которых превышает 250 эВ. Усреднённое по площади энергетическое разрешение детектора составило 211 эВ (ПШПВ на энергии 5,89 кэВ). При этом для штатного детектора ставится задача получить энергетическое разрешение не более 150 эВ.

Основной сложностью работы с детекторами на основе ЧЭ DepFET является огромный генерируемый поток данных. Для детектора размером 192×192 пикселя при времени считывания кадра 432 мкс и дискретизации

два байта на пиксель "сырой" поток данных составит 170,7 Мбайт с⁻¹. Очевидно, что сохранить в бортовые запоминающие устройства и передать на Землю такой объём данных невозможно. Кроме того, быстродействие существующих в настоящее время микропроцессоров, допускаемых к применению на КА, явно недостаточно для решения задачи поиска событий в этом потоке данных в реальном времени. Единственным, с нашей точки зрения, вариантом решения указанной проблемы является следующий. На первом этапе специализированный аппаратный контроллер решает задачу поиска кластеров 3 × 3 пикселя в потоке событий, тем самым существенно уменьшая поток данных. На втором этапе найденные кластеры передаются на обработку быстродействующему сигнальному микропроцессору, задачей которого является классификация событий, выделение из них одиночных, двойных и тройных и отсеивание событий других типов, очевидно не связанных с фотонами рабочего энергетического диапазона. На третьем этапе списки одиночных, двойных и тройных событий передаются на обработку микропроцессору общего назначения, выполняющему функции упаковки полученных данных в телеметрические кадры, их хранение и передачу в радиоканал.

В рамках эскизного проекта был разработан проект такого аппаратного контроллера и проведена оценка его реализуемости на программируемых логических ИС.

Эскизный проект был успешно защищён в 2019 г., однако до времени написания данной статьи опытно-конструкторская работа по проекту "Гамма-400" на следующий этап так и не перешла.

5. Заключение

В последние годы в ИКИ РАН разработан и изготовлен целый ряд полупроводниковых детекторов рентгеновского излучения для астрофизических приборов. Детекторы СД01 в составе телескопа ART-XC им. М.Н. Павлинского прошли лётные испытания и эксплуатируются на космическом аппарате "Спектр-РГ". Детекторы Д1 в составе КНА МВН планируются к запуску в 2024 г. В настоящее время в ИКИ РАН ведутся разработки перспективных кремниевых детекторов для будущих миссий. Дальнейшее направление работ заключается в разработке собственных ИС обработки сигналов полупроводниковых детекторов и расширении списка потенциальных контрагентов, имеющих опыт и возможность изготовления чувствительных элементов.

Авторы статьи выражают благодарность организациям: Acrorad Co., Ltd. (Япония), Integrated Detector Electronics AS-IDEAS (Норвегия) и PNSensor GmbH (Германия) за многолетнее и плодотворное сотрудничество.

Список литературы

1. Revnivtsev M et al., in *Space Telescopes and Instrumentation 2012: Ultraviolet to Gamma Ray* (Proc. SPIE, Vol. 8443, Eds T Takahashi, S S Murray, J-W A den Herder) (Bellingham, WA: SPIE, 2012) p. 844310
2. Сербинов Д В и др. *Письма в Астрон. журн.* **48** 243 (2022); Serbinov D V et al. *Astron. Lett.* **48** 222 (2022)
3. Pavlinsky M et al. *Astron. Astrophys.* **650** A42 (2021); arXiv:2103.12479; Павлинский М и др. *Письма в Астрон. журн.* **48** 357 (2022)
4. Sunyaev R et al. *Astron. Astrophys.* **656** A132 (2021); arXiv:2104.13267; Сюняев Р и др. *Письма в Астрон. журн.* **48** 301 (2022)
5. Topchiev N P et al. *Adv. Space Res.* **70** 2773 (2022)
6. Kishi N et al., in *2008 IEEE Nuclear Science Symp. Conf. Record, Dresden, Germany, 19–25 October 2008* (Piscataway, NJ: IEEE, 2008) p. 969, <https://doi.org/10.1109/NSSMIC.2008.4774557>
7. Toyama H et al. *Jpn. J. Appl. Phys.* **43** 6371 (2004)
8. Serbinov D V, Semena N P, Pavlinsky M N J. *Eng. Thermophys.* **26** 366 (2017)
9. Tajima H et al., in *X-Ray and Gamma-Ray Telescopes and Instruments for Astronomy* (Proc. SPIE, Vol. 4851, Eds J E Truemper, H D Tananbaum) (Bellingham, WA: SPIE, 2003) p. 875; astro-ph/0212053
10. Tajima H et al. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **51** 842 (2004); astro-ph/0404011
11. Lyons R E, Vanderkulk W *IBM J. Res. Develop.* **6** 200 (1962)
12. Семена Н П *Космические исследования* **56** 311 (2018); Semena N P *Cosmic Res.* **56** 293 (2018)
13. Tanaka T et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **568** 375 (2006)
14. Павлинский М Н и др. *Приборы и техника эксперимента* (2) 118 (2020); Pavlinsky M N et al. *Instrum. Exp. Tech.* **63** 243 (2020)
15. Gatti E, Rehak P *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res.* **225** 608 (1984)
16. Prigozhin G et al., in *Space Telescopes and Instrumentation 2016: Ultraviolet to Gamma Ray* (Proc. SPIE, Vol. 9905, Eds J A den Herder, T Takahashi, M Bautz) (Bellingham, WA: SPIE, 2016) p. 99051H
17. Feroci M et al. *Exp. Astron.* **34** 415 (2012); arXiv:1107.0436
18. Predehl P et al. *Astron. Astrophys.* **647** A1 (2021); arXiv:2010.03477
19. Meidinger N et al., in *Space Telescopes and Instrumentation 2016: Ultraviolet to Gamma Ray* (Proc. SPIE, Vol. 9905, Eds J-W A den Herder, T Takahashi, M Bautz) (Bellingham, WA: SPIE, 2016) p. 99052A; arXiv:1702.01079
20. Kemmer J, Lutz G *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **253** 365 (1987)
21. Plattner M et al., in *Space Telescopes and Instrumentation 2016: Ultraviolet to Gamma Ray* (Proc. SPIE, Vol. 9905, Eds J-W A den Herder, T Takahashi, M Bautz) (Bellingham, WA: SPIE, 2016) p. 99052D
22. Herrmann S et al., in *2008 IEEE Nuclear Science Symp. Conf. Record, Dresden, Germany, 19–25 October 2008* (Piscataway, NJ: IEEE, 2008) p. 2952, <https://doi.org/10.1109/NSSMIC.2008.4774983>
23. Herrmann S et al., *2009 IEEE Nuclear Science Symp. Conf. Record, Orlando, FL, USA, 24 October – 01 November 2009* (Piscataway, NJ: IEEE, 2009) p. 462, <https://doi.org/10.1109/NSSMIC.2009.5401597>

Detectors and integrated circuits of orbiting telescopes

V.V. Levin^(a), A.V. Krivchenko^(b), M.V. Kuznetsova^(c), A.A. Lutovinov^(d), I.A. Mereminskiy^(e), A.A. Rotin^(f)

Space Research Institute (IKI), Russian Academy of Sciences, ul. Profsoyuznaya 84/32, 117997 Moscow, Russian Federation

E-mail: ^(a) vvl@cosmos.ru, ^(b) krivchenko.a@gmail.com, ^(c) maria_kuznetsova@cosmos.ru,

^(d) aal@cosmos.ru, ^(e) i.a.mereminskiy@gmail.com, ^(f) alexeydfg@yandex.ru

Progress in X-ray astronomy is impossible without progress in X-ray detector technology. Currently, semiconductor X-ray detectors provide the best performance in terms of time and energy resolution. This paper presents a description of three types of semiconductor detectors, their sensitive elements, and specialized signal processing integrated circuits for the Spektr-RG and Gamma-400 projects and the MVN (All Sky Monitor) space experiment.

Keywords: X-ray detectors, CdTe, cadmium telluride, strip detectors, silicon detectors

PACS numbers: **29.40.** – n, 85.60.Gz, **95.55.** – n

Bibliography — 23 references

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **194** (4) 404–415 (2024)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFN.2023.04.039587>

Received 21 April 2023

Physics – Uspekhi **67** (4) (2024)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFN.2023.04.039587>