Разработка прототипа камеры атмосферного черенковского телескопа ALEGRO

© А.А. Богданов, Ю.В. Тубольцев, Г.А. Репман, А.М. Красильщиков, Е.Е. Холупенко, Ю.В. Чичагов

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: Alexander.A.Bogdanov@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 24 апреля 2024 г.
В окончательной редакции 30 июля 2024 г.
Принято к публикации 30 октября 2024 г.

Разработан малоразмерный прототип камеры черенковского телескопа ALEGRO. Обсуждены его устройство и конструкция. Создан и испытан макет канала регистрации прототипа камеры черенковского телескопа ALEGRO, на котором был отработан алгоритм работы и определены характеристики используемых кремниевых фотоумножителей и усилительного тракта. По результатам проведенных работ сделан вывод о возможности и перспективности создания уникальной высокогорной обсерватории ALEGRO для исследования гигаэлектронвольтного гамма-излучения энергичных космических объектов.

Ключевые слова: кремниевые фотоумножители, камера телескопа, черенковский телескоп.

DOI: 10.61011/JTF.2024.12.59239.336-24

В настоящее время в диапазоне энергий 3–30 GeV не существует инструментов, обладающих достаточной чувствительностью для исследования широких популяций гамма-источников, поскольку у орбитальных инструментов слишком мала физическая площадь детектирования, а для существующих наземных черенковских гамма-телескопов сигнал от широких атмосферных ливней, вызванных первичными частицами таких энергий (3–30 GeV), оказывается слишком слабым (см., например, [1]). Чтобы иметь возможность заполнить этот пробел, в ФТИ им. А.Ф. Иоффе в течение ряда лет разрабатывается проект уникальной высокогорной черенковской гамма-обсерватории ALEGRO, которая будет обладать предельно низким порогом регистрации космического гамма-излучения на уровне 3–5 GeV [2].

В качестве одного из шагов на пути к созданию обсерватории ALEGRO на базе существующей инфраструктуры обсерватории TAIGA [3], расположенной в Тункинской долине (республика Бурятия), планируется испытать прототип детекторной камеры, разработанный в ФТИ. Поскольку в составе обсерватории TAIGA на протяжении нескольких лет эксплуатируются малые черенковские телескопы TAIGA-IACT, уже показавшие эффективность и надежность реализованных в них технических решений, для уменьшения затрат и ускорения процесса разработки представляется целесообразным использовать существующую инфраструктуру, предусмотрев возможность эксплуатации прототипа аппаратуры ALEGRO в корпусе одного из телескопов серии TAIGA-IACT.

Прототип камеры (рис. 1) спроектирован в виде закрытого прямоугольного параллелепипеда с габаритными размерами 230 × 230 × 500 mm и весом около 6 kg. Детектирующая плоскость размерами 123 × 123 mm содержит 64 пикселя с минимальными зазорами между собой. Пиксели подключены к восьми детекторным модулям рядами по восемь пикселей. Детекторные модули соединены с платами контроллера и питания в задней части прототипа камеры. На раме прототипа предусмотрены восемь точек крепления и два окна для вентиляторов охлаждения.

На рис. 2 представлена структурная схема прототипа камеры ALEGRO. Алгоритм работы прибора заключается в следующем. Пиксели камеры, которые содержат по четыре кремниевых фотоумножителя MicroFC-60035 и предусилитель с переключаемым коэффициентом усиления (диапазоном), подключены к детекторным модулям и передают сигнал на триггерную систему TRIG и микросхему аналоговой памяти DRS4. При превышении сигналом с пикселя порога, заданного с цифроаналогового преобразователя DAC, триггерная система

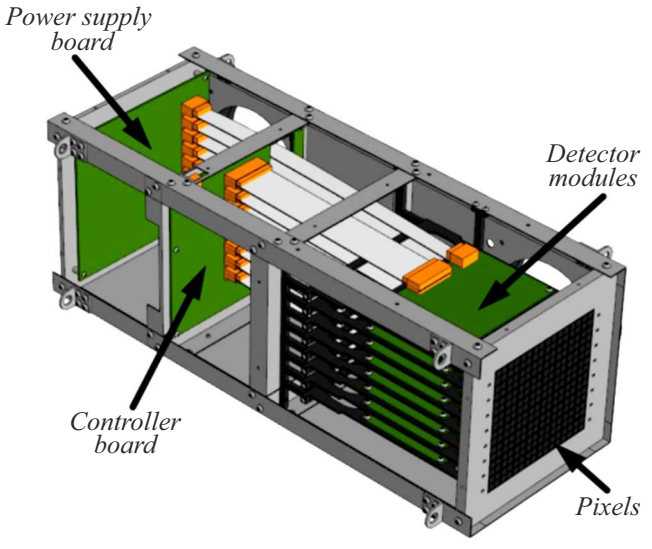


Рис. 1. 3*D*-модель конструкции прототипа камеры ALEGRO без корпуса.

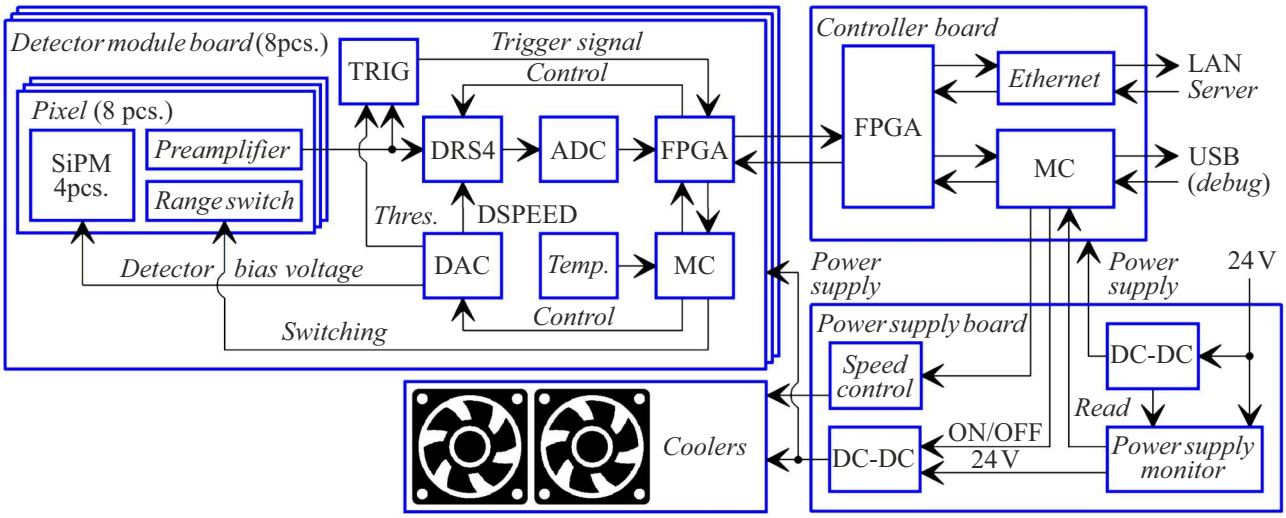


Рис. 2. Общая структурная схема прототипа камеры телескопа ALEGRO.

вырабатывает индивидуальные для каждого пикселя сигналы на программируемую логическую матрицу FPGA (Cyclone III) модуля. Триггерные сигналы всех модулей передаются на FPGA (Cyclone III) платы контроллера. При выполнении триггерных условий FPGA контроллера инициирует процедуру чтения, которая заключается в остановке и последовательном переборе ячеек аналоговой памяти DRS4 управляющими сигналами с синхронным запоминанием оцифрованных значений с аналого-цифрового преобразователя ADC.

Оцифрованные значения, представляющие собой осциллограмму длиной 1024 точки для каждого пикселя, обрабатываются на FPGA для определения амплитуды импульса в каждом пикселе. Сама осциллограмма не сохраняется, из нее лишь извлекается значение амплитуды как разница между уровнем сигнала перед триггером и максимумом сигнала в некотором временном окне (например, 10 ns). В итоге значения амплитуд сигналов, превысивших заданный порог, и временная метка события, вместе образующие запись, сохраняются в памяти FPGA контроллера. Все записи в памяти считываются внешним управляющим компьютером через локальную сеть.

У каждого детекторного модуля имеется микроконтроллер, управляющий цифро- аналоговым преобразователем DAC для установки требуемых пороговых напряжений, напряжений смещения детекторов и управляющих напряжений DRS4, включая напряжение DSPEED для управления частотой стробирования аналоговой памяти. Микроконтроллер модуля также переключает рабочий диапазон пикселей и измеряет температуру для цепи обратной связи, корректирующей напряжение смещения детекторов и скорость вращения вентиляторов охлаждения.

Микроконтроллер платы контроллера управляет включением питания отдельных модулей, контролирует их потребляемую мощность и корректирует скорость вращения вентиляторов охлаждения по показаниям от модулей.

Для лабораторной отработки прототипа камеры был создан макет канала регистрации (рис. 3, *a*), который включает в себя экземпляр восьмиканального детекторного модуля с USB интерфейсом связи с компьютером и один детекторный пиксель на четырех кремниевых фотоумножителях MicroFC-60035.

Макет канала регистрации был испытан в темной камере с применением импульсного лазерного источника излучения (частота 5 MHz, длительность импульса 8 ns, длина волны 650 nm). Выходной сигнал с предусилителя разветвлялся на макет и на осциллограф LeCroy WaveRunner 620Zi с полосой пропускания 2 GHz для оценки соответствия форм одних и тех же регистрируемых импульсов и калибровки коэффициента преобразования канала.

На рис. 3, *b* представлены осциллограммы импульса лазера, снятые одновременно при помощи макета (DRS4) и осциллографа (Osc). Центральный импульс имеет амплитуду 1240 mV и ширину на половине высоты (FWHM) 10 ns. Сравнение двух осциллограмм показывает явное соответствие наблюдаемых форм импульсов. Наблюдаемая на рис. 3, *b* зашумленность сигнала DRS4 объясняется неэквивалентностью ячеек аналоговой памяти DRS4 между собой, что приводит к разным пьедесталам у разных ячеек. Данный эффект можно компенсировать при помощи калибровки, предварительно измерив индивидуальные пьедесталы ячеек при отключенном напряжении смещения детектора.

Отдельные испытания пикселя при коэффициенте усиления предусилителя 100 с регистрацией выходного сигнала темнового счета осциллографом позволили получить распределение амплитуд темнового счета и вычислить величину однофотонного сигнала, которая

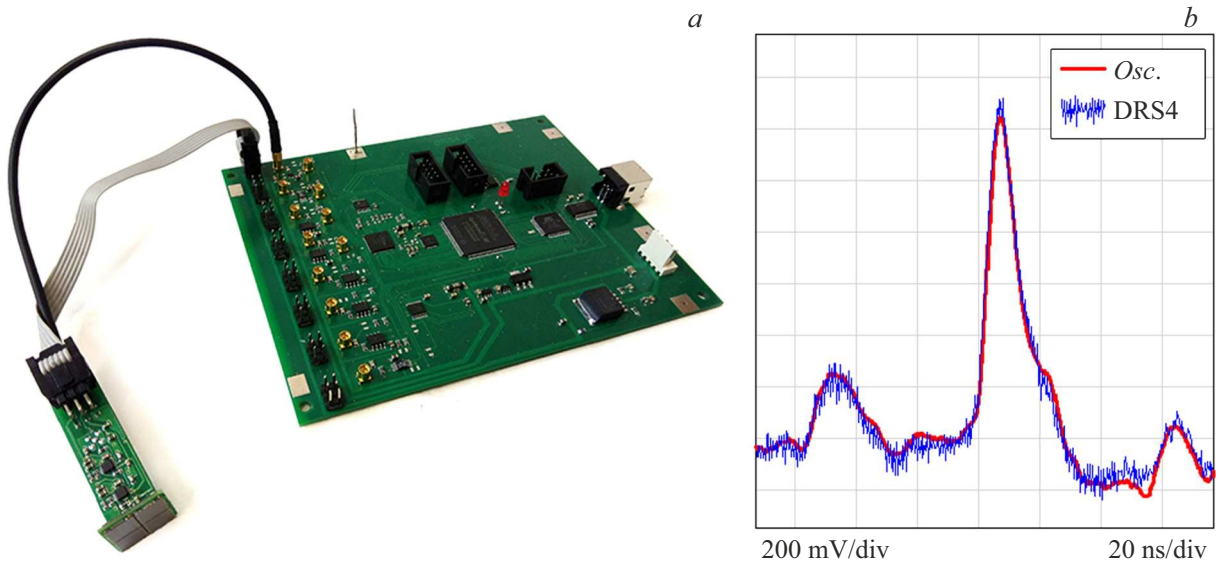


Рис. 3. Фотография созданного макета канала регистрации (*a*) и сравнительное наложение двух осциллограмм одного импульса (*b*).

при перенапряжении 6 V составила 37 mV на фотоэлектрон (под фотоэлектроном здесь и далее понимается единичный сигнал от одной сработавшей микроячейки кремниевого детектора). При перенапряжении 1 V величина однофотонного сигнала составляет уже около 7 mV на фотоэлектрон. Таким образом, с учетом рабочего диапазона усилительного тракта максимальный регистрируемый сигнал с пикселя составляет 200 и 40 фотоэлектронов в диапазоне перенапряжений 1 и 6 V соответственно. В дальнейшем коэффициент усиления может быть скорректирован и расширен введением возможности переключения коэффициента усиления пикселей для регистрации как малых сигналов, так и сигналов с большим количеством фотонов.

Скорость темнового счета для пикселя, состоящего из 4 кремниевых фотоумножителей, составила около 9 MHz при температуре 25°C. Измеренная эффективность регистрации (PDE) кремниевого фотоумножителя MicroFC-60035 при перенапряжении 5 V по методу, описанному в статье [4], составила 10.3% (на длине волны 650 nm) при температуре детектора 25°C, что согласуется с заявленной производителем величиной 12% при 21°C с учетом снижения PDE от повышения температуры детектора. На данном этапе работы измерение PDE было проведено только для длины волны 650 nm в связи с доступностью недорогих источников монохроматического излучения — красных лазеров. Максимальную чувствительность (около 40% при перенапряжении 5 V) SiPM MicroFC-60035 имеют на длине волны примерно 420 nm. Уточнение эффективности регистрации выбранных SiPM является предметом для дальнейших исследований.

В результате проведенных работ была разработана структурная схема, электрические принципиальные схемы и 3*D*-модель конструкции прототипа камеры телескопа ALEGRO. Проведены испытания макета канала регистрации камеры телескопа ALEGRO с целью отработки алгоритмов работы и определения параметров детекторов. Дальнейшее развитие проекта подразумевает корректировку схем, структуры и конструкции прототипа камеры на основе проведенного макетирования, создания опытных образцов, а также проведение лабораторных испытаний и полевых наблюдений в составе обсерватории TAIGA.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] F.A. Aharonian, A.K. Konopelko, H.J. Völk, H. Quintana. Astroparticle Phys., **15**, 335 (2001). https://doi.org/10.1016/S0927-6505(00)00164-X

[2] Е.Е. Холупенко, А.М. Быков, Ф.А. Агаронян, Г.И. Васильев, А.М. Красильщиков, П.Н. Аруев, В.В. Забродский, А.В. Николаев. ЖТФ, **88** (11), 1655 (2018). DOI: 10.21883/JTF.2018.11.46626.176-18 [E.E. Kholupenko A.M. Bykov, F.A. Aharonyan, G.I. Vasiliev, A.M. Krassilchtchikov, P.N. Aruev, V.V. Zabrodskii, A.V. Nikolaev. Tech. Phys., **63** (11), 1603 (2018). https://doi.org/10.1134/S1063784218110154]

[3] L.A. Kuzmichev, I.I. Astapov, P.A. Bezyazeekov, V. Boreyko, A.N. Borodin, N.M. Budnev, R. Wischnewski, A.Y. Garmash, A.R. Gafarov, N.V. Gorbunov, V.M. Grebenyuk, O.A. Gress, T.I. Gress, A.A. Grinyuk, O.G. Grishin, A.N. Dyachok, A.V. Zagorodnikov, V.L. Zurbanov, A.L. Ivanova, Y.A. Kazarina, N.N. Kalmykov, N.I. Karpov, V.V. Kindin, P.S. Kirilenko, S.N. Kiryuhin, V.A. Kozhin, R.P. Kokoulin, K.G. Kompaniets, E.E. Korosteleva, E.A. Kravchenko,

M. Kunnas, A. Chiavassa, A.A. Lagutin, V.V. Lenok, B.K. Lubsandorzhiev, N.B. Lubsandorzhiev, R.R. Mirgazov, R. Mirzoyan, R.D. Monkhoev, R. Nachtigall, E.A. Osipova, M.I. Panasyuk, L.V. Pankov, A.L. Pakhorukov, A.A. Petrukhin, V.A. Poleschuk, M. Popesku, E.G. Popova, A. Porelli, E.B. Postnikov, V.V. Prosin, V.S. Ptuskin, A.A. Pushnin, R.I. Raikin, G.I. Rubtsov, Ya.I. Sagan, V.S. Samoliga, L.G. Sveshnikova, Yu.A. Semeney, A.Y. Sidorenkov, A.A. Silaev, A.A. Silaev Jr., A.V. Skurikhin, M. Slunecka, A.V. Sokolov, V.P. Sulakov, V.A. Tabolenko, B.A. Tarashansky, L.G. Tkachev, A.V. Tkachenko, M. Tluczykont, O.L. Fedorov, A.D. Horns, C. Spiering, A.Sh.M. Elshoukrofy, I.I. Yashin. Phys. Atomic Nuclei, **81**, 497 (2018). https://doi.org/10.1134/S1063778818040105

[4] A.A. Bogdanov, Yu.V. Tuboltsev, Yu.V. Chichagov, S.N. Losev, G.S. Sokolovskii, A.M. Krassilchtchikov, E.E. Kholupenko. J. Phys.: Conf. Ser. **1697**, 012015 (2020). https://doi.org/10.1088/1742-6596/1697/1/012015