

РАЗРАБОТКА ГОДОСКОПА ПЛОЩАДЬЮ ~ 10 М² ИЗ ДРЕЙФОВЫХ ТРУБОК ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ КОСМИЧЕСКИХ МЮОНОВ

© 2024 г. М. Е. Баринов¹⁾, *, В. В. Бирюков¹⁾, А. А. Борисов¹⁾, С. В. Ерин¹⁾, Р. М. Фахрутдинов¹⁾, А. П. Филин¹⁾, В. Н. Гушин¹⁾, А. Н. Исаев¹⁾, А. С. Кожин¹⁾, А. В. Ларионов¹⁾, Н. А. Шаланда¹⁾, М. М. Солдатов¹⁾, В. И. Якимчук¹⁾

Поступила в редакцию 17.10.2023 г.; после доработки 17.10.2023 г.; принята к публикации 17.10.2023 г.

Мюонный годоскоп площадью 10 м², изготовленный из дрейфовых трубок длиной 3.7 м и диаметром 52 мм, находится в стадии разработки и изготовления в НИЦ “Курчатовский институт” — ИФВЭ. Всего 768 дрейфовых трубок сгруппированы в шесть идентичных мультислоев, каждый из которых состоит из двух слоев трубок с параллельно расположенными трубками. Ориентация трубок в соседних мультислоях ортогональна, таким образом, годоскоп имеет шесть *X*- и шесть *Y*-слоев трубок. Описаны механическая конструкция, накамерная электроника и системы сбора данных. Представлены ожидаемые технические характеристики и некоторые результаты испытаний.

DOI: 10.31857/S0044002724020047, EDN: KRUTMQ

1. ВВЕДЕНИЕ

Мюонные годоскопы, состоящие из трековых детекторов большой площади, используются для мюнографии крупномасштабных промышленных, геологических, исторических объектов, таких как ядерные реакторы, доменные печи, вулканы, египетские пирамиды и т.д. [1]. Широко распространенным типом крупногабаритных трековых детекторов для работы в относительно низкоинтенсивных пучках являются дрейфовые камеры, состоящие из отдельных дрейфовых трубок (ДТ) большой длины. Например, детектор ATLAS на Большом адронном коллайдере в ЦЕРНе содержит дрейфовые камеры с чувствительной областью до 10 м², состоящие из ДТ диаметром 30 мм и длиной до 6.3 м [2]. Учитывая, что поток космических лучей не столь интенсивен, для его регистрации целесообразно значительно увеличить диаметр трубки, чтобы минимизировать количество регистрирующих каналов на единицу площади и, соответственно, уменьшить стоимость детектора.

В качестве рабочего газа для работы ДТ может быть использована дешевая газовая смесь 93% Ar + 7% CO₂ при небольшом (несколько десятых бар) избыточном давлении. Как показано в [3], при достаточной герметичности трубок и мониторинге скорости дрейфа они могут работать без непрерывной продувки газовой смесью; после заполнения они могут работать год и даже более без

снижения эффективности и пространственного разрешения.

Целью настоящей работы является разработка и создание мюонного годоскопа с чувствительной областью 10 м², выполненного из ДТ диаметром 52 мм и длиной 3.7 м, расположенных в 12 плоскостях ДТ (6 + 6 плоскостей с ортогональной ориентацией трубок), способного работать в бестриггерном режиме [4] длительное время без обновления рабочего газа, оснащенного специализированной накамерной электроникой. Эскиз и размеры годоскопа приведены на рис. 1.



Рис. 1. Эскиз и размеры годоскопа.

2. ДРЕЙФОВЫЕ ТРУБКИ

Для создания годоскопа используются предварительно модернизированные ДТ (рис. 2), демонтированные с мюонного спектрометра комплекса “Меченых нейтрино” [5], работавшего в НИЦ

¹⁾НИЦ “Курчатовский институт” — ИФВЭ, Протвино, Россия.

* E-mail: Mikhail.Barinov@ihep.ru



Рис. 2. Дрейфовая трубка.

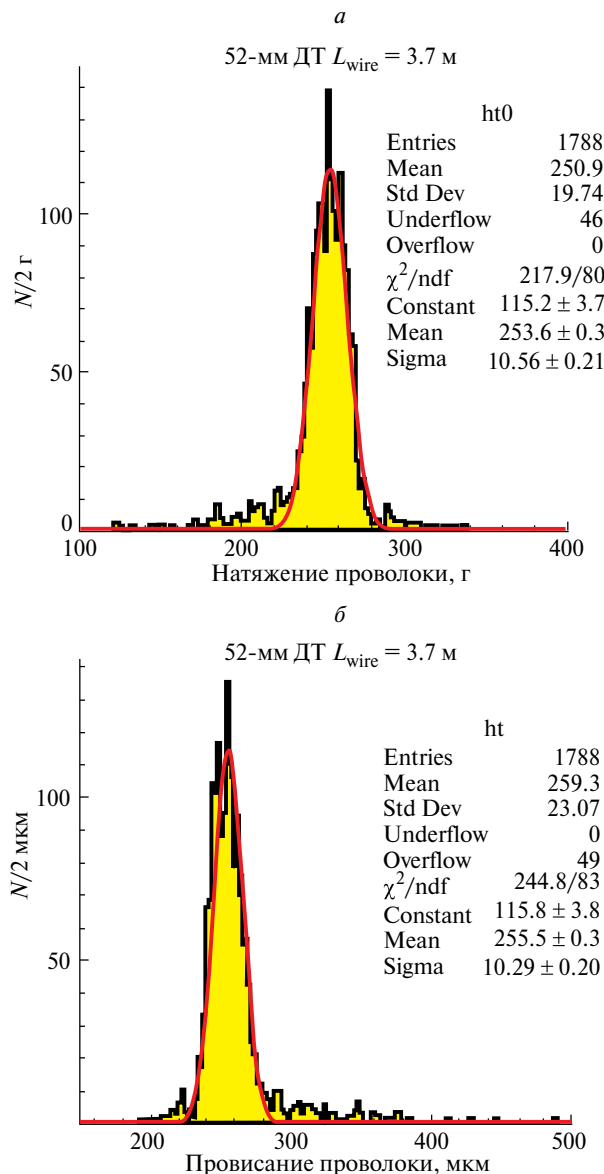


Рис. 3. Распределение натяжения (а) и провисания (б) проволоки.

“Курчатовский институт” — ИФВЭ около 35 лет назад. Корпус ДТ представляет собой алюминиевый цилиндр внешним диаметром 52 мм с толщиной стенки 0.8 мм, внутренняя поверхность которого служит катодом. Анодом служит вольфрамовая позолоченная проволока толщиной 50 мкм, натянутая с натяжением ~ 250 г между двумя торцевыми заглушками и закрепленная пайкой в их центральных латунных штифтах с точностью ~ 1 мм относительно

центров торцевых заглушек. Торцевая заглушка состоит из двух частей — корпуса и крышки, материал — оргстекло. Герметичность ДТ обеспечивается резиновым уплотнительным кольцом диаметром 2 мм, зажатым между этими двумя частями торцевой заглушки с помощью винтов. Подача рабочего газа осуществляется через латунную трубку внутренним диаметром 3 мм, впрыснутую и уплотненную герметиком к корпусу торцевой заглушки.

Из-за старости большинство ДТ потеряли герметичность, поэтому мы заменили уплотнительные кольца во всех ДТ, которые будут использоваться для изготовления годоскопа. Затем была проведена оценка фактической герметичности путем измерения скорости падения давления в группе трубок или, при необходимости, в отдельной трубке, накачанной избыточным давлением ~ 0.5 бар. Мы установили допустимую скорость утечки газа не более 2 мбар/сут, чтобы обеспечить возможность работы без обновления газа не менее одного года [3]. Разумеется, может быть использована и традиционная система непрерывной продувки газовой смеси.

В некоторых ДТ, также из-за старости, наблюдалось ослабление натяжения проволоки и даже их обрыв. Фактическое натяжение проволоки мы измерили по известной методике — путем измерения частоты их резонансных колебаний [6]. Распределения натяжения и расчетного провисания проволоки для 1788 ДТ приведены на рис. 3. Оборванные и ослабленные (до менее 90 г) проволоки были заменены на новые.

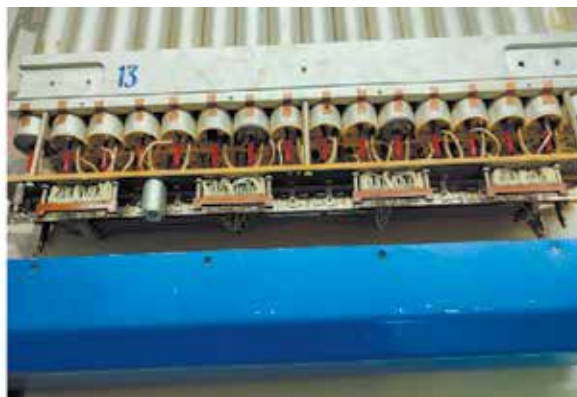
3. КОНСТРУКЦИЯ ГОДОСКОПА

Годоскоп состоит из модулей, каждый из которых состоит из 32 ДТ (рис. 4). ДТ модуля склеены между собой и расположены в два слоя по 16 ДТ в каждом по “методу плотной упаковки”, так что ДТ второго слоя смещены относительно ДТ первого слоя на радиус трубки. Механическая прочность слоя обеспечивается шестью алюминиевыми пластинами (три в верхней части модуля и три в нижней), приклеенными к ДТ. Эти пластины служат также для точного механического сопряжения четырех соседних модулей, образующих X- или Y-мультислой годоскопа в зависимости от ориентации трубок. Описанная конструкция обеспечивает точность расположения ДТ в многослойной конструкции ~ 1 мм.

Три X- и три Y-мультислоя чередуются друг с другом, таким образом, годоскоп имеет всего 12 плоскостей ДТ. Для заполнения или непрерывной продувки газовой смесью $\text{Ar}-\text{CO}_2$ (93–7%) все ДТ мультислоя последовательно соединены гибкими трубками. С одного конца каждого модуля имеется вспомогательная стеклотекстолитовая пластина (рис. 4, б), предназначенная для установки на ней высоковольтных и низковольтных разъемов и распределительных проводников, накамерной



а



б

Рис. 4. Модуль из 32 ДТ, вид с двух торцов.

электроники и электромагнитных экранов, пассивных электронных компонентов, разъемов подачи газа и т.д. Оба торца модуля защищены от механических повреждений защитными экранами из алюминия.

Годоскоп будет размещен в жесткой раме, снабженной регулировочными винтами, обеспечивающими возможность взаимного выравнивания мультислоев во всех направлениях с точностью ~ 1 мм. В результате, наряду с упомянутой выше точностью позиционирования и провисания проволоки, а также точностью 0.5 мм, обусловленной диффузией в газе и соотношением $r-t$ [5], пространственное разрешение годоскопа составит 2.5–3.0 мм, угловое разрешение ~ 3 мрад.

4. НАКАМЕРНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА И СИСТЕМА СБОРА ДАННЫХ

Сигналы, считываемые с ДТ, усиливаются 8-канальным усилителем (рис. 5) на основе интегральной схемы ОКА-2, разработанной по сверхвысокочастотной малощумящей технологии $6\text{-}\mu\text{FET}$, которая позволяет изготавливать $n-p-n$ -транзисторы с пороговой частотой >3 ГГц и коэффициентом усиления по току >150 . Микросхемы выпускаются в пластиковом корпусе QFP48.

Интегральная схема ОКА-2 включает в себя восемь каналов зарядочувствительных усилителей-формирователей-дискриминаторов. Обработка сигнала заключается в преобразовании короткого импульса тока в напряжение и регистрации сигнала, превышающего заданный порог. Выходные сигналы соответствуют стандарту LVDS.

Пороговая чувствительность каналов (всех восьми каналов одновременно) к входному сигналу регулируется в диапазоне напряжений 100–500 мВ. Чувствительность усилителя изменяется в пределах от 0.2 до 1.3 мкА. При пороговом напряжении 150–160 мВ чувствительность усилителя устанавливается на уровне ~ 1 мкА.

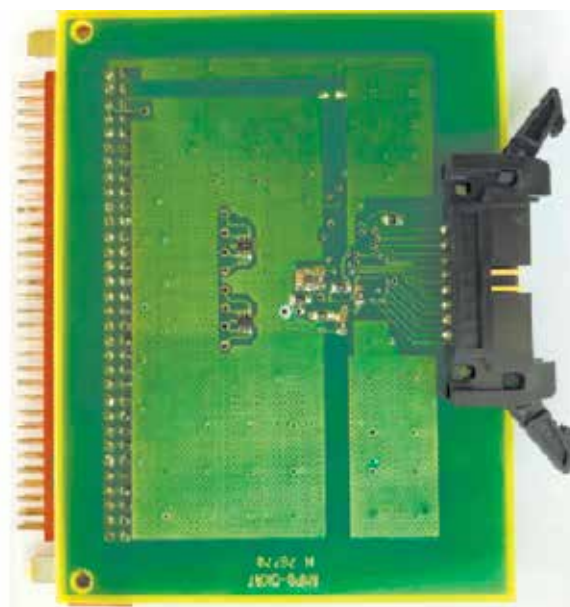
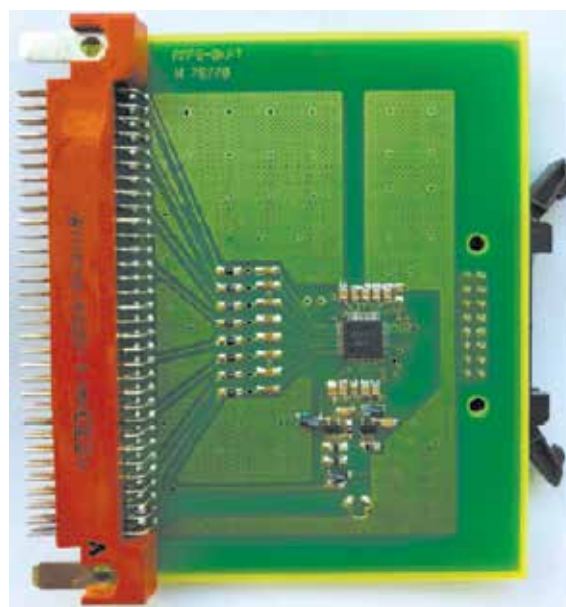


Рис. 5. Фотография 8-канального усилителя, вид с двух сторон.



Рис. 6. Фотография платы NAK-96.

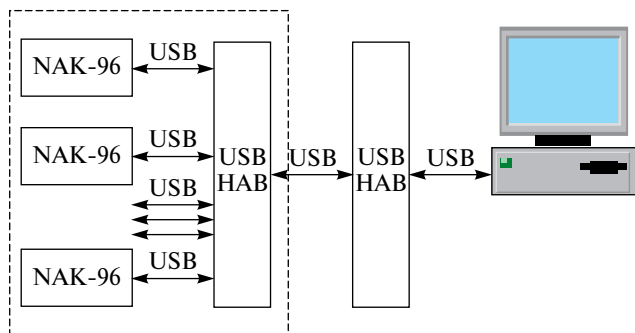


Рис. 7. Схема передачи данных.

Платы NAK-96 [7] (рис. 6) предназначены для использования в качестве устройств времяцифрового преобразования, а также интерфейса к компьютеру. На 12 разъемов платы NAK-96 подается до 96 сигналов от усилителей ДТ в уровнях LVDS (на каждый разъем поступают сигналы от восьми усилителей). При необходимости сигналы с некоторых каналов могут быть замаскированы. Обработка принятых сигналов осуществляется в аппаратном процессоре, реализованном в ПЛИС ALTERA типа EP3C16Q240C8 (производитель ALTERA, Cyclone III). Накопление

промежуточных данных реализуется во внутренней памяти объемом 16 кБ. Управление процессами преобразования и считывания, а также конфигурирование системы из нескольких плат осуществляется через USB-канал.

Регистрация времен прихода сигналов с усилителей происходит непрерывно в течение интервала регистрации (до 27 мс, задаваемого при инициализации) с временем разрешения 1.66 нс (2.5 или 5 нс задается при конфигурировании ПЛИС). Мертвое время регистрации в канале регистрации зависит от максимального времени дрейфа (2.2 мкс для описанных ДТ). Оно устанавливается при конфигурировании ПЛИС. Измерение времени осуществляется 24-разрядными счетчиками с временными нониусами.

Для выполнения операций по установке необходимых параметров платы, контроля правильности введенных параметров, а также чтения данных из внутренней памяти ПЛИС используется мост FPGA-USB, построенный на базе FT2232 IC (Future Devices) и некоторых ресурсов ПЛИС. Мост обеспечивает режим USB 2.0 и скорость 480 Мбит/с.

Одна из плат в системе является MASTER, остальные — SLAVES (определяются при инициализации). Питание платы осуществляется напряжением +5 В с потреблением менее 1 А. Поскольку в каждой многослойной системе четыре модуля ДТ, то оптимально, чтобы одна плата NAK-96 обслуживала два модуля. Это означает, что всего в годоскопе будет использоваться 12 плат NAK-96.

Схема передачи данных с использованием плат NAK-96 приведена на рис. 7.

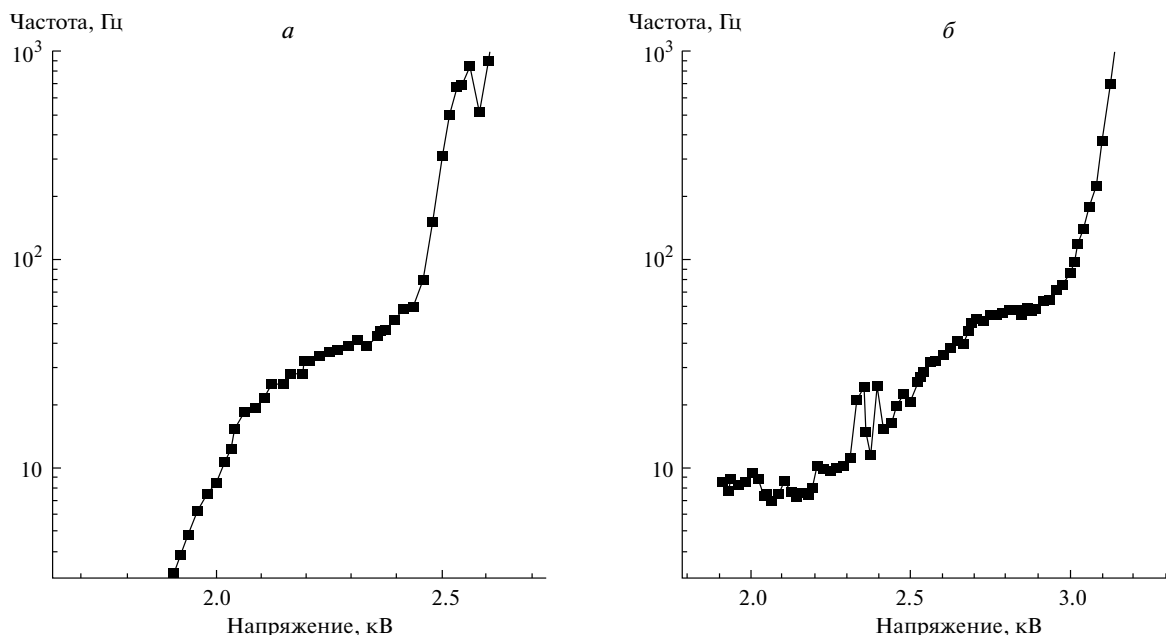


Рис. 8. Зависимость скорости счета от высокого напряжения при нормальном (а) и 1.8 бар (б) давлении газа.

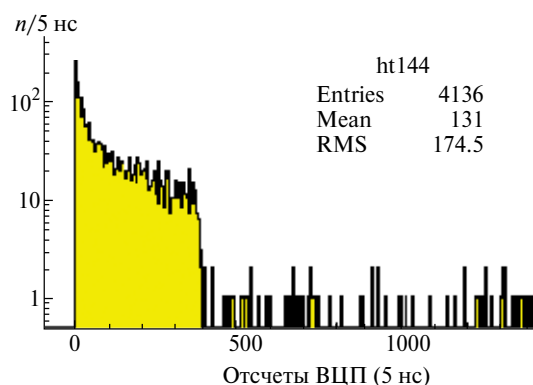


Рис. 9. Спектр ВЦП при давлении газа 1.8 бар.

5. ИСПЫТАНИЯ ДРЕЙФОВОЙ ТРУБКИ

Работоспособность 52-миллиметровой ДТ с газовой смесью 93% Ar + 7% CO₂ при нормальном и повышенном (1.8 бар) давлении была подтверждена с помощью электроники, описанной в [4]. Для испытаний использовались трубки длиной 1 м. Зависимость скорости счета от высокого напряжения, подаваемого на анодную проволоку, показана на рис. 8. Рабочий диапазон составляет 2.2–2.4 кВ при нормальном давлении газа, 2.7–2.9 кВ — при давлении 1.8 бар. Типичный спектр ВЦП показан на рис. 9. Максимальное время дрейфа составляет около 2.2 мкс.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработан и находится в стадии изготовления мюонный годоскоп площадью 10 м², состоящий из ДТ диаметром 52 мм, расположенных в 12 плоскостях ДТ.

2. Все 768 ДТ, входящих в состав годоскопа, прошли контроль качества. Допустимая утечка газа не превышает 2 мбар/сут.

3. Изготовлены опытные образцы накамерной электроники и электроники системы сбора данных.

4. Проведены испытания ДТ длиной 1 м с использованием газовой смеси 93% Ar + 7% CO₂. Рабочий диапазон составляет 2.2–2.4 кВ при нормальном давлении газа, 2.7–2.9 кВ — при давлении 1.8 бар.

5. Пространственное разрешение годоскопа ожидается на уровне 2.5–3.0 мм, угловое разрешение ~ 3 мрад.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. I. I. Yashin, N. N. Davidenko, A. O. Dovgopoly, R. M. Fakhroutdinov, M. M. Kaverznev, K. G. Kompaniets, Yu. N. Konev, A. S. Kozhin, E. N. Paramoshkina, N. A. Pasyuk, M. Yu. Tselinenko, O. P. Yuschenko, and O. V. Zolotareva, *Phys. At. Nucl.* **84**, 1171 (2021).
2. A. Borisov, R. Fakhroutdinov, A. Kozhin, A. Larionov, A. Pilaev, V. Rybatchenko, and Y. Salomatin, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* **494**, 214 (2002).
3. Н. И. Божко, А. А. Борисов, А. С. Кожин, Р. М. Фахрутдинов, Препринт ИФВЭ 2019-14.
4. А. А. Борисов, М. Ю. Боголюбовский, Н. И. Божко, А. Н. Исаев, А. С. Кожин, А. В. Козлов, И. С. Плотников, В. А. Сенько, М. М. Солдатов, Р. М. Фахрутдинов, Н. А. Шаланда, О. П. Ющенко, В. И. Якимчук, *ПТЭ*, № 2, 5 (2012).
5. M. Winde, I. A. Golutvin, V. H. Dodokhov, N. I. Zamyatin, A. V. Karpukhin, Y. T. Kiryushin, N. M. Lustov, V. N. Lysyakov, D. Pose, V. A. Sviridov, and V. N. Sotnikov, in *Proceedings of the International Symposium on Track Detectors*, Dubna, 1988.
6. A. D. Volkov, Preprint E13-2005-197, JINR (Dubna, 2005).
7. М. Солдатов, Презентация на семинаре НИЦ “Курчатовский институт” — ИФВЭ, 2019; <https://indico.ihep.su/event/503/>

DEVELOPMENT OF 10 m² HODOSCOPE MADE OF DRIFT TUBES FOR COSMIC RAY MUON REGISTRATION

© 2024 M. E. Barinov¹⁾, V. V. Biryukov¹⁾, A. A. Borisov¹⁾, S. V. Erin¹⁾, R. M. Fakhroutdinov¹⁾, A. P. Filin¹⁾, V. N. Gushchin¹⁾, A. N. Isaev¹⁾, A. S. Kozhin¹⁾, A. V. Larionov¹⁾, N. A. Shalanda¹⁾, M. M. Soldatov¹⁾, V. I. Yakimchuk¹⁾

¹⁾NRC “Kurchatov Institute” — IHEP, Protvino, Russia

The 10 m² muon hodoscope made of drift tubes with length 3.7 m and diameter 52 mm is under development and construction in NRC “Kurchatov institute” — IHEP. Totally 768 drift tubes are grouped into 6 identical multilayers, each consisting of two tube layers with parallelly placed tubes. Tube orientation in adjacent multilayers is orthogonal, thus the hodoscope has six *X* and six *Y* tube layers. Detailed mechanical structure, on-chamber electronic and data acquisition systems are described. Expected technical characteristics and some test results are presented.