

КАМЕРЫ MICROMEGAS ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТА ATLAS НА LHC

*А. Л. Гонгадзе**

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна
Институт физики им. Э. Андроникашвили, Тбилиси

ВВЕДЕНИЕ	501
MICROMEGAS (MICROMESH GASEOUS STRUCTURE)	506
КАМЕРЫ MICROMEGAS ДЛЯ МОДЕРНИЗАЦИИ МАЛОГО МЮОННОГО КОЛЕСА ATLAS	514
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	527
ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ СОКРАЩЕНИЯ	528
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	529

*E-mail: Alexi.Gongadze@gmail.com

КАМЕРЫ MICROMEGAS ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТА ATLAS НА LHC

*А. Л. Гонгадзе**

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Институт физики им. Э. Андроникашвили, Тбилиси

Увеличение светимости и энергии Большого адронного коллайдера (БАК) на следующей стадии модернизации (Phase-1) в 2018–2019 гг. приведет к существенному росту радиационной загрузки детектора ATLAS в первую очередь в областях, близких к точке взаимодействия протонных пучков БАК. Одной из таких областей является малое колесо (Small Wheel) мюонной системы установки. Его планируется полностью заменить новым малым мюонным колесом (New Small Wheel), где основными координатными детекторами будут камеры Micromegas. В работе дается краткий обзор всех существующих типов камер Micromegas. Особое внимание уделяется камерам Micromegas для детектора ATLAS.

The increase in luminosity and energy of the LHC in the next upgrade (Phase-1) in 2018–2019 will lead to a significant increase in radiation load on the ATLAS detector, primarily in the areas close to the interaction point of the LHC proton beams. One of these regions is the Small Wheel of the ATLAS Muon Spectrometer. It is planned to replace it with the New Small Wheel that will have Micromegas chambers as main coordinate detectors. The paper gives an overview of all existing types of Micromegas detectors with special focus on the Micromegas chambers for the ATLAS detector upgrade.

PACS: 29.40.Cs; 29.40.Gx

ВВЕДЕНИЕ

Газовые детекторы частиц — один из самых распространенных типов детекторов, используемых в ядерной физике [1, 2]. Первые такие детекторы появились в начале XX в. с изобретением однопроволочного пропорционального счетчика и счетчика Гейгера–Мюллера [3]. Они могут считаться предками всех современных газовых детекторов и в течение десятилетия были одним из основных инструментов изучения ионизирующего излучения. Дальнейшее применение ограничивалось отсутствием доступной многоканальной

*E-mail: Alexi.Gongadze@gmail.com

электроники, и до 1968 г. все системы «съема информации» имели оптический характер: фотографические эмульсии, камера Вильсона, пузырьковая камера, искровая камера, годоскопы из счетчиков Гейгера и т. п. Информация с этих детекторов фиксировалась на фотопленке, которая затем анализировалась кадр за кадром. Прорыв произошел в 1968 г. с изобретением Г. Шарпаком многопроволочной пропорциональной камеры (MWPC) [4].

Он показал, что каждая анодная проволока из массива многих, близко расположенных в одной камере, может вести себя в качестве независимого пропорционального счетчика. Кроме того, уровень развития полупроводниковой микроэлектроники позволял снабдить каждый канал (сигнальную проволоку) камеры собственным усилителем, интегрированным в камеру, что дало возможность создать условия для массового производства координатных детекторов на базе пропорциональных камер.

Благодаря своей превосходной по тем временам точности определения положения и скорости счета MWPC была быстро принята на вооружение и стимулировала новое поколение детекторов: дрейфовые и времяпроекционные камеры [5].

Тем не менее MWPC имеет два существенных ограничения — пространственное разрешение и скорость счета. Проволочки не могут быть размещены очень близко из-за механических и электростатических проблем, и, следовательно, ионы не могут быть собраны достаточно быстро. Для того чтобы справиться с этой проблемой, в 1986 г. А. Оед (A. Oed) предложил микрополосковую или, по-другому, микростриповую газовую камеру (MSGC) [6]. MSGC был первым из нового вида детекторов, известных как микроструктурные газовые детекторы (MPGD).

MSGC. Структура электродов микростриповой газовой камеры показана на рис. 1. В состоящей из множества металлических стрипов (анодов и катодов, нанесенных методом фотолитографии на подложку с высоким поверхностным и объемным сопротивлением $10^9\text{--}10^{16}$ Ом·см) MSGC, как и в проволочных камерах, используется процесс лавинного умножения. Альтернативно соединенные аноды и катоды разнесены на 50–100 мкм. Ширина анода 2–10 мкм, а шаг (pitch) составляет от 100 до 1000 мкм. Конфигурация электрического поля в зазоре между катодом и анодом (до нескольких десятков кВ/см) обеспечивает соответствующее газовое усиление (например, 10^4 в аргоновых смесях). Дрейф электронов первичной ионизации в область газового усиления обеспечивается однородным дрейфовым полем (напряженностью в несколько сотен В/см), созданным между анодной плоскостью и расположенным на расстоянии в несколько миллиметров от него дрейфовым электродом. Технология фотолитографии, используемая для производства MSGC, позволяет уменьшить (по сравнению с MWPC) расстояние между электродами по меньшей мере на порядок и, соответственно, повысить многократность срабатывания. Кроме того, быстрый сбор (50–100 нс) положи-

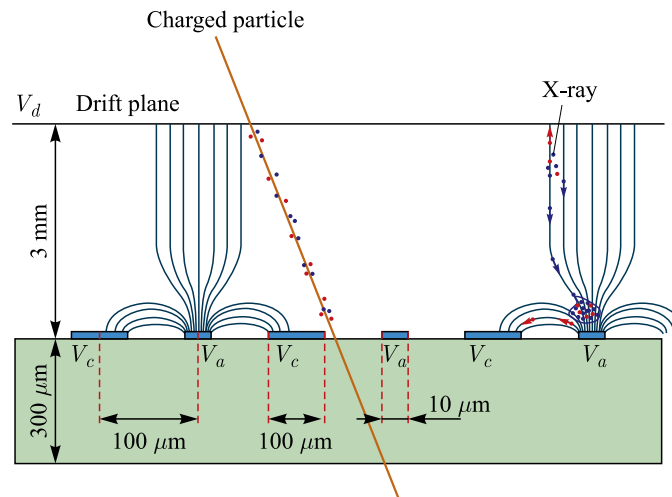


Рис. 1. Структура и функционирование MSGC (<http://gdd.web.cern.ch/GDD/msgc.html>)

тельных ионов близлежащими катодными стрипами уменьшает накопление пространственного заряда и в значительной степени увеличивает скорость счета (10^6 Гц/мм²) [7]. Это в 100 раз больше, чем для MWPC.

Кроме того, данная технология позволяет улучшить пространственное разрешение до 30 мкм [8]. Наконец, точный контроль размеров электродов обеспечивает хорошую однородность усиления по всей поверхности и лучшее разрешение по энергии.

Однако стоит отметить и слабые стороны MSGC-детекторов: старение и разряд. Первая проблема решается правильным подбором материалов и газов [9]. Проблема разряда является неизбежным следствием высокого усиления: во время усиления часть электронов, достигая подложки и тем самым заряжая ее, может сгенерировать очень высокие поля на поверхности подложки и увеличить вероятность разряда. Для более подробной информации о характеристиках и ограничениях MSGC можно обратиться к [1, 10].

Следующей важной вехой в истории MPGD можно считать почти одновременное появление газового электронного умножителя (GEM) и микросеточного газового устройства (Micromegas), предложенных в 1996 г. Ф. Саули (F. Sauli) [11] и И. Гиоматарисом (I. Giomataris) [12] соответственно. Вскоре GEM и Micromegas стали прародителями двух больших семейств современных MPGD-детекторов, таких как структуры, основанные на микроотверстии (GEM, THGEM, RETGEM и Micro-Hole и Strip Plate (MHSP)), и микросеточные или микроячеечные детекторы (Micromegas, Bulk Micromegas, Microbulk Micromegas, InGrid и PiggyBack).

GEM. Газовый электронный умножитель состоит из двух перфорированных слоев металлической фольги (например медной), разделенных, как обычно, 50-мкм изоляционным слоем (например каптоном (полиамидной пленкой)) [11]. Толщина фольги составляет 5–10 мкм. Регулярную структуру отверстий получают химическим травлением. Как правило, отверстия имеют биконическую форму с наружным (внутренним) диаметром 70 мкм (50 мкм) и шагом 100–140 мкм. Приложенная к электродам разность потенциалов в несколько сотен вольт создает высокую напряженность (десятки кВ/см) электрического поля в отверстиях (рис. 2). Первичные электроны, образованные детектируемой частицей в дрейфовой области перед GEM, фокусируются в отверстия, в которых и развиваются электронные лавины (стоит отметить,

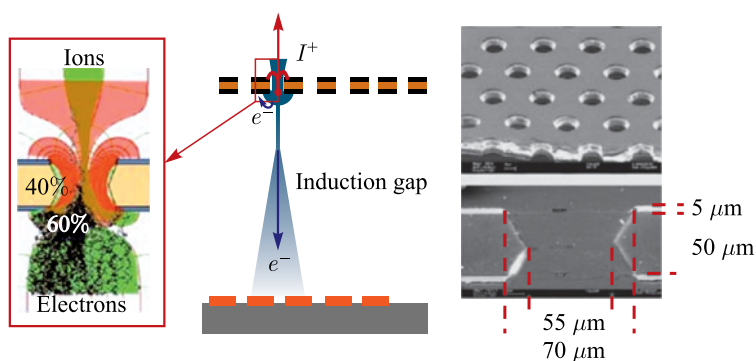


Рис. 2. Микрофотография GEM, карта электрического поля и схема его работы (<http://cerncourier.com/cws/article/cern/41011>)

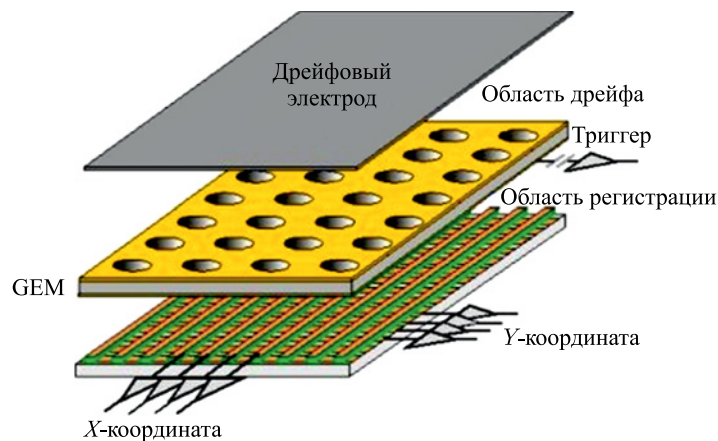


Рис. 3. Схема двухкоординатного трекового детектора на основе GEM (<http://gdd.web.cern.ch/GDD/>)

что только порядка 50–60 % лавинных электронов могут выйти в область регистрации). Таким образом, каждое отверстие можно представить как независимый пропорциональный счетчик.

Если в систему добавить одно- или двухкоординатную анодную плоскость, то благодаря малому диаметру отверстий и шагу между ними можно установить координаты трека частицы с высокой степенью точности (~ 50 мкм) на соответствующей анодной плоскости (рис. 3).

Поскольку газовое усиление единичного GEM не очень высокое (до 10^3), обычно используются несколько последовательных каскадов усиления (рис. 4).

В заключение можно кратко перечислить основные характеристики GEM-детекторов:

- работа в большинстве газовых смесей, включая чистые благородные газы;
- газовое усиление порядка 10^5 ;

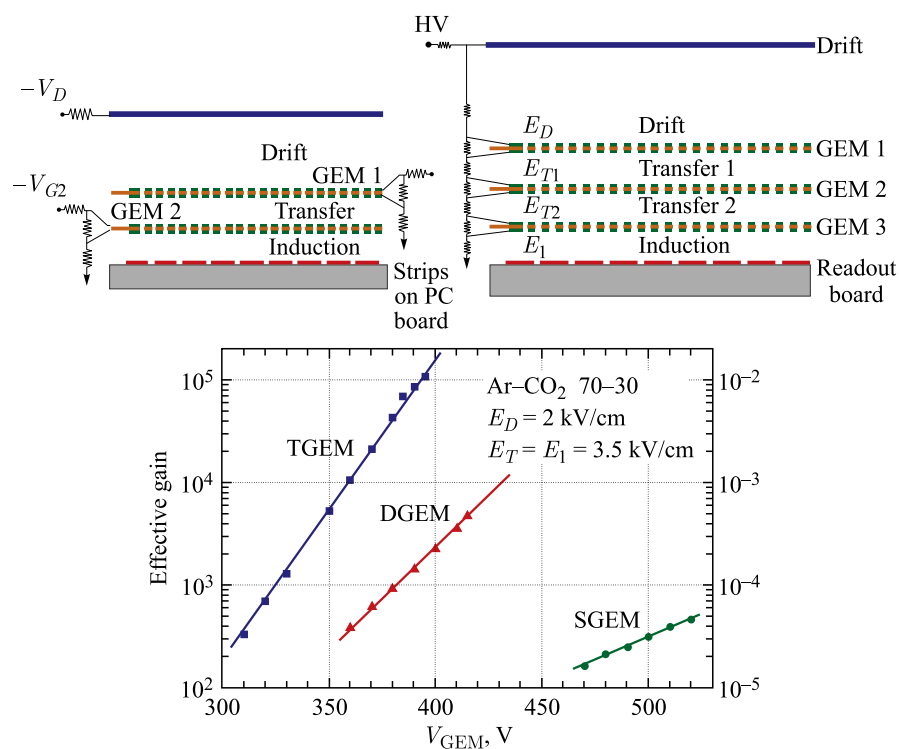


Рис. 4. Схема двух- и трехкаскадного GEM и зависимость газового усиления для одиночной (SGEM), двойной (DGEM) и тройной (TGEM) структуры от напряжения в аргоновой смеси (<http://gdd.web.cern.ch/GDD>)

- разрешение по энергии 18 % FWHM на 5,9 кэВ (^{55}Fe);
- точность пространственной локализации 50 мкм;
- высокая загрузочная способность — свыше 10^5 Гц/мм²;
- активная область до $\sim 0,7$ м²;
- гибкая форма, включая цилиндрическую, детектора и считывающей структуры;
- изотропность.

Для более подробной информации об использовании газовых электронных умножителей в некоторых различных экспериментах можно обратиться к [13–17].

MICROMEGAS (MICROMESH GASEOUS STRUCTURE)

В 1991 г. И. Гиоматарис (I. Giomataris) и Ж. Шарпак (G. Charpak) предложили новую концепцию детектора для подавления адронов (Hadron Blind Detector, HBD) [18]. В этой концепции большинство адронов, образующихся при столкновениях протонов, невидимы детектором, в то время как электроны и мюоны больших импульсов регистрируются эффективно. В исследованиях использовался плоскопараллельный газовый детектор. При его оптимизации экспериментально было продемонстрировано преимущество узкого зазора усиления (1 мм). Это спровоцировало идею построения устройства с еще более узким зазором [19], что и привело к разработке нового детектора — Micromegas (ММ) [12].

Micromegas представляет собой плоскопараллельный двухступенчатый лавинный счетчик. Он состоит из области ионизации/дрейфа с шириной от нескольких миллиметров до десятков сантиметров (режим TPC), узкой области усиления — лавинного размножения с шириной, как правило, 50–128 мкм, расположенной между тонкой металлической сеткой (mesh или micromesh), и считывающих стрипов или площадок на печатной плате. Электрическое поле в области ионизации ~ 1 кВ/см, а в области усиления ~ 50 –100 кВ/см. Детектор способен работать как в режиме измерения координаты, так и в режиме триггера (рис. 5). Расстояние между анодной плоскостью и сеткой задается изоляционными столбиками — пилларами.

Сетка изготавливается из разных материалов (никель, медь, алюминий, нержавеющая сталь) и разными способами, такими как электроформовка, химическое травление, плетение, напыление (рис. 6). Кроме структур, отмеченных на рисунке, редко, но можно встретить сетки, полученные лазерной и плазменной гравировкой.

Micromegas-детекторы можно разделить на несколько типов: Micromegas, Microbulk Micromegas, Bulk Micromegas, InGrid и PiggyBack.

Первые прототипы ММ состояли из двух прикрученных друг к другу каркасов, на которых были наклеены анодная плоскость и никелевая сетка,

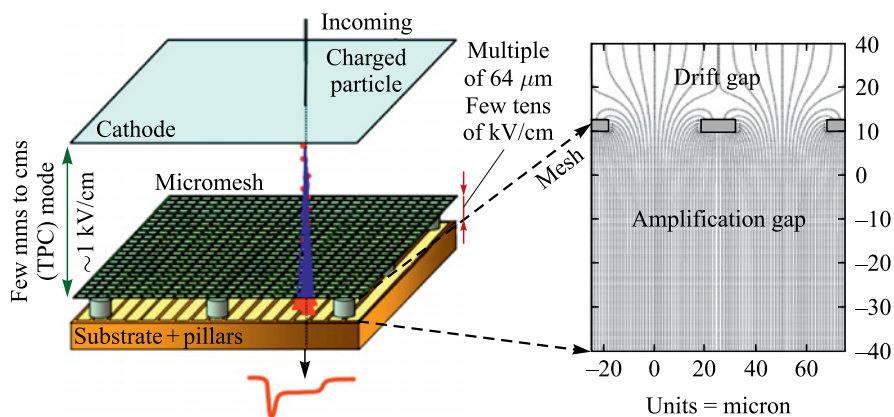


Рис. 5. Схема ММ (из <http://www.linearcollider.org>) и карта электрического поля [20]

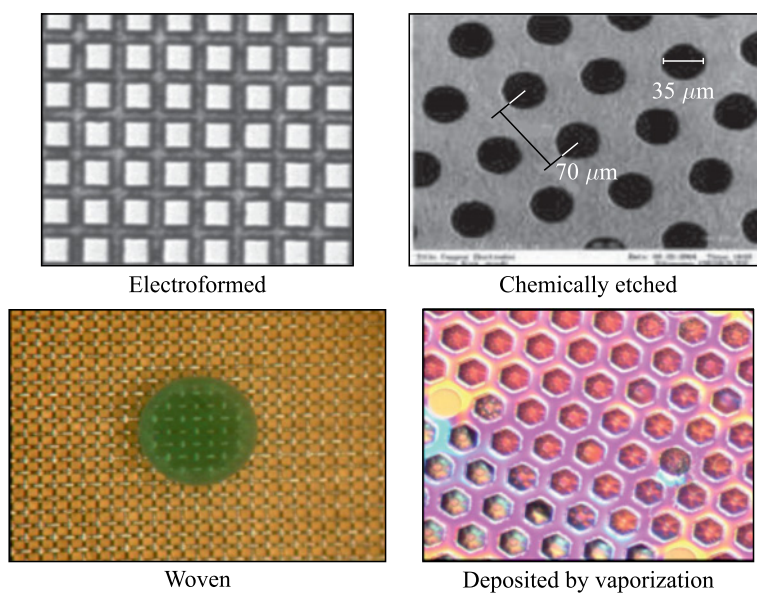


Рис. 6. Сетка, полученная разными способами: электроформовкой (гальванопластикой), химическим травлением, плетением, напылением

полученная электроформовкой. Расстояние между анодом и сеткой задавалось размещением между ними столбиков из фоторезистивной пленки (пилларов) нанесенной на анодную плоскость стандартными фотолитографическими методами, или с помощью стандартной лески. Достичь хорошей плоскостно-

сти и параллельности в таком методе сборки было трудно, что приводило к неравномерности газового усиления и пространственного разрешения. Впоследствии во избежание этого были предложены два новых объемных метода производства ММ, названных Microbulk и Bulk, которые позволяют сформировать анодную плоскость и сетку как единое целое.

Microbulk Micromegas. Microbulk Micromegas, как правило, изготавливается из 50-мкм каптоновой (полиамидной) пленки с двухсторонним 5-мкм медным покрытием с использованием стандартной фотолитографии. Полученный детектор приклеивается поверх жесткой подложки, которая обеспечивает поддержку микроструктуры. Процедуру изготовления двухкоординатного Microbulk ММ поясняет рис. 7. На первом этапе производится формирование считывающей структуры, а потом, после присоединения каптона с односторонним медным покрытием, происходит формирование межслойных переходов, считывающих линий и фотохимическая обработка.

Детекторы этого типа имеют очень высокую однородность зазора усиления, что и позволяет получить лучшее энергетическое разрешение среди всех

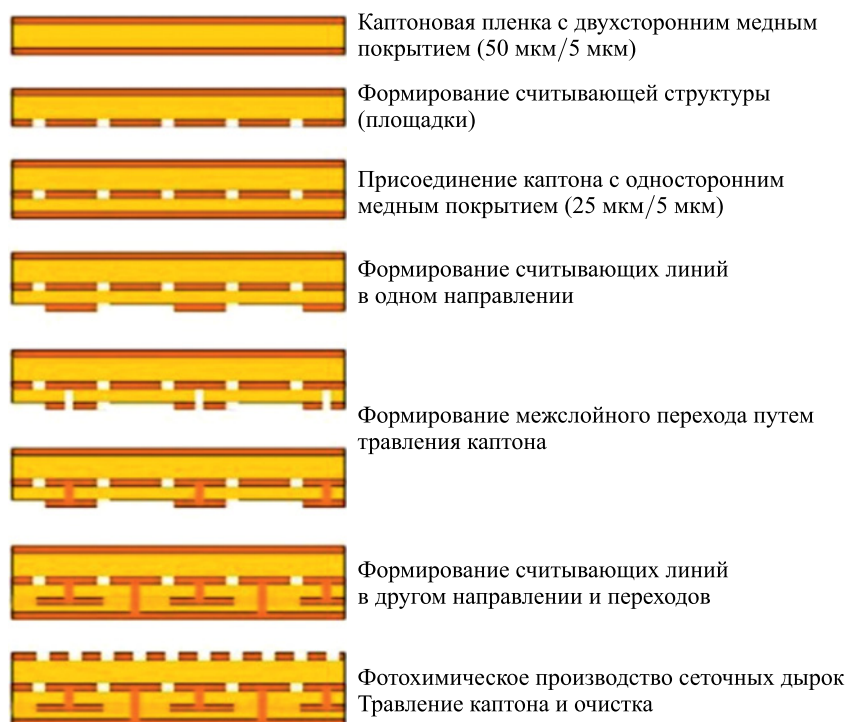


Рис. 7. Схема изготовления двухкоординатного Microbulk ММ [21]

существующих MPGD-детекторов. В [22] сообщается о достижении энергетического разрешения 11 % FWHM на линии 5,9 кэВ ^{55}Fe и 1,8 % на 5,5 МэВ ^{241}Am в газовой смеси $\text{Ar} + 5\% \text{iC}_4\text{H}_{10}$ (аргон/изобутан). Кроме того, детектор Microbulk Micromegas отличается наименьшим из всех аналогичных детекторов количеством материала и высокой чистотой в отношении радиоактивных примесей, а также демонстрирует отличную долговременную стабильность. Тем не менее следует отметить характерный для него более высокий электронный шум из-за высокой емкости и хрупкость детектора.

Bulk Micromegas. Объемная — «все в одном» — Bulk-технология производства ММ была предложена в 2006 г. [23]. В данном методе происходит замещение полученной электроформовкой сетки на плетеную. Этот вид сетки является устойчивым к растяжению, изготавливается из разных материалов (Fe, Cu, Ti, Ni и Au), стоит недорого, коммерчески доступен и производится в виде больших рулонов (2×40 м) что позволяет изготавливать детекторы большой площади. Обычно используется сетка, изготовленная из нержавеющей стали. Процедуру изготовления такого детектора с использованием одной фотолитографической маски поясняет рис. 8. Из-за того что промышленность выпускает фоторезистивную пленку только определенных толщин, для получения требуемого расстояния между анодом и сеткой приходится ламинировать несколько слоев. Например, пленка Ryalux PC1000 компании DuPont имеет толщины 25, 38, 51 и 64 мкм. Сначала на печатной плате ламинируется необходимое количество фоторезистивной пленки. После ламинирования еще одного фиксирующего сетку слоя фоторезистивной пленки и засветки полученной структуры через фотолитографическую маску ультрафиолетовым излучением происходит травление в растворе кальцинированной соды, промывка, сушка в печи и обрезка излишней сетки.

Такой детектор имеет ряд преимуществ. Он прост в изготовлении, поскольку технология основана на стандартных печатных платах, что дает возможность создания детекторов большой площади при низкой себестоимости. Используемая сетка довольно однородна. Детектор имеет приемлемое энергетическое разрешение (18 % FWHM на 5,9 кэВ, что ограничивается толщиной сетки), хорошее газовое усиление ($2 \cdot 10^4$ в $\text{Ar} + 5\% \text{iC}_4\text{H}_{10}$) и низкий уровень шума за счет низкой емкости. Однако низкоэнергетические сигналы имеют более высокое время нарастания (60 нс при зазоре 75 мкм и 150 нс для 150 мкм), а также более чувствительны к изменениям давления [23].

InGrid. InGrid представляет собой сетку, интегрированную в кремниевую подложку с помощью методов планарной микротехнологии. Предназначен для повышения производительности пиксельных детекторов на основе ММ. Сетка строится на этапе постобработки, аналогичной производству Bulk Micromegas, и состоит из пилларов SU8 (широко используемый негативный фоторезистивный слой на основе эпоксидной смолы) высотой 50 мкм и алю-

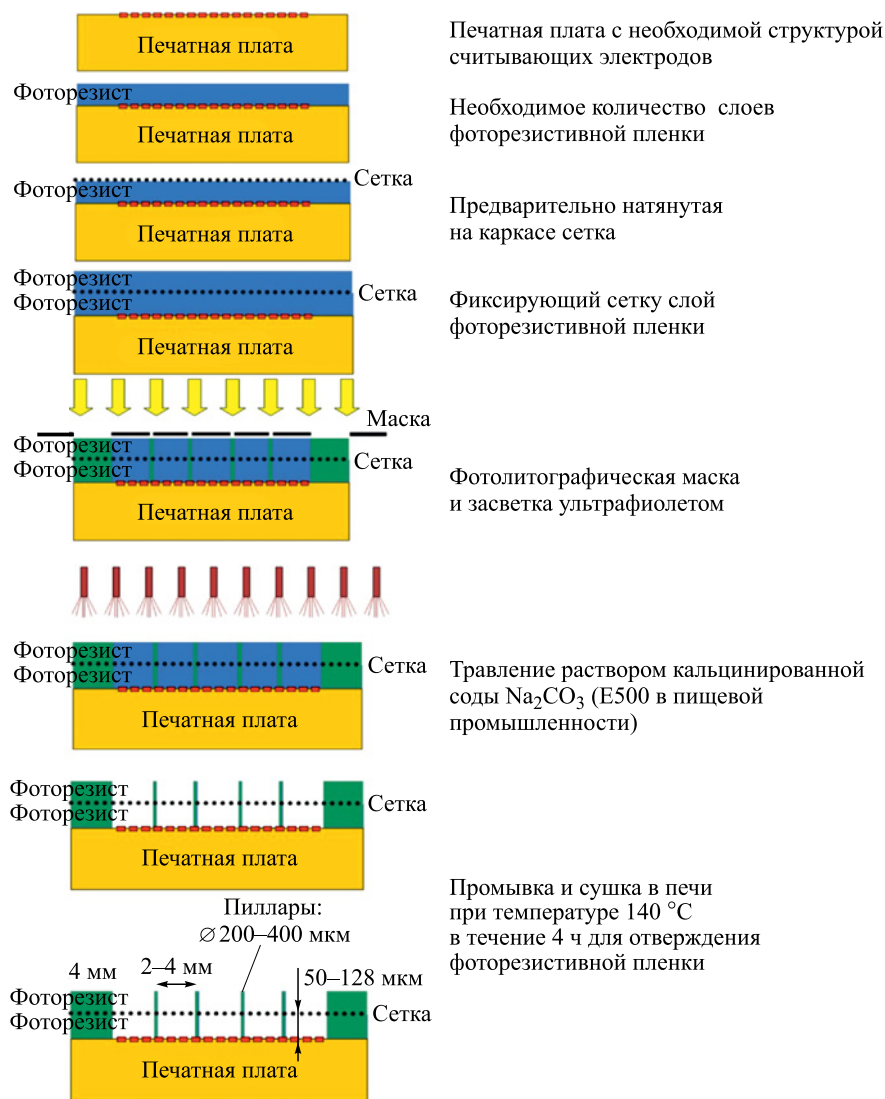


Рис. 8. Схема изготовления Bulk MM с одной фотолитографической маской, используемая группой CEA Saclay

миниовой плоскости толщиной 0,8 мкм с отверстиями, которые согласуются с пикселями интегральной схемы (ИС) Timepix (<https://medipix.web.cern.ch/medipix/pages/medipix2/timepix.php>) (рис. 9) [24, 25].

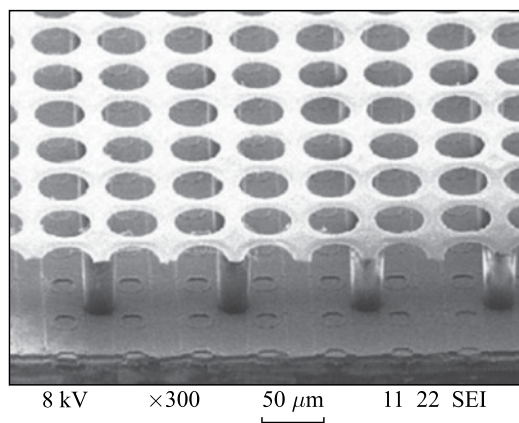


Рис. 9. Фотография детектора InGrid

Этапы процесса изготовления InGrid следующие: очистка и окисление кремниевой подложки; осаждение и структурирование анода; осаждение и облучение негативного фоторезистивного слоя; осаждение и структурирование материала сетки и, наконец, удаление необлученных участков фоторезистивного слоя через отверстия сетки (рис. 10).

Наиболее важная причина, которая может повлиять на долгосрочную работу InGrid, — появление разрушительных разрядов по всей узкой (50 мкм) области усиления. Один из способов защиты — покрытие ИС тонким слоем (в несколько микрометров) нитрида кремния (Si_3N_4), наносимого на верхнюю часть Timerix ASIC [27, 28].

Основными преимуществами данного детектора являются высокая чувствительность к одиночным электронам, очень высокая эффективность восстановления трека частицы, высокое пространственное и угловое разрешение, высокое разрешение по энергии и чрезвычайно высокая радиационная стойкость.

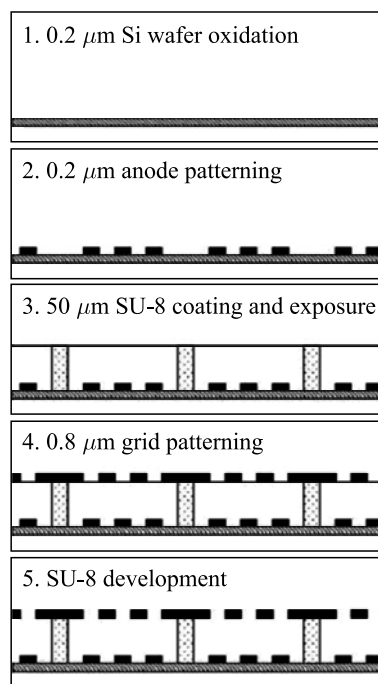


Рис. 10. Основные этапы изготовления детектора InGrid [26]

В настоящее время InGrid-детекторы с дрейфовым зазором несколько миллиметров предлагаются для модернизации координатной системы ATLAS на супер-БАК [29].

PiggyBack. Идея данного типа детектора Micromegas заключается в отделении детектирующей части от считывающей, как показано на рис. 11. Детектор может быть объединен со считывающим пиксельным массивом современных электронных интегральных схем. Сигнал передается посредством емкостной связи на площадки считывания [30, 31].

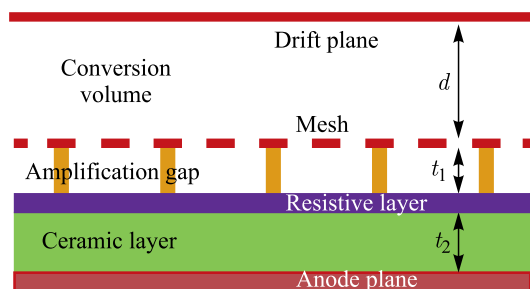


Рис. 11. Схема детектора PiggyBack

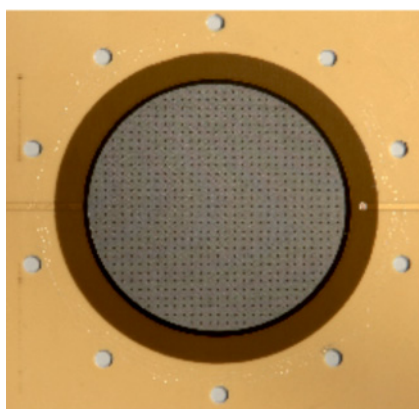


Рис. 12. Фотография детектора Piggy-Back

С целью оптимизации индуцированного посредством емкостной связи сигнала толщина диэлектрика t_2 должна удовлетворять соотношению $t_2 \ll t_1(\varepsilon_2/\varepsilon_1)$, где ε_1 является диэлектрической постоянной среды 1 (газ), а ε_2 — среды 2 (изолятор) (рис. 11). Поскольку изолятор играет одновременно роль стенки контейнера газового детектора, толщина должна быть разумной (несколько сотен микрометров). Для того чтобы соответствовать вышеприведенному неравенству, материал должен иметь как можно большую диэлектрическую проницаемость. Хорошими кандидатами являются изоляторы из керамики, имеющие большие диэлектрические постоянные ($\gg 10$). В первом прототипе (рис. 12) использовался стандартный зазор усиления $t_1 = 128$ мкм, а в качестве материала керамического изолятора была выбрана окись алюминия (глинозем) с $t_2 = 300$ мкм ($\varepsilon_2 = 10$). В целях защиты от разрядов в качестве резистивного

слоя был использован 20-мкм слой оксида рутения (RuO_2), имеющий удельное сопротивление 100 МОм/см. Он широко применяется для высокотемпературного покрытия керамики при изготовлении резисторов или интегральных схем.

В тестах детектора дрейфовая область имела зазор шириной 10 мм и использовались два типа газовой смеси: $\text{Ar} + 5\% \text{iC}_4\text{H}_{10}$ и $\text{Ne} + 5\% \text{C}_2\text{H}_6$ (неон/этан). Энергетическое разрешение в 21% FWHM на линии 5,9 кэВ было достигнуто в обоих случаях. Детектор показал газовое усиление немного ниже, чем стандартный 128-мкм Vulk-детектор на тех же напряжениях, которое до момента пробоя достигло значения 10^5 (рис. 13).

Отметим некоторые преимущества данного детектора.

- Газовый объем детектора полностью отделен от считывающей плоскости. Это дает полную свободу пользователю выбирать вариант конструкции считывающей электроники в зависимости от своих потребностей. Также она может быть удалена или заменена без отключения детектора.

- Керамика может обеспечить большие значения диэлектрической проницаемости (до нескольких тысяч). Это открывает возможность для выбора, когда это необходимо, толстого изолятора. В случае большой толщины изолятора индуцированный на считывающих стрипах сигнал оказывается сосредоточен на большие площади, что позволяет использовать считывающие площадки большого размера без ухудшения пространственного разрешения: хорошее пространственное разрешение поддерживается за счет «обмена заряда площадками» [32, 33].

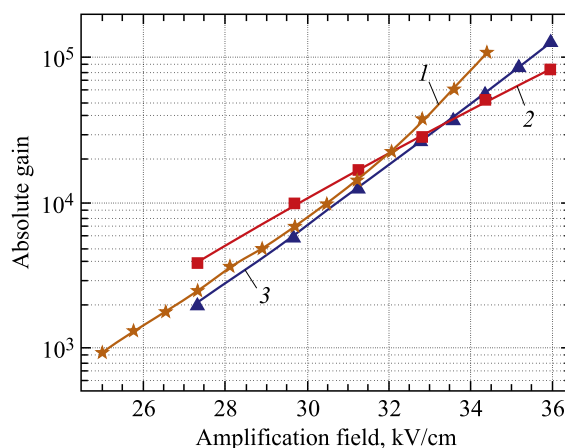


Рис. 13 (цветной в электронной версии). Зависимость газового усиления от величины поля в зазоре лавинного размножения. Желтая линия (1) соответствует стандартному Vulk MM, а красная (2) и синяя (3) — PiggyBack в $\text{Ne} + 5\% \text{C}_2\text{H}_6$ и $\text{Ar} + 5\% \text{C}_4\text{H}_{10}$ соответственно

- Предложенная схема обеспечивает полную защиту электроники от пробоя.
- Очень легко прикладывать положительное напряжение на сетку и анод, а катод держать заземленным без необходимости схемы развязки высокого напряжения для анодных сигналов. Это может быть важно в том случае, когда катод используется как входное окно.
- Материалы детектора — оксид рутения и керамика — обладают отличной дегазацией. Это подходит для высококачественного вакуума и открывает путь для герметизации емкости газового объема детектора.

КАМЕРЫ MICROMEGAS ДЛЯ МОДЕРНИЗАЦИИ МАЛОГО МЮОННОГО КОЛЕСА ATLAS

Модернизация малого мюонного колеса ATLAS. Большой адронный коллайдер будет модернизирован в несколько этапов (Phase-1, Phase-2). После первой длительной остановки (LS1 — long shutdown) в 2013–2014 гг. энергию ускорителя планируется увеличить почти до проектной (7 ТэВ на пучок) и достичь или превысить расчетное значение светимости $1 \cdot 10^{34} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ (на момент написания статьи — сентябрь 2015 г. — достигнута энергия 6,5 ТэВ на пучок). После второго длительного перерыва (LS2) в 2019 г. светимость ускорителя будет увеличена до $(2-3) \cdot 10^{34} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, что позволит установке ATLAS собрать статистику событий в объеме до $100 \text{ фб}^{-1}/\text{год}$. Планируется и следующий шаг модернизации в 2023 г., после которого светимость коллайдера возрастет до $5 \cdot 10^{34} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, а интегральная светимость установки за 10 лет работы достигнет значения до 3000 фб^{-1} [34] (рис. 14).

Для того чтобы эффективно использовать рекордные параметры БАК, некоторые части установки ATLAS, не рассчитанные на работу в столь интенсивных пучках, должны быть модернизированы по той же временной схеме, что и модернизация БАК.

Увеличение как светимости, так и энергии БАК приведет к существенному росту радиационной загрузки элементов детектора ATLAS в первую очередь в областях, близких к точке взаимодействия пучков. Одной из таких областей детектора ATLAS является так называемое малое колесо (Small Wheel) мюонной системы установки. Его планируется полностью заменить новым малым мюонным колесом (New Small Wheel) во время Phase-1 [35] (рис. 14). Эта часть мюонной системы ATLAS расположена на расстоянии около 7 м от точки взаимодействия и перекрывает область псевдобыстрот $1,0 < |\eta| < 2,7$ для мюонов и $1,0 < |\eta| < 2,4$ для системы выработки триггера первого уровня L1 (рис. 15).

Потребность в замене SW на NSW вызвана двумя причинами: сохранением высокой эффективности выделения частиц и увеличением уровня подавления фоновых событий в триггере первого уровня L1.

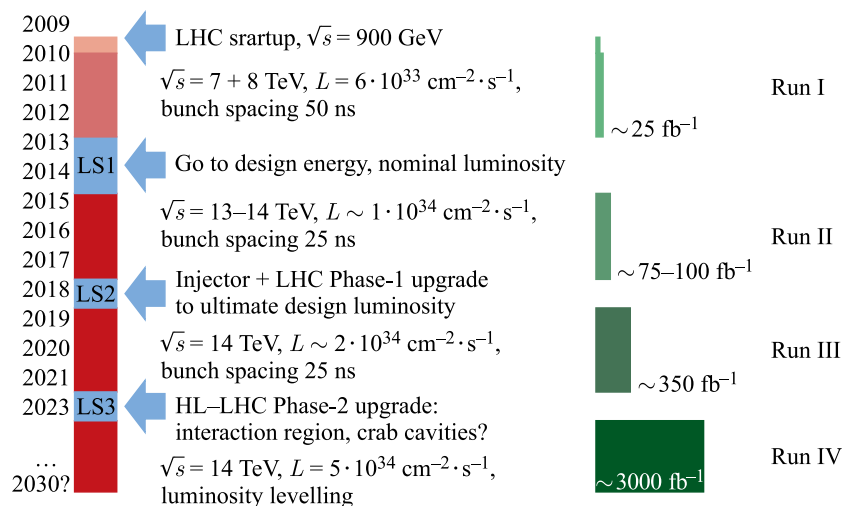


Рис. 14. Приблизительный график запланированных обновлений на БАК

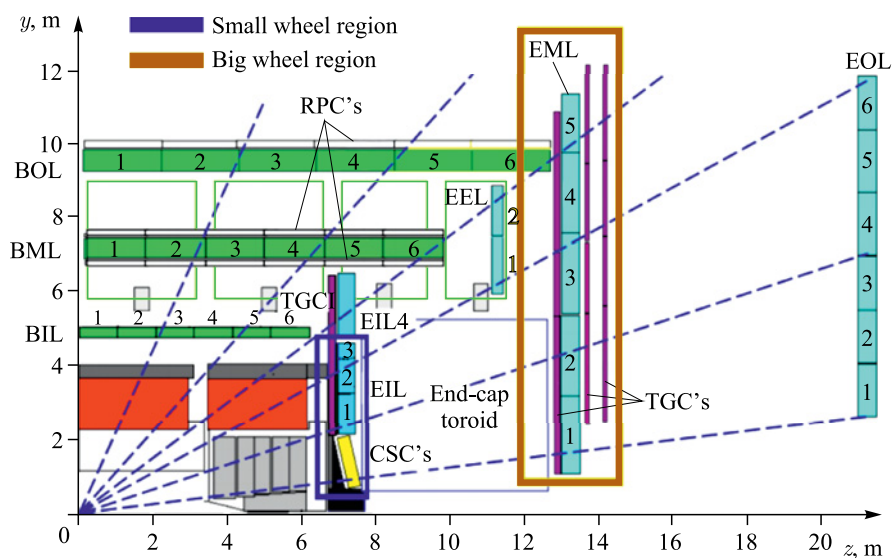


Рис. 15 (цветной в электронной версии). z - y -срез больших секторов 1/4 части детектора ATLAS. Синим цветом отмечены камеры MDT торцевой области, а желтым — CSC (Cathode Strip Chambers) камеры малого колеса. Зелеными прямоугольниками помечены MDT-камеры центральной части мюонного детектора ATLAS. Триггерные камеры RPC (Resistive Plate Chamber) и TGC обозначены белым и пурпурным. Начало координат соответствует точке взаимодействия

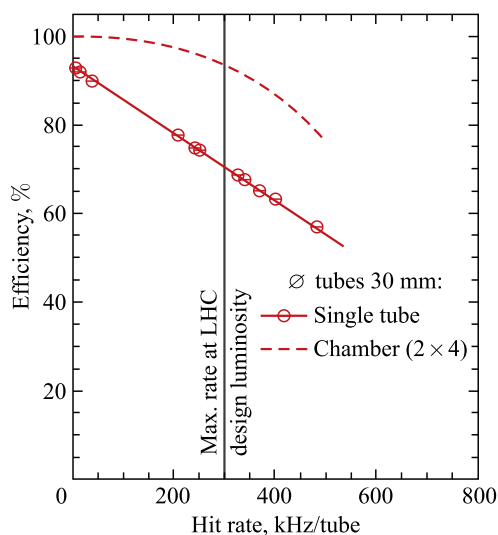


Рис. 16. Зависимость эффективности единичной MDT-трубки (сплошная линия) и камеры (штриховая) от загрузки. Камера состоит из двух мультислов с четырьмя слоями трубок в каждом [35]

detector, EM), расположенных сразу после торцевого магнитного тороида на расстоянии 6 м от SW (см. рис. 15). Значительная часть срабатываний мюонного триггера EM вызывается фоновыми частицами. Относительно низкоэнергетические частицы, в основном протоны, генерируемые в материале, расположенном между малым колесом и EM-станцией, вызывают ложные

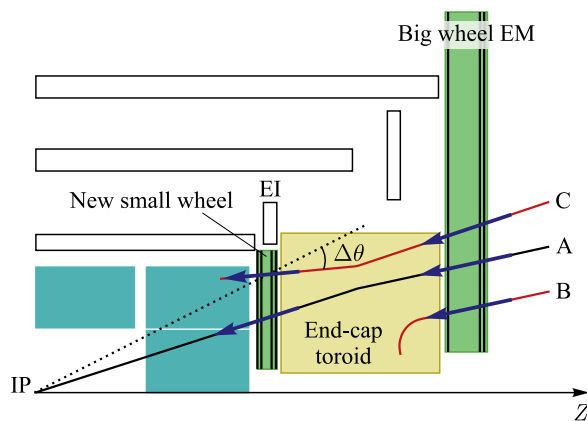


Рис. 17. Схема срабатывания мюонного триггера. NSW позволит отвергнуть ложные срабатывания (С и В)

- Основными детекторами мюонного спектрометра являются MDT (Monitored Drift Tube) камеры. MDT-трубки имеют диаметр 3 см и максимальное время дрейфа около 700 нс. При загрузке, превышающей 300 кГц на трубку (ожидаемой на проектной светимости БАК), наблюдается значительная потеря эффективности регистрации, что влияет на общую эффективность реконструкции трека (рис. 16).

- В настоящее время схема мюонного триггера L1 в торцевой области ATLAS основана на совпадении сигналов различных слоев TGC (Thin Gap Chamber) камер средней мюонной станции (End-cap Muon detector, EM), расположенных сразу после торцевого магнитного тороида на расстоянии 6 м от SW (см. рис. 15).

Значительная часть срабатываний мюонного триггера EM вызывается фоновыми частицами. Относительно низкоэнергетические частицы, в основном протоны, генерируемые в материале, расположенном между малым колесом и EM-станцией, вызывают ложные

срабатывания. Анализ данных 2012 г. показывает, что около 90 % срабатываний мюонного триггера являются ложными. Триггерная станция в районе NSW в состоянии указать на точку взаимодействия (IP) и снизить общий уровень срабатываний триггера как минимум на три порядка (рис. 17).

Micromegas для малого мюонного колеса. НИОКР по изучению возможности использования Micromegas для NSW начался в 2007 г. с образования коллаборации MAMMA (Muon ATLAS MicroMegas Activity, <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/viewauth/Atlas/MuonMicromegas>). В 2012 г. после подробного и долгого обсуждения мюонная коллаборация эксперимента ATLAS приняла решение использовать Micromegas-камеры при создании NSW. Необходимо будет изготовить Micromegas-камеры общей площадью около 1200 м². В дополнение к восьми плоскостям Micromegas NSW также должен быть оснащен восемью плоскостями камер sTGC (small Thin Gap Chamber) для создания полностью новой системы из sTGC и Micromegas как для триггера, так и для трекинга. Основным координатным детектором будет Micromegas, а триггерным — sTGC. NSW, как ожидается, будет установлен в ходе остановки БАК, запланированной на 2018 г. (LS2). Основными требованиями, предъявляемыми к детекторам, являются следующие: работа на нагрузках до 15 кГц/см², отличная возможность отслеживания (пространственное разрешение каждой плоскости не хуже 100 мкм для треков под углами до 35° и эффективность 98 %), временное разрешение, достаточное для идентификации частиц триггером L1, и хорошее сопротивление старению.

NSW имеет диаметр ~ 10 м и состоит из 16 (8 больших и 8 малых) секторов плоскостей детекторов трапециевидальной формы. Каждая плоскость состоит из двух мультислоев. Каждый мультислой или квадруплет включает четыре sTGC и четыре Micromegas-детектора, расположенных по схеме: sTGC – Micromegas – Micromegas – sTGC, чтобы увеличить расстояние между мультислоями триггерных sTGC-камер (рис. 18).

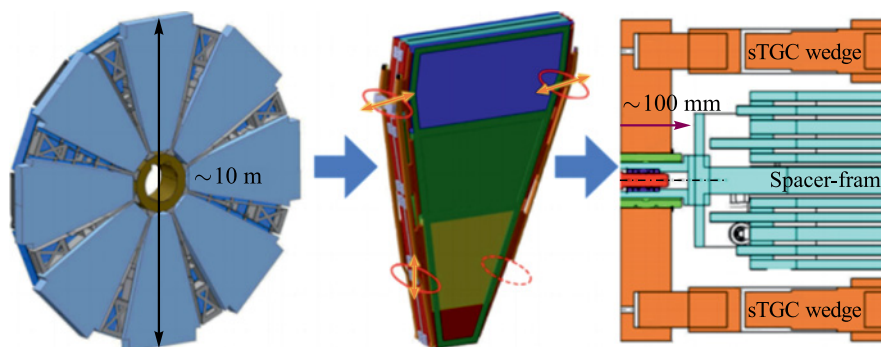


Рис. 18. Общий вид NSW, одного сектора и мультислоя STGC и ММ в секторе

Выбор восьми плоскостей ММ (двух квадруплетов) детектора был продиктован необходимостью обеспечить надежную, полностью работоспособную систему на весь срок службы детектора ATLAS с эффективностью регистрации частиц камерами, близкой к 100 %, как для онлайн-, так и для оффлайн-реконструкции треков. В каждом квадруплете используется два слоя для измерения полярного угла (псевдобыстрота η) и два слоя для измерения азимутального угла (φ) с наклоном $\pm 1,5^\circ$ относительно η .

Перед коллаборацией МАММА стоял ряд как методических, так и инженерных задач, которые были успешно решены. Ниже мы коснемся основных из них.

Искровая защита. Для эффективной регистрации минимально ионизирующих частиц (мюонов) необходимо обеспечить коэффициент газового усиления в ММ-детекторе порядка 10^4 . Но при таком коэффициенте усиления медленные или многозарядные частицы, образовавшиеся при взаимодействии нейтронов с ядрами рабочего газа или материалом ММ-камеры, создадут в рабочем объеме ММ более 1000 электронов на расстояниях, сравнимых с типичным поперечным растеканием лавины (несколько сотен микрометров), и могут привести к образованию искрового разряда (очень близко к пределу Рэтера — $\sim 10^8$) [36]. Искра может повредить детектор и считывающую электронику и/или привести к большому возрастанию мертвого времени. Для решения этой проблемы была разработана система искровой защиты путем добавления слоя резистивных полос на тонком изоляторе (50–70 мкм Pyralux, каптона или FR4) над анодным электродом (рис. 19).

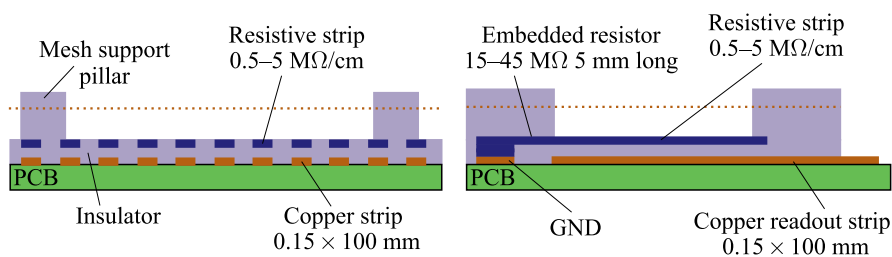


Рис. 19. Эскиз детектора с резистивным покрытием

Для оптимизации такого варианта ММ-детектора была проведена серия измерений свойств камер для резистивных покрытий с различной величиной удельного сопротивления этого слоя. Оптимальными оказались значения сопротивления в пределах 20–30 МОм/см. На рис. 20 приведены ток и напряжение для стандартного и резистивного ММ-детекторов в пучке нейтронов и пионов. Для более подробной информации можно обратиться к [36, 37].

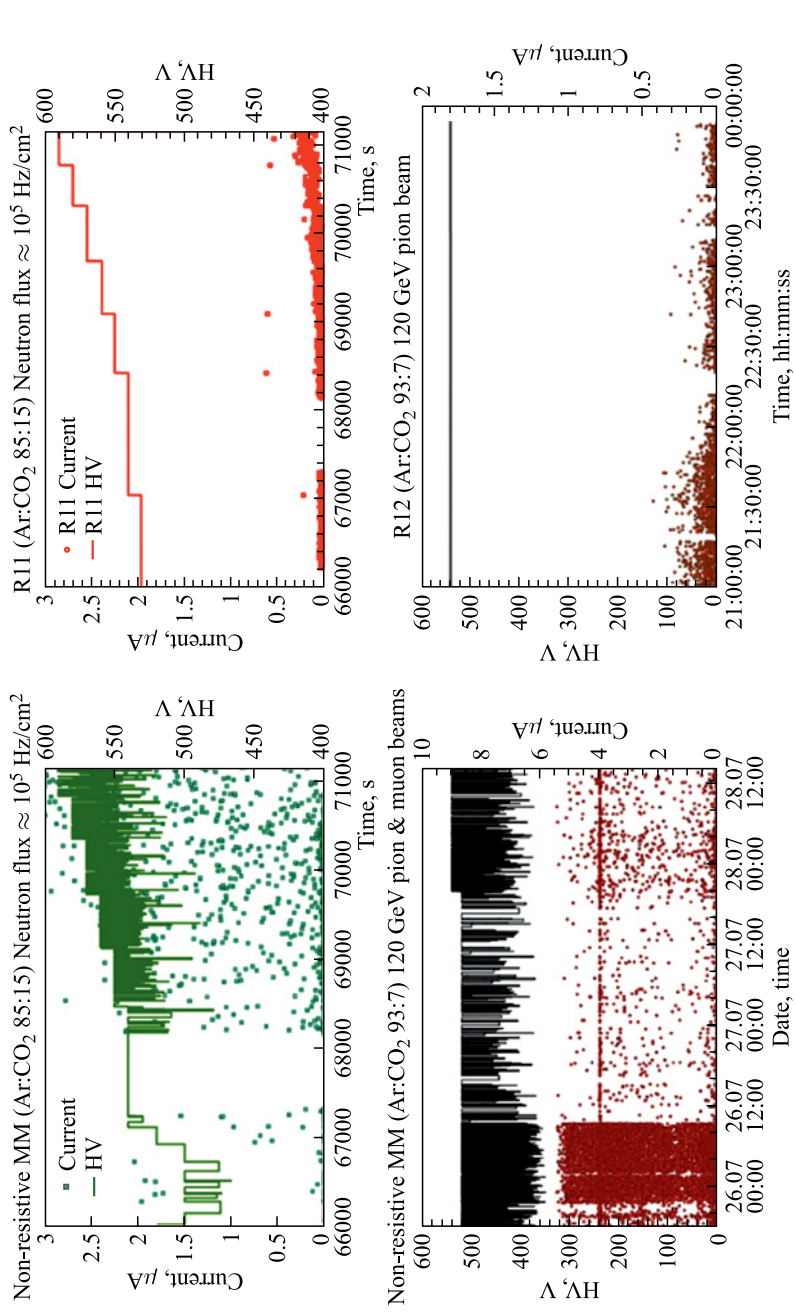


Рис. 20. Зависимость тока и напряжения стандартного и резистивного ММ от времени облучения в пучке нейтронов и пионов. С левой стороны стандартный ММ, справа резистивный

Долговременная радиационная стойкость стандартных ММ-детекторов без резистивного слоя была исследована в работах [38,39]. Однако после введения резистивного покрытия с добавлением новых материалов возникла необходимость дополнительных тестов по старению. Обширные тестовые испытания детектора проводились в CEA Saclay в 2011–2012 гг. ММ-детекторы облучались рентгеновскими и гамма-лучами с энергиями 8 кэВ и 1 МэВ соответственно, тепловыми нейтронами и альфа-частицами. Дозы облучения были эквивалентны ожидаемой в наиболее подверженной воздействию радиации области NSW примерно за 10 лет работы БАК при светимости $5 \cdot 10^{34} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. В ходе данных измерений не наблюдалось признаков какого-либо значимого ухудшения работы детектора. Подробности можно найти в [40, 41].

Алгоритм определения координаты частицы. Углы возможного входа мюонов в NSW составляют $8\text{--}35^\circ$. Точную координату частицы можно получить двумя способами: либо по методу определения центра заряда кластера (что является лучшим алгоритмом для почти ортогональных треков — в тестах было получено пространственное разрешение $\sim 73 \text{ мкм}$ со средним размером кластера примерно 2,4 стрипа [42]), либо, при больших ($> 10^\circ$) значениях угла, с помощью так называемого метода μTPC . Концепция μTPC показана на рис. 21. Позиция каждого стрипа дает координату x , в то время как z -координаты (перпендикулярно плоскости стрипа) могут быть восстановлены из времени прихода электронов после калибровки z - t -зависимости ($z = tV_{\text{дрейфа}}$). Это позволяет реконструировать трек частиц в дрейфовой

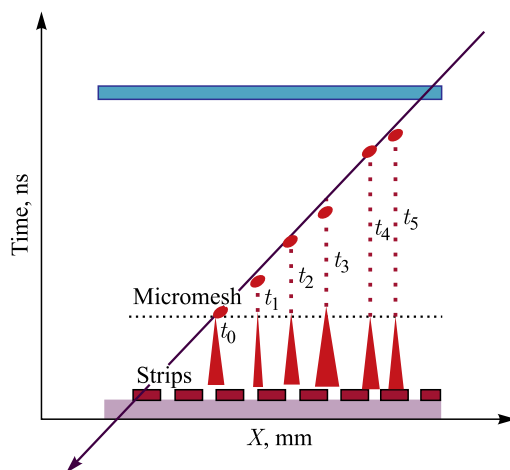


Рис. 21. Концепция μTPC . Измеряя время прихода сигнала на стрипы и зная скорость дрейфа, можно реконструировать трек частицы

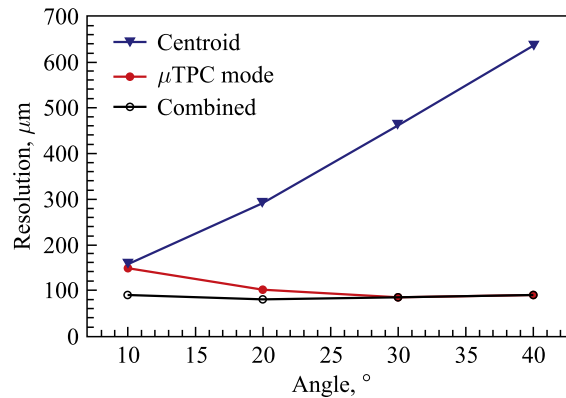


Рис. 22. Пространственное разрешение ММ, полученное методом определения центра заряда кластера, методом μ TPC и комбинацией из двух методов, в зависимости от угла вылета мюона

области детектора. В рабочей газовой смеси $\text{Ar} : \text{CO}_2$ (93 : 7) и при напряженности электрического поля в дрейфовой области 600 В/см скорость дрейфа составляет 4,7 см/мкс, что соответствует максимальному времени дрейфа около 100 нс для 5-мм дрейфового зазора.

Использование сочетания обоих алгоритмов реконструкции дает разрешение лучше чем 100 мкм для одной плоскости детектора (рис. 22).

Угол Лоренца. Так как в области NSW магнитное поле с различной ориентацией относительно плоскости ММ может достичь значений до 0,4 Тл, то, соответственно, при реконструкции трека должны быть использованы методы с учетом угла Лоренца. Очевидно, что размер создаваемых кластеров (число стрипов в кластере) зависит от изменения траектории электронов из-за магнитного поля. Размер кластеров увеличивается или уменьшается в зависимости от величины и направления магнитного поля (рис. 23).

С целью изучения данной зависимости были проведены испытания ММ-камер на пучке пионов с энергией 150 ГэВ в ЦЕРН. Набор из четырех прототипов (Т1, Т2, Т3, Т4) небольших размеров (10 × 10 см) и еще 4 реперные ММ-камеры (DUB1, ROM, DUB2, LNF) были установлены внутри сверхпроводящего магнита, который может обеспечить магнитное поле напряженностью до 2 Тл (рис. 24).

Угол Лоренца был измерен при различных значениях магнитного поля. Измерения оказались в хорошем соответствии с результатами моделирования на основе пакета Garfield (<http://garfield.web.cern.ch/>) (рис. 25).

Было установлено, что влияние магнитного поля можно учесть двумя способами:

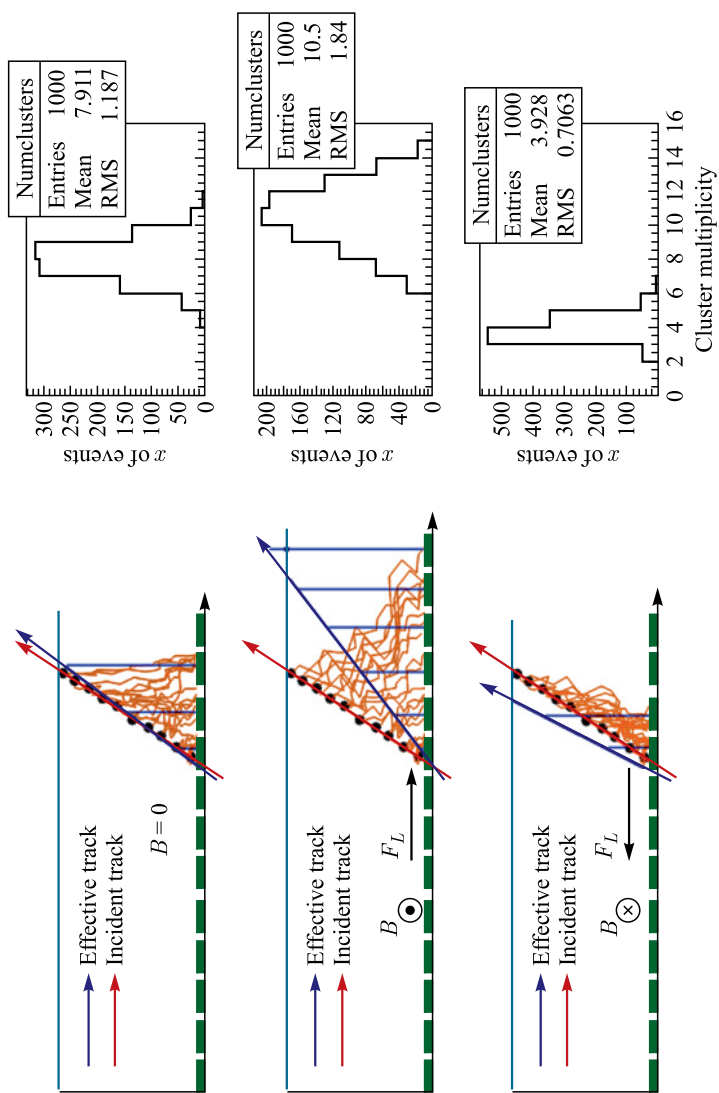


Рис. 23. Влияние направления и величины магнитного поля на размер кластера (моделирование)

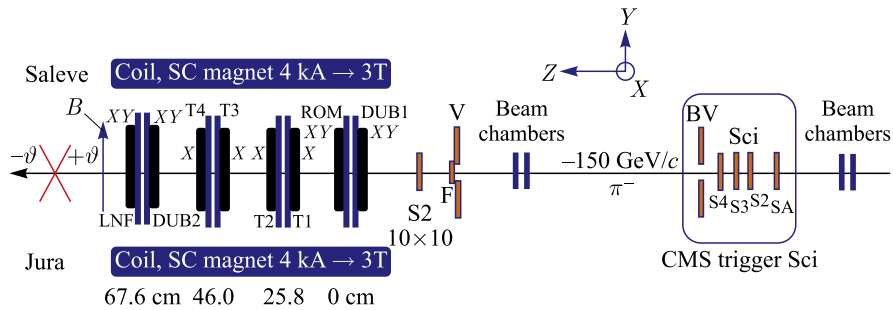


Рис. 24. Схема экспериментальной установки

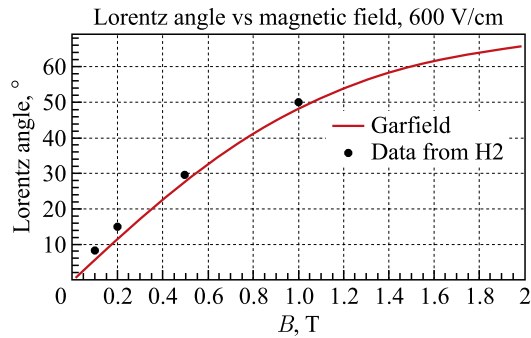


Рис. 25. Измерение углов Лоренца. Дрейфовое поле 600 В/см

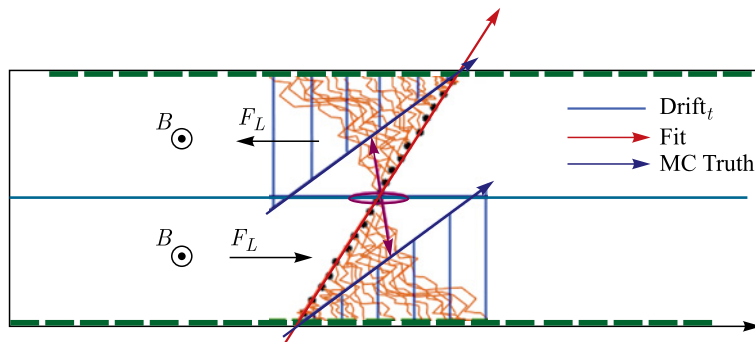


Рис. 26 (цветной в электронной версии). Конфигурация «спина к спине». Синей (центральной горизонтальной) линией отмечена катодная плоскость

а) установкой дублета ММ-камер в конфигурации «спина к спине», что обеспечивает эффект «самокоррекции», так как эффекты от угла Лоренца в двух дрейфовых зазорах будут равны по величине, но противоположны по направлению (рис. 26);

б) путем введения коррекции методом точного измерения магнитного поля на NSW с адекватным количеством датчиков.

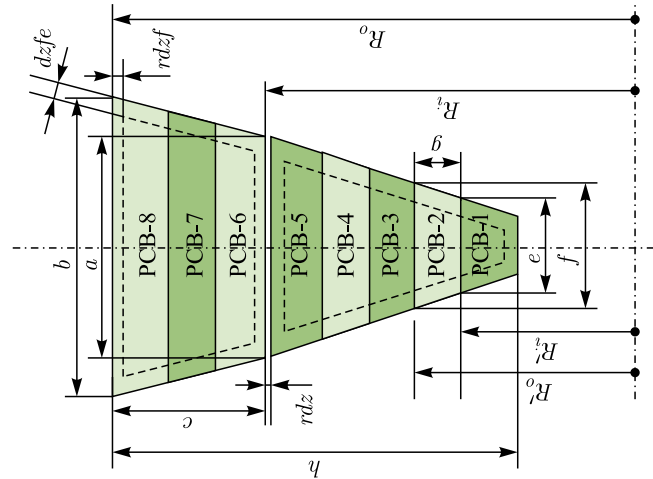
Решено, что в дальнейшем все ММ-камеры будут устанавливаться в конфигурации «спина к спине».

Механические размеры камеры. До недавнего времени самыми большими по площади являлись камеры Micromegas эксперимента COMPASS (40×40 см) (<http://wwwcompass.cern.ch/>), а клин нового малого колеса для больших секторов имеет длину 372,4 см и длины оснований 46 и 222 см. Кроме того, оказалось, что промышленность не выпускает печатные платы с шириной больше ~ 70 см за ненадобностью. К тому же использование структуры Bulk Micromegas, когда сетка и анод представляют одно целое, нецелесообразно в плане обслуживания большой площади детектора. Поэтому коллаборация МАММА приняла важные конструктивные решения: а) разделить клин детектора на две составляющие части; б) каждая часть, в зависимости от размера, будет склеиваться из трех или пяти печатных плат шириной от 43 до 48 см; в) сетка будет отделена от анодной части, хотя и будет покоиться на пилларах (так называемая floating mesh). На рис. 27 представлена схема разделения клина с размерами.

На рис. 28 дается общее представление о расположении камер Micromegas и sTGC в секторе и камер Micromegas в мультиплете.

Основные конструктивные характеристики Micromegas-детекторов для ATLAS NSW приведены в таблице.

Параметр	Значение	Характеристика
Сетка, линий/дюйм	325 (ширина окна 54 мкм, диаметр проволоки 18 мкм, оптическая прозрачность 51 %)	Нержавеющая сталь, отделена от анодной части
Зазор усиления, мкм	128	
Дрейфовый зазор, мм	5	
Резистивные стрипы, МОм/см	$R = 10$	Соединены между собой
Считывающие стрипы, мм	0,425–0,450	
Стереоугол, °	$\pm 1,5$	4 из 8 слоев
Суммарное число стрипов	2,1 млн	
Газ		Ar : CO ₂
ВН на резистивных стрипах, В	550	Положительная полярность
Поле в зазоре усиления, кВ/см	40	
Поле в дрейфовом зазоре, В/см	600	



Параметр	Большой сектор		Маленький сектор	
	LM1	LM2	SM1	SM2
<i>a</i> (внутренняя длина)	660	2022,8	460	1300
<i>b</i> (наружная длина)	2042	2220	1300	1780
<i>c</i> (радиальный размер)	2310	1410	2210	1350
R_i (внутренний радиус)	923	3238	895	3110
R_o (внешний радиус)	3233	4648	3105	4460
<i>h</i> (радиальный размер сектора)	3725			
<i>rdz</i> (радиальный зазор между модулями)	5			
<i>rdzf</i> (радиальный размер рамок)	30	30	30	30
<i>dzlfe</i> (размер рамок и электроники)	100			
Количество считывающих печатных плат в слое	5	3	5	3

Рис. 27. Схема разделения клина NSW Micromegas и размеры в миллиметрах

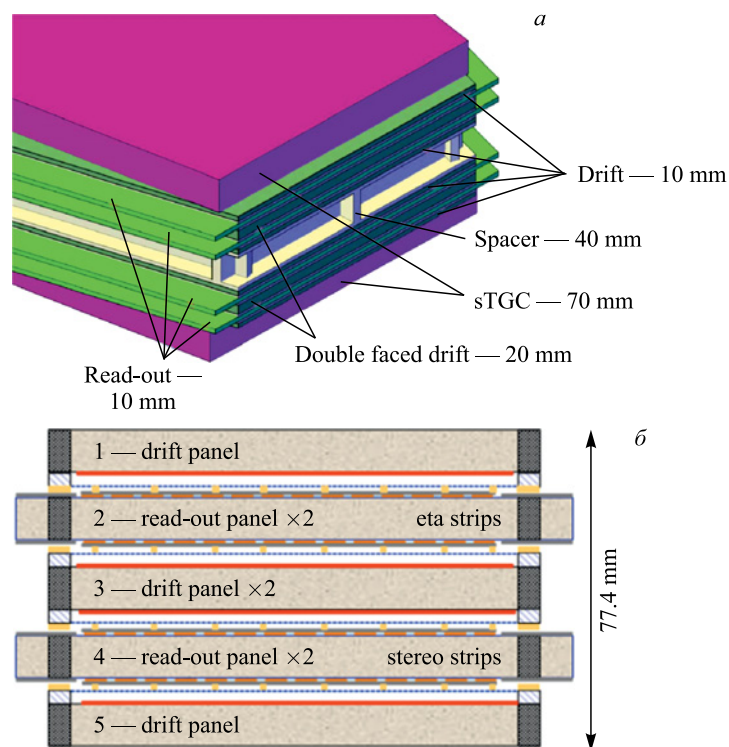


Рис. 28. Расположение камер MM и sTGC в секторе (а) и MM-камер в мультиплете (б) с размерами

Требования к конструкции детектора. Опыт, накопленный в ходе работ существующего мюонного спектрометра, показывает, что для поддержания отличной реконструкции мюонных треков поперечный импульс следует измерять с разрешением лучше чем 15% на 1 ТэВ. Это и приводит к необходимости обеспечения механической точности сборки камеры $\sigma_{\text{кам}} = 40$ мкм с учетом всех 16 плоскостей измерения с разрешением 100 мкм на плоскость (для сравнения точность сборки используемых дрейфовых камер была 20 мкм). $\sigma_{\text{кам}}$ включает в себя как точность позиции считывающих полос/стрипов, так и точность сборки дрейфовой плоскости.

Это ведет к следующим требованиям для любого детектора новых малых колес.

1. Для каждой плоскости детектора положение вдоль точной координаты должно быть известно со среднеквадратической погрешностью менее 30 мкм.

2. Координата положения любого элемента детектора, перпендикулярная указанной выше точной координате (z), должна быть известна со среднеквадратической погрешностью менее 80 мкм.

3. Отклонение размера дрейфового зазора от номинального значения (5 мм) должно быть меньше чем 200 мкм в любом месте в камере.

4. Газовое усиление детектора должно быть равномерным по всей чувствительной области детектора с максимальным отклонением 50 % от рабочей точки и не ниже $5 \cdot 10^3$ (половина номинального усиления детектора).

Кроме того, все детекторы должны быть герметичными и не терять более чем 10^{-5} объема газа в 1 мин. Этот предел соответствует падению давления примерно 0,6 мбар в 1 ч для квадрушлета емкостью 50 л.

Электроника считывания (FrontEnd). Высокочувствительная электроника считывания камер Micromegas и sTGC базируется на 64-канальном программируемом ASIC VMM, разрабатываемом в Брукхейвенской национальной лаборатории [35]. Он обеспечивает усиление, формирование, нахождение пика и оцифровку сигнала детектора MM. Коэффициент усиления имеет восемь значений регулировки (0,5, 1, 3, 4,5, 6, 9, 12, 16 мВ/фКл). ASIC имеет временное и зарядовое разрешение 1 нс и 1 фКл соответственно и работает на обеих полярностях заряда.

В настоящее время в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ создаются два участка по производству камер Micromegas. Первый участок будет обеспечивать производство и тестирование камер Micromegas для наружной части больших секторов — LM2 (см. рис. 27). На нем предстоит изготовить 384 м² площади считывающих поверхностей из 1200 м² общей площади NSW. Комплекующие материалы будут централизованно доставляться из ЦЕРН для всех участников проекта. Производство будет осуществляться в 2016–2017 гг. Второй участок предназначен для полного цикла производства камер Micromegas с шириной активной области до 50 см.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В течение последнего десятилетия микроструктурные газовые детекторы заняли доминирующие позиции в экспериментах по физике частиц. Особенно перспективным как по характеристикам, так и по простоте изготовления и обслуживания является Micromegas.

Использование узкой области лавинного умножения (50–150 мкм) — основное достоинство в работе всех типов Micromegas. Вследствие этого поперечное сечение приходящей на анод лавины мало, что вкупе с малым расстоянием между анодными полосками или площадками приводит к превосходному пространственному разрешению. Происходит быстрый сбор электронов и ионов — 1 и 30–100 нс (в зависимости от газового промежутка и состава смеси) соответственно. Это ослабляет эффект образования пространственного

заряда, присущий другим газовым детекторам, и увеличивает скорость счета. Например, в работе [43] было показано, что коэффициент усиления оставался стабильным в протонном пучке с интенсивностью $2 \cdot 10^9$ Гц/мм². Энергетическое разрешение Micromegas зависит от однородности поля усиления, отношения электрических полей в зонах дрейф/умножение, которое влияет на электрическую прозрачность сетки, и коэффициента усиления. Благодаря сочетанию однородной области умножения, большого отношения полей и коэффициента усиления ($> 10^5$) детекторы Micromegas показывают превосходное энергетическое разрешение (как было упомянуто выше, 11 % FWHM на линии 5,9 кэВ ⁵⁵Fe и 1,8 % на 5,5 МэВ ²⁴¹Am).

Кроме того, детекторы Micromegas обладают отличной стабильностью основных характеристик в течение длительных периодов работы, имеют высокую радиационную стойкость, так как изготавливаются из радиационно стойких материалов (плексиглас, каптон, медь, керамика), имеют низкую массу и себестоимость. Сочетание всего вышеперечисленного способствует их широкому использованию как в физических научных исследованиях, так и в области медицинской физики и радиологии.

Перечислим некоторые физические эксперименты и прикладные задачи, в которых используется Micromegas по типу назначения:

- времяпроекционная камера: MIMAC (Directional Detection of Dark Matter search), T2K, проект для ILC TPC;
- низкофононый рентгеновский детектор: CAST (CERN Axion Solar Telescope, <http://cast.web.cern.ch/CAST/>);
- профайлер пучка нейтронов: nTOF (<https://ntof-exp.web.cern.ch/ntof-exp/>);
- детектор ультрафиолетового излучения: ForFire (EU FP7 program, http://cordis.europa.eu/result/rcn/58266_en.html) [44];
- адронный калориметр: проект для линейного коллайдера [45, 46];
- трекер: Compass, Clas12 и ATLAS NSW.

Очевидно, что создание участка полного цикла по производству современных координатных детекторов типа Micromegas в ЛЯП ОИЯИ даст сотрудникам института возможность более эффективно участвовать как в реализации разных физических экспериментов, так и в прикладных исследованиях.

Благодарности. Автор искренне благодарит В. А. Беднякова, И. Б. Гонгадзе, А. В. Куликова и особенно А. В. Гуськова и Г. А. Шелкова за ценные замечания и поддержку. Отдельное спасибо Е. В. Сабаевой.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ СОКРАЩЕНИЯ

ASIC (Application-Specific Integrated Circuit) — проблемно-ориентированная (специализированная) интегральная микросхема

ATLAS NSW (ATLAS New Small Wheel) — малое мюонное колесо эксперимента ATLAS

CSC (Cathode Strip Chamber) — камера с катодными стрипами

FWHM (Full Width at Half Maximum) — полная ширина на полувысоте

Garfield — программный пакет для детального моделирования двух- и трехмерных дрейфовых камер (<http://garfield.web.cern.ch/garfield/>)

GEM (Gas Electron Multiplier) — газовый электронный умножитель

HBD (Hadron Blind Detector) — детектор для подавления адронов

InGrid (Integrated Micromegas using wafer post-processing technology) — интегрированная на кремниевой подложке сетка Micromegas

LS (Long Shutdown) — длительная остановка БАК

MHSP (Micro-Hole and Strip Plate) — пластина с микроотверстиями и полосками

Micromegas или **MM** (MICROMESH Gaseous Structure) — микросеточная газовая структура

MPGD (Micropattern Gas Detector) — микроструктурный газовый детектор

MSGC (Micro-Strip Gas Chamber) — микростриповая/микрополосковая газовая камера

NSW (New Small Wheel) — новое малое колесо

THGEM (Thick GEM) — «толстый» газовый электронный умножитель

RETGEM (Resistive Electrode GEM) — газовый электронный умножитель с резистивным электродом

sTGC (small Thin Gap Chamber) — маленькая камера с тонким зазором

SW (Small Wheel) — малое колесо

Timepix — прикладная микросхема, разработанная коллаборацией MEDIPIX в ЦЕРН (<http://medipix.web.cern.ch/medipix/>)

TGC (Thin Gap Chamber) — камера с тонким зазором

TPC (Time Projection Chamber) — времяпроекционная камера

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Sauli F.* Gas Detectors: Recent Developments and Future Perspectives // Nucl. Instr. Meth. A. 1988. V. 419. P. 189.
2. *Sauli F., Sharma A.* Micropattern Gaseous Detectors // Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. 1999. V. 49. P. 341.
3. *Geiger H., Muller W.* // Phys. Z. 1928. V. 29. P. 839.
4. *Charpak G. et al.* The Use of Multiwire Proportional Counters to Select and Localize Charged Particles // Nucl. Instr. Meth. A. 1968. V. 62. P. 262.
5. *Nygren D. R., Marx J. N.* The Time Projection Chamber // Phys. Today. 1978. V. 31. P. 46.
6. *Oed A.* Position-Sensitive Detector with Microstrip Anode for Electron Multiplication with Gases // Nucl. Instr. Meth. A. 1988. V. 263. P. 351.

7. *Bouclier R. et al.* Performance of Gas Microstrip Chambers on Glass Substrata with Electronic Conductivity // Nucl. Instr. Meth. A. 1993. V. 332. P. 100.
8. *Angelini F. et al.* Test-Beam Study of the Performance of the Microstrip Gas Avalanche Chamber // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1990. V. 37. P. 112.
9. *Bohm J.* High Rate Operation and Lifetime Studies with Micro-Strip Gas Chambers // Nucl. Instr. Meth. A. 1995. V. 360. P. 34.
10. *Sauli F.* Gas Detectors: Achievements and Trends // Nucl. Instr. Meth. A. 2001. V. 461. P. 47.
11. *Sauli F.* GEM: A New Concept for Electron Amplification in Gas Detectors // Nucl. Instr. Meth. A. 1997. V. 386. P. 531.
12. *Giomataris Y. et al.* Micromegas: A High-Granularity Position-Sensitive Gaseous Detector for High Particle-Flux Environments // Nucl. Instr. Meth. A. 1996. V. 376. P. 29–35.
13. *Zeuner T.* The MSGC-GEM Inner Tracker for HERA-B // Nucl. Instr. Meth. A. 2000. V. 446. P. 324.
14. *Fabjan C. W., Riegler W.* Trends and Highlights of VCI 2004 // Nucl. Instr. Meth. A. 2004. V. 535. P. 79.
15. *Alfonsi M. et al.* Status of Triple GEM Muon Chambers for the LHCb Experiment // Nucl. Instr. Meth. A. 2007. V. 581. P. 283.
16. *Ruggiero G.* The TOTEM Detectors // Proc. of the XI Intern. Conf. of Elastic and Diffractive Scattering towards the High Energy Frontiers, Blois, France, 2005.
17. *Tserruya I.* Development of a Triple GEM UV-Photon Detector Operated in Pure CF₄ for the PHENIX Experiment // Nucl. Instr. Meth. A. 2004. V. 523. P. 345.
18. *Giomataris Y., Charpak G.* A Hadron-Blind Detector // Nucl. Instr. Meth. A. 1991. V. 310. P. 589–595.
19. *Giomataris Y.* Private Communication.
20. *Charpak G. et al.* Micromegas, a Multipurpose Gaseous Detector // Nucl. Instr. Meth. A. 2002. V. 478. P. 26.
21. *Delbart A. et al.* New Developments of Micromegas Detector // Nucl. Instr. Meth. A. 2001. V. 461. P. 84.
22. *Andriamonje S. et al.* Development and Performance of Microbulk Micromegas Detectors // JINST. 2010. V. 5. P. 02001.
23. *Giomataris I. et al.* Micromegas in a Bulk // Nucl. Instr. Meth. A. 2006. V. 560. P. 405.
24. *Chefdeville M. et al.* An Electron-Multiplying “Micromegas” Grid Made in Silicon Wafer Post-Processing Technology // Nucl. Instr. Meth. A. 2006. V. 556. P. 490.
25. *Blanco Carballo V. M. et al.* A Radiation Imaging Detector Made by Postprocessing a Standard CMOS Chip // IEEE Electron Device Lett. 2008. V. 29, No. 6. P. 585.
26. *Chefdeville M.* Development of Micromegas-Like Gaseous Detectors Using a Pixel Readout Chip as Collecting Anode. Amsterdam Univ., 2009.
27. *Carballoa V. M. B. et al.* Results from MPGDs with a Protected Timepix or Medipix-2 Pixel Sensor as Active Anode // IEEE NSS Conf. Record, 2007.
28. *Aarts A. A. et al.* Discharge Protection and Ageing of Micromegas Pixel Detector // IEEE NSS Conf. Record, 2006.

29. *van der Graaf H., Hartjes F., Romaniouk A.* Performance and Prospects of GridPix and Gossip Detectors. RD51-2009-006.
30. *Attie D. et al.* A Piggyback Resistive Micromegas // JINST. 2013. V. 8. P. P05019.
31. *Galan J. et al.* Characterization and Simulation of Resistive-MPGDs with Resistive Strip and Layer Topologies // Nucl. Instr. Meth. A. 2013. V. 732. P. 229.
32. *Derre J. et al.* Spatial Resolution in Micromegas Detector // Nucl. Instr. Meth. A. 2001. V. 459. P. 523.
33. *Iguaz F. J. et al.* Micromegas Detector Developments for Dark Matter Directional Detection with MIMAC // JINST. 2011. V. 6. P. P07002.
34. *Rossi L., Brüning O.* High Luminosity Large Hadron Collider. A Description for the European Strategy Preparatory Group. Tech. Rep. CERN-ATS-2012-236. 2012.
35. *The ATLAS Collab.* ATLAS NSW TDR. CERN-LHCC-2013-006, ATLAS-TDR-20-2013. 2013.
36. *Wotschack J.* The Development of Large-Area MICROMEGAS Detectors for the ATLAS Upgrade // Mod. Phys. Lett. A. 2013. V. 28, No. 13. P. 1340020.
37. *Alexopoulos T. et al.* A Spark-Resistant Bulk-Micromegas Chamber for High-Rate Applications // Nucl. Instr. Meth. A. 2011. V. 640. P. 110.
38. *Bay A. et al.* Study of Sparking in Micromegas Chambers // Nucl. Instr. Meth. A. 2002. V. 488. P. 162.
39. *Thers D. et al.* Micromegas as a Large Microstrip Detector for the COMPASS Experiment // Nucl. Instr. Meth. A. 2011. V. 469. P. 133.
40. *Galan J. et al.* An Aging Study of Resistive Micromegas for the HL-LHC Environment // JINST. 2013. V. 8. P. P04028.
41. *Jeanneau F. et al.* Performances and Ageing Study of Resistive-Anodes Micromegas Detectors for HL-LHC Environment // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2012. V. 59. P. 1711.
42. *Alexopoulos T. et al. (MAMMA Collab.).* Development of Large Size Micromegas Detector for the Upgrade of the ATLAS Muon System // Nucl. Instr. Meth. A. 2010. V. 617. P. 161.
43. *Charpak G. et al.* First Beam Test Results with Micromegas, a High-Rate, High-Resolution Detector // Nucl. Instr. Meth. A. 1998. V. 412. P. 47.
44. *Peyaud A. et al.* The ForFire Photodetector // Nucl. Instr. Meth. A. 2015. V. 787. P. 102.
45. *Gaglione R. et al.* MICROMEGAS Chamber with Embedded DIRAC ASIC for Hadronic Calorimeter // JINST. 2009. V. 4. P. P11011.
46. *Adloff C. et al.* MICROMEGAS Chambers for Hadronic Calorimetry at a Future Linear Collider. arXiv:0909.3197v2.