

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА И МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ MICROMEGAS-ДЕТЕКТОРОВ В ЛЯП ИМ. В. П. ДЖЕЛЕПОВА ОИЯИ

*М. Балькина, Б. Буадзе, А. Гонгадзе¹, И. Б. Гонгадзе,
Л. А. Гонгадзе², Д. В. Дедович, М. А. Демичев, Н. В. Дорошкевич,
А. С. Жемчугов, Н. Н. Каурцев, Н. А. Ковязина, И. Ляшко,
П. Д. Морозов, И. Минашвили, И. Н. Потрап, Т. О. Руденко,
Р. В. Сотенский, Д. В. Харченко, З. Чубинидзе, Г. А. Шелков*
Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

В настоящее время в ЛЯП им. В. П. Дзелепова ОИЯИ созданы два участка по производству Micromegas-детекторов. Первый участок обеспечивает производство и тестирование Micromegas-камер для наружной части больших секторов (LM2) новых малых колес мюонного спектрометра эксперимента ATLAS. На нем предстоит изготовить и протестировать 64 двусторонние считывающие панели, каждая 3 м² площадью, и 32 камеры Micromegas на их основе. Комплектующие материалы для всех участников проекта централизованно доставляются из ЦЕРН. Второй участок предназначен для НИОКР Micromegas-детекторов с шириной до 60 см и является участком полного производственного цикла.

Presently, two Micromegas detector production sites have been constructed at the JINR DLNP. The first site provides production and testing of Micromegas chambers for the outer part of the large sectors (LM2) of the New Small Wheels for the ATLAS Muon spectrometer. It will produce and test 64 double-sided readout panels, each with an area of 3 m², and 32 Micromegas chambers based on them. Component materials are supplied from CERN in a centralized fashion for all participants of the project. The second site is for a complete production cycle and intended for the R&D of Micromegas detectors with a width of up to 60 cm.

PACS: 29.40.Cs; 29.40.Gx

ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на более чем столетнюю историю с момента изобретения, газовые детекторы частиц остаются одними из самых распространенных типов детекторов, используемых в ядерной физике [1, 2]. Особенно когда дело касается больших площадей покрытия с малыми затратами. В свою очередь, за последние два десятилетия

¹E-mail: Alexi.Gongadze@gmail.com

²E-mail: Gongadze.Levan@gmail.com

достижения в технологии фотолитографии и микропроцессорной технике привели к постепенному замещению проволочных детекторов микроструктурными газовыми детекторами (Micro-Pattern Gas Detector, MPGD). Сочетание превосходного пространственного и временного разрешения и высокой радиационной стойкости позволяет микроструктурным газовым детекторам занять доминирующие позиции в экспериментах физики частиц. Одним из таких примеров является модернизация так называемых новых малых колес (New Small Wheel, NSW) мюонного спектрометра ATLAS, при котором MDT-камеры (Monitored Drift Tubes) и катодные стриповые камеры (Cathode Strip Chamber, CSC) заменяются координатными микроструктурными детекторами Micromegas и триггерными тонкоззорными камерами с малой полоской (small-strip Thin Gap Chamber, sTGC).

Модернизация малого мюонного колеса эксперимента ATLAS. Эксперименты, проводимые на Большом адронном коллайдере (БАК), в основном нацелены на исследование свойств бозона Хиггса и на проверку различных теорий за пределами Стандартной модели, для чего требуется увеличение статистики. По планам коллаборации увеличение светимости БАК до двух номинальных ($2 \cdot 10^{34} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$) обеспечит интегральную светимость 300 фб^{-1} к концу третьего сеанса работ в 2024 г. Естественно, рост светимости вызовет увеличение радиационной загрузки детектора, особенно в местах, близких к точке взаимодействия (Interaction point, IP) пучков. Это и вызывает необходимость модернизации некоторых, не рассчитанных на такую загрузку подсистем детектора ATLAS. Одной из них является внутренний торец мюонного спектрометра EI (End-cap Inner), или, по-другому, малое колесо (SW, Small Wheel). Два SW (сторона А и сторона С детектора ATLAS) расположены симметрично от точки взаимодействия на примерных расстояниях 7,4 м. Они состоят из MDT и CSC координатных камер. CSC-камеры расположены вблизи оси пучка, где потоки частиц выше. В качестве триггерных камер используются тонкоззорные камеры (Thin Gap Chamber, TGC) [3].

По сути потребность модернизации SW вызвана двумя причинами: сохранением высокой эффективности выделения частиц и увеличением уровня подавления фоновых событий в триггере первого уровня L1 [4]. В качестве основного трекового детектора модернизированного Нового малого колеса (NSW, New Small Wheel) коллаборацией 2012 г. была выбрана камера Micromegas, а основным триггерным детектором sTGC [5].

Micromegas (MICROMesh Gaseous Structure). Детектор был предложен И. Гиоматарисом в 1996 г. [6]. Вскоре Micromegas стал прародителем семейства микросеточных детекторов (Micromegas, Bulk Micromegas, Microbulk Micromegas, InGrid и PiggyBack) [4]. Все они имеют плоскопараллельную структуру и состоят из двух областей, разделенных тонкой металлической сеткой — области дрейфа/ионизации с шириной от нескольких миллиметров до десятков сантиметров (режим TPC) — и узкой области лавинного размножения/усиления с шириной, как правило, 50–128 мкм. Расстояние между подложкой/считывающей поверхностью и сеткой задается изоляционными столбиками — пилларами. Электроны, дрейфуя из области ионизации со слабым электрическим полем ($\sim 1 \text{ кВ/см}$), приобретают достаточную для образования лавины энергию в области усиления с напряженностью электрического поля 40–50 кВ/см. Схема и принцип работы Micromegas представлены на рис. 1.

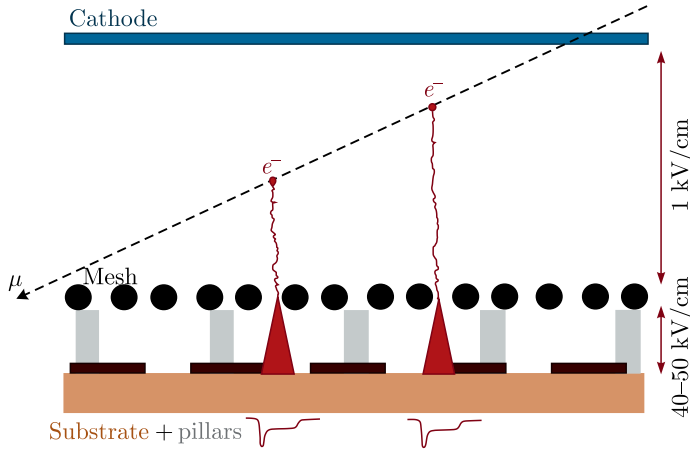


Рис. 1. Схема и принцип работы Micromegas-детектора

Для модернизации NSW используются модифицированный Bulk Micromegas-детектор с резистивным покрытием над анодными полосками. В нем, в отличие от классического варианта, сетка не имплантирована в общую структуру: подложка-пиллары-сетка, а составляет единое целое с катодом — наклеена на каркас на расстоянии 5 мм от него. Данный вариант называется Micromegas с плавающей сеткой (floating mesh). Такая компоновка существенно облегчает обслуживание детектора. Высота пилларов, или, по-другому, ширина зоны усиления составляет 128 мкм.

Структура и механические размеры. NSW имеет диаметр 10 м и, как и весь мюонный спектрометр, разделен на 16 секторов (8 больших и 8 малых) клиновидных плоскостей детекторов. Каждый сектор состоит из двух клиньев Micromegas и двух клиньев sTGC, расположенных по схеме: sTGC–Micromegas–Micromegas–

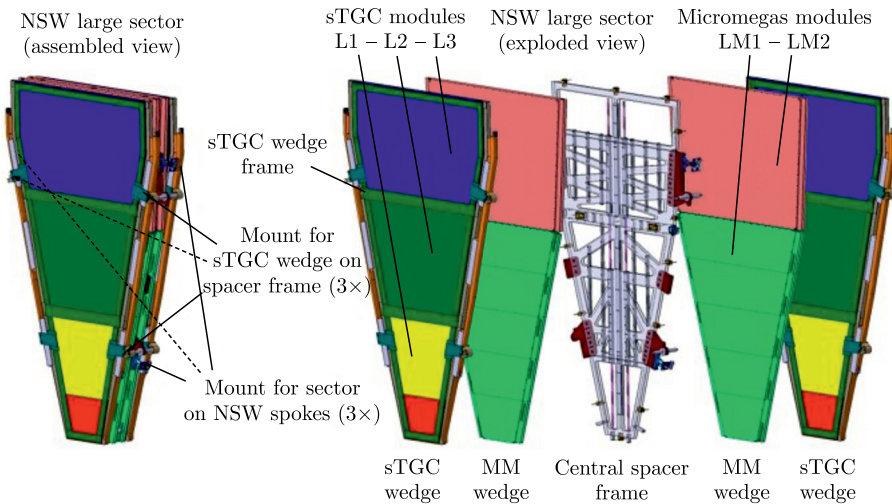


Рис. 2. Схема большого сектора NSW в собранном и разобранном виде [7]

sTGC. Каждый клин Micromegas поделен на две составные части модулей детектора трапециевидальной формы. В итоге существует четыре типа модулей Micromegas на внутренних и наружных частях клина: малый модуль 1 и малый модуль 2 (SM1 и SM2 от small module) в малых секторах и большой модуль 1 и большой модуль 2 (LM1 и LM2 от large module) в больших секторах NSW. Количество каждого типа модулей на два NSW составляет 32. На рис. 2 показано графическое представление большого сектора NSW в собранном и разобранном виде.

Каждый модуль Micromegas состоит из двух двусторонних считывающих и трех дрейфовых — двух односторонних и одной двусторонней — панелей. Получается четыре детектирующие плоскости на модуль, поэтому его иногда называют квадруплетом (рис. 3). Детекторы были спроектированы таким образом, чтобы достигать

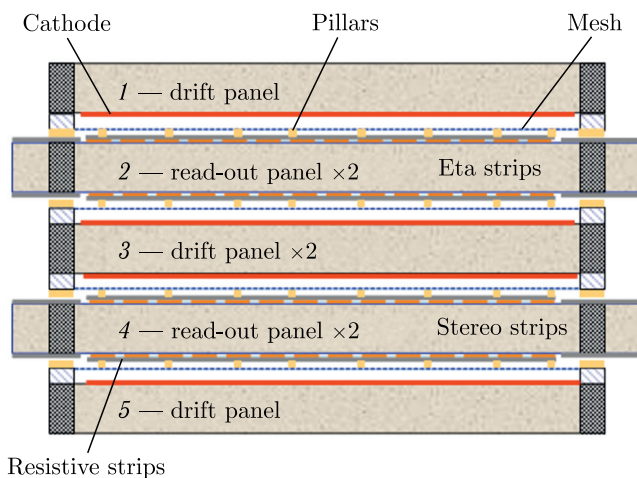


Рис. 3. Схематический вид модуля/квадруплета Micromegas

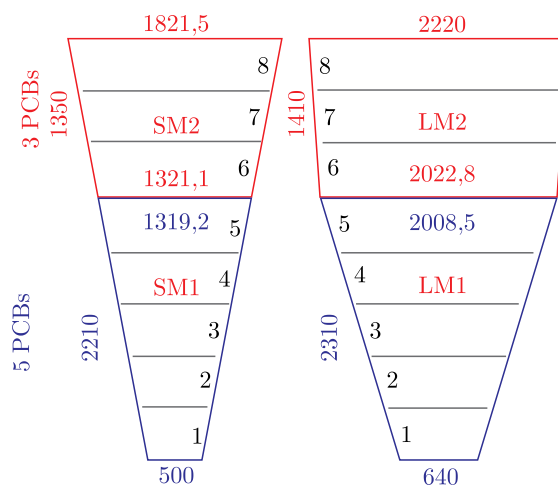


Рис. 4. Схематический вид клиньев малых и больших секторов. Размеры указаны в миллиметрах

пространственного разрешения лучше чем 100 мкм в прецизионном радиальном (η) направлении и 2–3 мм в неточном направлении ϕ . Соответственно, одна панель считывания имеет стрипы, параллельные друг другу и перпендикулярные к радиальному направлению (эта панель), а в другом — стереопанель — считывающие стрипы наклонены на $\pm 1,5^\circ$ относительно η .

Панели считывания с каждой стороны состоят из пяти (SM1, LM1) или трех (SM2, LM2) печатных плат, собранных на легкой несущей конструкции из алюминиевой рамы и сотовых панелей.

На рис. 4 показан схематический вид клиньев малых и больших секторов с размерами.

Требования к конструкции детектора. Для достижения 15%-го разрешения поперечного импульса для мюонов с энергией 1 ТэВ должны соблюдаться следующие механические точности: положение считывающих стрипов по прецизионной координате (η) должно быть известно с точностью, не превышающей среднеквадратическое значение в 30 мкм, и с точностью 80 мкм перпендикулярно поверхности модуля (Z — вдоль оси пучков в БАК). Эти требования определяют механические ограничения, которые учитывались при проектировании модулей Micromegas и должны контролироваться на производственных участках:

- печатные платы на одной стороне считывающей панели должны быть выровнены друг относительно друга с допуском ± 40 мкм;
- две стороны считывающей панели должны быть выровнены с допуском ± 60 мкм;
- толщина и плоскостность панели должны варьироваться в пределах ± 110 мкм (37 мкм RMS) по отношению к номинальной плоскости;
- высота дрейфового зазора должна быть достаточно точной на всей поверхности модуля (± 110 мкм).

Кроме того,

- 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 в 10^4);
- детекторы должны быть герметичными. Скорость утечки не должна превышать 10^{-6} бар·л/с при избыточном давлении 3 мбар.

И наконец, модули должны быть достаточно жесткими и с контролируемыми термомеханическими деформациями, чтобы иметь возможность их отслеживать и вносить соответствующие поправки в программу восстановления трека частиц во время эксплуатации детектора.

Обязательства ОИЯИ. ЛЯП ОИЯИ совместно с коллегами из Университета Аристотеля в Салониках (Греция) (Aristotle University of Thessaloniki, AUTH) ответствен за изготовление и тестирование LM2 — модулей Micromegas для наружной части больших секторов NSW. В ОИЯИ будут изготовлены и протестированы все 64 (плюс дополнительно 2 запасные) считывающие панели общей площадью 384 м² из 1200 м², предусмотренных для всего NSW. Кроме того, используя 96 дрейфовых панелей, произведенных в AUTH, мюонная группа ЛЯП должна собрать и протестировать перед отправкой в ЦЕРН 32 модуля, или квадруплета, Micromegas (плюс дополнительно один модуль).

Ответственными за изготовление и тестирование остальных типов модулей Micromegas являются:

SM1 — кластер из Павии, Рима, Козенци, Фраскати и Лечче Национального института ядерной физики (Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, INFN), Италия;

SM2 — немецкий кластер в составе университетов из Мюнхена (Ludwig-Maximilians-Universität, München), Майнца (Universität Mainz), Вюрцбурга (Julius-Maximilians-Universität, Würzburg) и Фрайбурга (Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg), Германия;

LM1 — Центр ядерных исследований Комиссариата по атомной энергии и альтернативным источникам энергии в Сакле (CEA Saclay), Франция.

Следует отметить, что почти все комплектующие материалы для производства — печатные платы, сотовые панели, детали для несущей рамы и т. д. — централизованно доставляются из ЦЕРН для всех участников проекта. Причем печатные платы там же проходят и контроль качества перед отправкой производителям модулей Micromegas.

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ УЧАСТКИ

Для выполнения взятых на себя обязательств в 2016 г. были начаты и в 2017 г. завершены работы по оснастке и запуску производственного участка по производству Micromegas-камер для нового малого колеса (NSW) мюонного спектрометра установки ATLAS в корпусе №4 ЛЯП ОИЯИ.

Тогда же были начаты и в 2018 г. закончены работы по созданию участка полного цикла по производству Micromegas-детекторов с шириной до 60 см [8]. Участок в свете возросшего за последнее 10 лет интереса к микроструктурным газовым детекторам (Micro Pattern Gas Detectors, MPGD) в общем и к детекторам Micromegas в частности дает возможность сотрудникам Института более эффективно участвовать как в реализации разных физических экспериментов, так и в прикладных исследованиях.

Следует отметить, что участки были созданы в результате существенного развития и оснащения новым современным оборудованием открытого ранее участка для MDT ATLAS.

Участок по производству Micromegas для NSW ATLAS. Участок включает в себя (рис. 5):

- 1) ЧПП (72 м², класс чистоты ISO 7) по производству считывающих панелей и тестированию их геометрических характеристик;
- 2) часть другого ЧПП (50 м², класс чистоты ISO 6), используемого для сборки и тестирования модулей Micromegas на высокое напряжение;
- 3) зал (150 м²) для стенда на космических лучах и постобработки панелей;
- 4) комнату (25 м²) для тестирования панелей на газовую течь;
- 5) помещение (25 м²) для мойки панелей.

В оснастку ЧПП (6×12 м) по производству и тестированию геометрических характеристик считывающих панелей входят два точных вакуумных стола (2510 × 1610 мм) для склейки панелей, точный монтажный стол для предварительной подготовки печатных плат и алюминиевой несущей рамы и высокоточный гранитный стол (3550×2600×500 мм). На гранитном столе закреплен трехосевой линейный модуль с оптической системой бесконтактного измерения топологии поверхностей (рис. 6).



Рис. 5. Схема расположения производственных участков. Участок по производству Micromegas для NSW ATLAS: 1 – чистое производственное помещение (ЧПП) по производству считывающих панелей; 2 – ЧПП для сборки и тестирования модулей/квадруплетов; 3 – зал для стенда испытаний на космических лучах; 4 – комната тестирования на газовую течь панелей Micromegas; 5 – комната для мойки панелей. Участок полного производственного цикла по производству Micromegas-детекторов (6) и общая для обоих участков газовая комната (7)



Рис. 6. ЧПП по производству и тестированию геометрических характеристик панелей. 1 – вакуумные столы; 2 – монтажный стол; 3 – гранитный стол; 4 – трехосевой линейный модуль с оптической системой бесконтактного измерения топологии

Само помещение оборудовано системами поддержания чистоты воздуха (ISO 7), стабилизации температуры ($21 \pm 0,5^\circ\text{C}$) и влажности ($(45 \pm 10)\%$). Для перемещения вакуумного стола во время производства используется электрическая таль.

Монтажный и вакуумные столы (ВС) были изготовлены совместно с детекторной группой ЦЕРН по специально отработанной технологии. Точный поверхностный слой

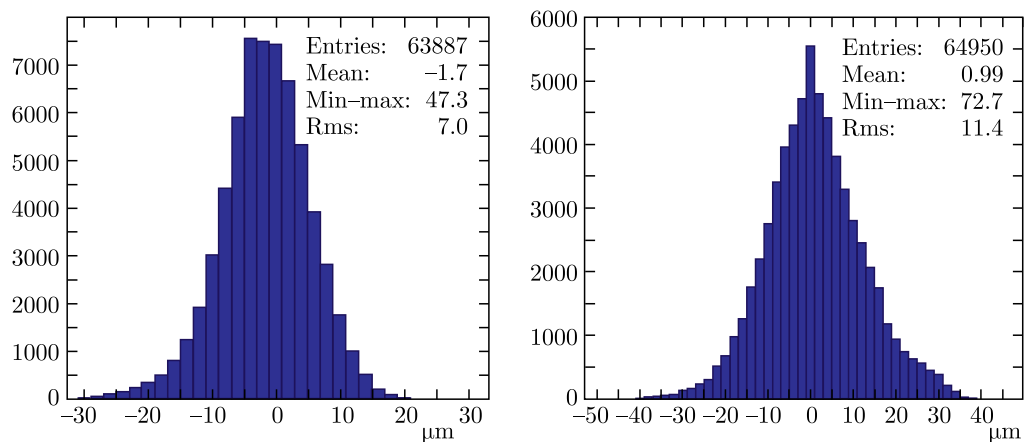


Рис. 7. Гистограммы измерения плоскостности точных поверхностных слоев вакуумных столов

ВС изготавливался из эпоксидного геля и из 8 структурных слоев углеродного волокна методом вакуумного инжестрирования клея. Окончательно поверхностный слой имел толщину примерно 3,5 мм и в точности повторял форму поверхности гранитного стола. Для несущей рамы были использованы углеродное волокно, алюминиевая перфорированная сотовидная решетка высотой 20 см и балки, изготовленные из пеноматериала (Rohacell). Детали между собой склеивали с помощью эпоксидного клея Araldite 2011.

В дальнейшем в точном поверхностном слое ВС с использованием координатно-измерительной машины были просверлены отверстия для вакуумного присасывания печатных плат во время склейки, а также прецизионные отверстия для их точного позиционирования на поверхностях вакуумных столов.

Чтобы удостовериться в необходимом качестве поверхностных рабочих слоев ВС, они были промерены. Измерения производились на гранитном столе с использованием оптической системы бесконтактного измерения топологии. Рис. 7 демонстрирует результаты измерения плоскостности точных поверхностных слоев обоих вакуумных столов. Максимальные отклонения (минимум/максимум) столов от плоскостности 47 и 73 мкм при среднеквадратических погрешностях (RMS) — 7 и 11,4 мкм соответственно.

Принимая во внимание, что максимальное допустимое отклонение, как было отмечено выше, не должно превышать 220 мкм (± 110 мкм), можно заключить, что ВС с большим запасом удовлетворяют необходимым требованиям. На рис. 8 показаны результаты измерения всех произведенных на сегодняшний день считывающих панелей, что подтверждает сказанное.

Идея изготовления считывающей панели с помощью ВС заключается в следующем: на вакуумном столе пилларами вниз кладутся по три заранее подготовленные печатные платы. С использованием соответствующих точных отверстий на ВС и на самих платах они выравниваются и затем вакуумом присасываются к поверхности. На печатные платы наносится клей (Araldite 2011), сверху на них на одном столе позиционируется заранее заклеенная алюминиевая несущая рама и сотовые панели. На заключительном этапе с помощью точных направляющих создается сэндвич из

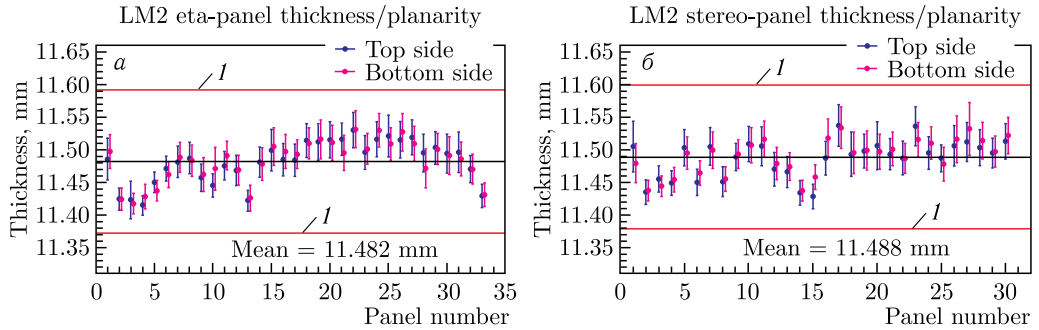


Рис. 8 (цветной в электронной версии). Результаты измерения толщины и плоскостности всех произведенных на сегодняшний день считывающих 33 эта- (а) и 30 стерео- (б) панелей. Красной линией (I) отмечены допуски ± 110 мкм от среднего значения

вакуумных столов с печатными платами и несущей конструкцией посередине. Расстояние между столами, т. е. толщина считывающей панели, задается набором точных прокладок между столами. Рис. 9 демонстрирует некоторые этапы производства считывающих панелей.

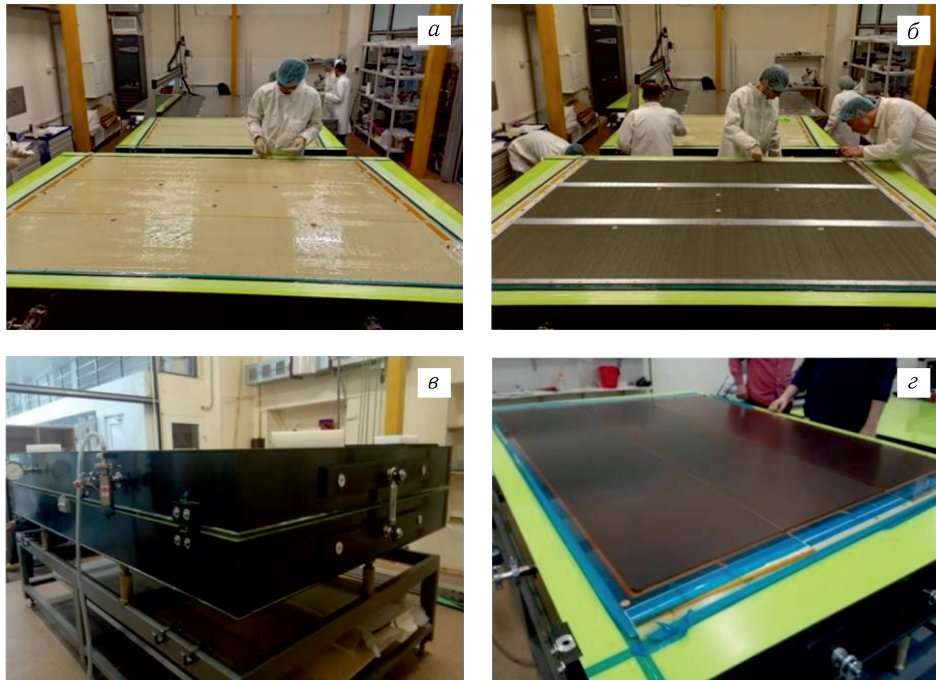


Рис. 9. Некоторые этапы производства считывающих панелей: а) печатные платы выровнены и присосаны к вакуумным столам, клей нанесен на платах первого вакуумного стола; б) закладка несущей рамы, сотовых панелей и специальных вставок, клей нанесен и на втором ВС; в) сэндвич из ВС и печатных плат с несущей конструкцией посередине; г) итоговый результат после снятия второго вакуумного стола через 24 ч после склейки

13-т монолитный гранитный стол ($3550 \times 2600 \times 500$ мм) с точностью поверхности и боковых граней лучше чем 10 мкм используется для измерения толщины и плоскостности изготавливаемых считывающих панелей и квадруплетов Micromegas. Кроме того, он используется для проверки точности выравнивания верхних и нижних печатных плат друг относительно друга в считывающей панели и самих панелей в квадруплете, а также измерения расстояния между печатными платами на одной плоскости.

Для этих целей на гранитном столе был собран трехосевой линейный модуль из компонентов производства компании Isel [9]. Размеры рабочего объема модуля ($X \times Y \times Z$) $3550 \times 2600 \times 400$ мм. Заявленная производителем точность позиционирования во всех трех направлениях составляет 20 мкм.

На Z -направляющей трехосевого линейного модуля закреплен измерительный зонд оптической системы бесконтактного измерения топологий поверхностей «CHRcodile S» производства фирмы Precitec [10]. Принцип измерения прост: посредством перемещения Z -направляющей белый свет с помощью зонда с выраженной хроматической aberrацией фокусируется на поверхность объекта измерения. Затем модуль в автоматическом режиме перемещает зонд над измеряемой поверхностью на гранитном столе по заданной траектории. Траекторию и шаг перемещения можно задавать программно. Спектр отраженного света показывает ярко выраженный пик, спектральное положение которого определяет расстояние — суперпозицию номинальной толщины

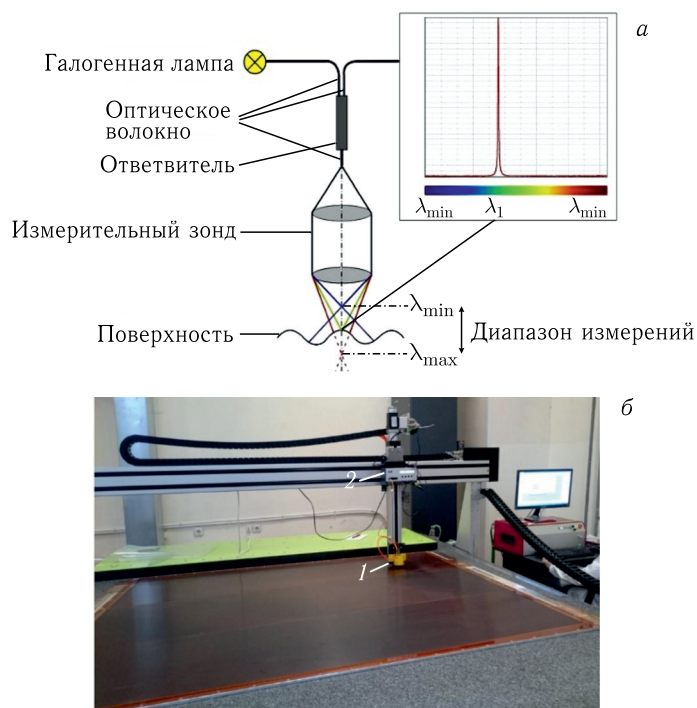


Рис. 10. а) Принцип работы оптической системы бесконтактного измерения; б) измерение считывающей панели: 1 — измерительный зонд в кожухе; 2 — блок управления

и планарности до поверхности (рис. 10). Измерения с блока управления передаются на компьютер посредством интерфейса стандарта RS-232. Система способна проводить измерения в диапазоне до 2 мм с точностью порядка 0,1 мкм.

Для проверки точности выравнивания верхних и нижних печатных плат друг относительно друга в считывающей панели и самих панелей в квадруплете используются устройства RasFork, разработанные в CEA Saclay и основанные на использовании оптико-электронной системы RASNIK [11]. Измерения проводятся с помощью считывания «шахматных» масок, нанесенных с двух сторон ближе к краю на середине печатных плат в процессе их производства фотолитографическим методом. Для измерения панелей используется схема измерения с двухканальным RasFork, а для квадруплета с четырехканальным. На рис. 11 представлена схема измерения с двухканальным RasFork, вид «шахматной» маски и результаты измерения всех произведенных панелей. Измерения расстояния между печатными платами на одной плоскости (absolute alignment) производятся посредством считывания масок ПЗС-камерой, закрепленной на Z-направляющей трехосевого линейного модуля.

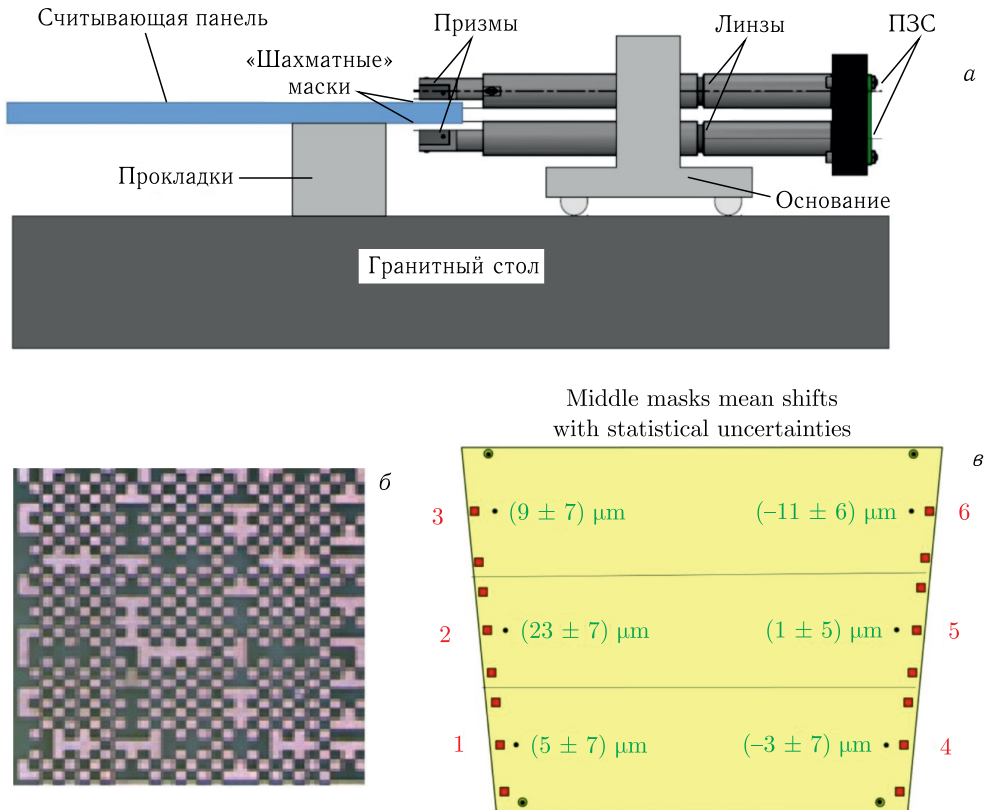


Рис. 11. Схема (а), вид «шахматной» маски (б) и результаты измерения (в) сдвигов верхних и нижних печатных плат друг относительно друга со статистическими неопределенностями

ЧПП для сборки и тестирования модулей *Micromegas* на высокое напряжение (класс ISO 6) занимает площадь 50 м² (рис. 12). Часть комнаты занимает зондовая станция Cascade Microtech EPS150 [12] для измерения характеристик полупроводниковых пластин и приборов, полуавтоматическая установка микросварки TPT HB16 [13] и координатно-измерительная машина (КИМ) Carl Zeiss ECLIPSE700 [14].

Зондовая станция используется для измерения вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик детекторов на основе GaAs:Cr, предназначенных для системы мониторинга радиационного фона ATLAS-GaAsPix в шахте установки ATLAS.

Установка микросварки TPT HB16 предназначена для клиновой микросварки и термокомпрессионной сварки золотым шариком для разработки и производства микрочипов. Установка обеспечивает сварку тонкой проволокой (до 75 мкм) из золота, алюминия, серебра и меди, а также лентой шириной до 250 мкм.

КИМ ECLIPSE700 имеет точность измерения $2,4 + L/250$ мкм, где L — длина измеряемой детали в мм. Измеряемый объем (длина/ширина/высота) 700×700×580 мм. Он предназначен для метрологии и в данном конкретном случае использовался для измерения точных деталей, необходимых для производства несущей рамы панелей *Micromegas*.

Остальную часть ЧПП занимает станция для сборки модулей из считывающих и дрейфовых панелей *Micromegas* и стойка с универсальным крейтом SY5527LC производства фирмы CAEN для многоканальных источников питания [15]. Крейт оснащен четырьмя 12-канальными источниками питания высокого напряжения (ВН) A7435DP [16], что в итоге дает возможность одновременного тестирования двух собранных модулей *Micromegas* (24 канала ВН на каждом) на высокое напряжение. Станция была разработана совместно с детекторной группой из ЦЕРН. В последующем она была доработана и изготовлена в ОИЯИ. Станция состоит из основы и вращающейся части, на которой крепятся панели во время сборки. Это дает возмож-

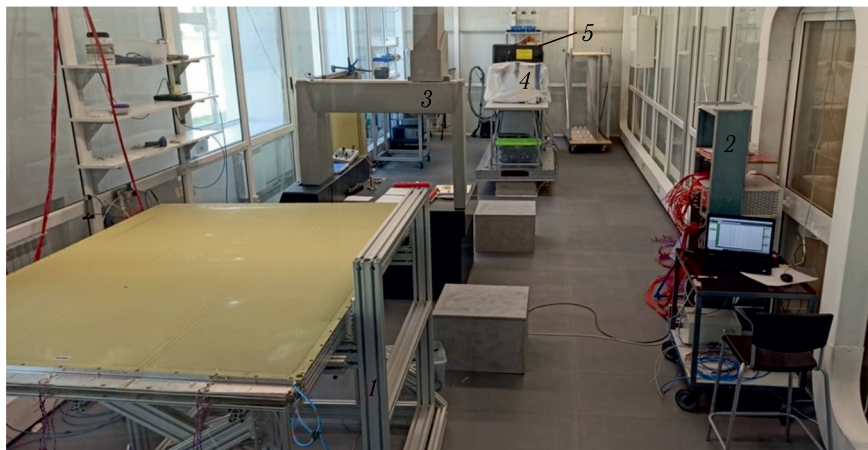


Рис. 12. Вид на ЧПП для сборки и тестирования модулей *Micromegas* на высокое напряжение: 1 — станция для сборки модулей *Micromegas* с лежащим на нем модулем; 2 — стойка с источниками питания высокого напряжения; 3 — КИМ Carl Zeiss ECLIPSE700. На заднем плане видны: 4 — установка микросварки и 5 — зондовая станция

ность, во избежание попадания пыли на рабочую поверхность панелей, производить сборку квадруплета в вертикальной позиции, а тестирование в горизонтальной, что удобнее.

Кроме того, в ЧПП заходят две газовые линии. Одна из них используется для подачи чистого сухого воздуха для предварительного тестирования квадруплетов на ВН до их окончательного закрытия/герметизации, а по другой линии подается рабочий газ ArCO_2 (93:7) для финального теста до переноса собранного квадруплета на тест на космических лучах. Для генерации сухого воздуха используется осушитель адсорбционного типа с холодной регенерацией HLR012 [17].

Зал для стенда на космических лучах и постобработки считывающих и дрейфовых панелей имеет площадь 150 м^2 . Стенд на космических лучах включает в себя (рис. 13):

- механическую структуру для размещения детекторов;
- годоскоп из 6 сцинтилляционных счетчиков (две плоскости с тремя счетчиками в каждом);
- подвижные направляющие для установки тестируемых модулей;
- две MDT-камеры размером $2,16 \times 3,30 \text{ м}$ для мюонного спектрометра ATLAS, изготовленные в 2005 г. в рамках обязательств ОИЯИ [18];
- источники высокого напряжения, логические блоки для формирования триггера, система продувки модулей рабочим газом.

В нормальном режиме тестов MDT-камеры не задействованы, но при необходимости они могут быть использованы для точного определения параметров трека прошедшей частицы.

Физическое тестирование предполагает измерение эффективности регистрации мюонов модулем Micromegas при рабочем напряжении детектора 580 В и рабочей

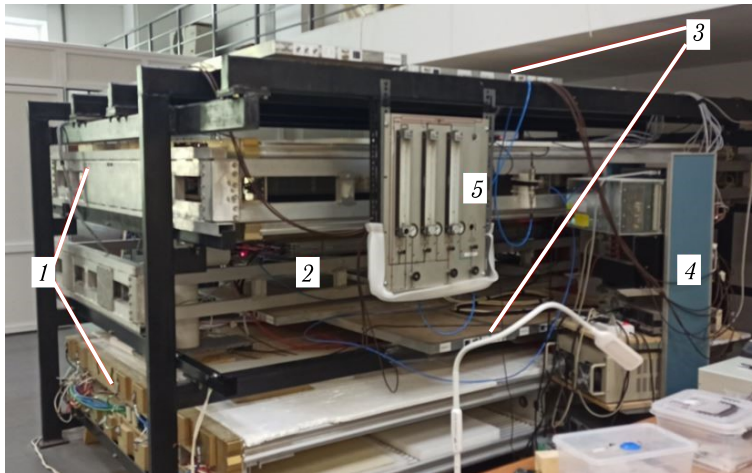


Рис. 13. Стенд на космических лучах: 1 — MDT-камеры; 2 — подвижная направляющая с модулем Micromegas; 3 — плоскости сцинтилляционных счетчиков; 4 — стойка с электроникой; 5 — измеритель потока газа

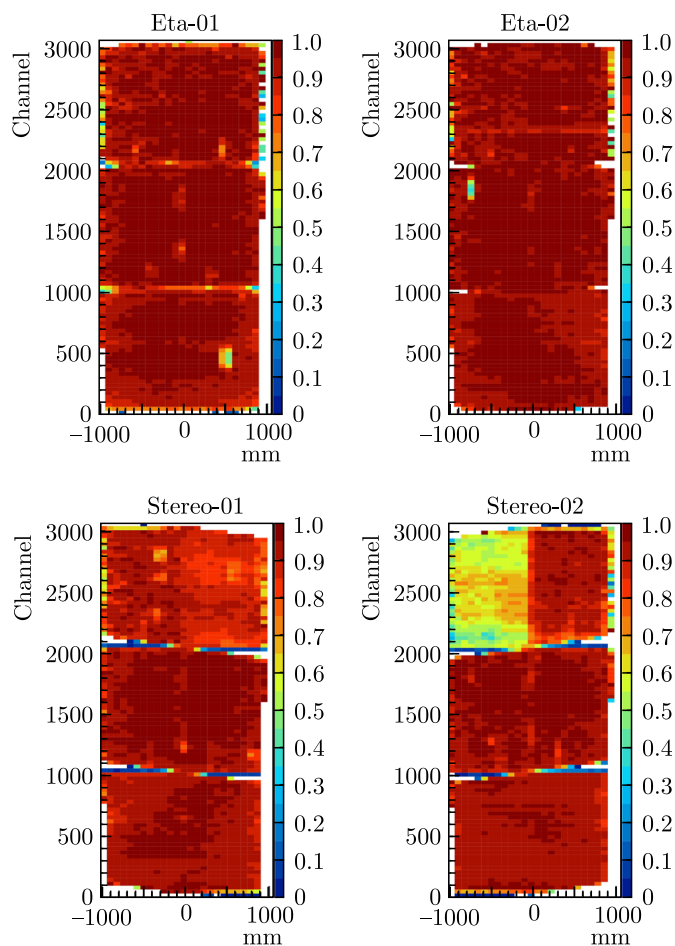


Рис. 14. Пример измерения эффективности регистрации мюонов

газовой смеси ArCO_2 (93:7) (рис. 14), что, учитывая расположение ЛЯП ОИЯИ над уровнем моря ~ 120 м, соответствует установленному коллаборацией рабочему напряжению 570 В для работы детектора на высоте БАК в ЦЕРН (~ 400 м над уровнем моря).

При наличии дополнительного времени проводятся наборы данных при пониженных напряжениях 525, 540 и 560 В для измерения зависимости эффективности от напряжения. Предполагается, что у исправного модуля эффективность выходит на плато при рабочем напряжении.

Комната для тестирования панелей на газовую течь. В комнату из выделенного помещения с газовыми баллонами и редукторами давления (см. рис. 5, поз. 7) заходят две линии из медных труб. В комнате находятся:

— два стенда проверки на газовую течь. Один из них используется для тестирования считывающих панелей (рис. 15), а второй для собранных модулей. Каждый стенд

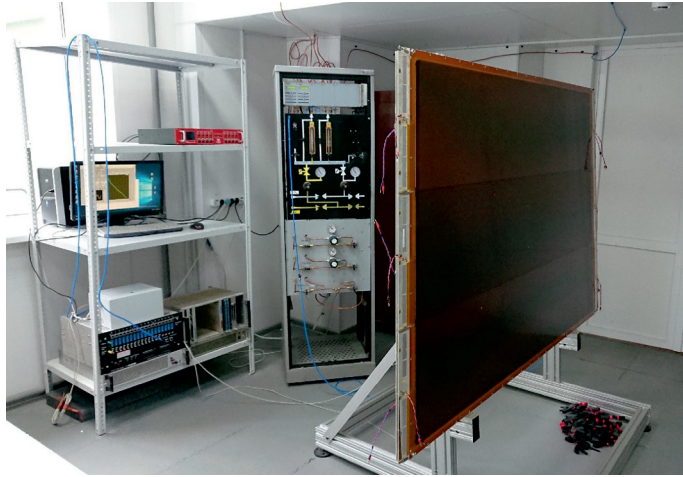


Рис. 15. Вид стенда для тестирования панелей на газовую течь с измеряемой панелью, закрепленной на фальшпанели, и газовой стойкой

включает манометр избыточного давления, манометр абсолютного давления и датчики температуры, контролируемые программой LABVIEW. Манометр избыточного давления имеет диапазон 20 мбар, точность 0,1 %, цифровой выход RS485. Манометр абсолютного давления: диапазон 800–1200 мбар, точность 0,02 %, цифровой выход RS485. Для контроля температуры используются два стандартных датчика ATLAS MDT. Сама станция выполнена в виде коробки размерами 20×30×15 см с датчиками давления и локальным контроллером внутри, подключенным к ПК через порт USB;

— фальшпанель для проверки панелей на газовую течь. Она изготовлена из поликарбонатного стекла, усиленного алюминиевыми профилями Bosch. Стандартное используемое для производства модулей уплотнительное кольцо из этилен-пропиленового каучука (EPDM — Ethylene Propylene Diene Monomer) диаметром 7 мм применяется для герметизации «испытательного объема» между испытуемой и фальшпанелями;

— две независимые газосмесительные установки на базе регуляторов массового расхода фирмы Bronkhorst [19]. Обеспечиваемые максимальные потоки составляют 10 л/ч (используется для стенда на космических лучах) и 40 л/ч (для ЧПП по сборке и тестированию модулей Micromegas на высокое напряжение). Они также применяются для получения известного потока газа для расчета деформации панели/модуля во время теста на газовую течь.

Для измерения течи панели или модуля используется метод «перепада давления» (dP/dt). При измерении учитываются изменение атмосферного давления и температуры, а также объемная деформация из-за избыточного давления. Как отмечалось выше, скорость утечки газа не должна превышать 10^{-6} бар-л/с, что соответствует падению давления примерно 0,6 мбар/ч для модуля LM2 емкостью ~ 60 л, при избыточном давлении 3 мбар. На рис. 16 представлены графики измерения 19 эта- и 19 стереопанелей.

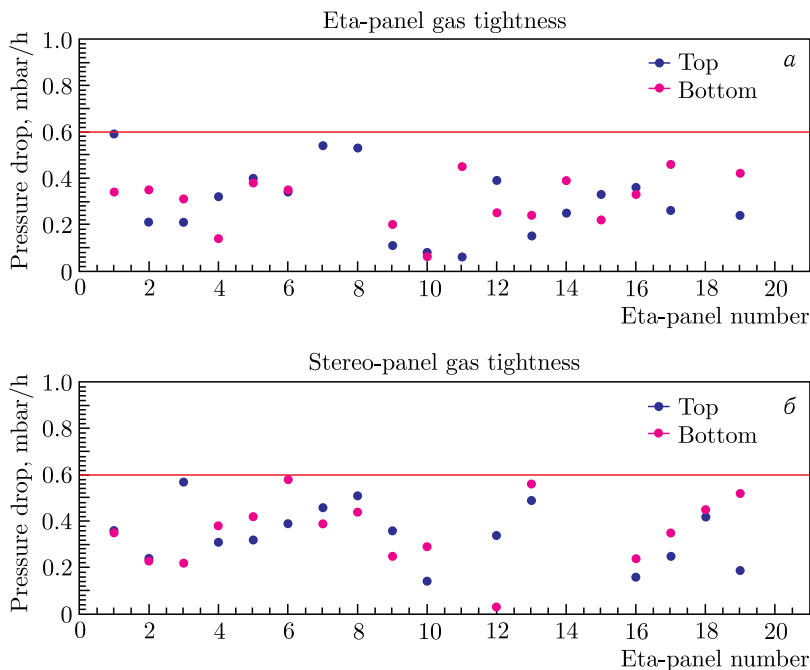


Рис. 16. Графики измерения 19 эта- (а) и 19 стереопанелей (б). Линией показано предельное значение допустимой течи

Помещение (25 м²) для мойки панелей. Сборка модуля Micromegas — механическое соединение дрейфовых и считывающих панелей — производится в чистой комнате для предотвращения осаждения примесей в газовом объеме. Но перед этим, чтобы гарантировать стабильность высокого напряжения, повышенное внимание следует уделить обезжириванию поверхностей и удалению загрязнений, которые возникают при производстве панелей, особенно у основания пилларов, и возможных ионных компонентов солей. Это также особенно важно для поверхностей, изготовленных из резистивного материала, где необходимо полностью удалить остатки материалов от литографических производственных процессов. Сухая чистка панелей в чистой комнате с использованием антистатических роликов не может справиться с данными задачами. Ее назначение — удаление пыли с поверхностей непосредственно перед сборкой модуля. Поэтому необходима промывка панелей по специально разработанной процедуре.

Для мойки дрейфовых панелей используется раствор детергента NGL1740 (10 г/л), а для считывающих панелей — универсальное чистящее средство Cif. Технология в обоих случаях одинакова: они наносятся на поверхность кистью, выдерживаются 10–15 мин и потом смываются сначала теплой водопроводной водой, а затем, для удаления с поверхностей возможных ионных компонентов солей, деионизированной водой под высоким давлением (70 бар на расстоянии 20 см от поверхности). После мойки, для удаления влаги, следует сушка в специально созданном для этого сушильном шкафу. В случае наличия «пиков» на резистивном слое или следов разряда на поверхности перед мойкой считывающие панели полируются взвешенными в воде гранулами пемзы (размер гранул ~100 мкм).

Для мойки панелей была оборудована специальная комната. В комнате находятся структуры для поддержки панелей, деионизатор воды ДМЭ-4/Б 50 ОПТИМА [20], емкость для деионизированной воды и мойки высокого давления Kärcher. В комнате оборудована приточно-вытяжная вентиляция с температурной стабилизацией.

Участок полного цикла по производству Micromegas-детекторов. До недавнего времени самыми большими по площади являлись детекторы Micromegas для экспериментов COMPASS (40×40 см) [21] и T2K (36×34 см) [22]. Оработка технологии производства детекторов Micromegas больших площадей для модернизации NSW ATLAS (~ 3 м²) открывает новые возможности для их использования в экспериментах с большим перекрытием площади. Кроме того, растет интерес к микросеточным детекторам со стороны физического сообщества. Исходя из перечисленного выше, а также того факта, что данная новая технология производства никогда не была осуществлена ни в России, ни в ОИЯИ, было принято решение о сооружении участка полного производственного цикла для Micromegas-детекторов. Следует учесть, что участок не предназначен для производства печатных плат. Группа под свои задачи разрабатывает схему печатной платы (ПП), создает необходимые для производства ПП и фотошаблона для пилларов Gerber-файлы и отправляет производителям. После получения готовых плат и фотошаблонов на участке производятся все последующие необходимые работы — формирование и наращивание пилларов необходимой высоты, зазоров усиления и дрейфа, создание газового объема, тестирование и паспортизация готового детектора.

Участок полного цикла по производству Micromegas-детекторов занимает 78 м². Для работы с фоторезистом на все окна и осветительные приборы наклеена желтая пленка, которая эффективно блокирует УФ-излучение. Оборудование для производства детекторов включает в себя (рис. 17):

— натяжитель сетки GRÜNIG G-Stretch 215 A1 [23], дающий возможность натягивать сетку размером до 1050 мм (длина/ширина), и измеритель натяжения того

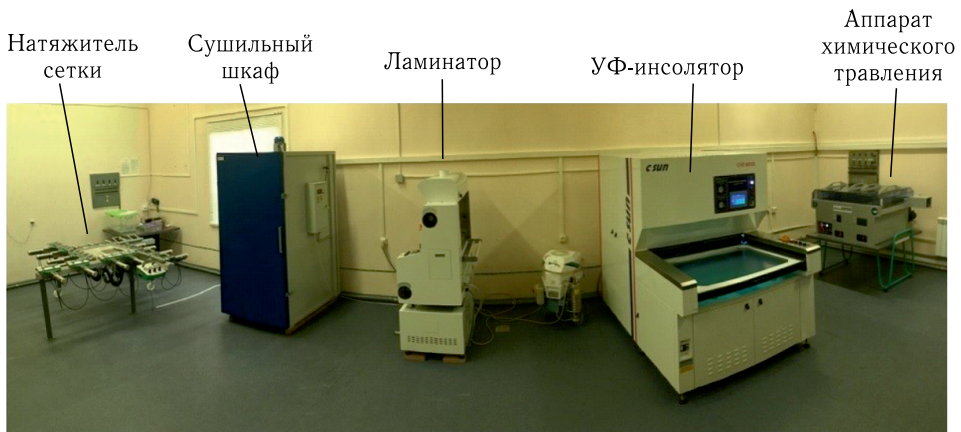


Рис. 17. Оборудование для производства Micromegas-детекторов на участке полного производственного цикла

же производителя. Сила натяжения при производстве Micromegas-детекторов 10–13 Н/см;

— рулонный ламинатор C SUN CSL-M25E [24] для двустороннего нанесения сухого фоторезиста шириной до 610 мм на поверхность заготовок печатных плат. В качестве фоторезистивного слоя была выбрана пленка DuPont Pyralux 1025 толщиной 64 мкм [25]. Для обеспечения равномерного покрытия платы и адгезионной прочности были подобраны оптимальные параметры: температура ламинирующего ролика — 100 °С, температура прижимающего ролика — 50 °С, давление, создаваемое между роликами, — 3 кг/см² и скорость ламинации — 1 м/мин. Кроме того, перед нанесением фоторезиста печатная плата предварительно нагревается в сушильном шкафу до температуры 50 °С;

— полуавтоматический двусторонний инсолятор для экспонирования фоторезиста через фотошаблон C SUN UVE-M500 [24]. В качестве источника УФ-излучения в инсоляторе используется ртутная лампа мощностью 5 кВт (интенсивность — 30 мВт/см² при длине волны 365 нм). Максимальный размер заготовок (толщиной 0–3,2 мм) и область экспонирования: 610×740 мм. Для одного слоя фоторезистивной пленки была подобрана энергия в 0,2 мДж/см²;

— модульную конвейерную установку химического травления для двусторонних ПП с линейным разрешением менее 0,1 мм Bungard Elektronik Sprint 6000 [26], с шириной конвейера 600 мм. Травление фоторезиста проводится в 1%-м растворе кальцинированной соды — Na₂CO₃. Скорость подачи при производстве варьируется в пределах от 0,2 до 0,6 м/мин;

— шкаф сушильный лабораторный ШСВ-1000 [27] с размером рабочей камеры 700×1500×1000 мм, диапазоном стабилизируемых температур +50–+250 °С и точностью поддержания температуры не хуже ±2 °С. Шкаф используется для отверждения проявленной фоторезистивной пленки в течение 4 ч при температуре 140 °С, а также для предварительного нагрева ПП перед ламинацией;

— деионизатор мембранный ДМЭ-ЗБ [28]. Деионизированная вода используется для окончательной промывки фоторезиста после проявления.

Для проверки качества детектора и предварительного тестирования в помещении имеются стереоскопический с цифровой камерой и USB-микроскопы и крейт стандарта NIM с двухканальными источниками питания высокого напряжения CAEN N471. Также подведена газовая линия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На участке по производству Micromegas для NSW ATLAS работы идут полным ходом. К моменту написания статьи практически было закончено производство и тестирование считывающих панелей (64 шт.). Также были собраны, протестированы и паспортизованы 19 модулей Micromegas. Из них для интеграции на структурах Нового малого колеса в ЦЕРН (рис. 18) были отправлены 17 модулей. Окончание работ намечено на март–апрель 2021 г. В дальнейшем созданная инфраструктура будет использоваться для «Phase 2» обновления эксперимента ATLAS. Группа будет задействована в НИОКР по созданию и производству новых беспроводных резистивных

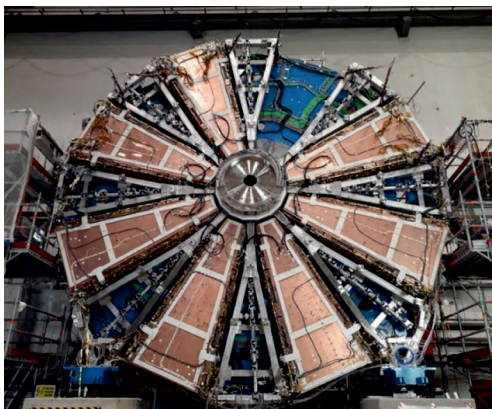


Рис. 18. Клинья малых секторов Micromegas и sTGC на структуре NSW-A ATLAS в здании 191 ЦЕРН

плоских камер (РПК, RPC — Resistive Plate Chambers), выбранных коллаборацией основными триггерными камерами внутреннего слоя мюонного спектрометра. При этом геометрический охват триггера вырастет с сегодняшних 73 до 96%, что существенно увеличит эффективность установки.

На участке полного производственного цикла совместно с Туринским университетом идут разработка, производство и тестирование Micromegas-детекторов для их возможного использования в модернизации установки COMPASS++/AMBER на ускорителе SPS в ЦЕРН. Создание участка уже вызвало заметный интерес среди российских и зарубежных коллег, занимающихся созданием экспериментальных установок. Есть большая заинтересованность в совместных методических разработках. Наряду с производством детекторов Micromegas, совместно с ЛВЭ ОИЯИ, ИЯП БГУ и Томским политехническим университетом реализуется проект разработки ТЗ для установки нанесения резистивного DLC (Diamond-like carbon) покрытия на разные материалы. В дальнейшем планируется закупка установки.

Возможность производства опытных образцов и небольших партий детекторов на этом участке, безусловно, позволяет сотрудничать как в подготовке и реализации физических экспериментов, так и в прикладных и методических исследованиях.

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. *The ATLAS Collab.* Muon Spectrometer Technical Design Report. CERN/LHCC/97-22. 1997.
4. *Гонгадзе А.* Камеры Micromegas для эксперимента ATLAS на LHC // ЭЧАЯ. 2016. Т. 47, № 2. С. 501–531.
5. *The ATLAS Collab.* ATLAS NSW TDR. CERN-LHCC-2013-006, ATLAS-TDR-20-2013. 2013.

6. *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.
7. *Kuger F.* Signal Formation Processes in Micromegas Detectors and Quality Control for Large Size Detector Construction for the ATLAS New Small Wheel. CERN-THESIS-2017-106. 2017.
8. *Dedovich D. et al.* Bulk Micromegas Fabrication at JINR // J. Instrum. 2019. V. 14.
9. Isel Germany AG. <https://www.isel.com/>.
10. Precitec Optronic GmbH. <https://www.precitec.com/optical-3d-metrology/>.
11. *van der Graaf H. et al.* RasNiK, an Alignment System for the ATLAS MDT Barrel Muon Chambers. Amsterdam: NIKHEF, 2000.
12. Cascade Microtech. <https://www.formfactor.com/products/probe-systems/>.
13. TPT Wire Bonder GmbH. <https://www.tpt-wirebonder.com/hb16/>.
14. Carl Zeiss AG. <https://www.zeiss.com/corporate/int/home.html>.
15. CAEN S.p.A. <https://www.caen.it/subfamilies/mainframes/>.
16. CAEN S.p.A. <https://www.caen.it/products/a7435/>.
17. Officine Meccaniche Industriali Srl. <https://www.omi-italy.it/en/hl-0003-0030>.
18. *Глонти Г. Л. и др.* Автоматизированная линия сборки и испытания детекторов мюонной системы установки ATLAS. Сообщ. ОИЯИ P13-2001-218. Дубна, 2001.
19. BRONKHORST HIGH-TECH B.V. <https://www.bronkhorst.com/int/products/gas-flow/controllers/>.
20. ООО «ВМТ». <https://www.vladbmt.ru/>.
21. *Bernet C. et al.* The 40×40 cm Gaseous Microstrip Detector Micromegas for the High-Luminosity COMPASS Experiment at CERN // Nucl. Instr. Meth. A. 2005. V. 536, No. 1–2. P. 61–69.
22. *Abgrall N. et al.* Time Projection Chambers for the T2K Near Detectors // Nucl. Instr. Meth. A. 2011. V. 637, No. 1. P. 25–46.
23. Grunig. <https://www.grunig.ch/en/products/stretching/g-stretch-215.html>.
24. C SUN Mfg. Ltd. <https://www.csun.com.tw/>.
25. DuPont™. <https://www.dupont.com/electronic-materials/laminates.html>.
26. Bungard Elektronik GmbH & Co.KG. <https://www.bungard.de/en/machines/etching-developing-machines/sprint-3000>.
27. НПФ «Термокон». <http://термо-спб.ru/catalog/cushilnye-shkafy-serii-shsv/sushilnyy-shkaf-shsv-1000/>.
28. ООО «ВМТ». <https://distiller.vladbmt.ru/produkcziya/sp-ultrachistoj-vodyi/deionizatoryi-25-lch/>.

Получено 9 октября 2020 г.