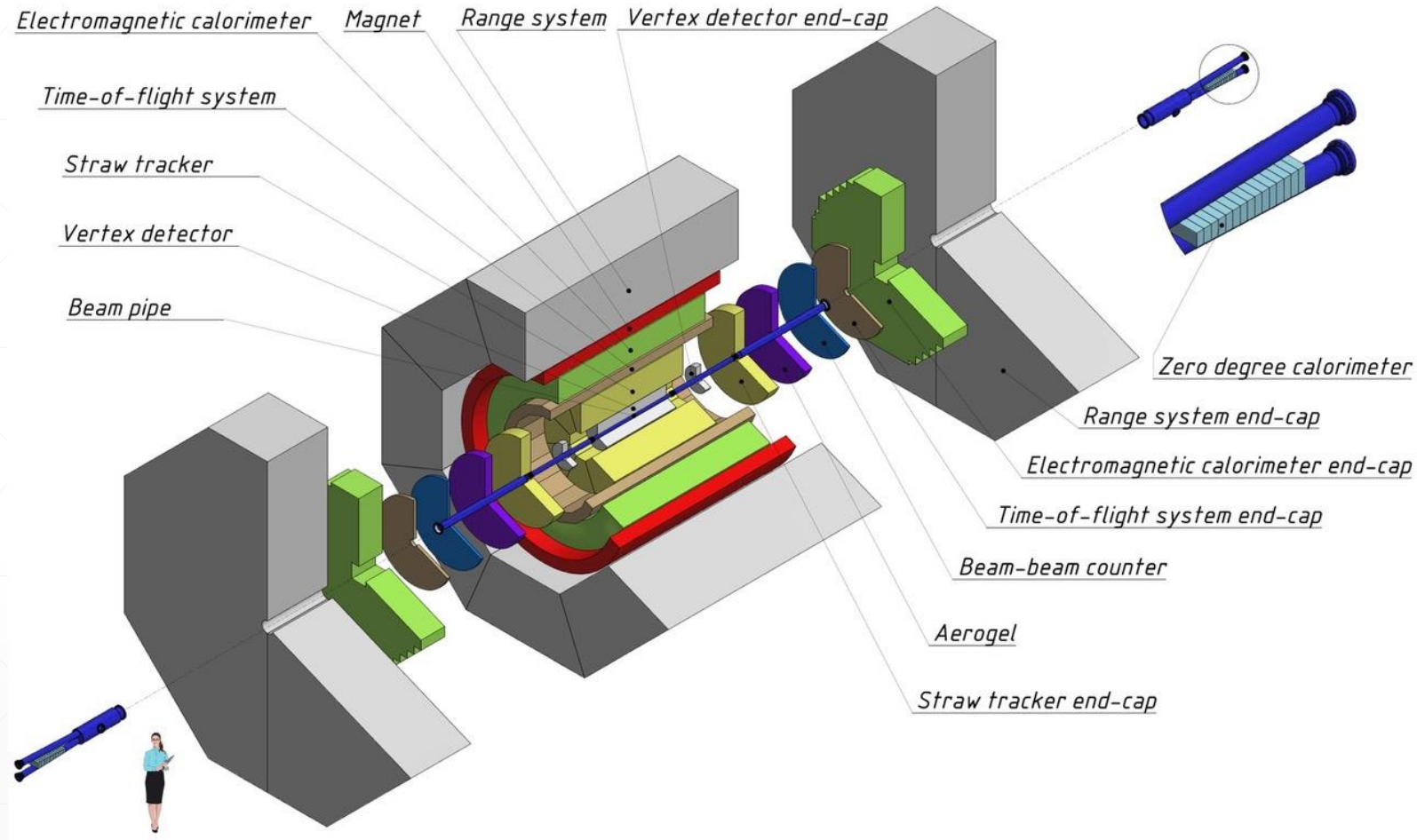


Прототип центрального трекера на основе Micromegas (МСТ) для детектора SPD

И. В. Ляшко, А. Л. Гонгадзе, Д. В. Дедович, Н. А. Ковязина

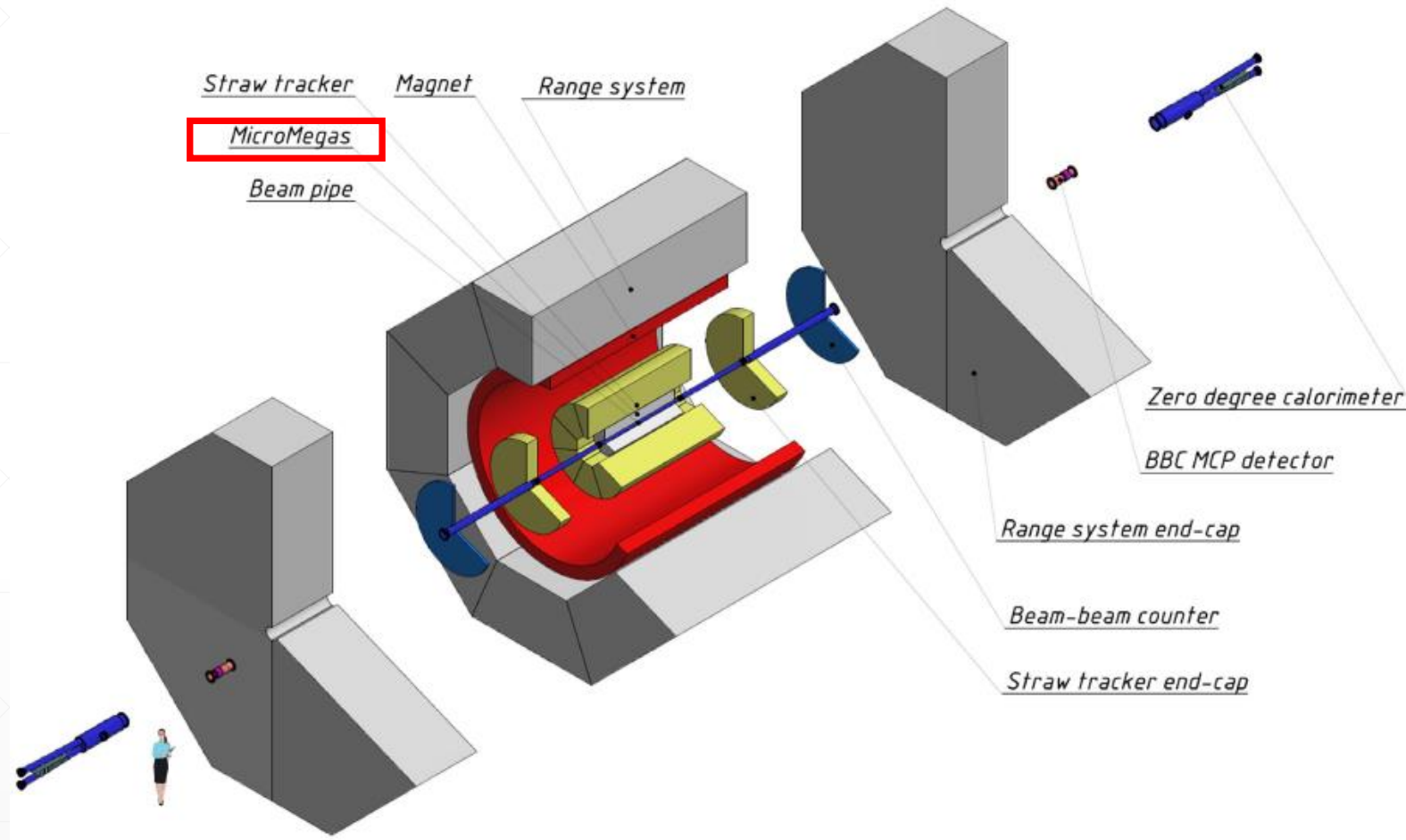
Объединённый институт ядерных исследований

Экспериментальная установка **Spin Physics Detector**



Установка SPD спроектирована как универсальный 4π-детектор, включающий системы трекинга, калориметр, мюонную систему и систему идентификации частиц, размещённые в сверхпроводящем магните.

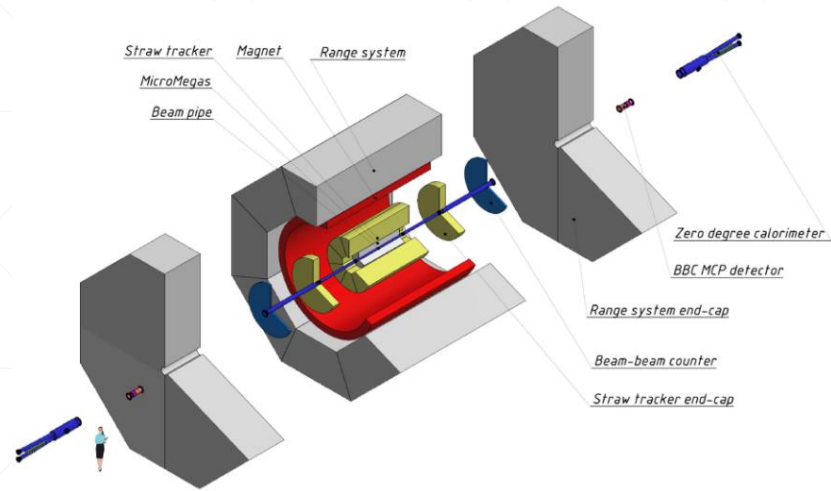
Экспериментальная установка SPD: Фаза 1



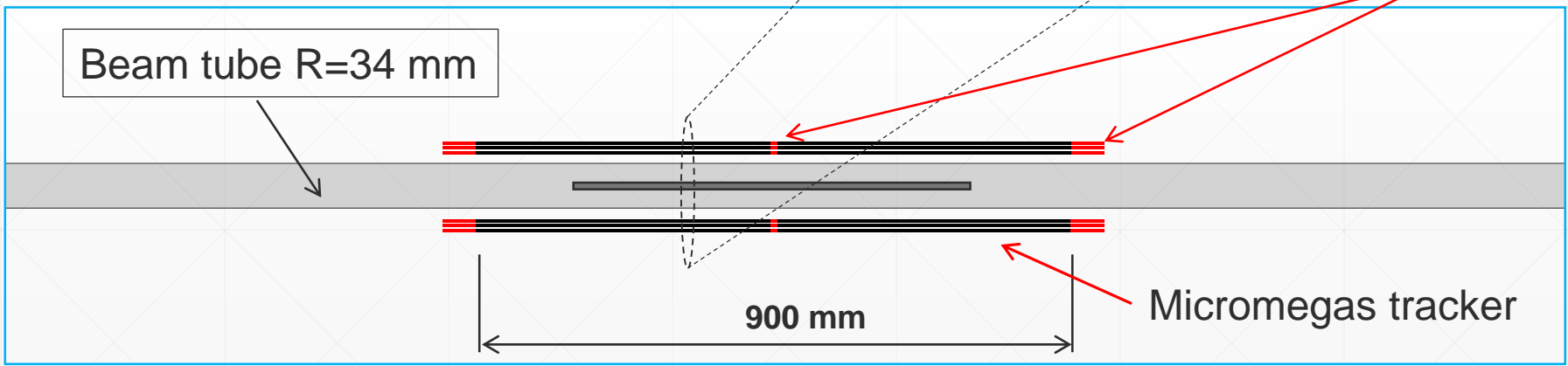
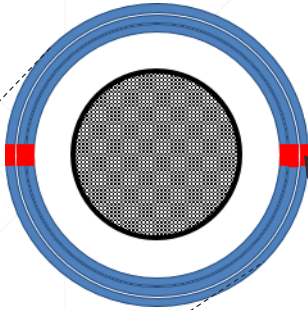
Micromegas Central Tracker (MCT) – простой и дешевый детектор призванный улучшить импульсное разрешение и эффективность поиска треков в первые годы эксплуатации SPD.

MCT не предназначен для реконструкции вершин $D^{0,\pm}$

Micromegas Central Tracker (MCT). Общая схема



Micromegas tracker: 3 слоя R=50-61 mm
12 полуцилиндрических детекторов micromegas



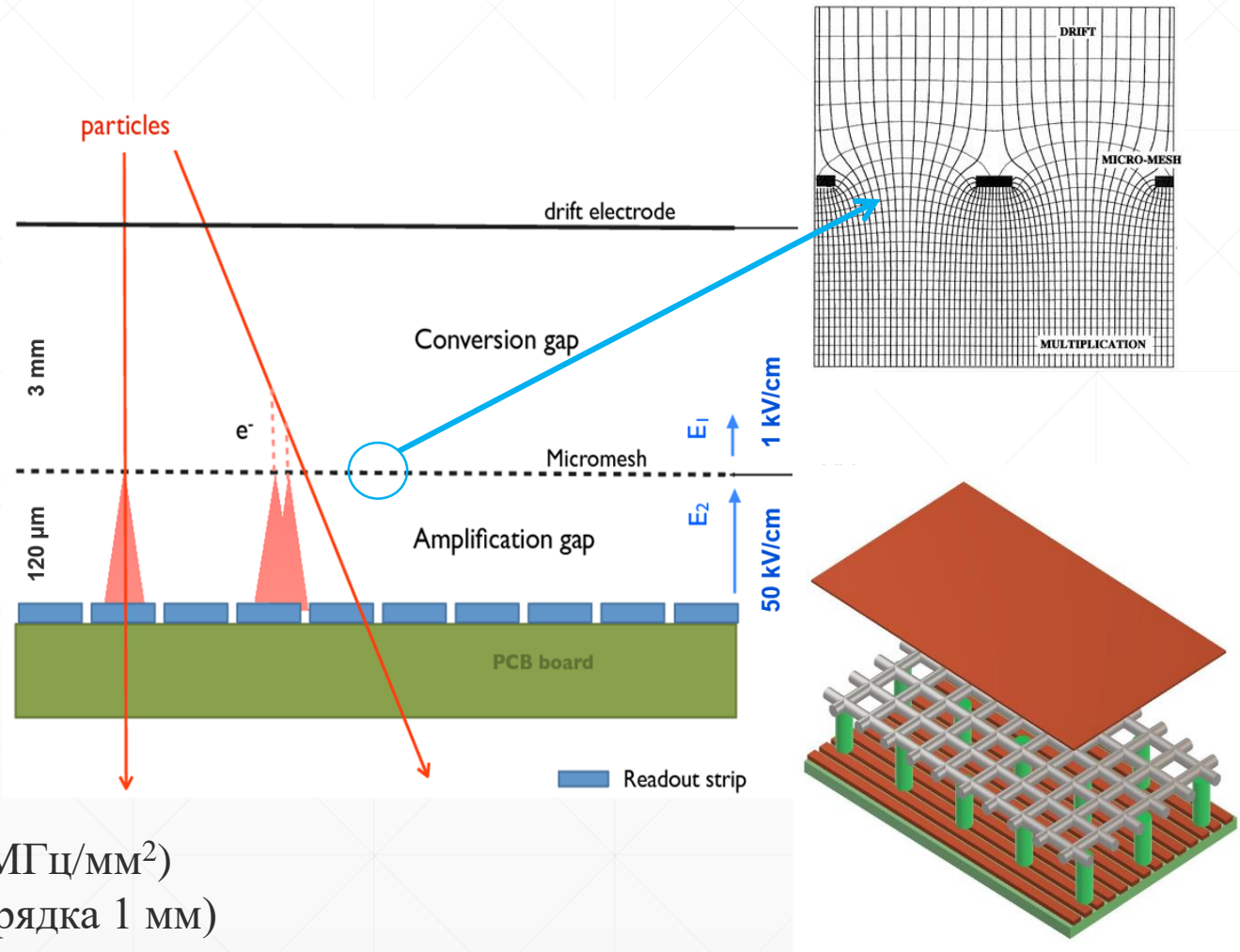
Micro Mesh Gaseous Structure

Micromegas – плоский счетчик с выделенными ионизационным и усилительным зазорами разделенными тонкой сеткой.

- Ионизационный зазор: 3-5 мм
- Усилительный зазор: ~120 мкм
- Газовое усиление: $\sim 10^4$
- Прозрачность сетки для первичных электронов: $>95\%$ при оптимальном E_{drift}/E_{gain}
- Анод сегментирован в виде медных полосок

Преимущества:

- Высокая нагрузочная способность (10 МГц/мм^2)
- Хорошее двухтрековое разрешение (порядка 1 мм)
- Координатное разрешение 100-150 мкм



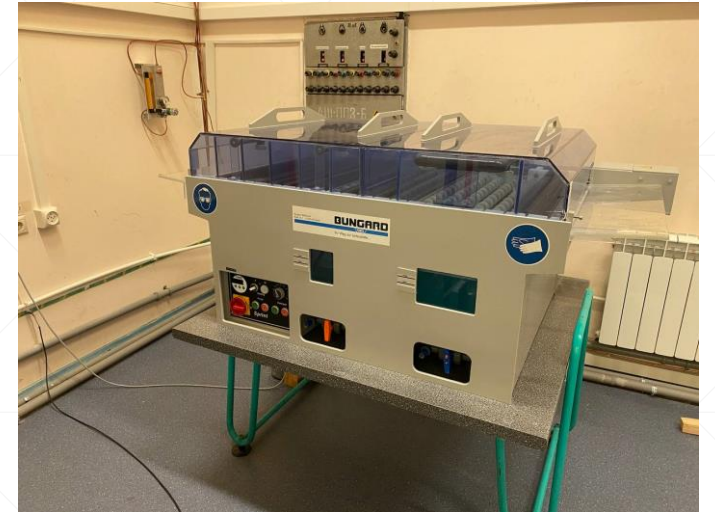
Производственный комплекс Micromegas



Натяжитель сетки



Инсолятор



Установка травления

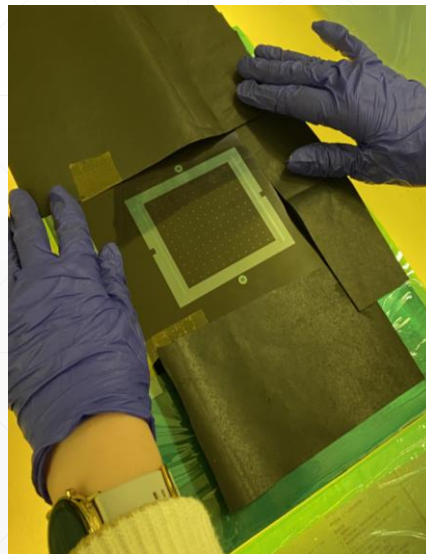
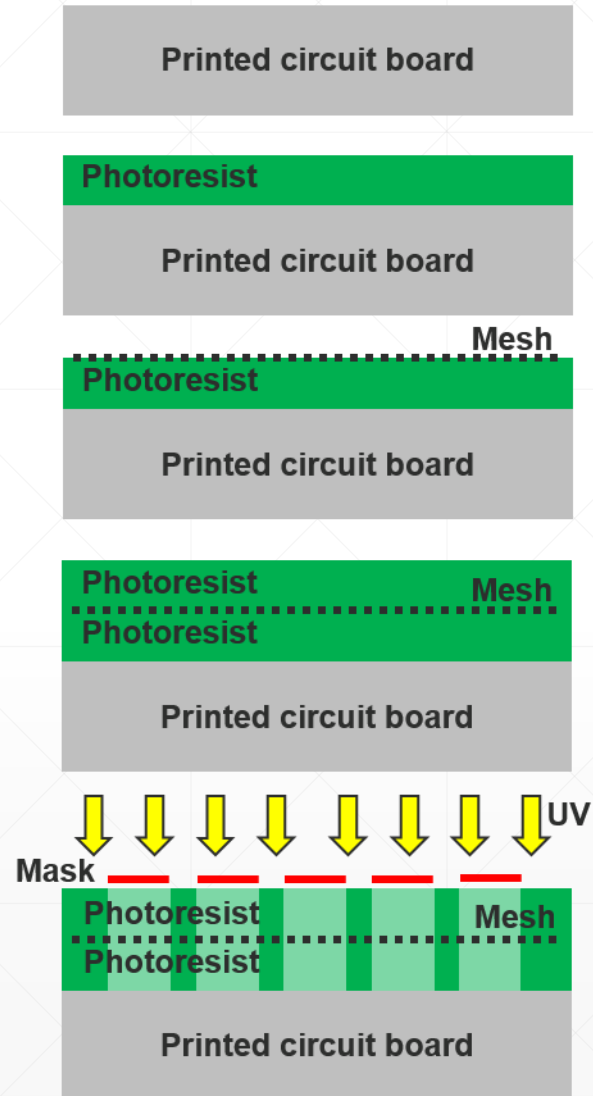


Ламинатор

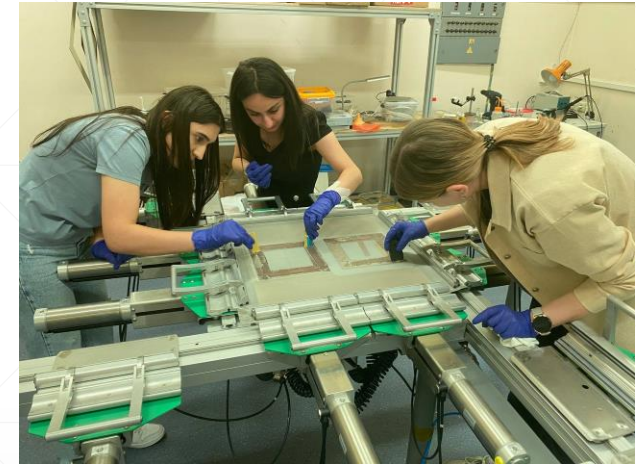


Сушильный шкаф

Изготовление детекторов ММ



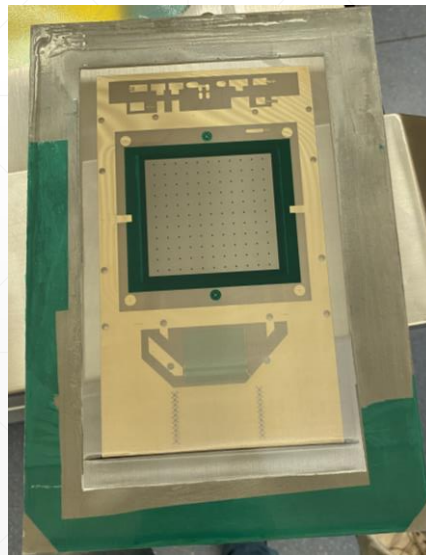
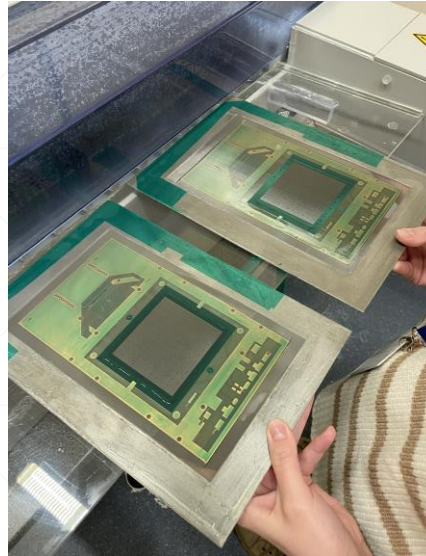
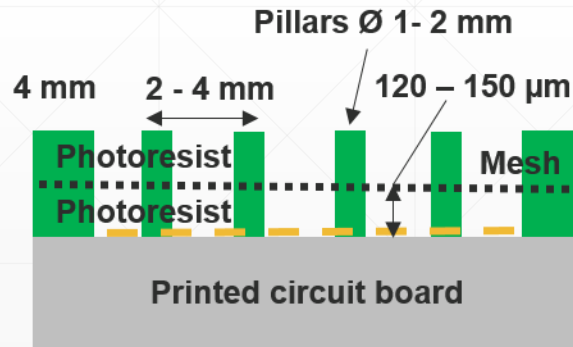
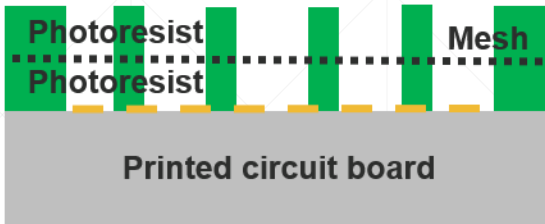
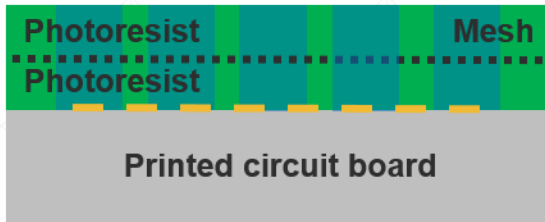
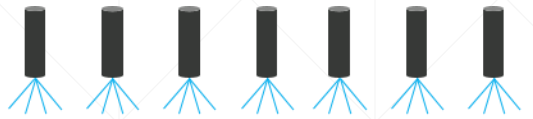
На исходную РСВ наносится необходимое количество слоев фоторезистивной пленки (DYNAMASK 40,75 мкм)



Предварительно натянутая на каркасе сетка фиксируется слоем фоторезистивной пленки

Используя фотолитографическую маску наш прототип засвечивается ультрафиолетом

Изготовление детекторов ММ



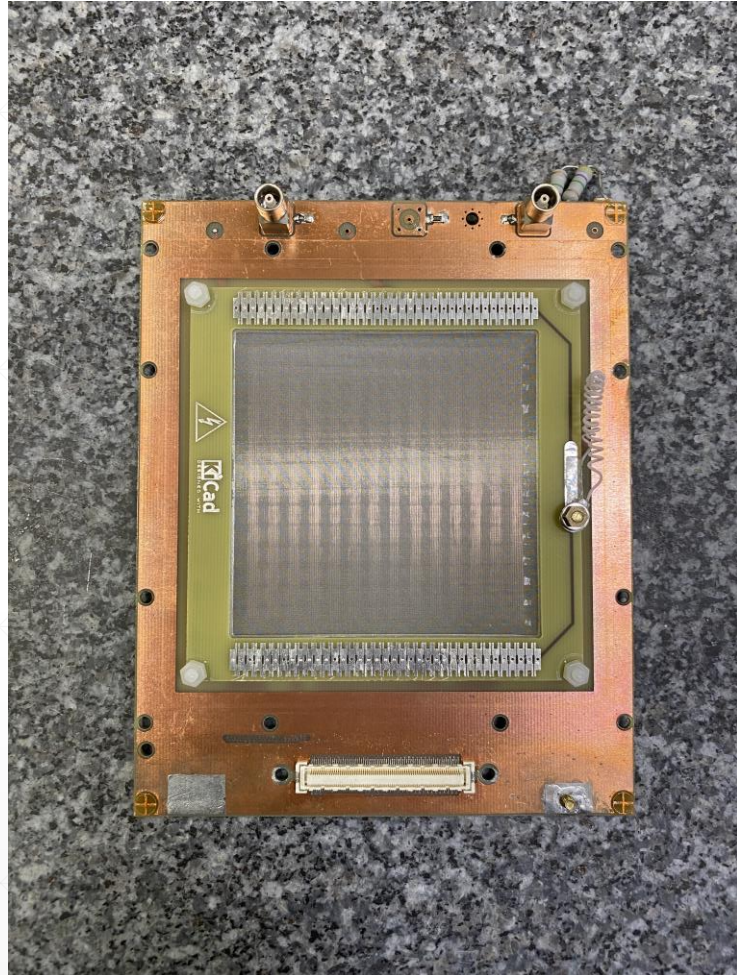
Травление 1%-м раствором кальцинированной соды Na_2CO_3

Засвеченная область остается, все остальное смывается

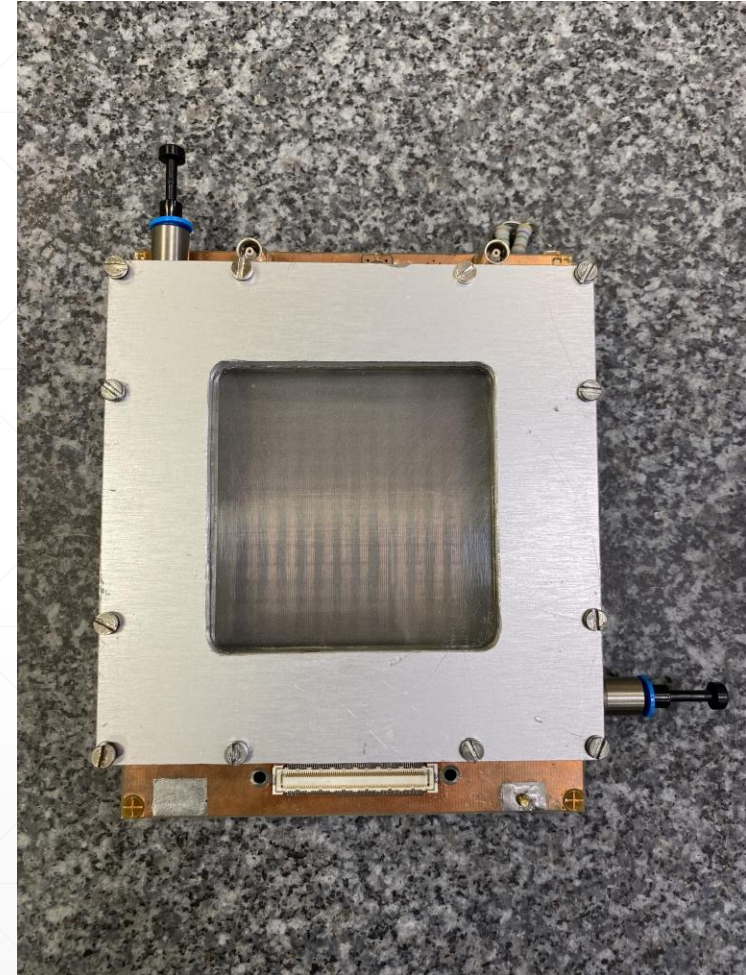
Промывка в деионизированной воде и сушка в печи при 145° – 1 час

Лишняя сетка обрезается. Распаиваются дискретные элементы

Изготовление детекторов ММ



Установка дрейфового зазора

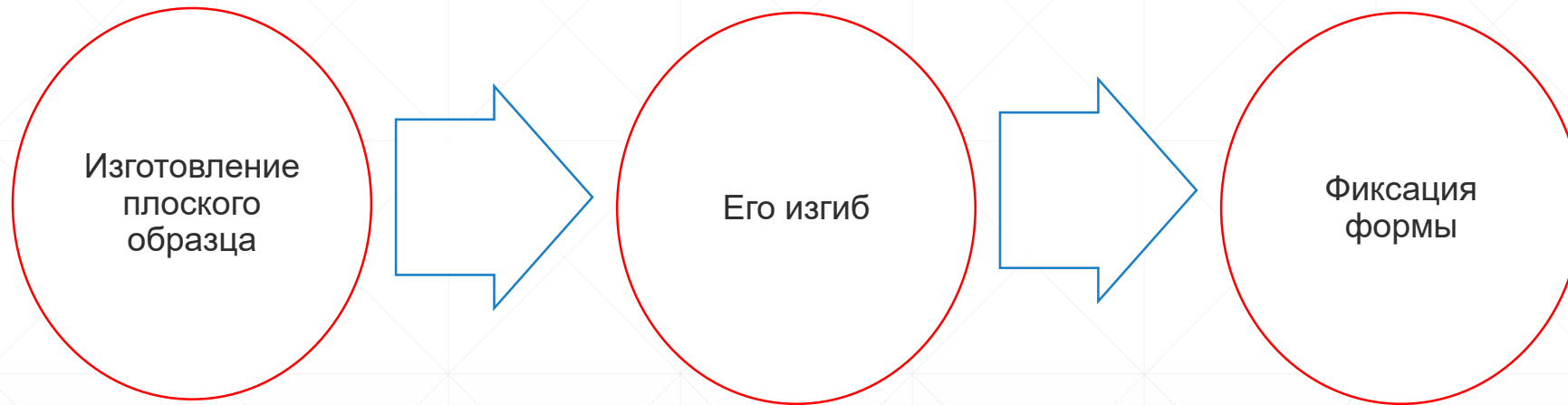


Детектор в сборе

Изготовление полуцилиндрического детектора ММ

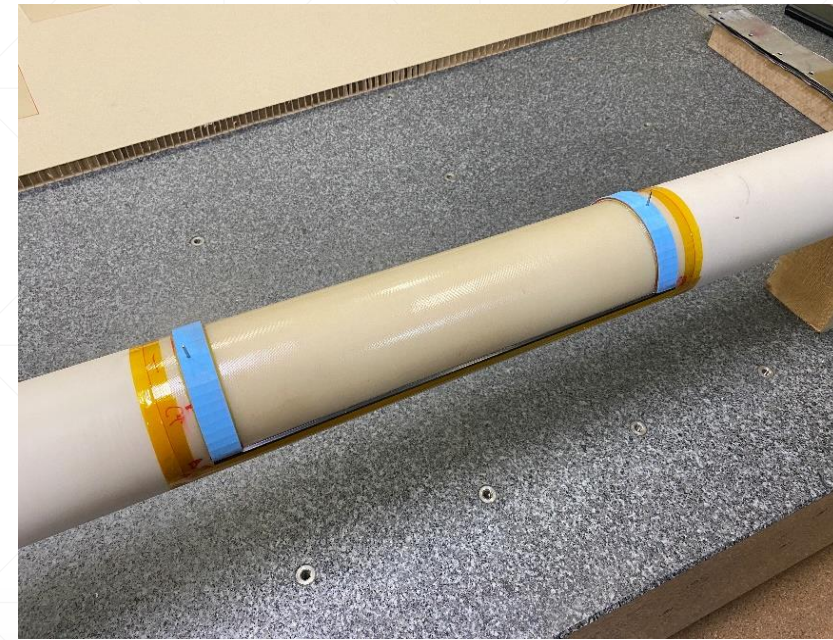
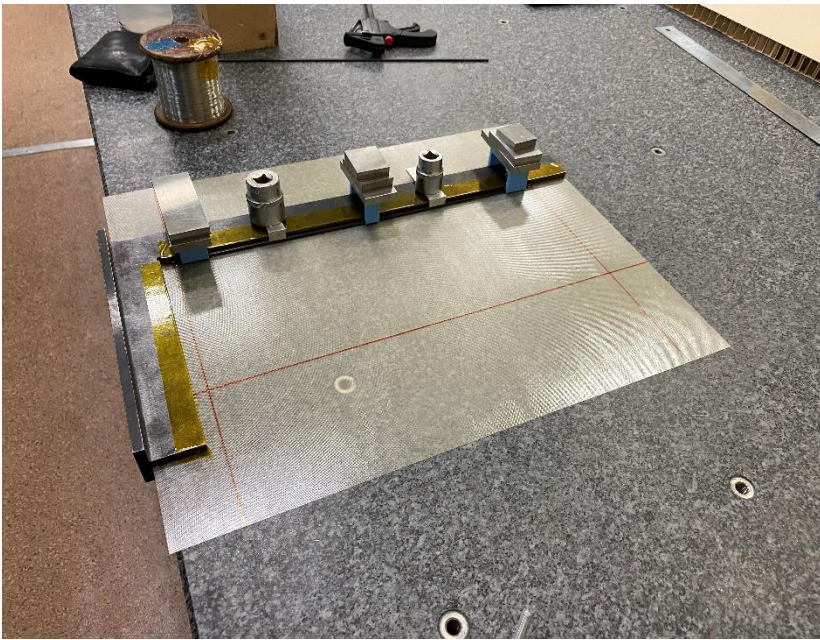
Во многом мы пользуемся опытом наших коллег из Сакле (Франция), которые разработали цилиндрический детектор на основе Micromegas для эксперимента CLAS12.

Разница: у нас радиус кривизны 5 см, а у них 20 см.



Разработка вершинного детектора ММ в рамках CLAS12

Изготовление механического полумеханического ММ



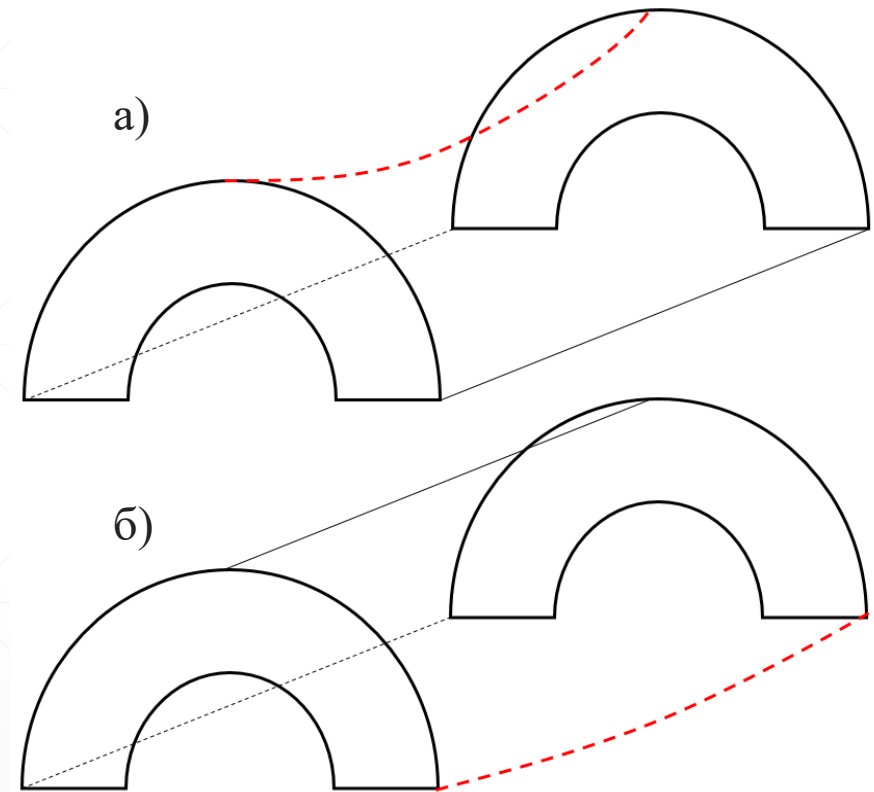
Материал: FR4 (толщина = 300 микрон). Силовой каркас: пластиковые дуги, графитовые стержни
Длина образца - 40 см,
Дрейфовый зазор - 3 мм.
Радиус изгиба - 5 см.
Эпоксидная смола Araldite 2011



Механический прототип ММ



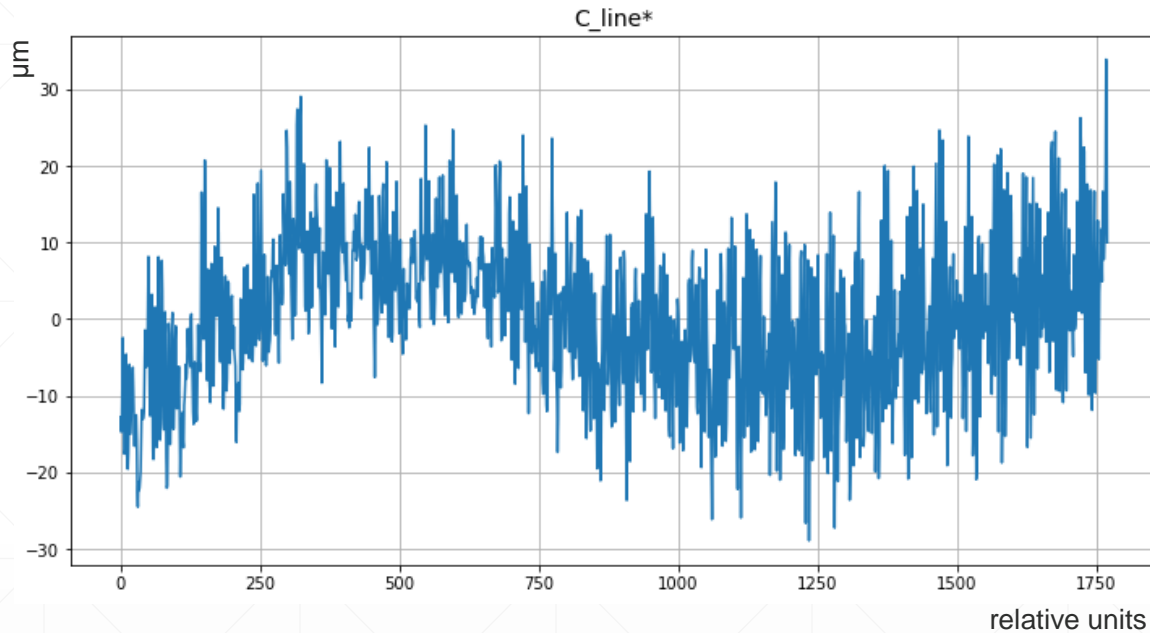
Второй менее жесткий механический прототип.
Материал: Каптон (толщина = 200 микрон)



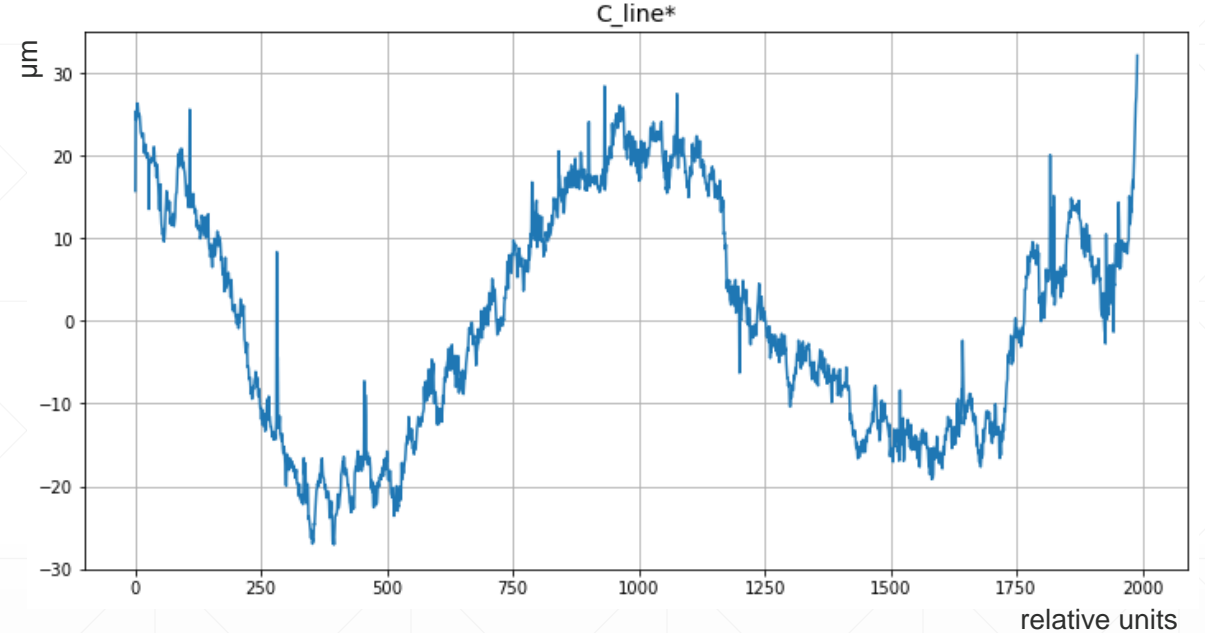
Ожидаемые типы деформации:
а) седловидная б) бочкообразная

Геометрия прототипа. Бочкообразная деформация

Механический прототип из каптона



Измерение геометрии бочкообразной деформации **внутреннего слоя** прототипа с помощью станка с ЧПУ (числовое программное управление).

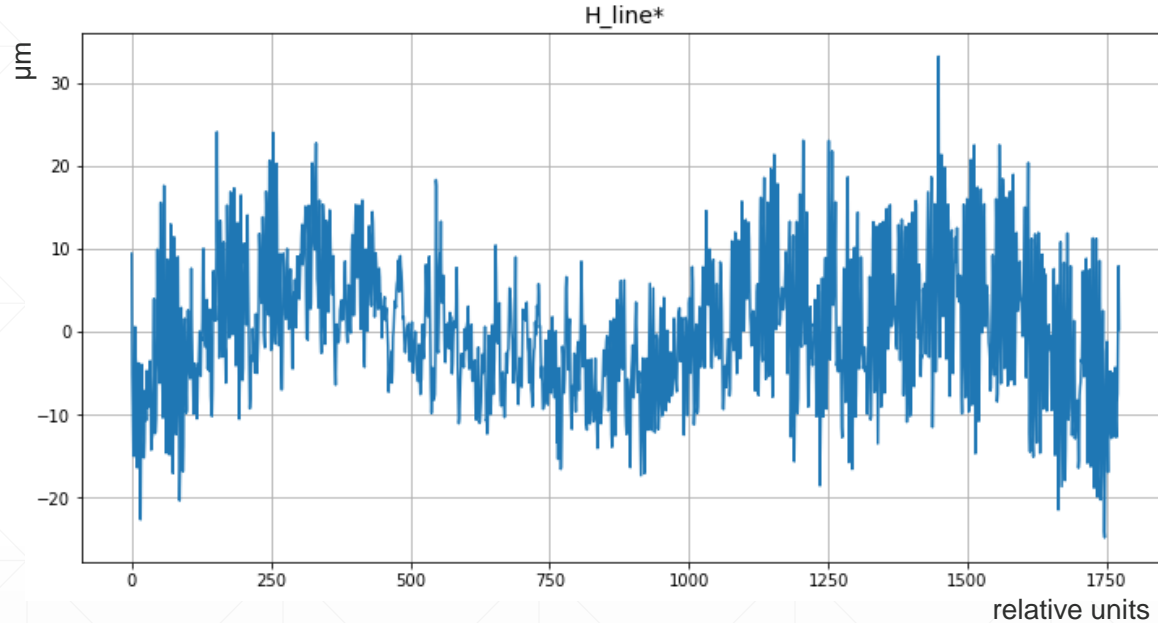


Измерения геометрии деформации ствола **внешнего слоя** прототипа с помощью станка с ЧПУ.

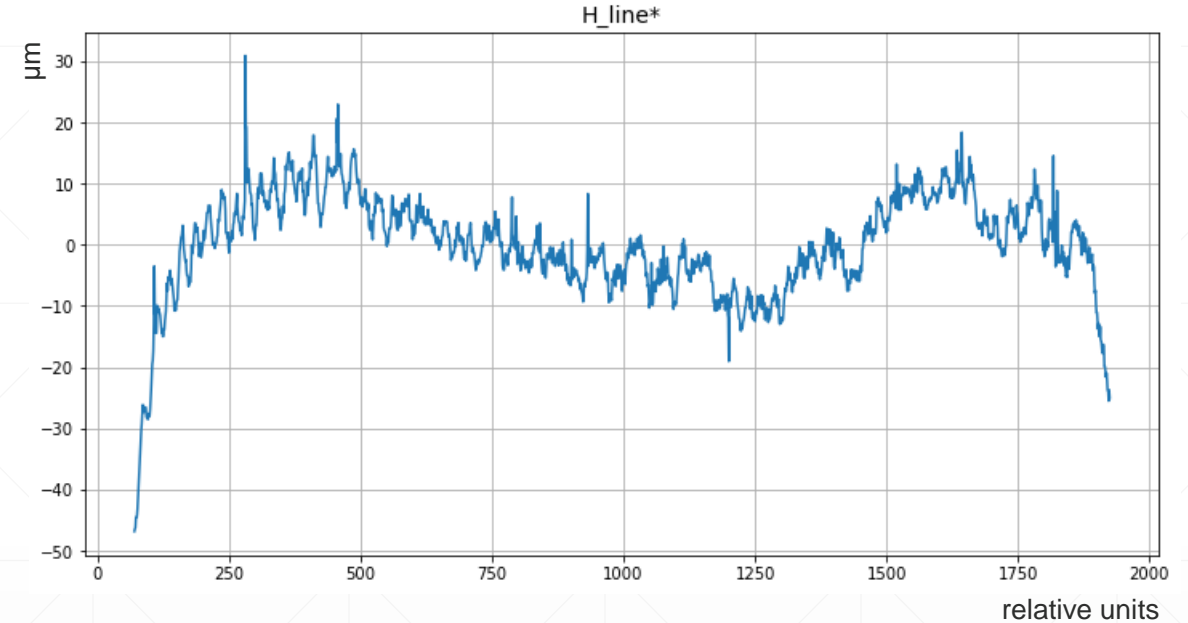
Разброс не превышает 50 микрон

Геометрия прототипа. Седловидная деформация

Механический прототип из каптона



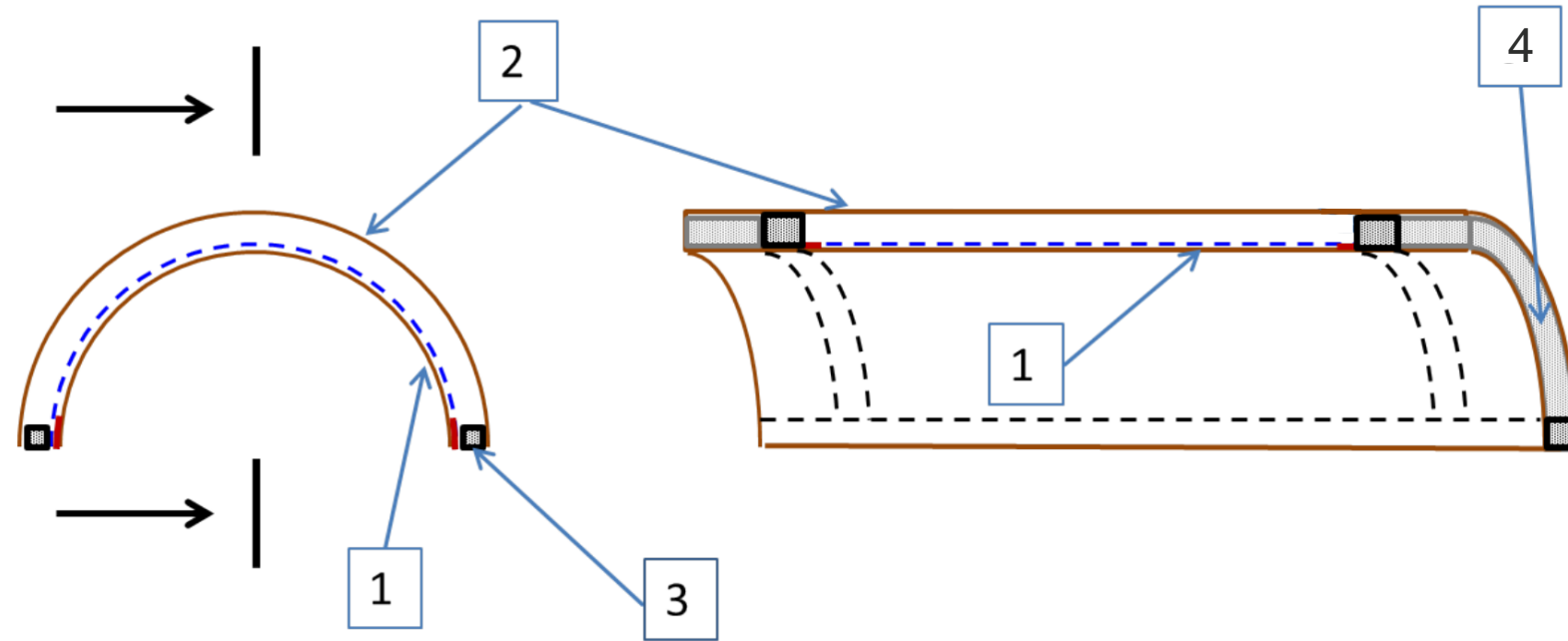
Измерение геометрии седловидной деформации **внутреннего слоя** прототипа с помощью станка с ЧПУ (числовое программное управление).



Измерения геометрии седловидной деформации **внешнего слоя** прототипа

Седловидная деформация плоскости катода не превысила 100 мкм в центральной точке

Упрощенный эскиз рабочего полуцилиндрического прототипа



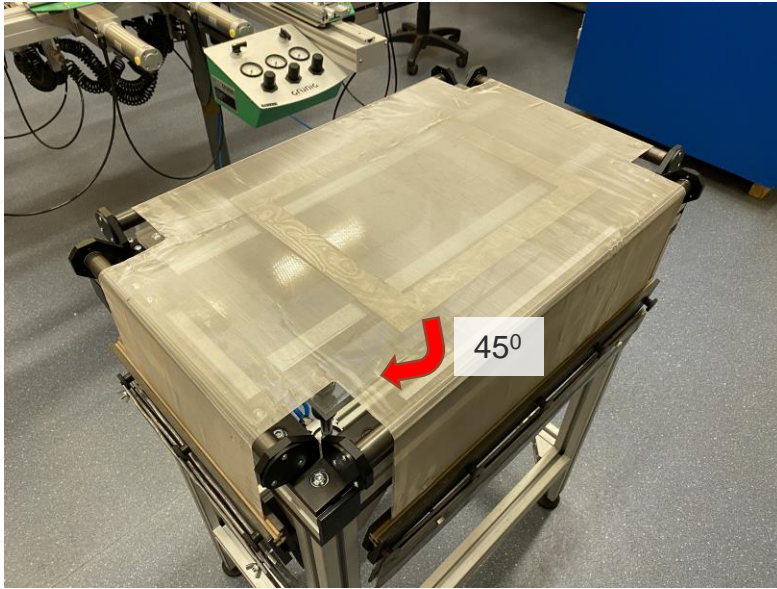
Слева: перпендикулярное сечение. Справа: продольный разрез.

1 - плата считывания с сеткой и усиливающим зазором; 2 - катодная плата; 3 - полоски углеродного волокна; 4 - пластиковые силовые дуги.

Пассивированные участки показаны **красным цветом**.

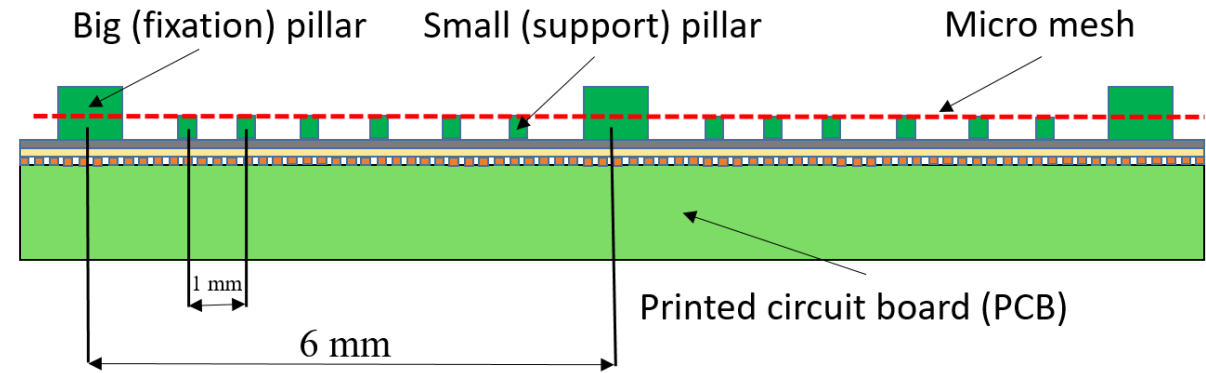
Проблемы при изготовлении цилиндрического прототипа

- При изгибе плоского объемного модуля ММ натяжение сетки значительно увеличивается



- ❖ Изготовлена новая машина натяжения сетки, позволяющая снизить начальное натяжение сетки со стандартного значения $7 \div 10 \text{ N} \cdot \text{cm}^{-1}$ to $1 \text{ N} \cdot \text{cm}^{-1}$.
- ❖ Изменение ориентации нитей сетки относительно рабочей поверхности на 45° позволило распределить нагрузку по всем направлениям нити одинаково, а также снизить натяжение сетки в 1.4 раза

- Натянутая сетка имеет плоскую форму между пилларами, благодаря чему расстояние от сетки до цилиндрической поверхности анода существенно варьируется



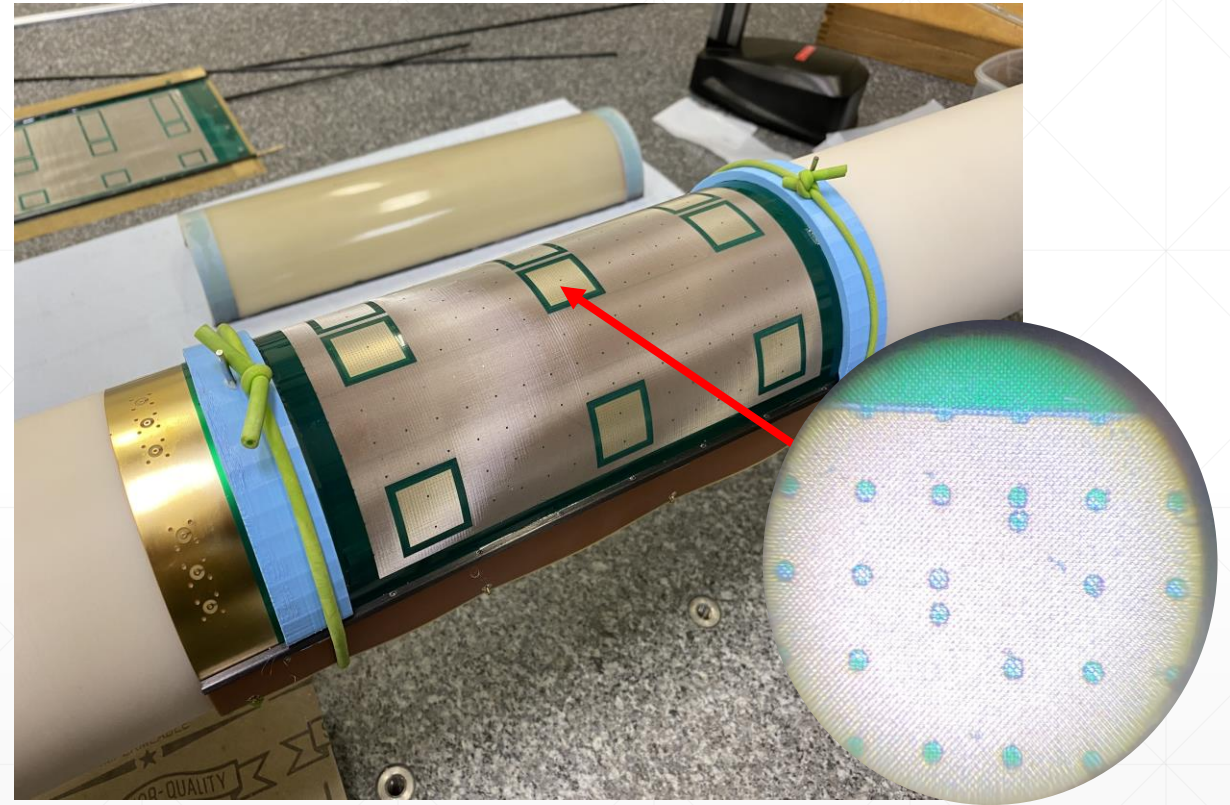
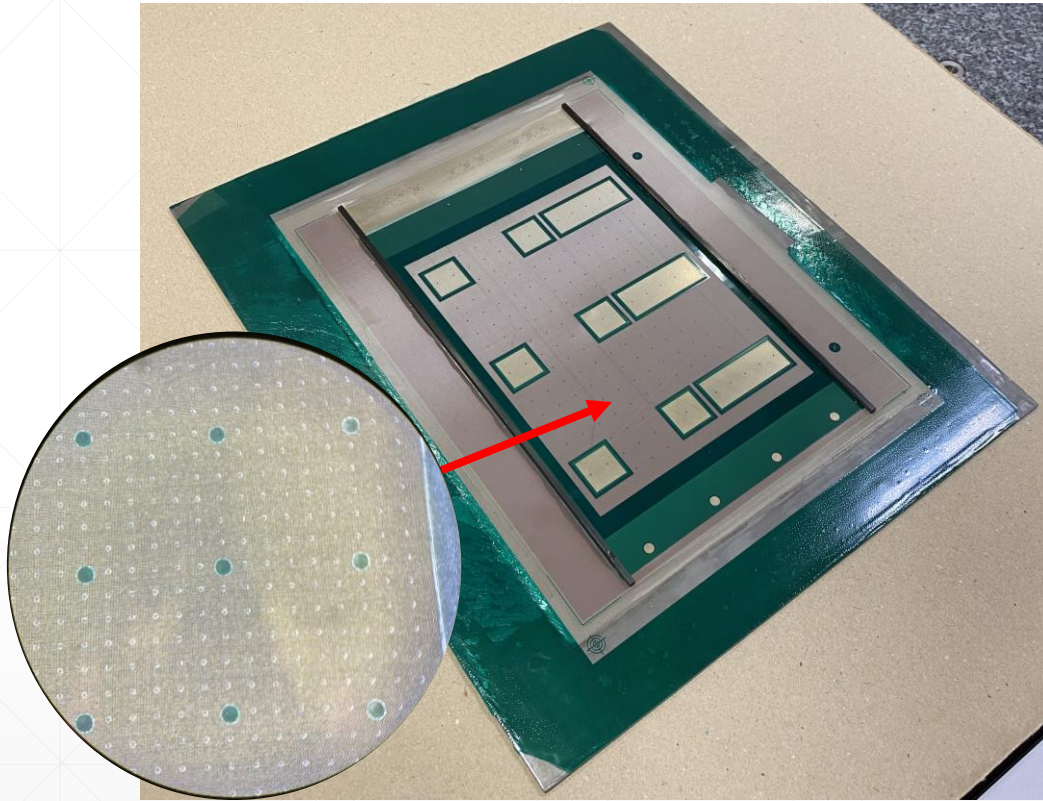
На расстоянии 1 мм располагаются небольшие пиллары диаметром 0,2 мм, которые не фиксируют сетку, а лишь поддерживают ее.

Большие крепежные пиллары толщиной 0,75 мм имеют шаг 6 мм.

Общая площадь, занимаемая пилларами, составляет менее 4%

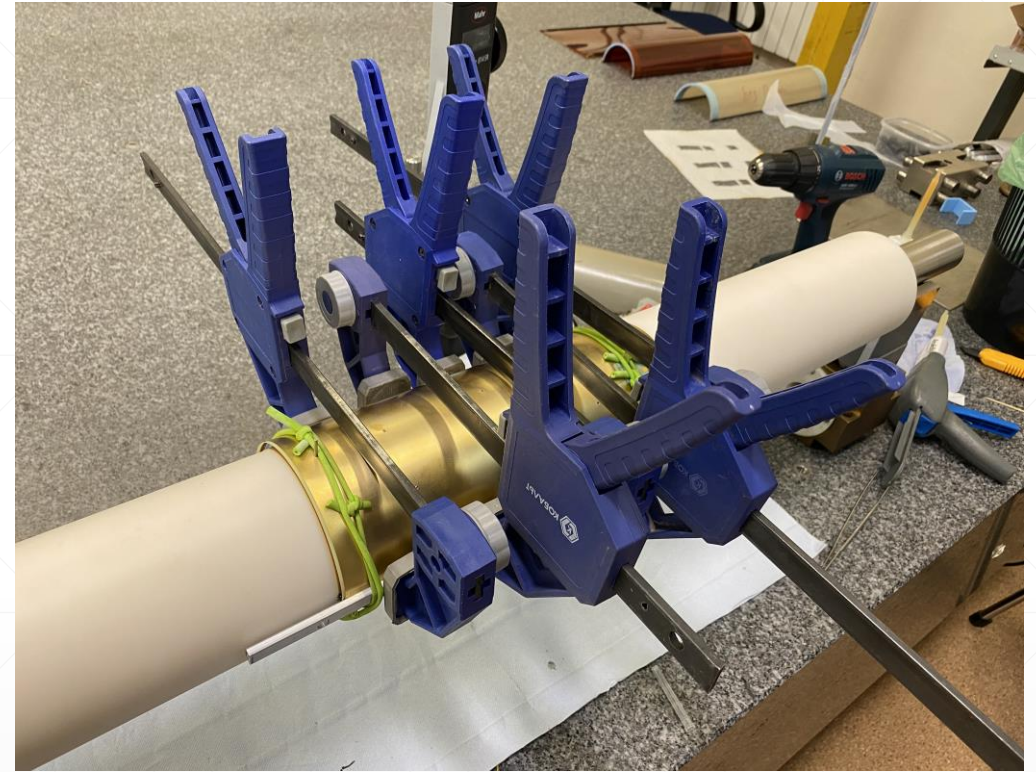
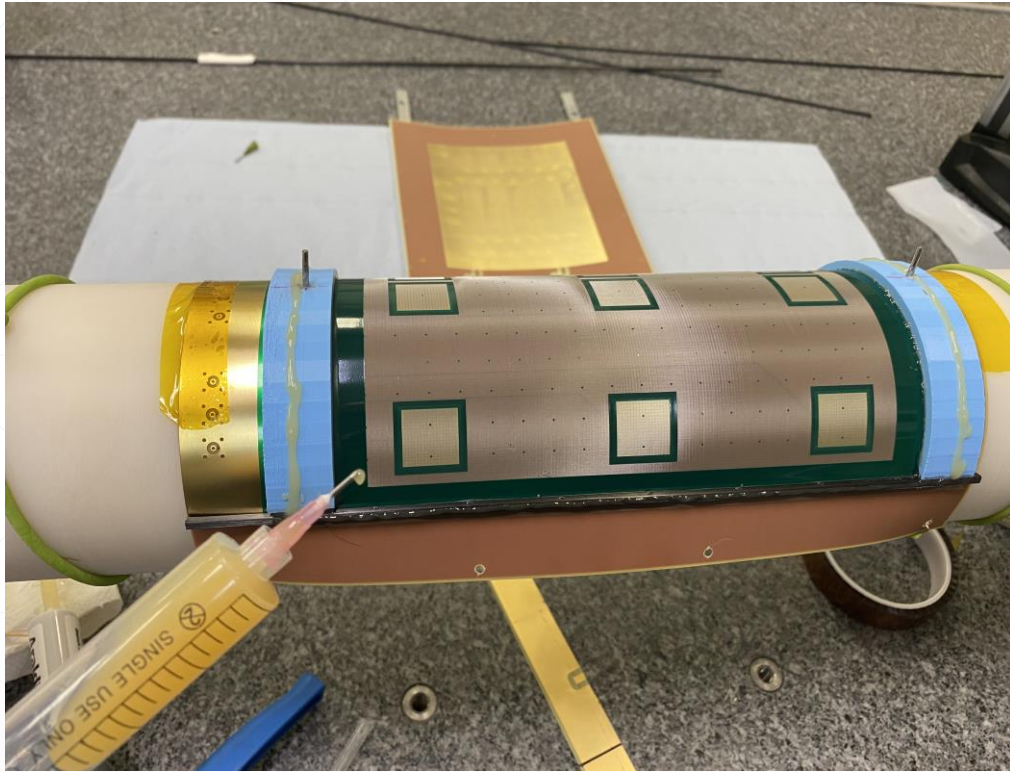
Изготовление полуцилиндрического прототипа

Наиболее важным параметром, который мы хотели контролировать для первого прототипа, является стабильность величины зазора усиления и, следовательно, усиления газа по площади детектора.



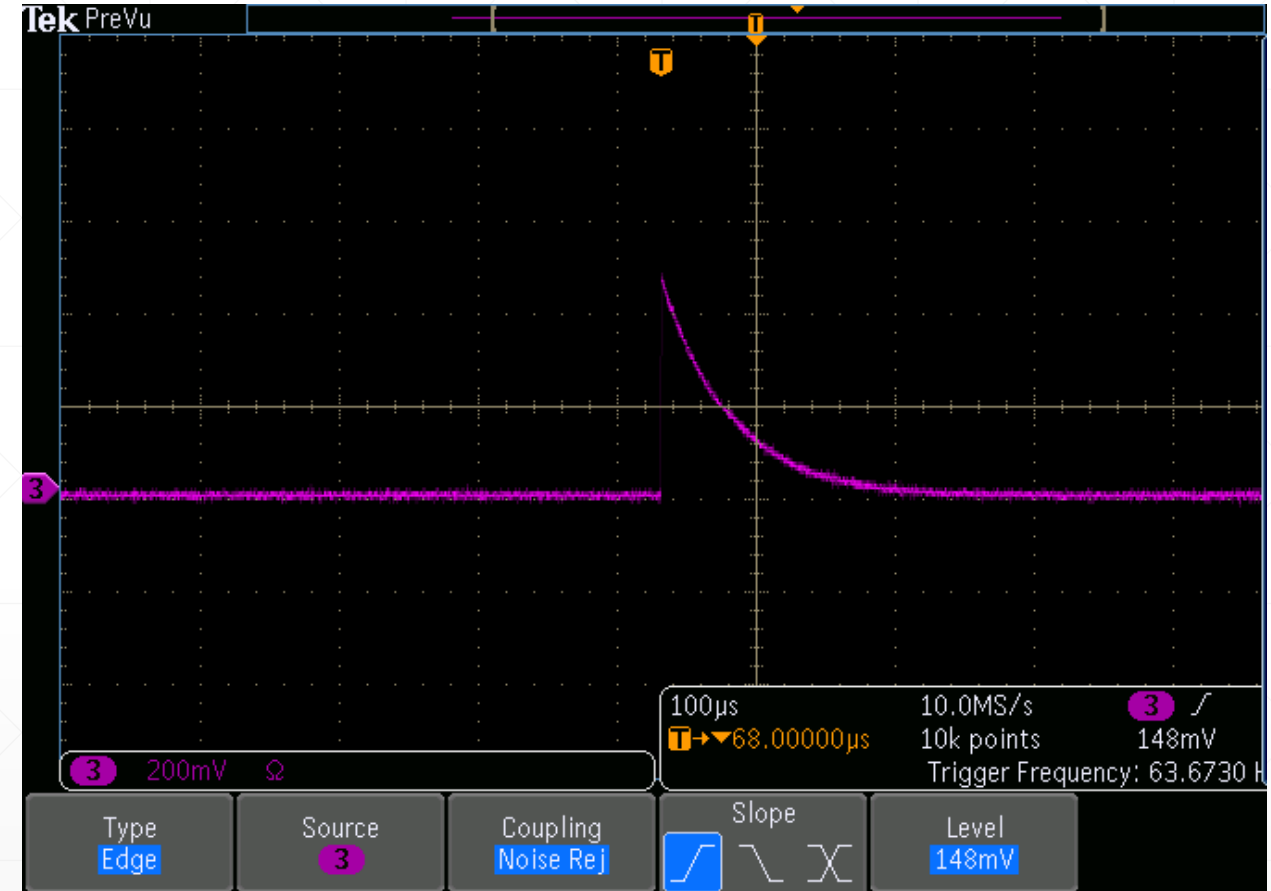
Для удобства сигнальные электроды выполнены в виде окошек размером $1,5 \times 1,5 \text{ см}^2$ и $1,5 \times 4,5 \text{ см}^2$. Для изучения влияния возможных дефектов на характеристики детектора в процессе изготовления на одной площадке (#6) были сдвинуты два пиллара.

Изготовление полуцилиндрического прототипа



Процедура нанесения эпоксидной смолы и склейка катода и силового каркаса

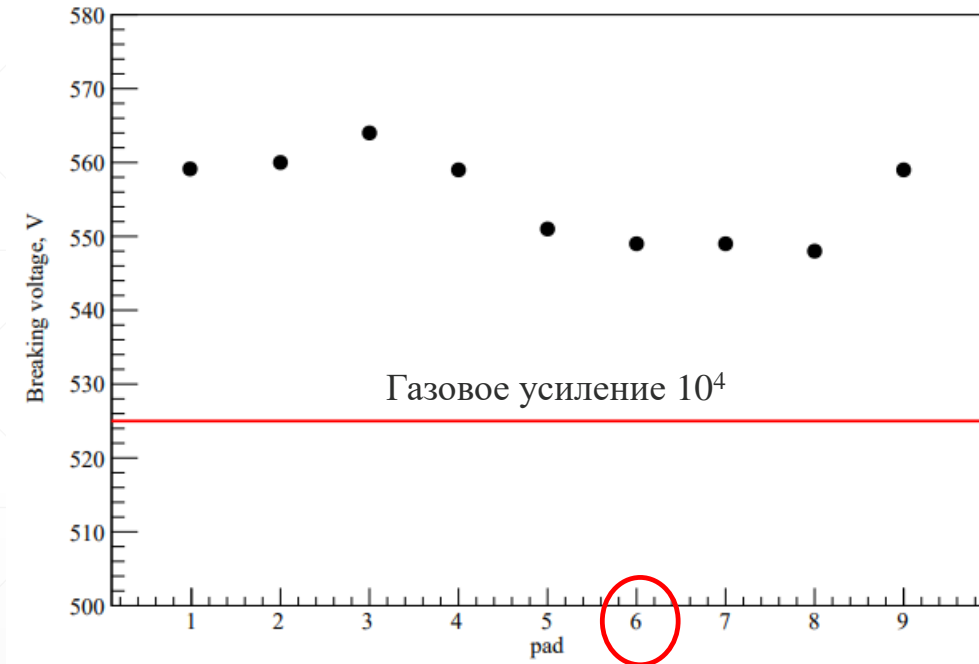
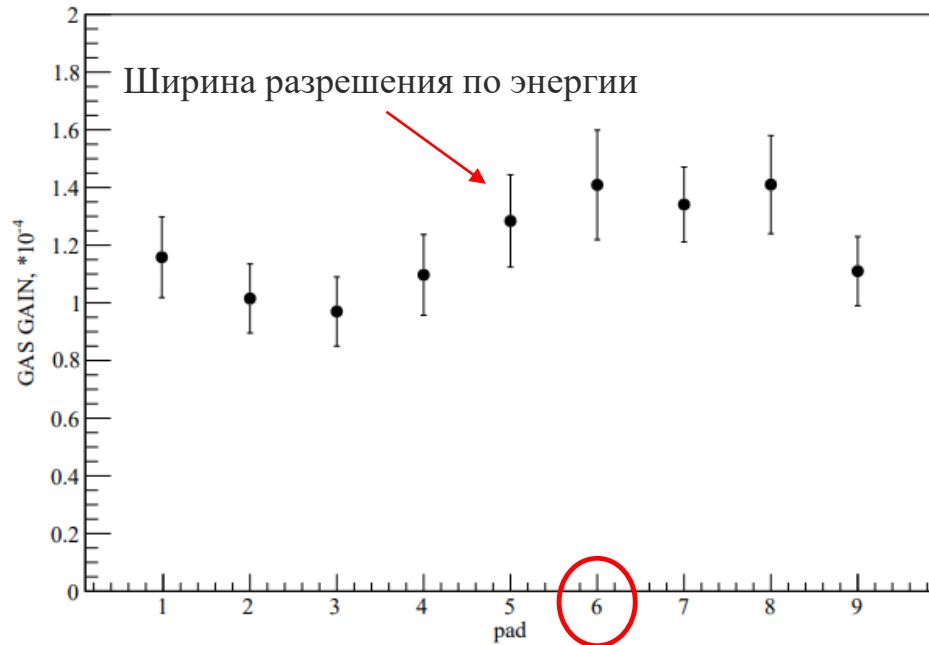
Детектор в сборе и его первое испытание



Сигнал на осциллографе. Амплитуда – 450 mV, Время сигнала – 150 µs

Исследование стабильности усиления газа по площади

Для собранного прототипа было определено напряжение пробоя для всех «окошек», а также измерены коэффициент усиления газа и энергетическое разрешение при одном и том же рабочем напряжении $U_{\text{gain}} = 525 \text{ В}$.



Слева: зависимость коэффициента усиления газа для каждого «окошка» при фиксированном напряжении усиления $U_{\text{gain}} = 525 \text{ В}$, что соответствовало коэффициенту усиления газа 10^4 . Столбики ошибок представляют разрешение по энергии (среднеквадратичное значение), измеренное с помощью источника Fe_{55} .

Справа: напряжение пробоя, измеренное отдельно для всех «окошек». Красная линия представляет рабочее напряжение для коэффициента усиления газа около 10^4 . Для всех мы имеем запас по напряжению в 25В.

Заключение

За 2 года развития проекта МСТ/SPD:

- Отработаны основные этапы технологии производства Micromegas детекторов.
- Изготовлен и протестирован первый цилиндрический прототип МСТ.
- ❖ Следующий шаг – изготовление и тестирование рабочего прототипа со стрипами и резистивным покрытием.

Спасибо за внимание!



Ляшко Игорь Витальевич

Младший научный сотрудник ЛЯП НЭОВП, сектор №3.



Публикации:

- 1) I. Lyashko et al. «Technical Design Report of the Spin Physics Detector at NICA», «Natural Science Review» т.1, №1, 2024.
- 2) A. Gongadze, D. Dedovich, N. Koviagina, I. Liashko «Micromegas-based Central Tracker for the SPD experiment», принята к публикации в «Письма в ЭЧАЯ», т. 22, №1, 2025.

Личный вклад:

- Проработка технологии производства Micromegas детекторов.
 - Изготовление двух механических полуцилиндрических прототипов и тестирование их геометрии.
 - Разработка и изготовление рабочего прототипа полуцилиндрического трекера и его тестирование.
-