

**Разработка и изготовление трековых модулей
на основе кремниевых двухсторонних
микростриповых детекторов**



Шереметьев Алексей Дмитриевич

Специальность 1.3.2

Научный руководитель:
к.ф.-м.н. Мурин Юрий Андреевич

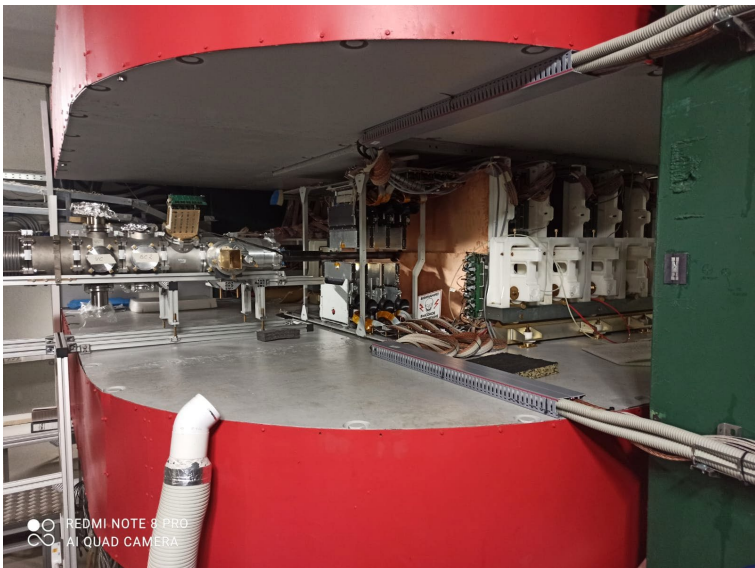
Работа выполнена в Лаборатории физики высоких энергий им. В. И. Векслера и А. М. Балдина
Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна

В экспериментах по релятивистской ядерной физике, включающих взаимодействия тяжелых ионов, требуется гораздо больше детекторных элементов по сравнению с ядерными измерениями, из-за гораздо большего числа одновременно производимых вторичных частиц.

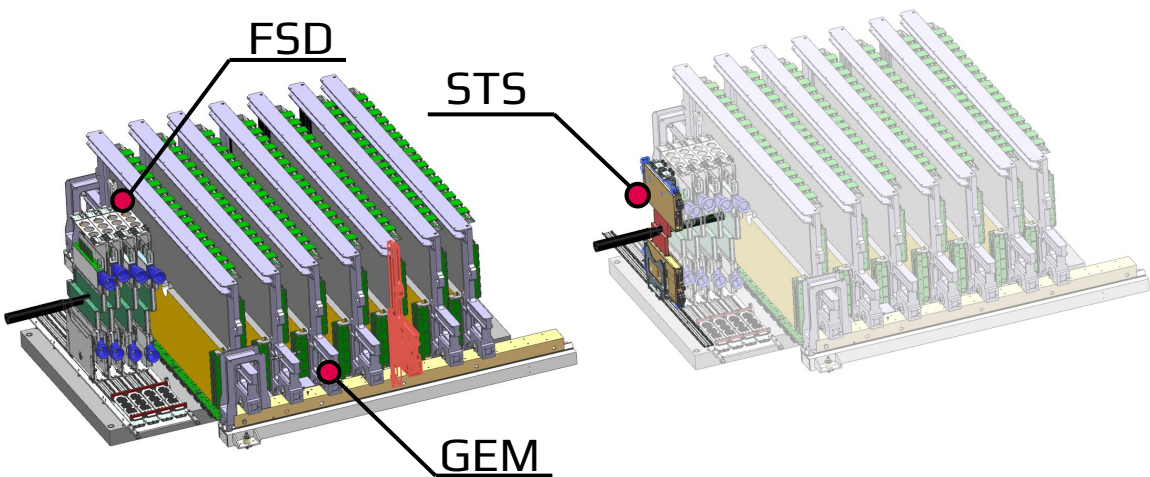
При энергиях $\sqrt{s_{nn}} = 2,5 - 3,5$ ГэВ/нуклон ожидается, что столкновения $Vi + Vi$ дадут от 300 до 600 частиц на взаимодействие.



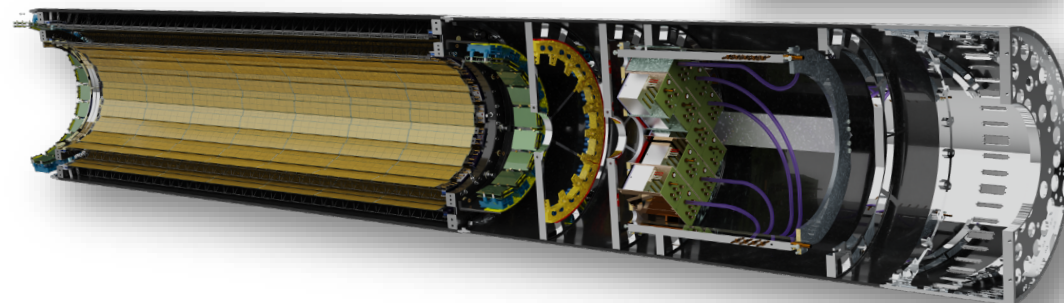
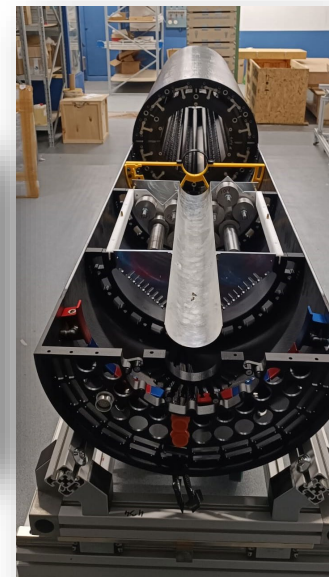
Установка VM@N
Фиксированная мишень



REDMI NOTE 6 PRO
AI QUAD CAMERA

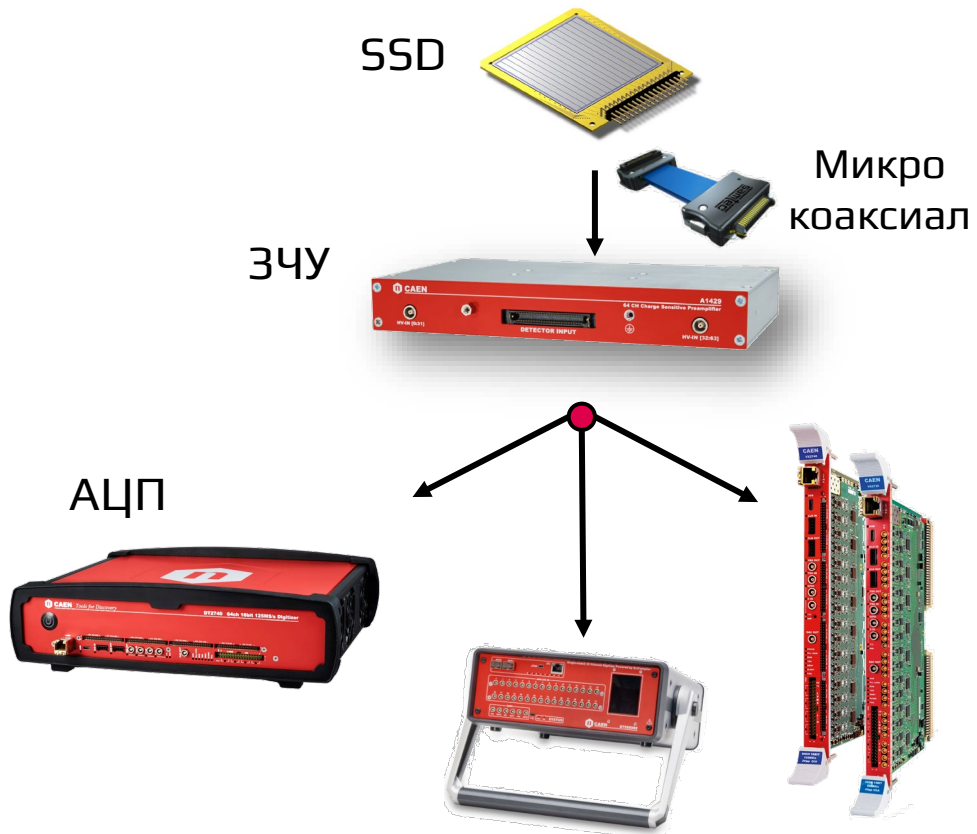


Установка MPD ITS
Эксперимент на встречных пучках



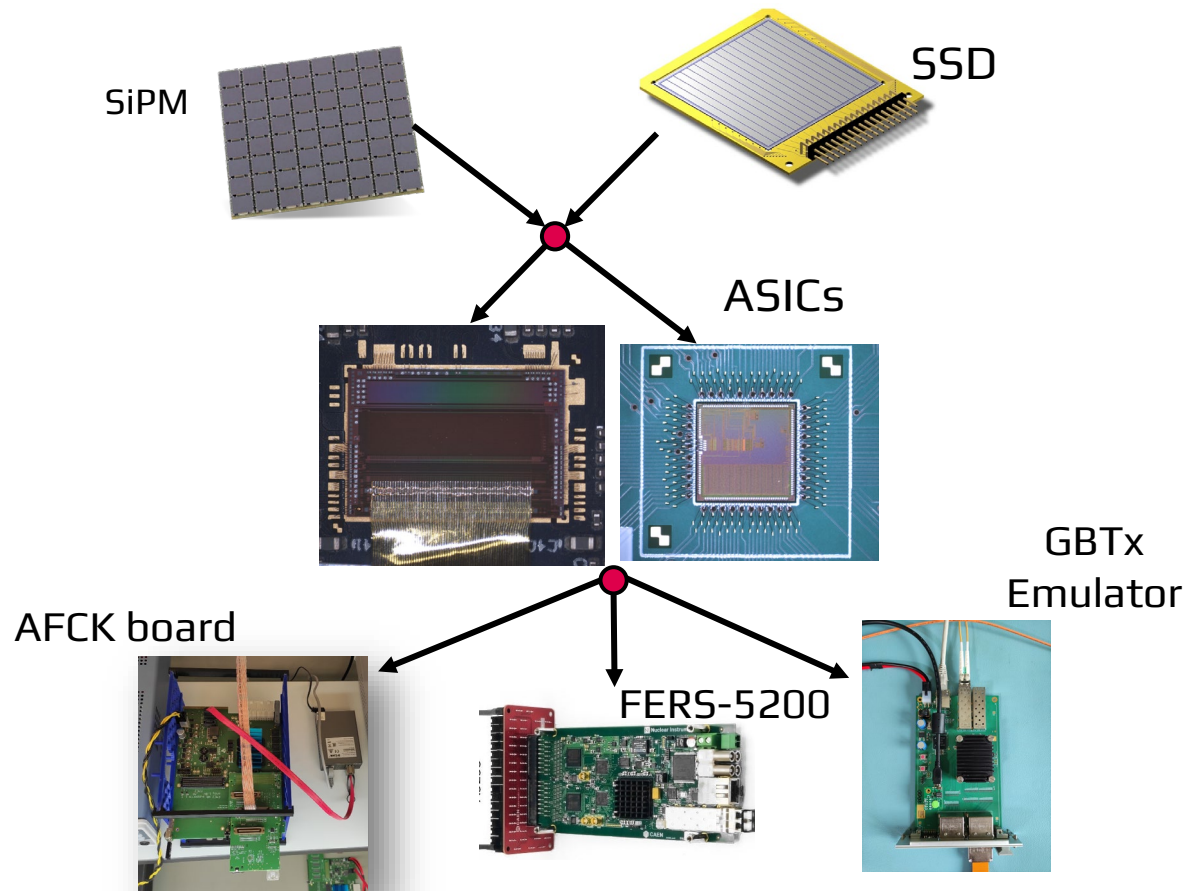
Коммерческий метод

Лимит каналов считывания



Микроэлектронный метод

Лимит каналов зависит от системы



Не существует готовой коммерческой технологии считывающих блоков, которая могла бы стать жизнеспособным решением для огромного количества требуемых каналов!

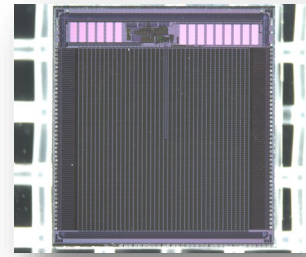
Целью диссертационной работы является разработка и экспериментальное исследование конструктивно-технологических решений изготовления трековых модулей на основе микрополосковых кремниевых детекторов для внутренних кремниевых трековых систем на ускорительном комплексе NICA.

Для достижения поставленной цели требовалось решить следующие основные задачи:

- **Предложить метод** изготовления и **отладить технологию** для производства трековых модулей СВМ/ВМН.
- **Изготовить предсерийную партию** кремниевых трековых модулей.
- **Исследовать рабочие характеристики** кремниевых трековых модулей и **оптимизировать технологический процесс** их изготовления.
- **Создать исследовательскую инфраструктуру**, позволяющую детально изучить характеристики разрабатываемых трековых детекторов.
- **Выполнить апробацию качества** изготовленных предсерийных **кремниевых трековых модулей** в испытаниях на лабораторных стендах и на пучке протонов 1 ГэВ.

Конструкция кремниевого трекового модуля СВМ/ВМН

Линейный регулятор
напряжения



Характеристики КТМ:

Чувствительная область: 60×60 мм²;

Количество каналов считывания: 2048 шт.

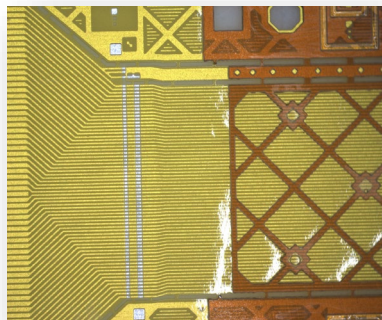
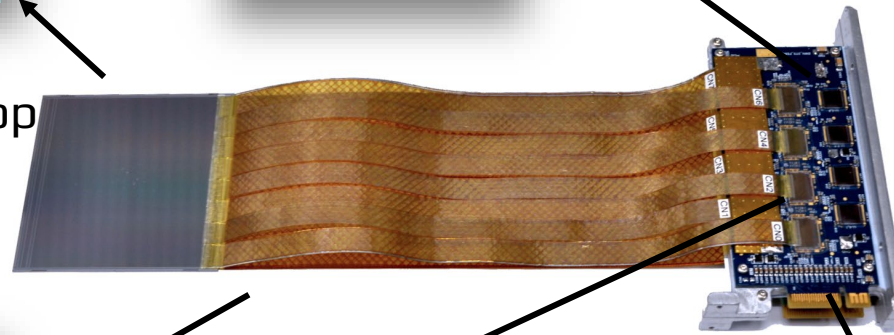


Микрополосковый
кремниевый детектор

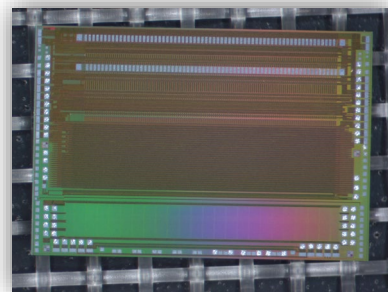
Количество сваренных контактов:

Проволокой 25 мкм: 2476 соединений;

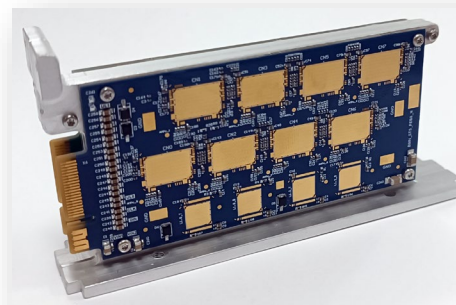
Линейная сварка 10 мкм: 2096 соединений.



Гибкие сверхлегкие
алюминиевые
микрокабели



Микросхемы STS-
XUTER

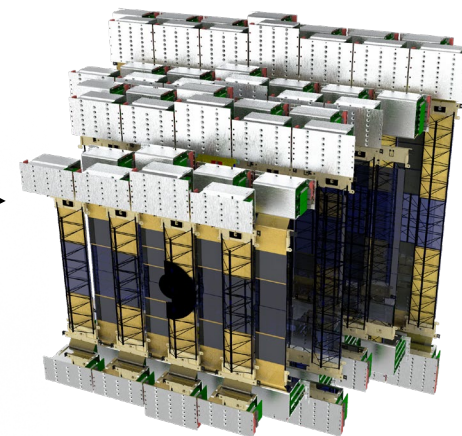


Плата FEB



STS Ladder

STS Station



Характеристики детектора:

Размеры детектора: 62×62 мм²;

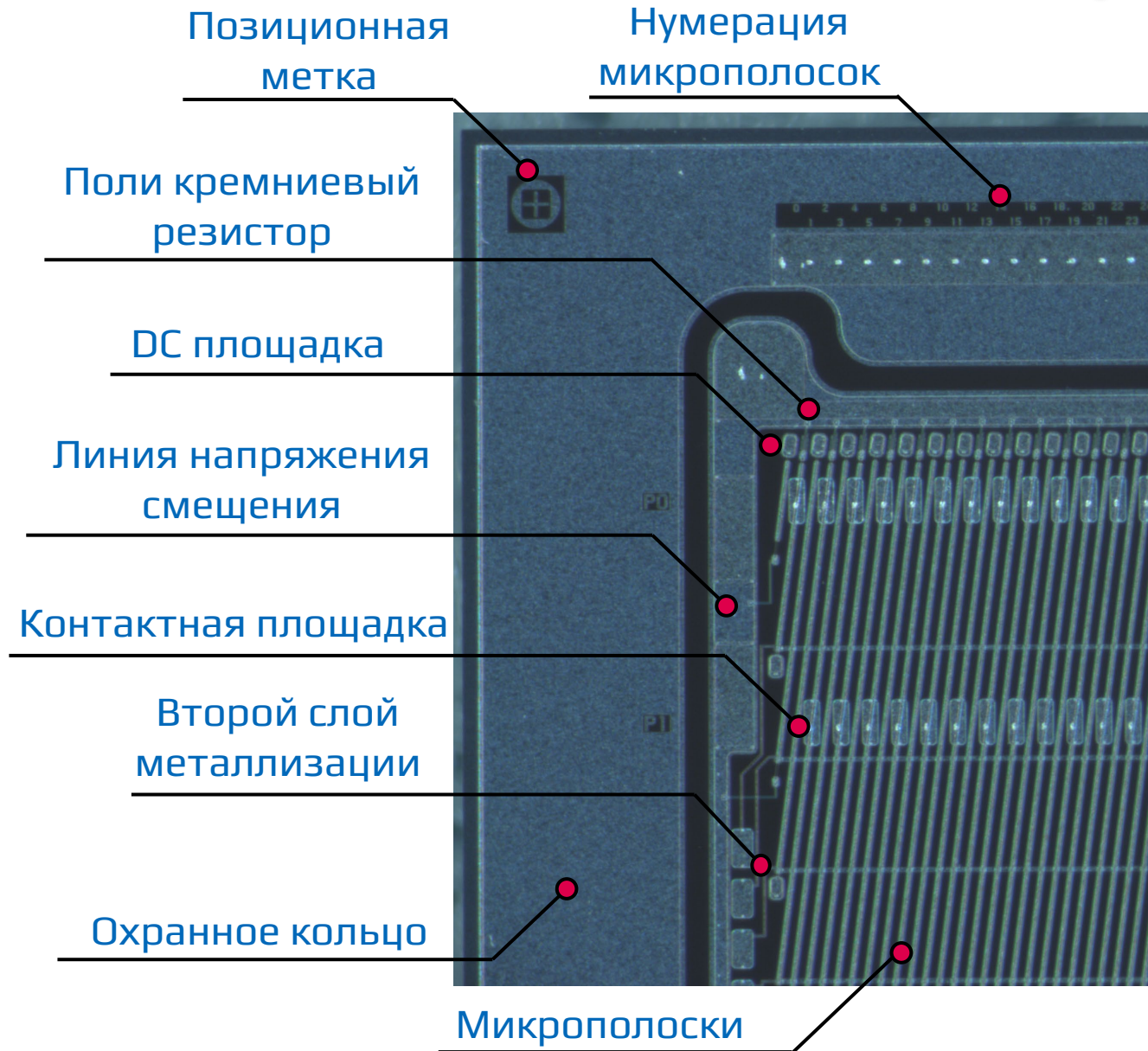
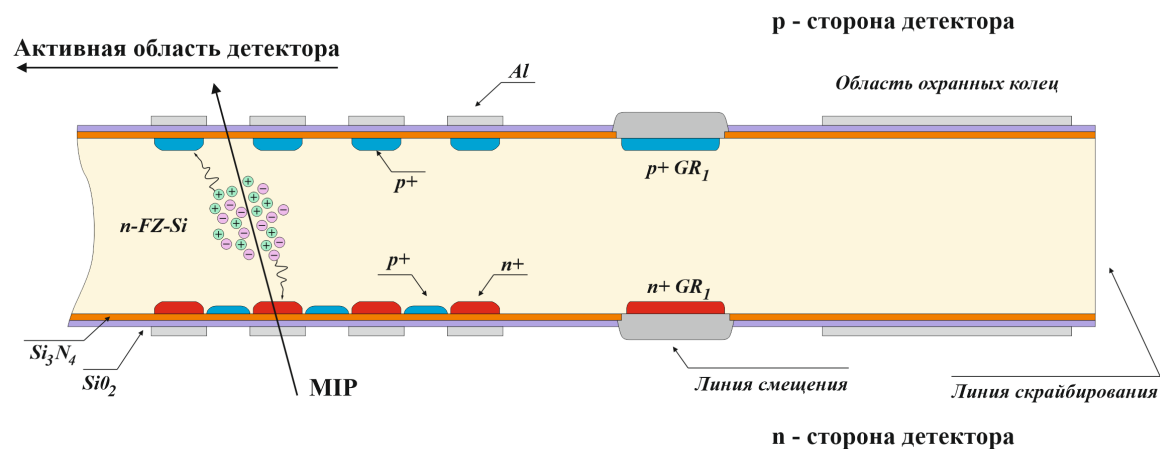
Толщина детектора: 285 мкм ±15 мкм;

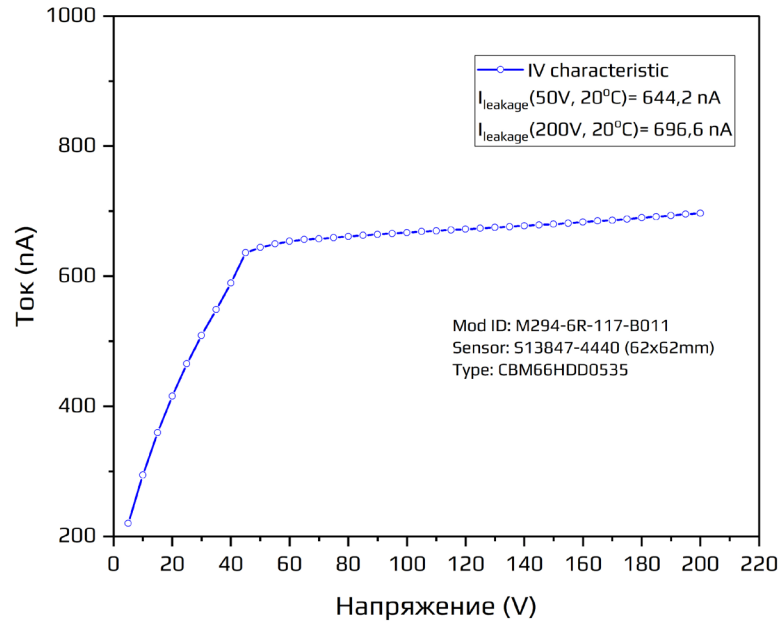
Количество каналов: 2048;

Шаг микрополосок: 58 мкм

Сtereo угол: $\theta^n = 0^\circ$, $\theta^p = 7.5^\circ$;

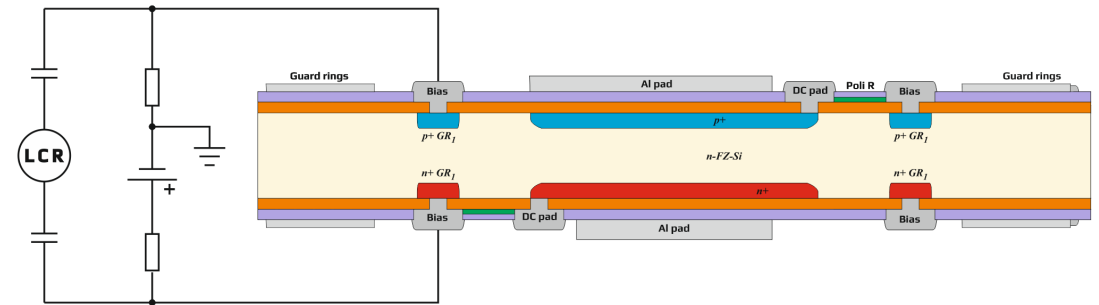
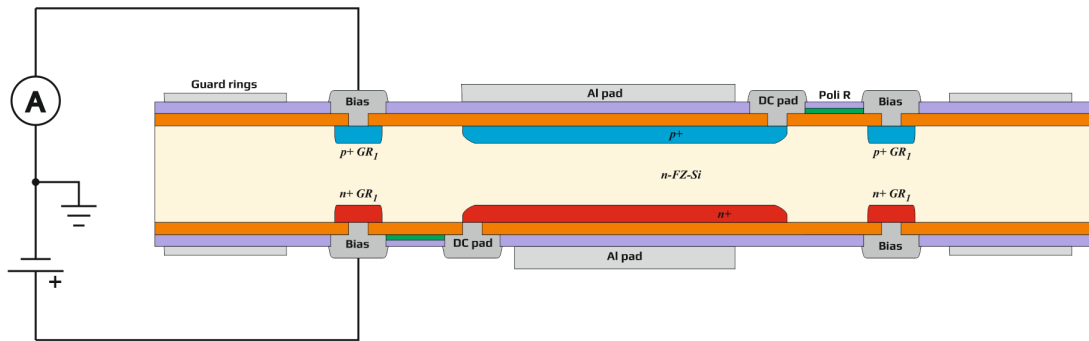
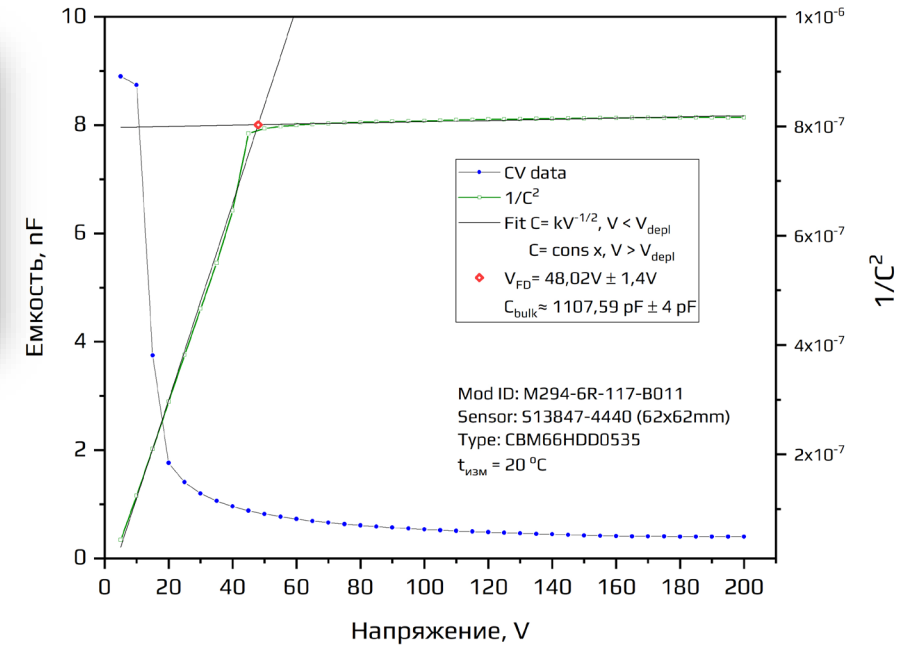
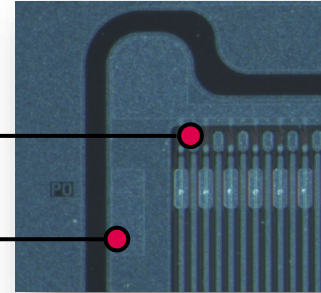
Удельное сопротивление: 2 - 6 кОм × см.



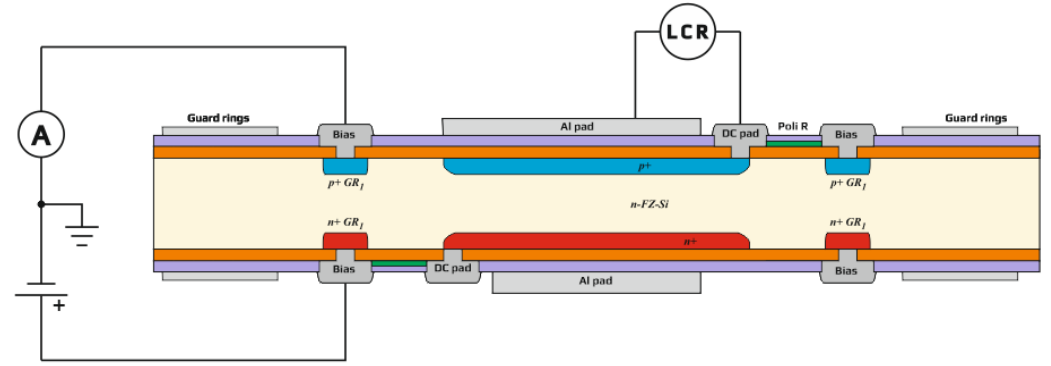
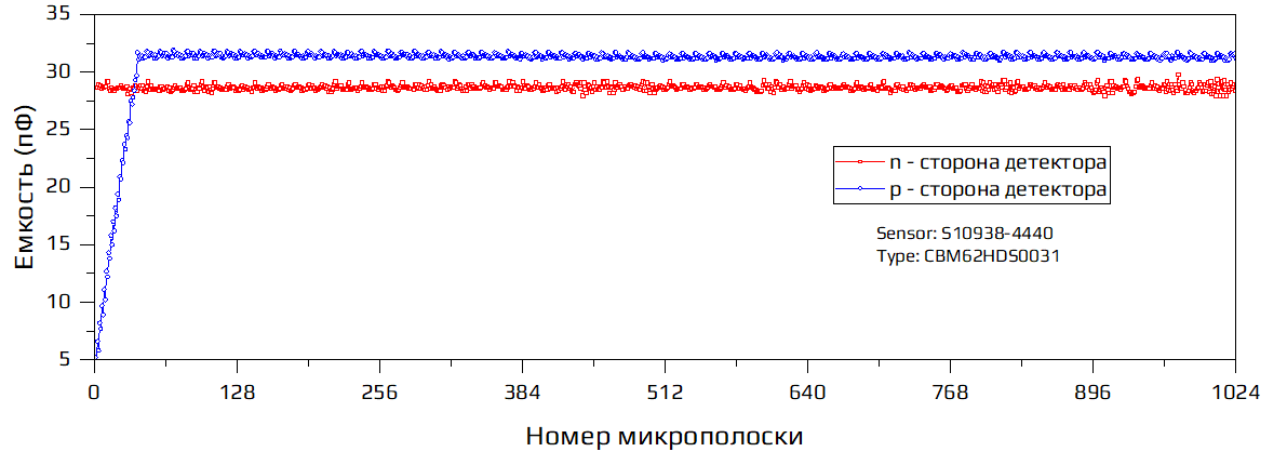


DC площадка

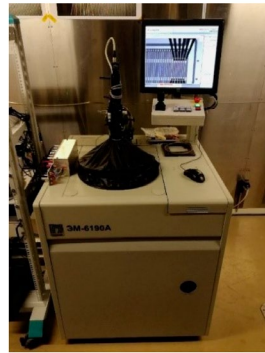
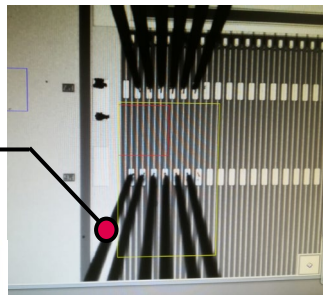
Bias линия



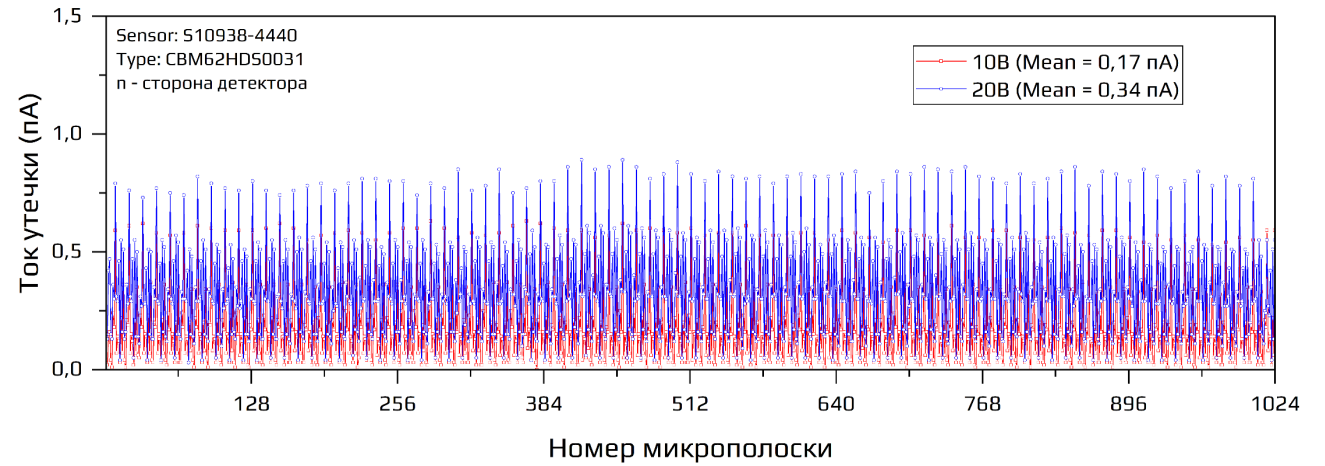
A.I Sheremeteva, E. Strletskaaya, M. Korolev, I. Martinovsky, M. Merkin, Yu. Murin, N. Zamiatin
 «Progress in STS Sensor Characterization at JINR» CBM Progress Report 2017



12 зондовых контактов



Зондовая установка
Планар EM-6190A



Характеристики микросхемы STS-XYTER:

Возможность работы в бестриггерной моде;

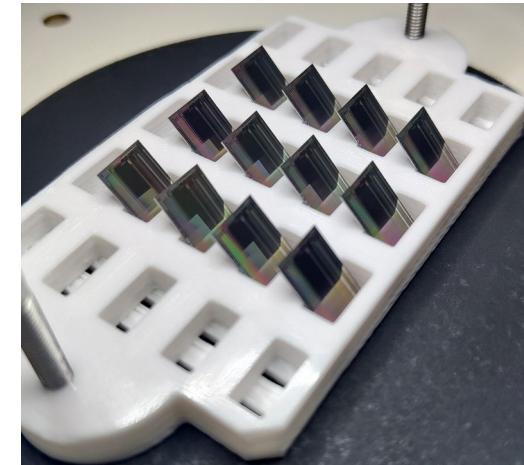
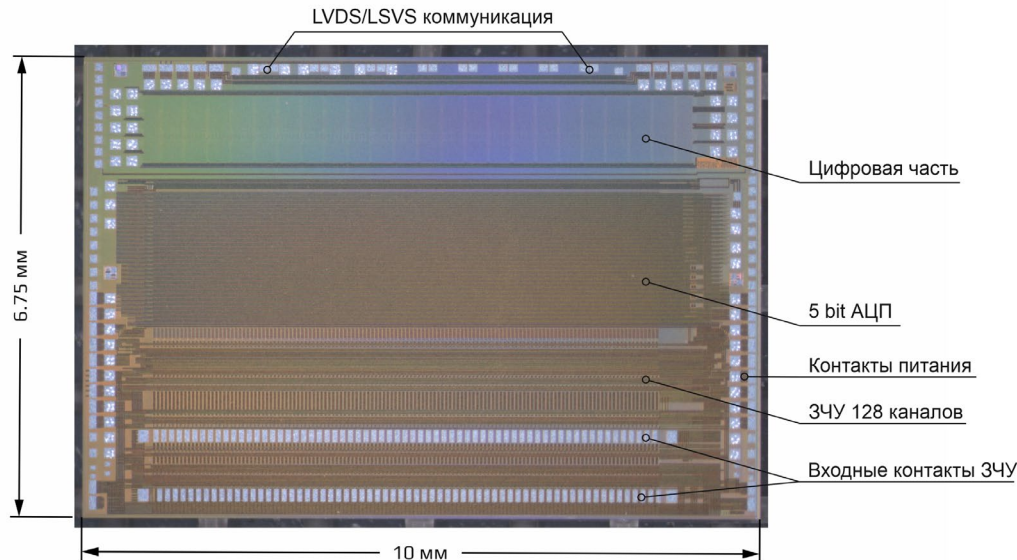
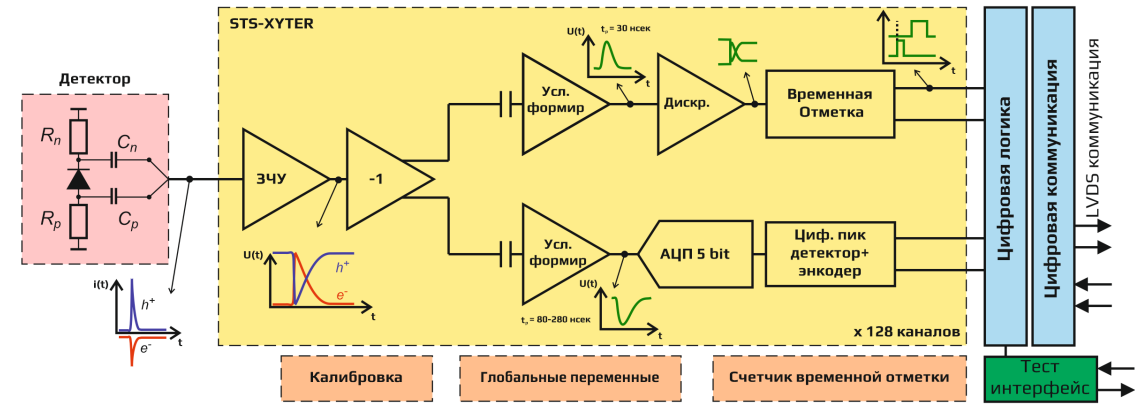
Размеры микросхемы: 10× 6,75 мм;

Количество каналов: 128 + 2 тест;

Измерение амплитуды: ЗЧУ + Мед. форм. + 5 бит АЦП;

Измерение временной отметки: ЗЧУ + Быс. форм. + Дискрим. + 14 бит АЦП;

Шаг входных каналов: 116 мкм (Два ряда контактов).



Характеристики микросхемы LDO:

Размеры микросхемы: 5,6× 5,8 мм;

Входное напряжение: 2,4 - 3,3 В;

Линейное выходное напряжение: 1,8 (1,2) В ± 3%;

Максимальный ток: 1,6 А;

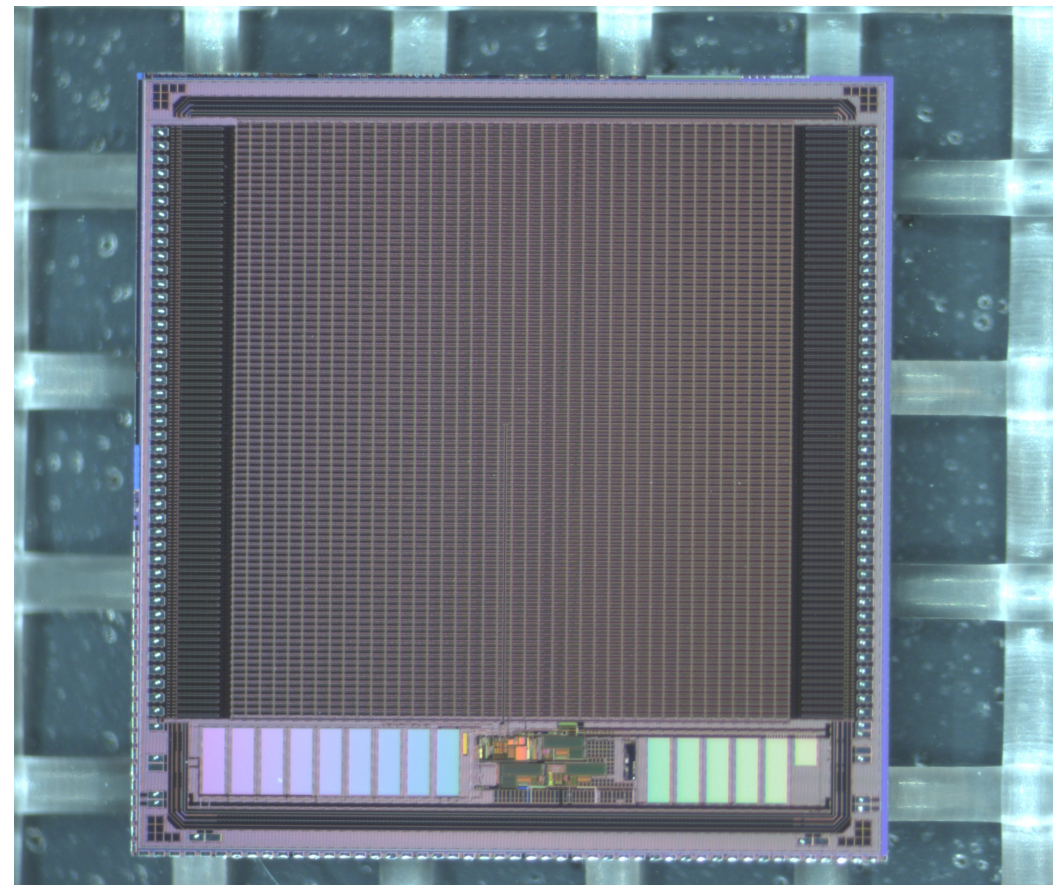
Макс. перегрузка по току (более 1 сек): 3 А;

Температурная перегрузка: 120 °С;

Размер контактной площадки: 118 × 58 мкм;

Температурный дрейф: 100 мВ/В (-20 +50 °С);

Количество каналов: 43.



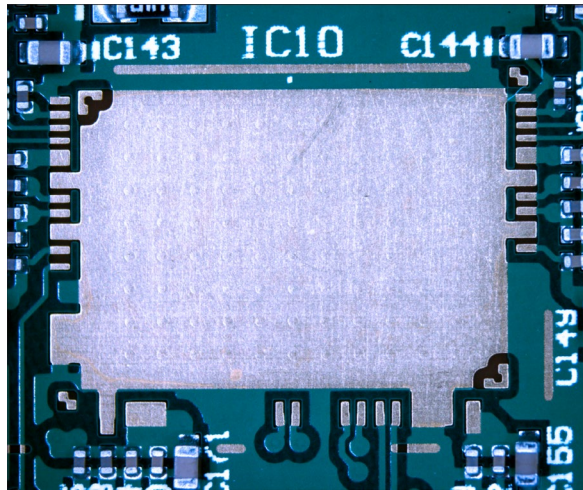
Характеристики платы FEB и теплового моста:

Размеры платы: 40× 86 мм;

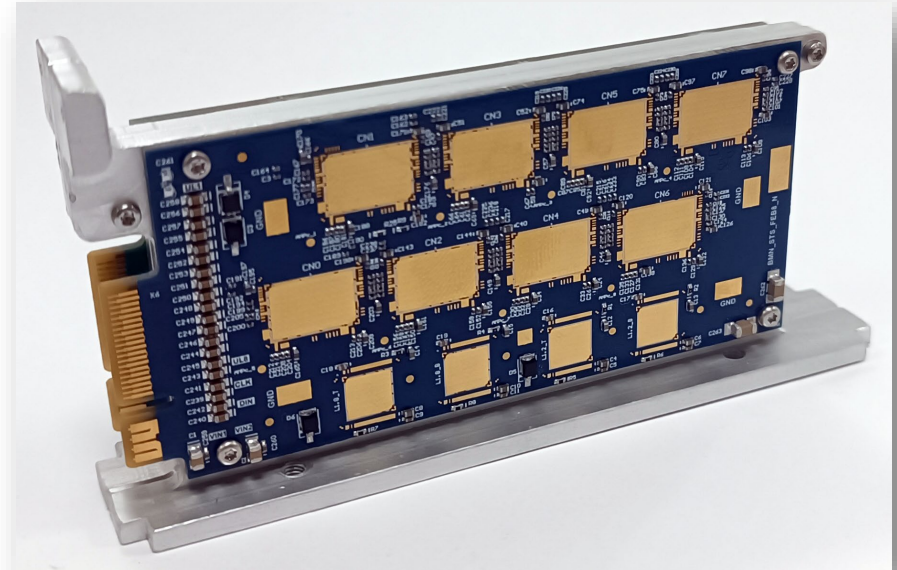
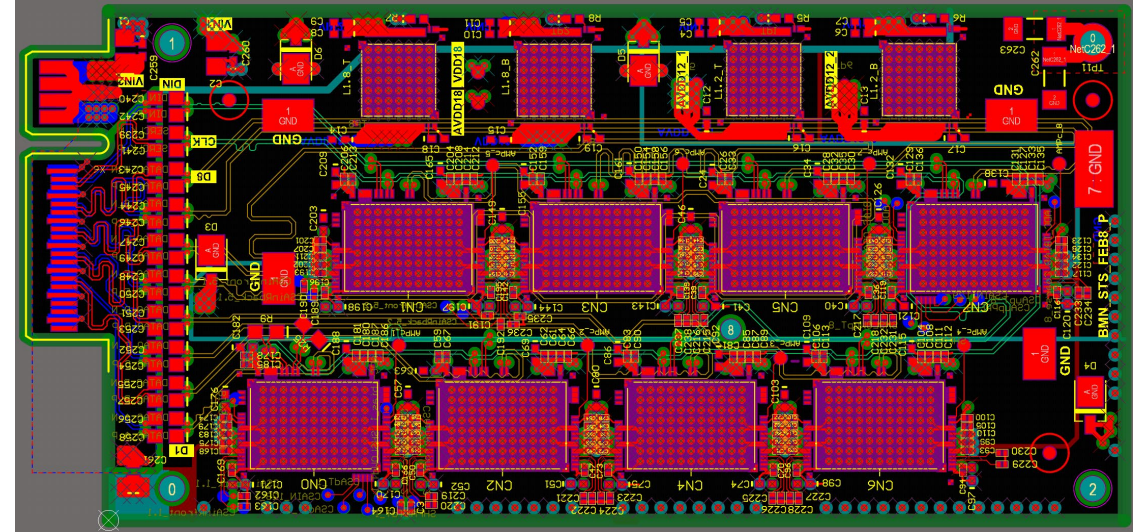
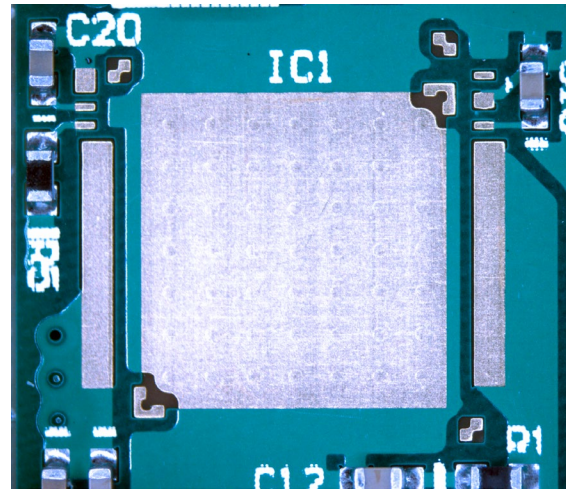
Количество слоев: 8 шт.;

Материал теп. моста: алюминий АД1 (210 Вт/(м×К)).

Место установки
микросхемы STS-XYTER



Место установки
микросхемы LDO



Характеристики микрокабеля:

Материал кабеля: FDI-A20;

Длина кабеля: 110 – 450 мм;

Кол-во сигнальных полосок: 64 шт.;

Шаг контактов: 116 мкм;

Толщина: 24 мкм (Al-10мкм + PI 14 мкм);

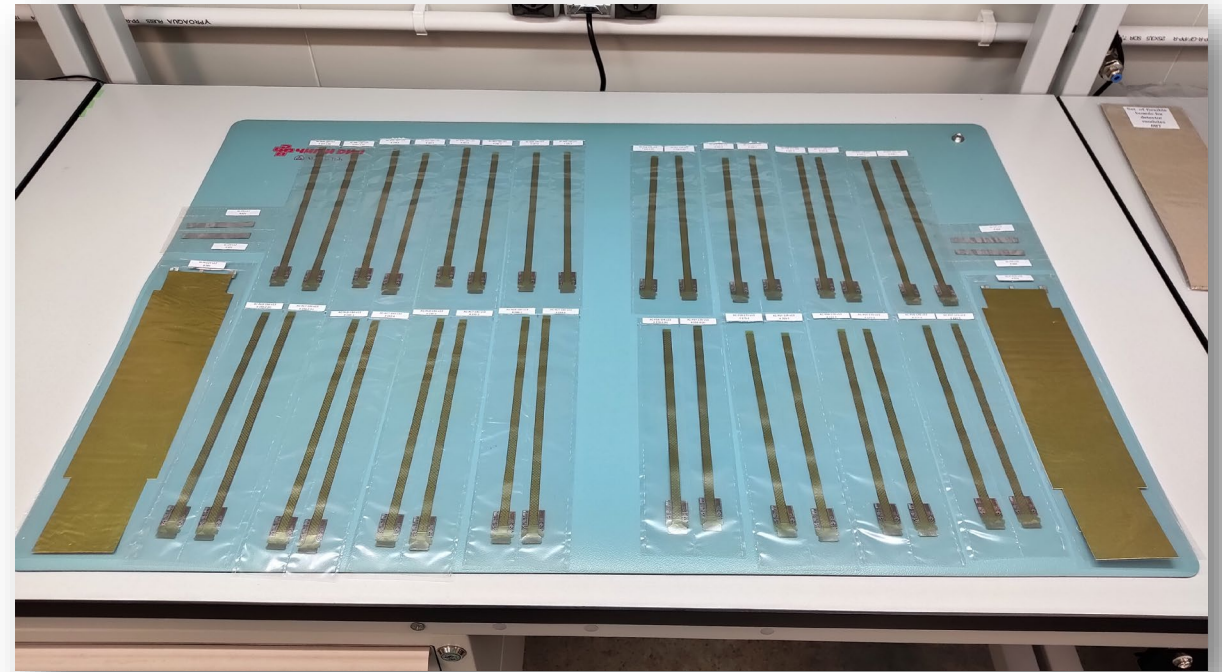
Экранирующий слой: PI 75 мкм 30% заполнения;

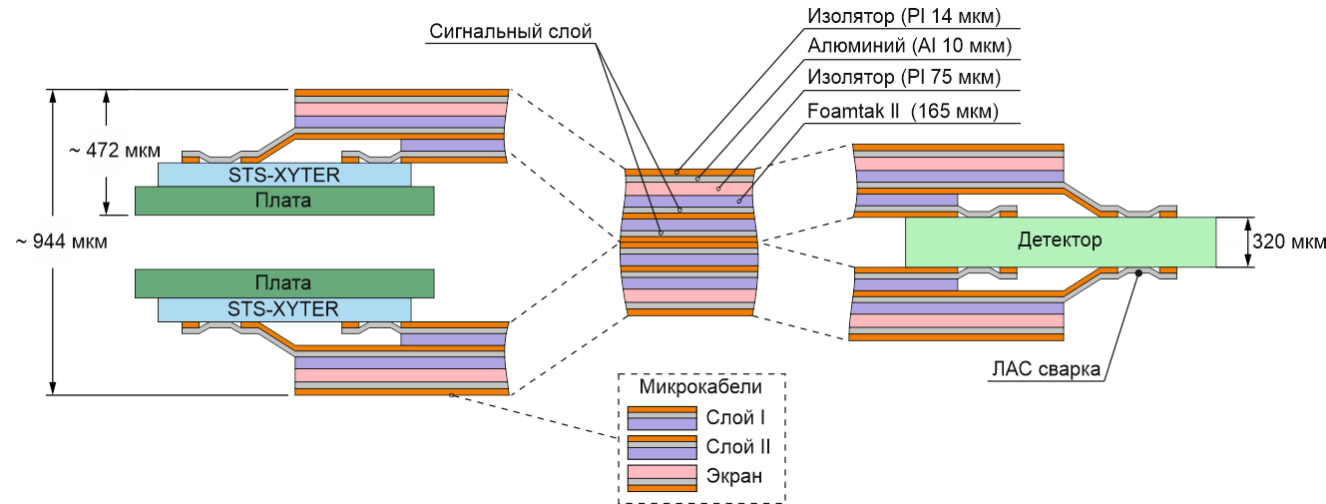
Количество слоев: 3 шт.;

Радиационная длина: $0,124\% X/X_0$;

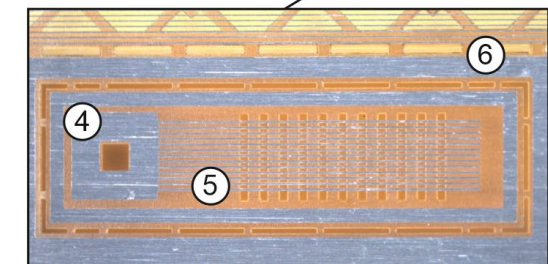
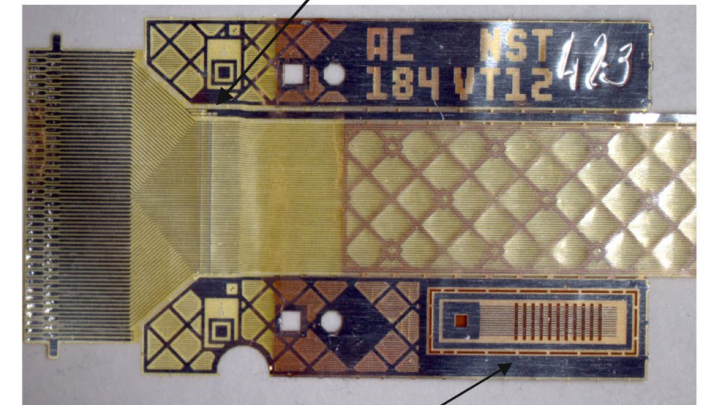
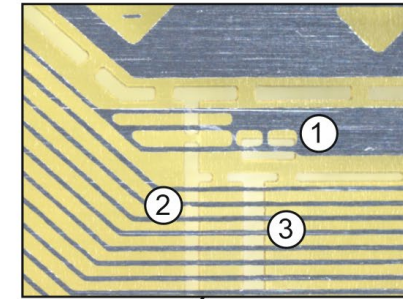
Сопротивление сигнальной линии: 0,3-0,4 Ом/см;

Емкость сигнальной линии: 0,36 – 0,45 пФ/см;





Зона ультразвуковой сварки



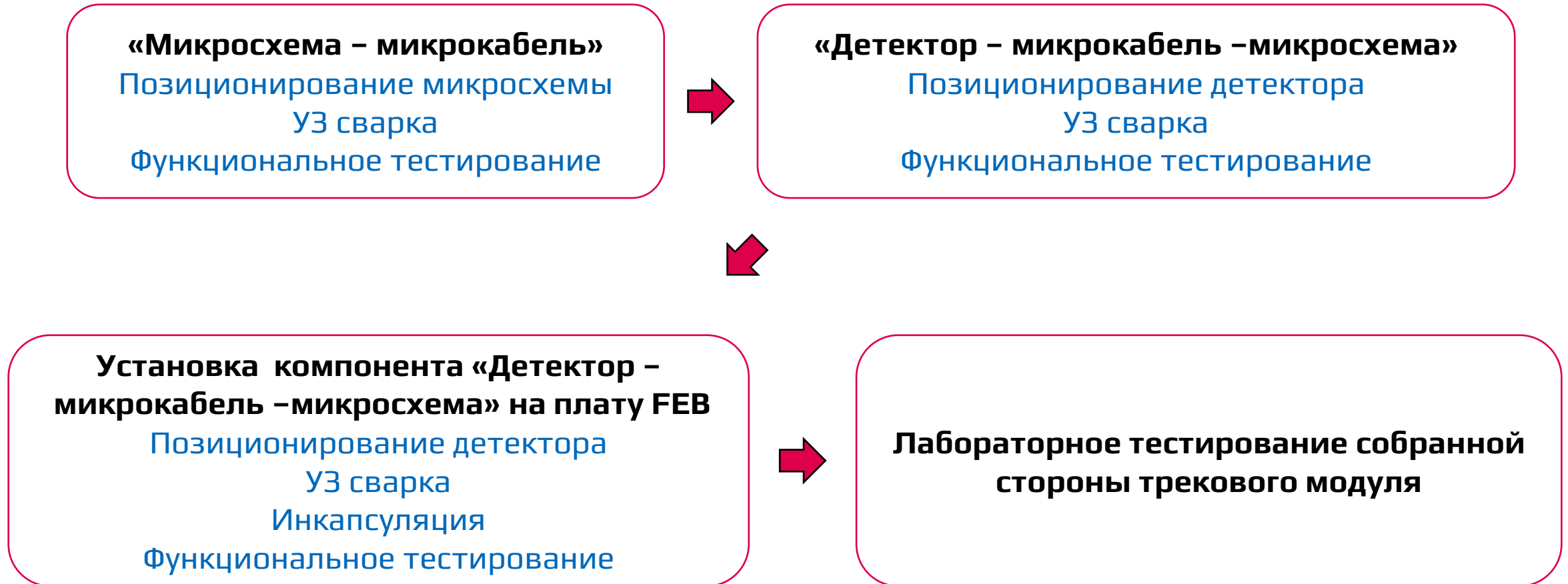
Тестовая область

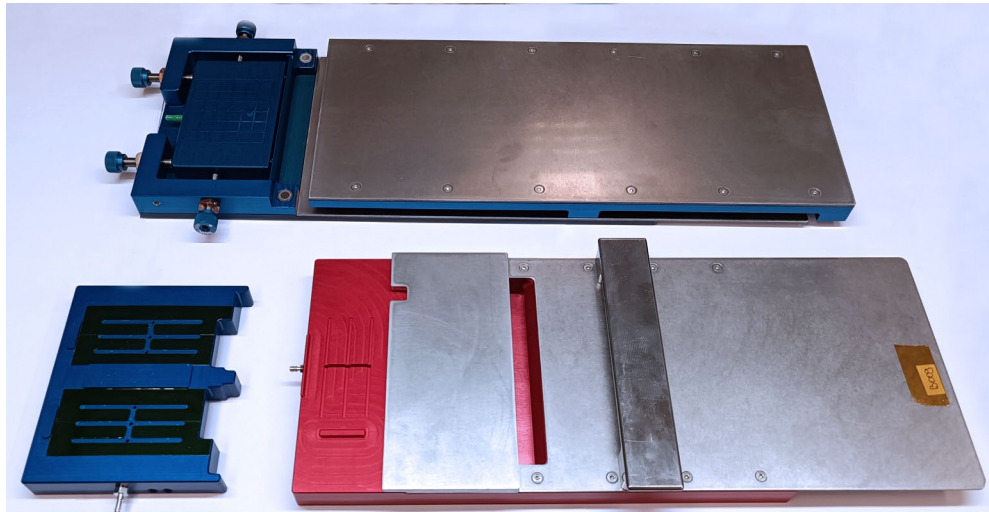
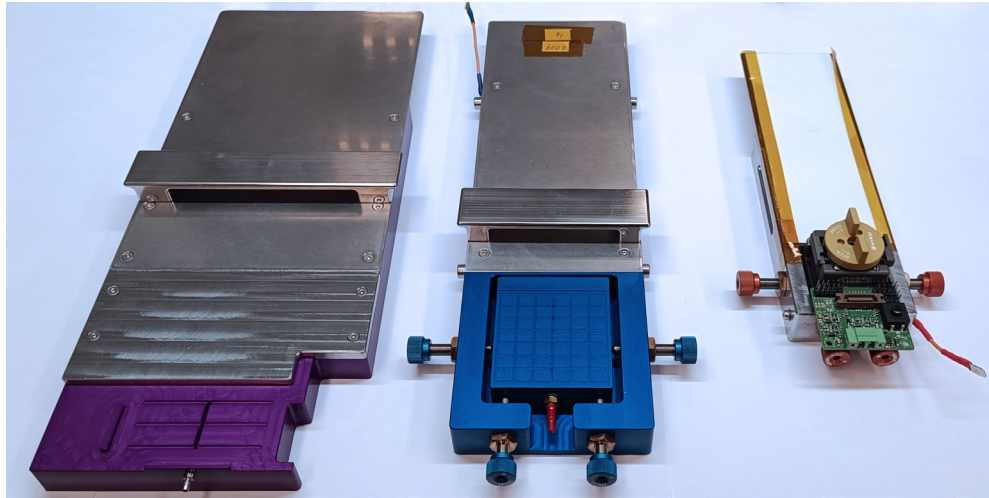
1. Проводник подачи напряжения смещения на детектор с окном для УЗС.
2. Окна для отрезания тестовой зоны кабеля.
3. 64 сигнальных алюминиевых проводника для УЗС.
4. Тестовая область состоит из зоны для установки инструмента отрыва.
5. 11 окон с 10 проводниками для подбора параметров УЗС;
6. Зоны для вырезки тестовой области.

Технология изготовления модуля СВМ/ВМН

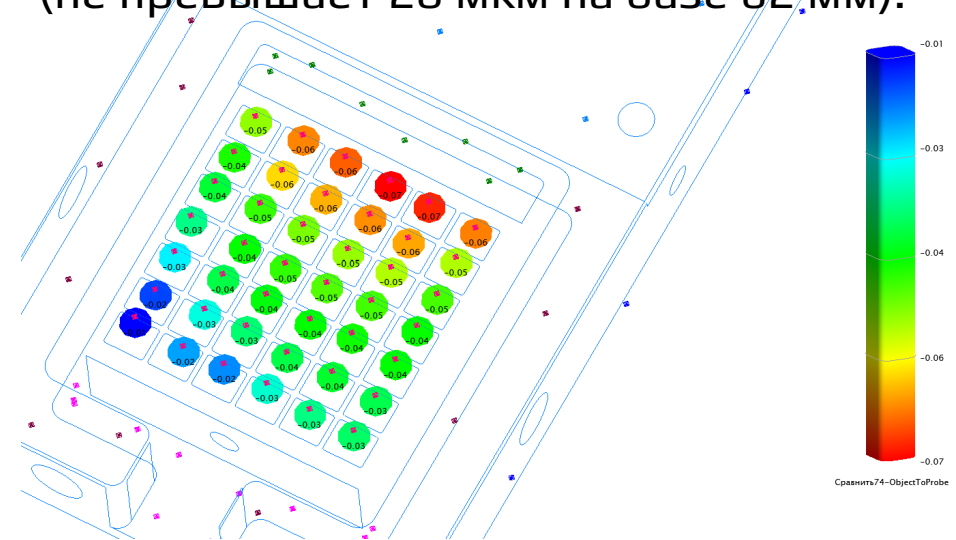


Технологический процесс изготовления одной стороны трекового модуля

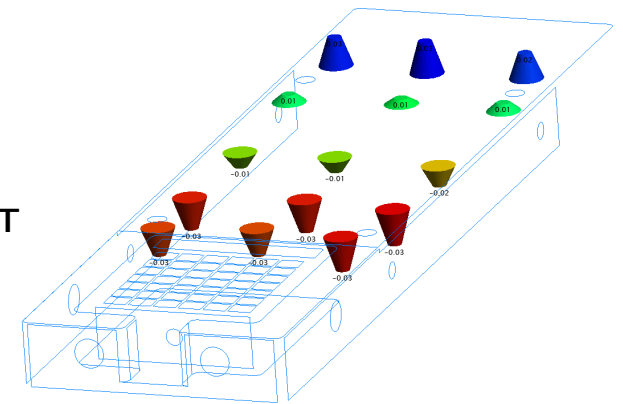




Измерения плоскопараллельности рабочей поверхности вакуумного столика для детектора (не превышает 20 мкм на базе 62 мм).



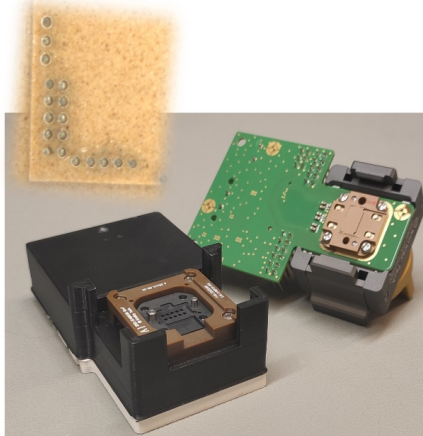
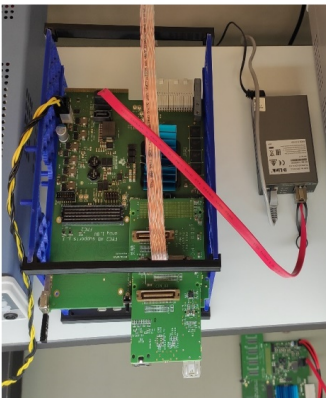
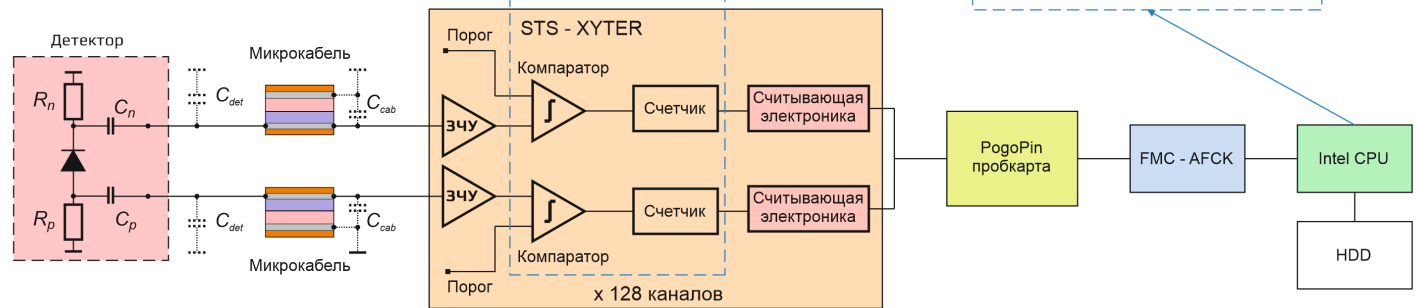
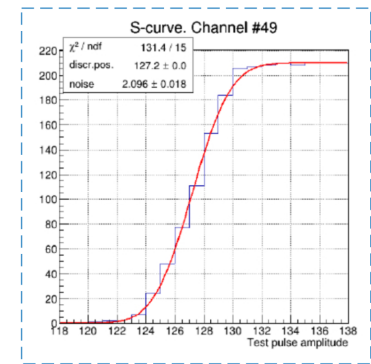
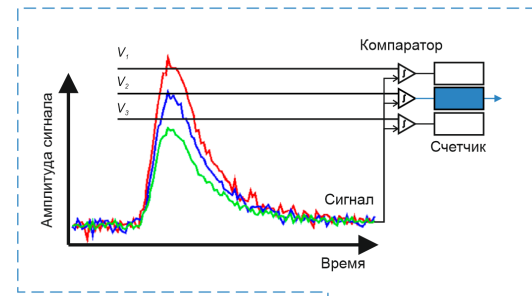
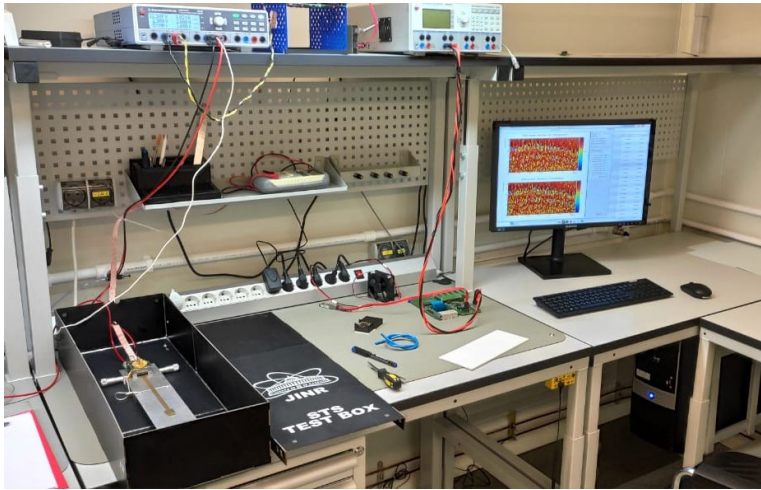
Перепад высоты в области позиционирования микрокабеля (не превышает 30 мкм на базе 160 мм).



Тестовый стенд с основными компонентами для пошагового тестирования компонентов модуля в процессе его сборки

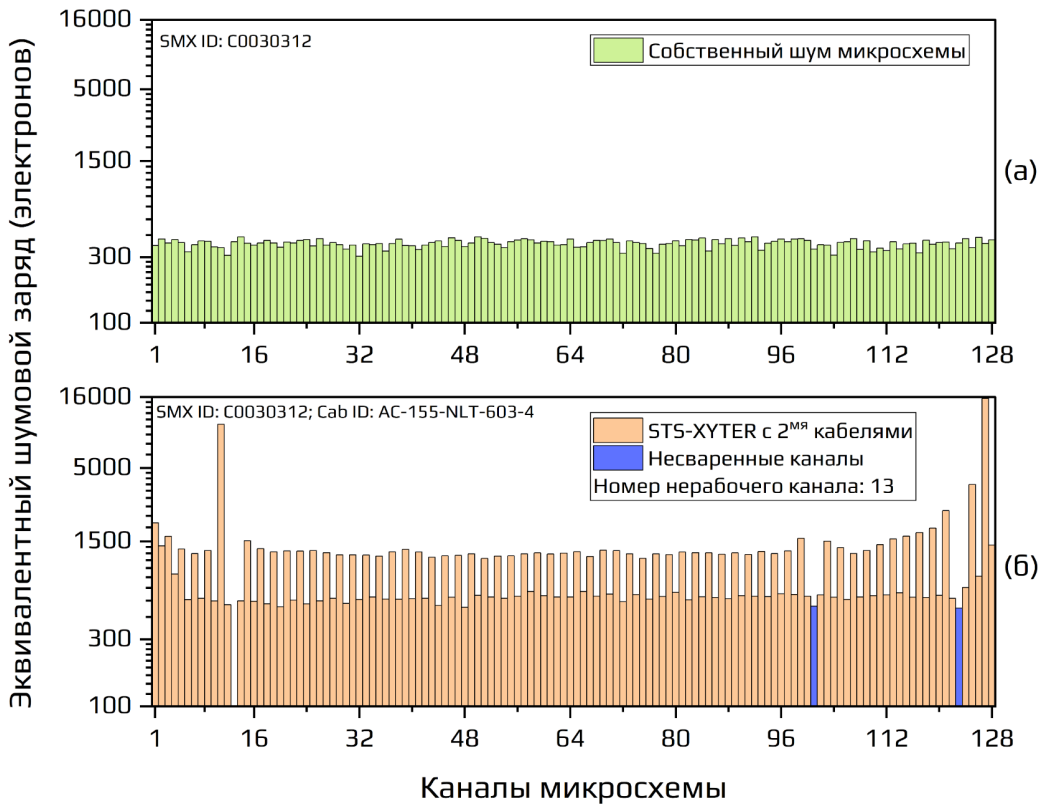
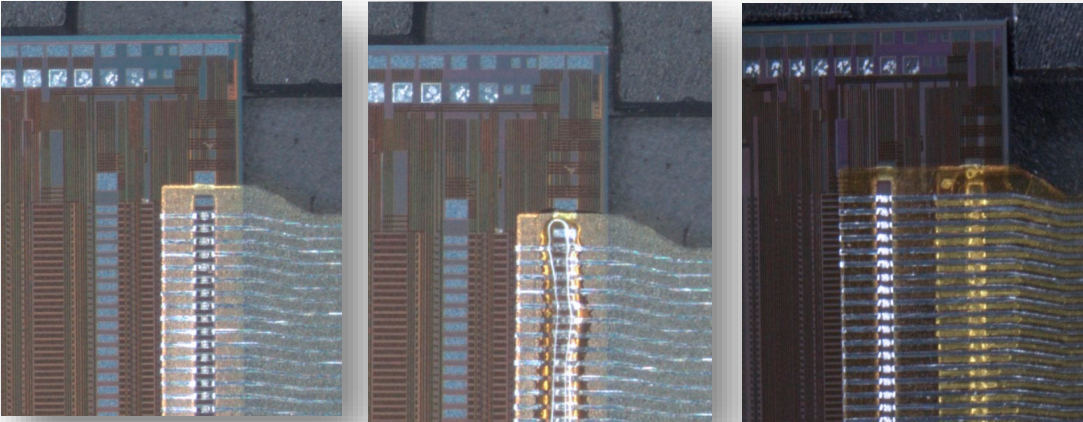
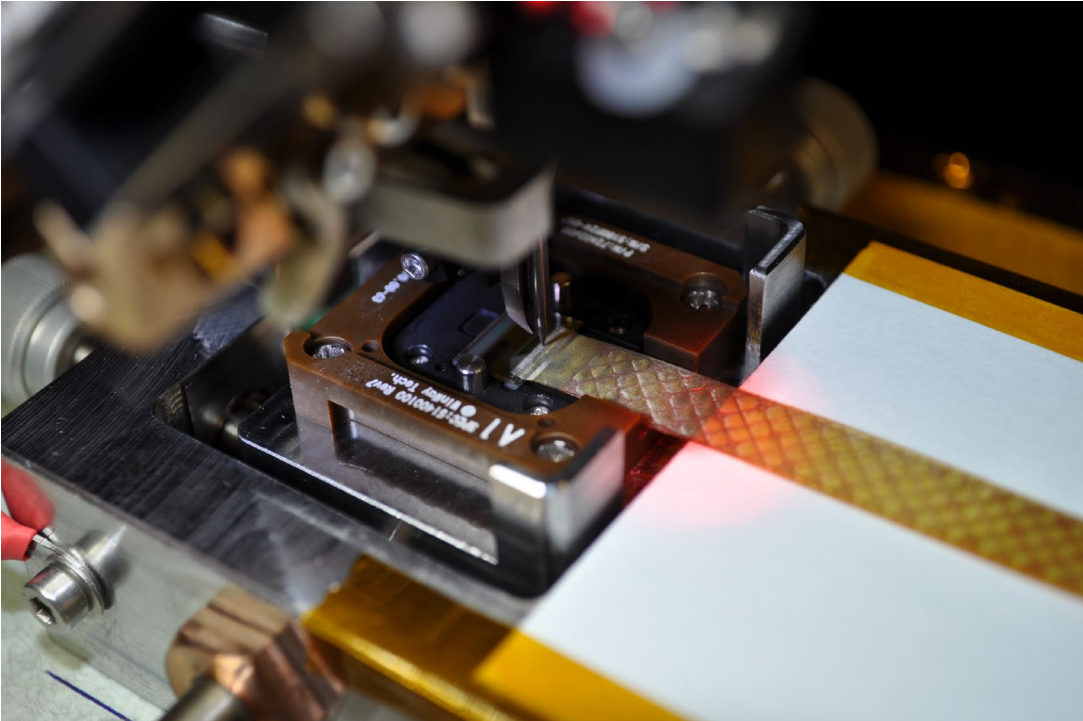
$$erf(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-t^2} dt.$$

$$Y(V) = \frac{N}{2} \left(1 + erf \left(\frac{V - V_0}{\sigma\sqrt{2}} \right) \right) + Y_0,$$



A. Sheremetev, A. Kolozhvari, D. Dementev, M. Shitenkov, Yu. Murin "The Quality Assurance Test System for Assembly of STS Modules for the BM@N Experiment", Physics of elementary particles and atomic nuclei Vol. 20 p. 613-618

«Микросхема – микрокабель»
 Позиционирование микросхемы
 УЗ сварка
 Функциональное тестирование

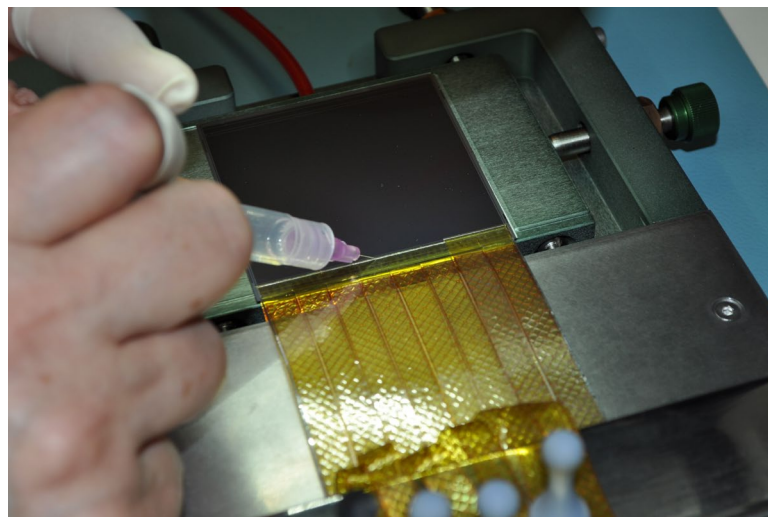
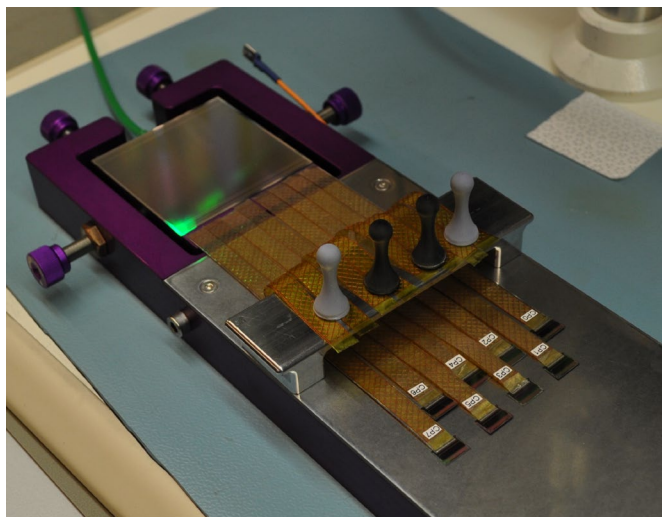
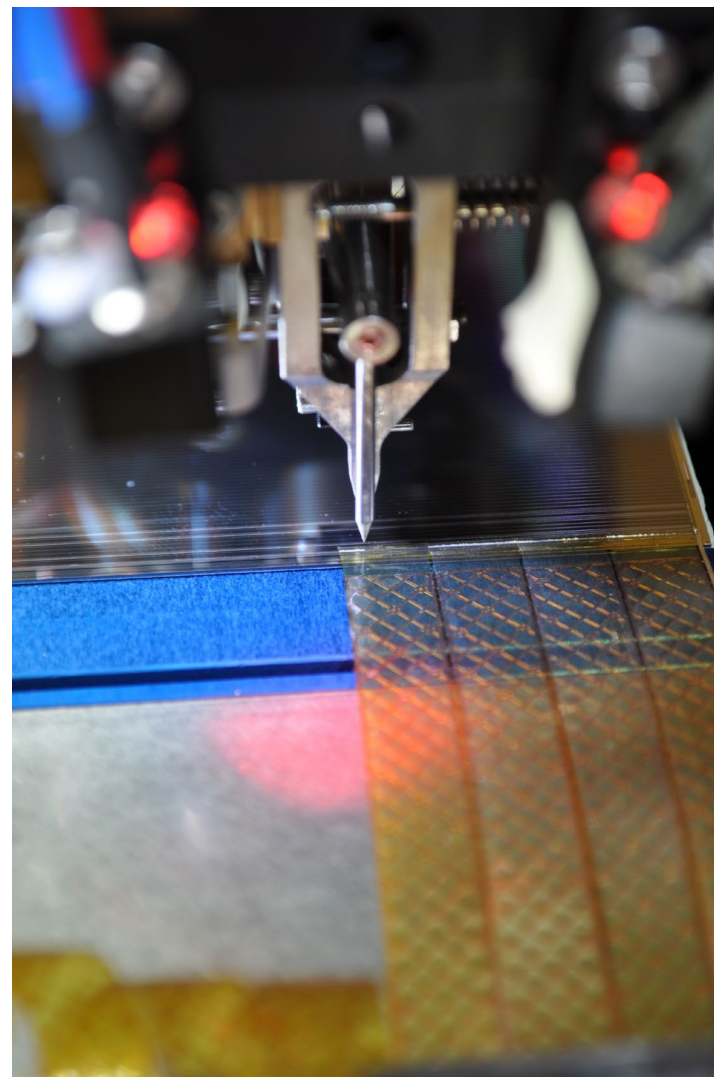
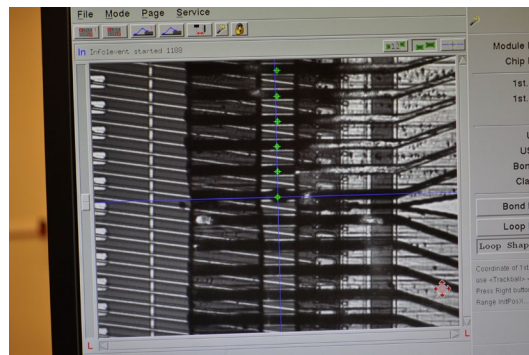


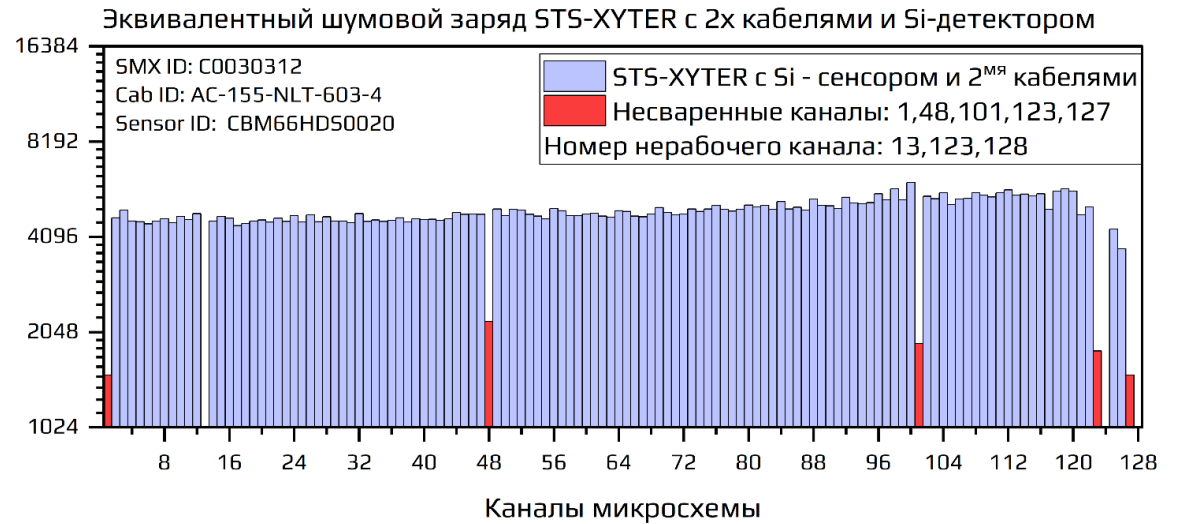
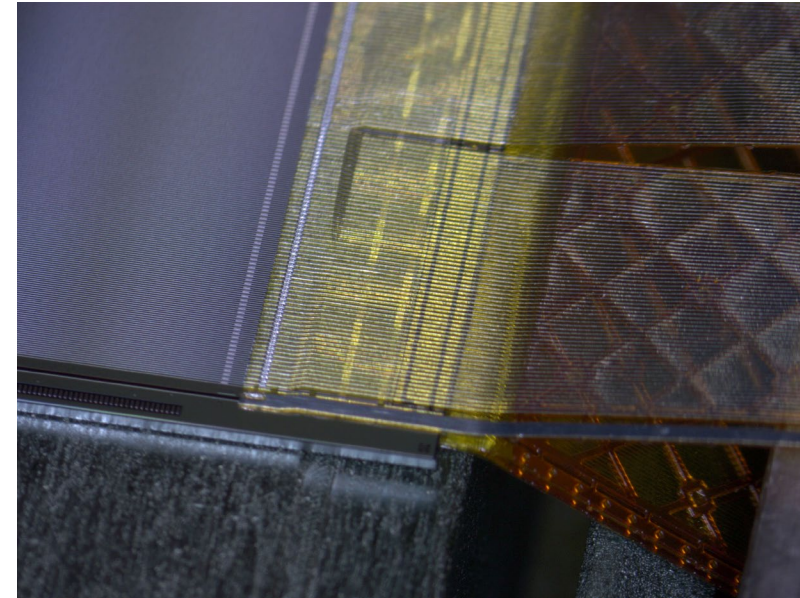
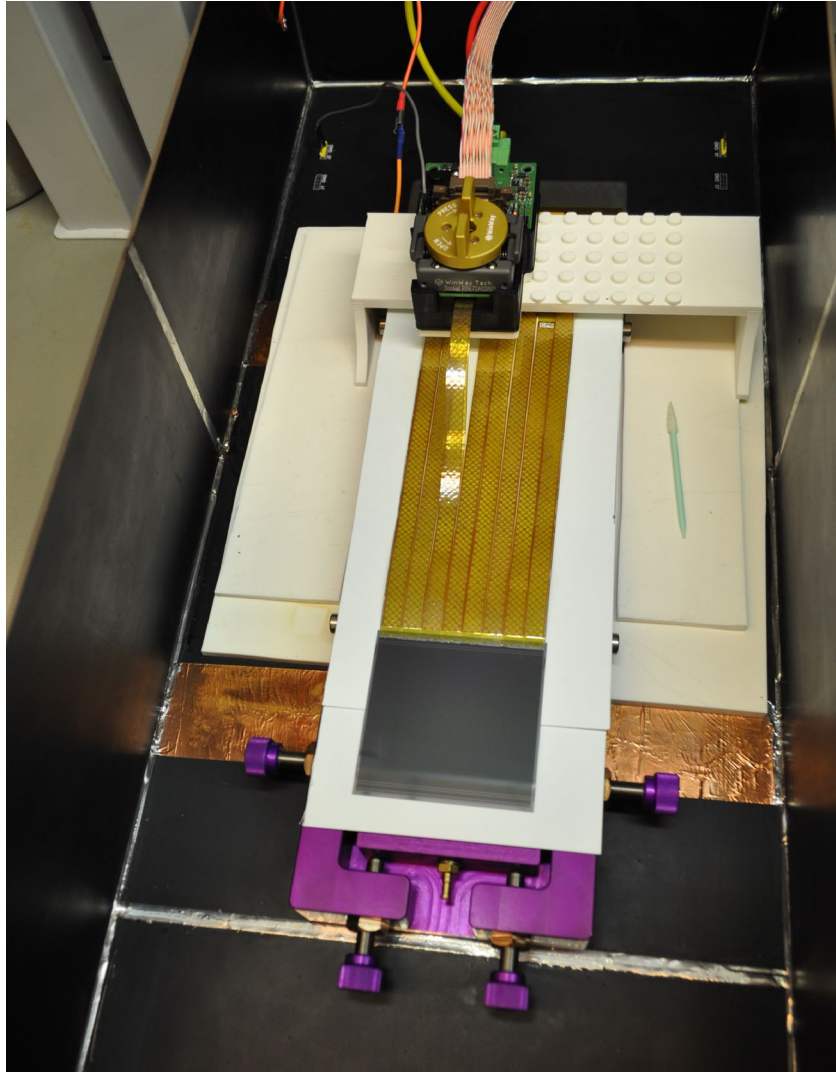
«Детектор – микрокабель – микросхема»

Позиционирование детектора

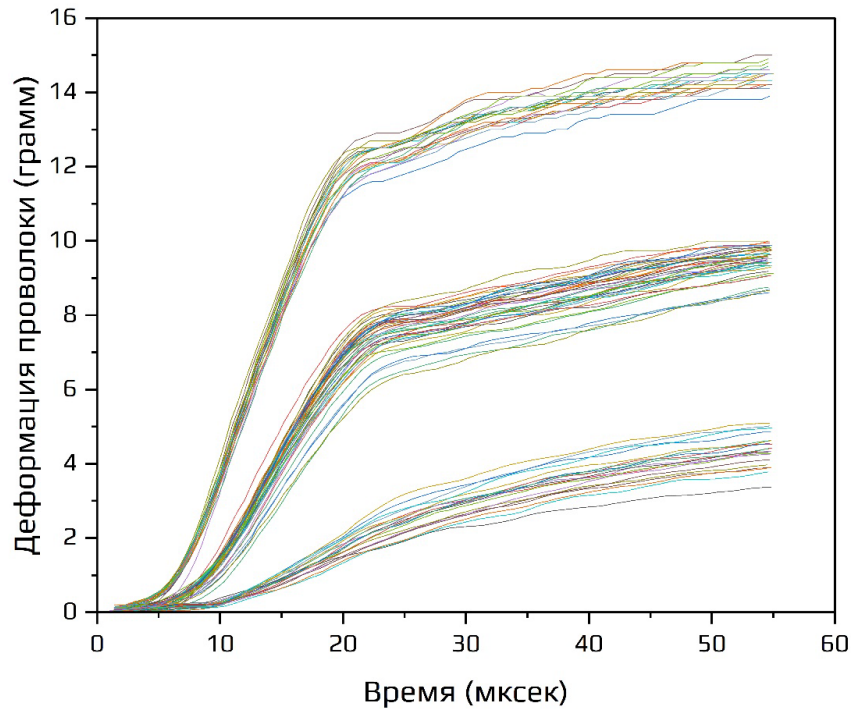
УЗ сварка

Функциональное тестирование

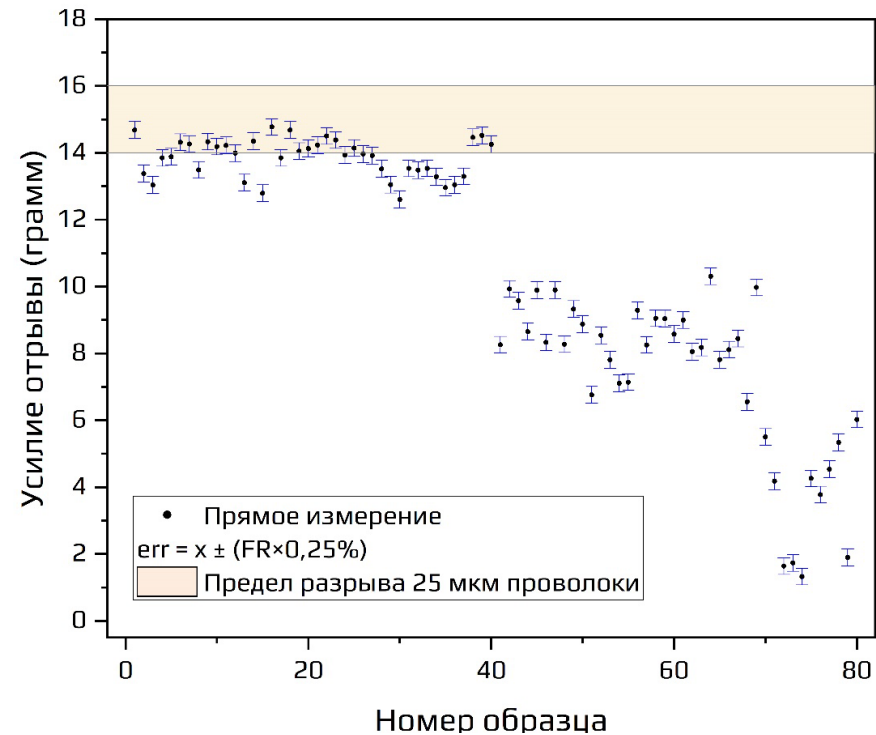




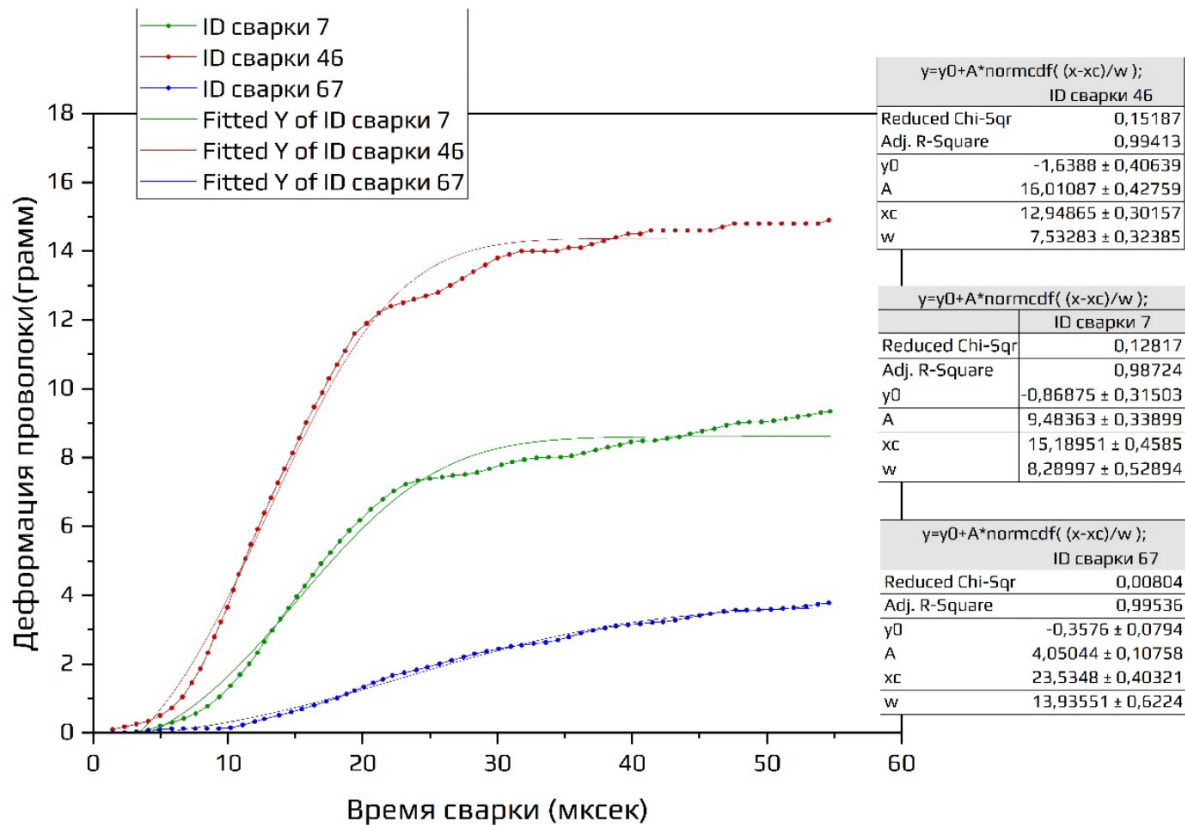
Возможность исследовать качество сварного соединения при помощи разрушающего метода тестирования (отрыва приваренной перемычки) не всегда оправданна. Для оценки качества ультразвукового соединения предлагается аналитическая методика оценки кривой деформации



Зависимость деформации проводника от времени сварки

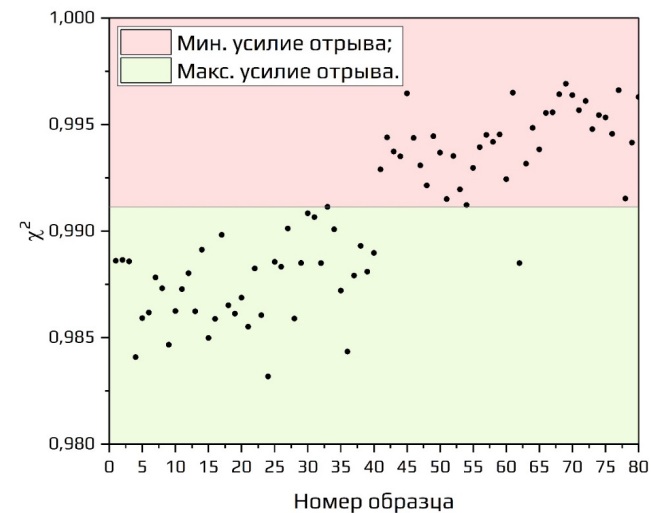


Результаты измерения усилия отрыва для каждого образца в эксперименте



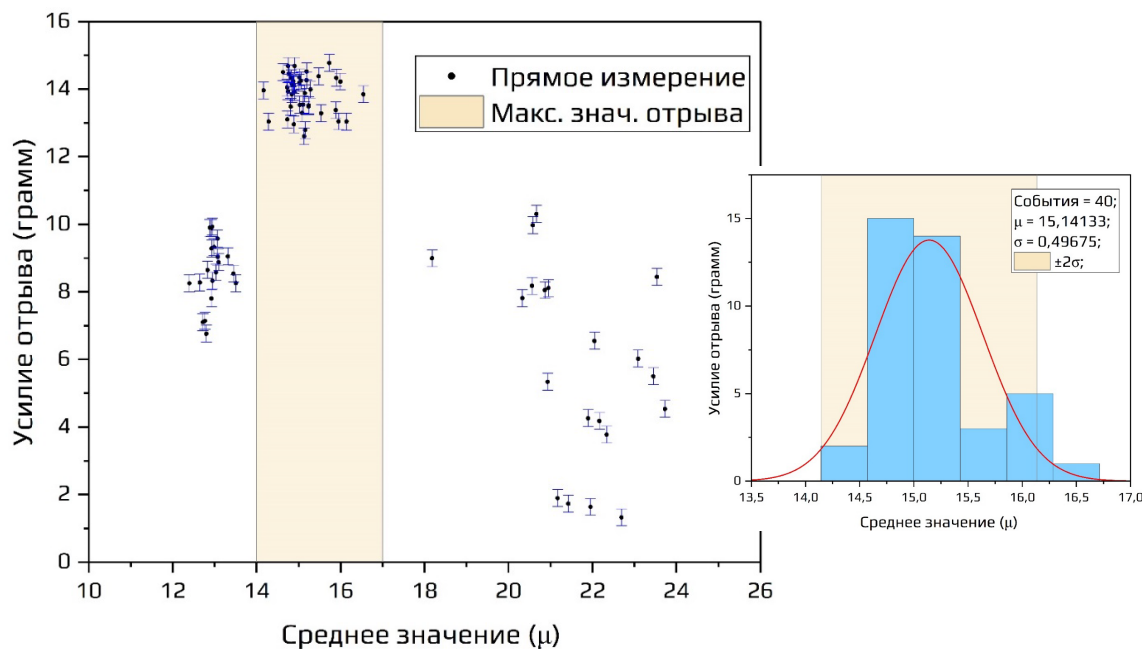
$$y = y_0 + A \int_{-x}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}} dt,$$

y_0 – параметр смещения кривой;
 A – амплитуда ;
 μ – среднее значение;
 σ – стандартное отклонение;

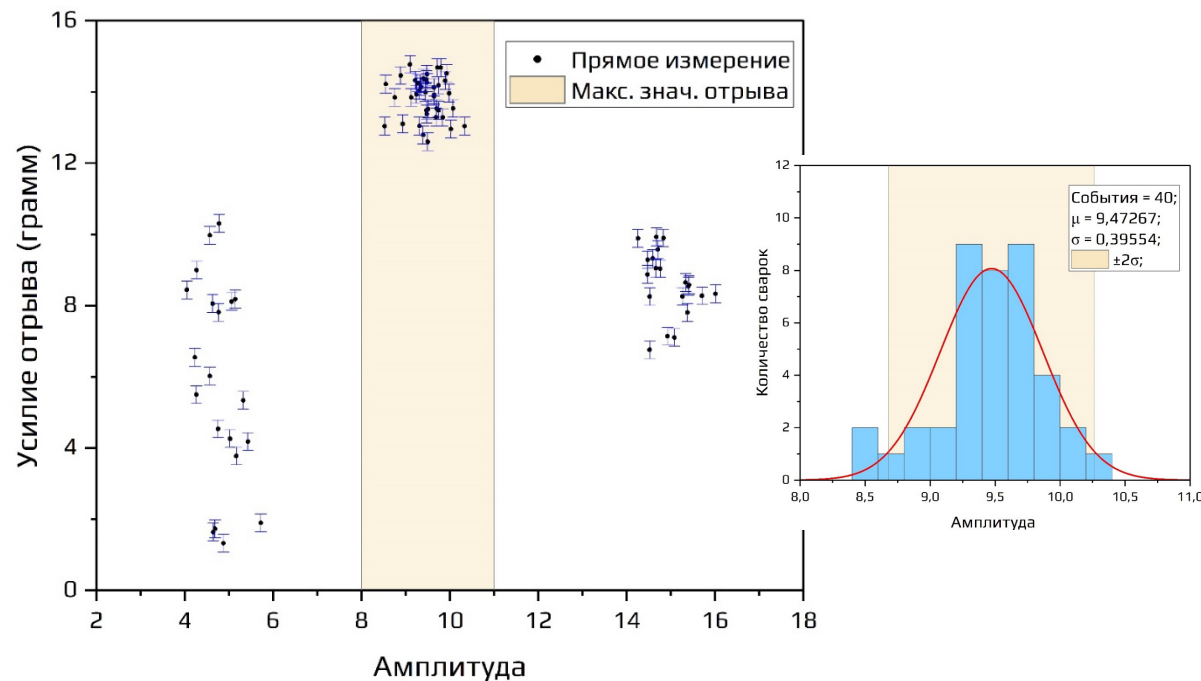


Критерий χ^2 для каждого образца в эксперименте

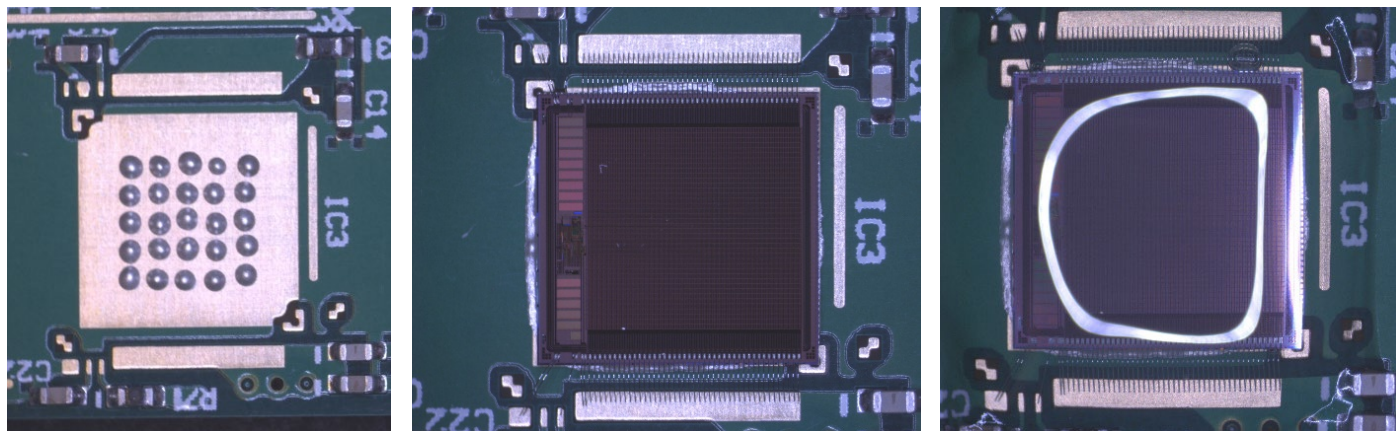
Зависимость параметров амплитуды (A) и среднего значения (μ) аппроксимированной кривой деформации от усилия отрыва



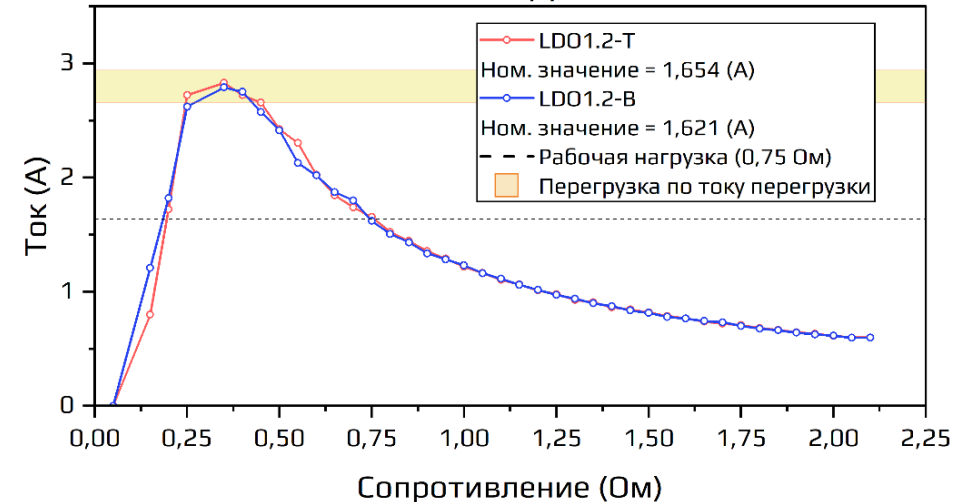
Распределение параметров среднего значения для каждого образца в эксперименте



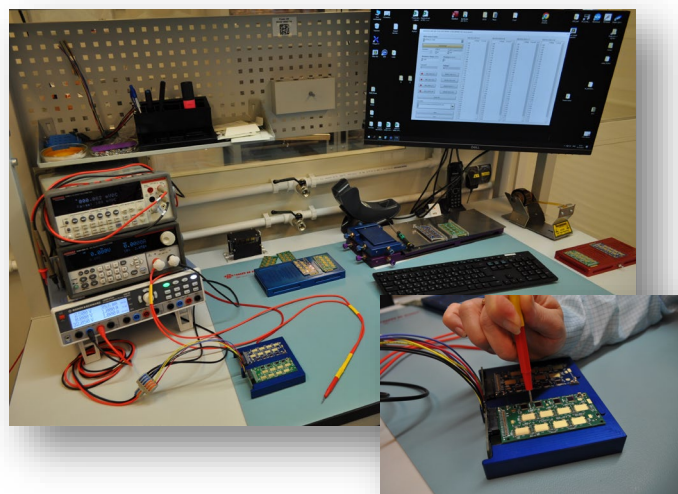
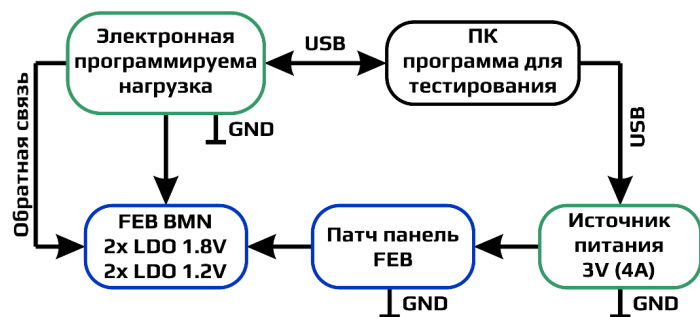
Распределение параметров амплитуды для каждого образца в эксперименте



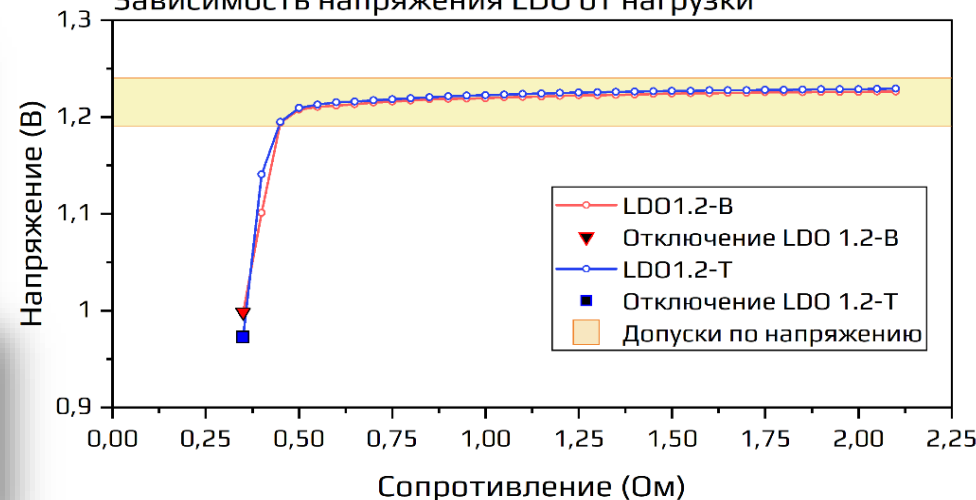
Зависимость тока LDO от нагрузки

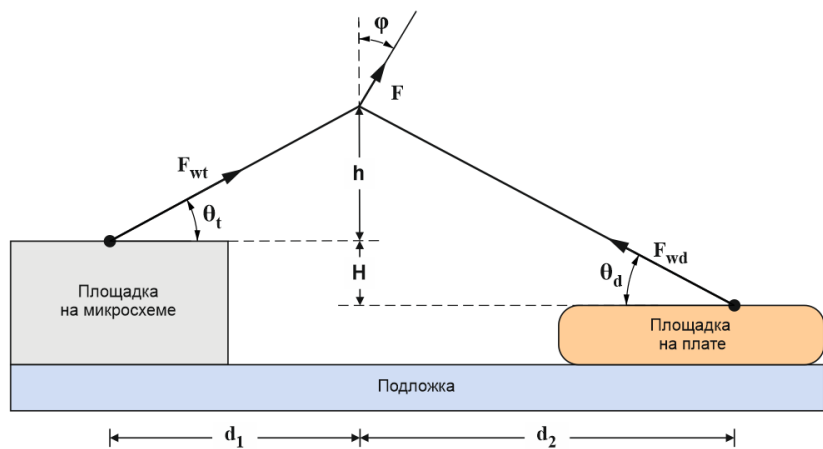


Тестовый стенд входного контроля микросхемы LDO



Зависимость напряжения LDO от нагрузки





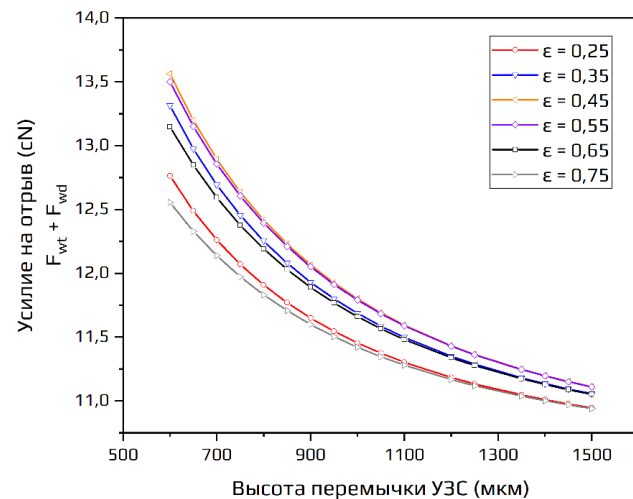
Расстояние: $d_1 + d_2 \leq 1150$ мкм

Высота микросхемы: $H = 200$ мкм

$$\vec{F}_{wt} = \vec{F}_{wd} = 6,032 \text{ сН}, d/h = 1,27$$

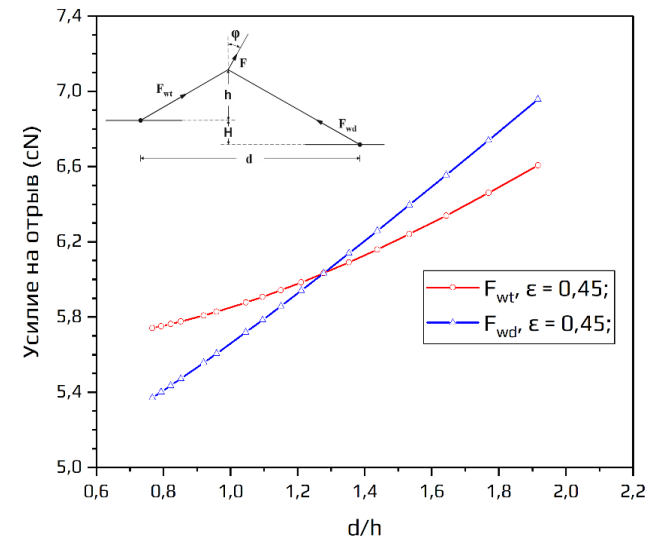
$$F_{wt} = F \left[\frac{1 - \varepsilon}{\left(1 + \frac{\varepsilon H}{h}\right)} \times \left(1 + \frac{\varepsilon^2 d^2}{h^2}\right)^{1/2} \right],$$

$$F_{wd} = F \left[\frac{\varepsilon \left(1 + \frac{H}{h}\right)}{1 + \frac{\varepsilon H}{h}} \times \left(1 + \frac{(1 - \varepsilon)^2 d^2}{(h + H)^2}\right)^{1/2} \right],$$

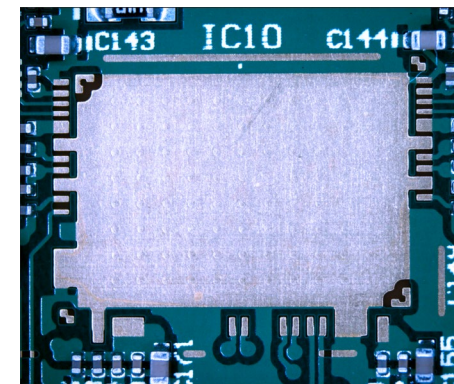


Зависимость усилия на отрыв от высоты перемычки при разных отношениях между двумя точками

СВЯЗИ



Зависимости усилия отрыва в точках \vec{F}_{wt} и \vec{F}_{wd} от геометрических параметров петли сварки



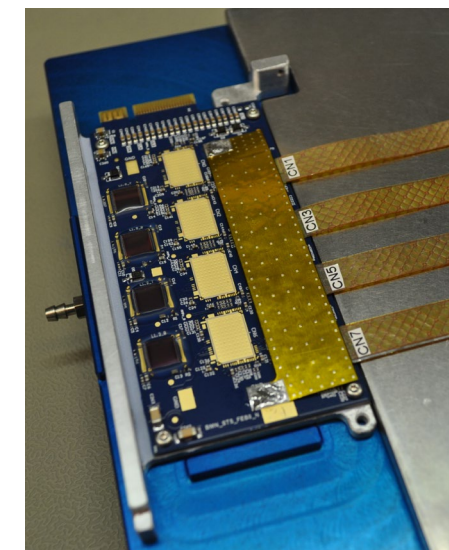
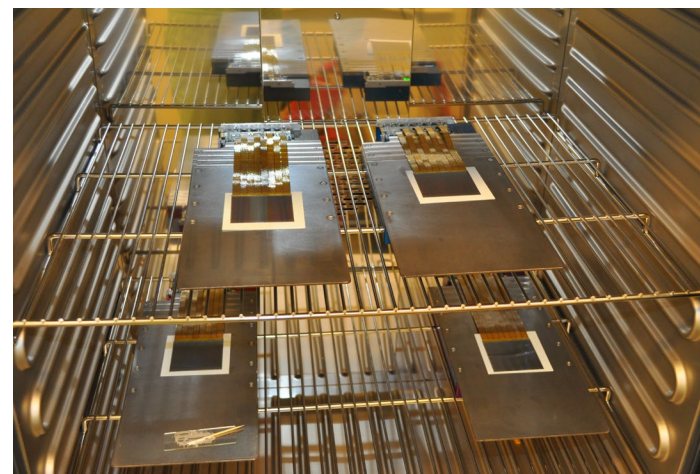
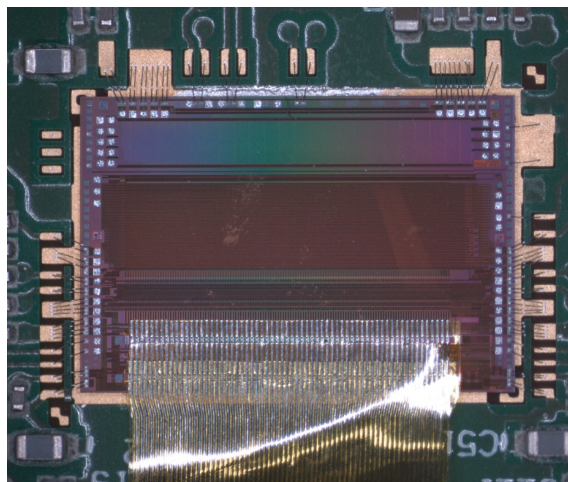
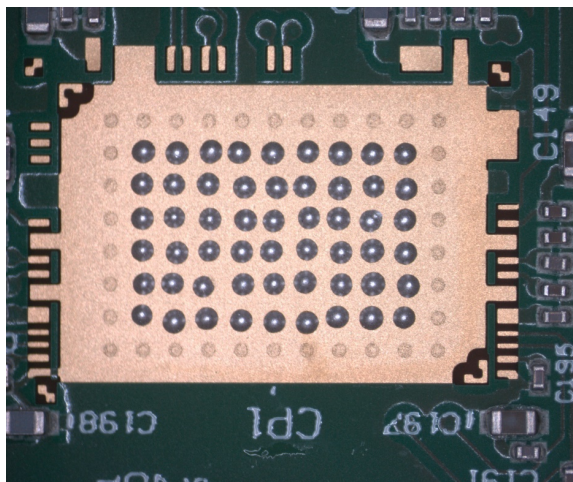
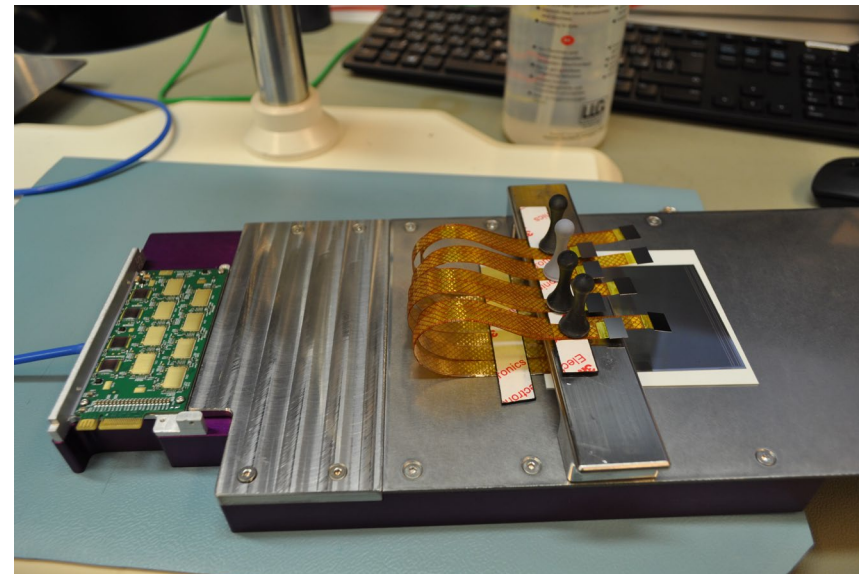
Установка компонента «Детектор – микрокабель – микросхема» на плату FEB

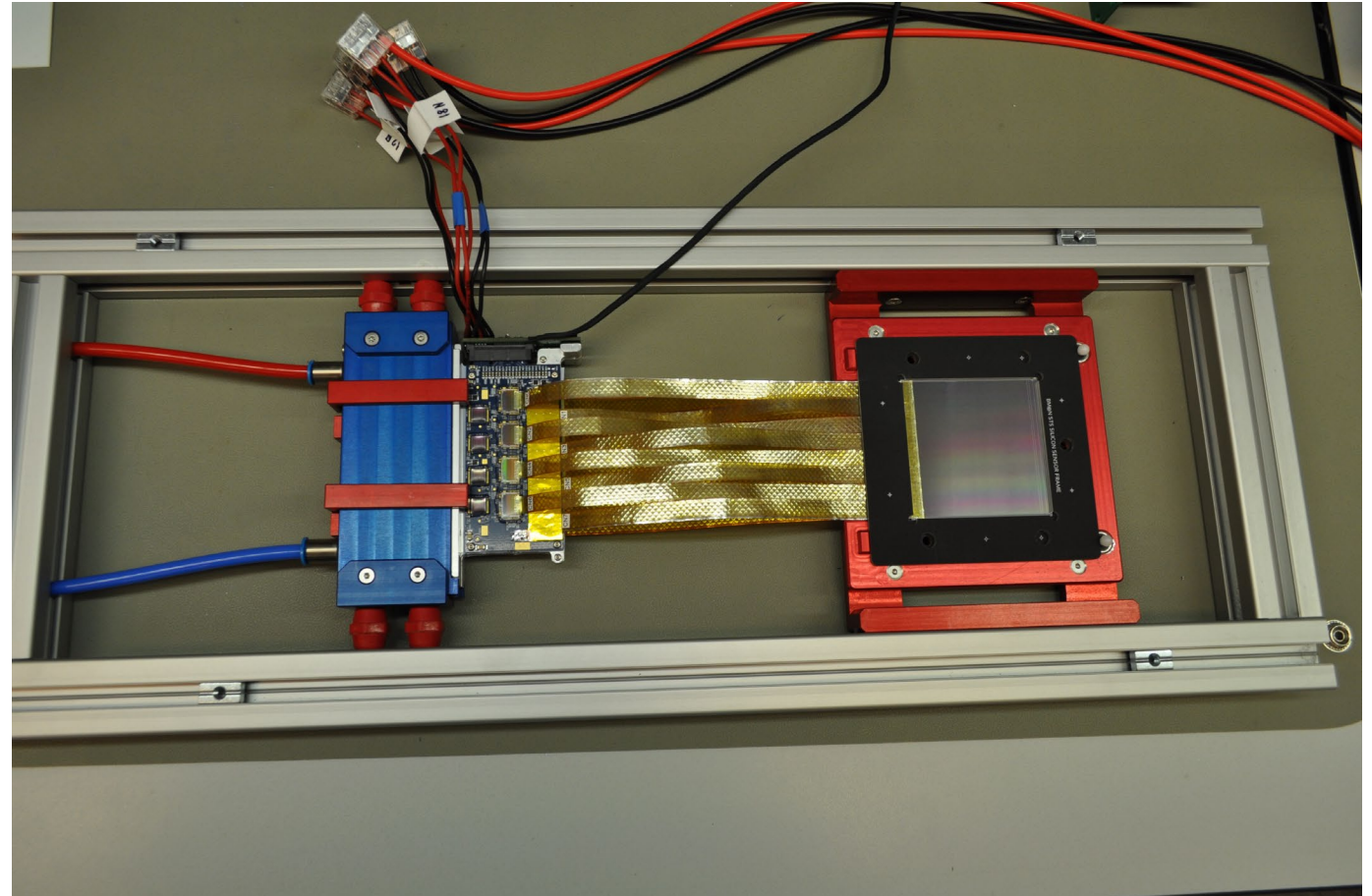
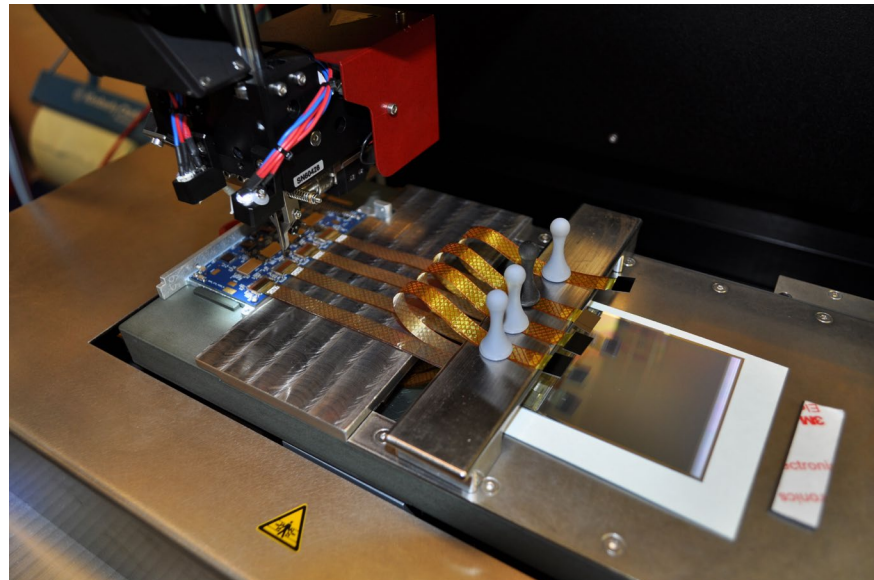
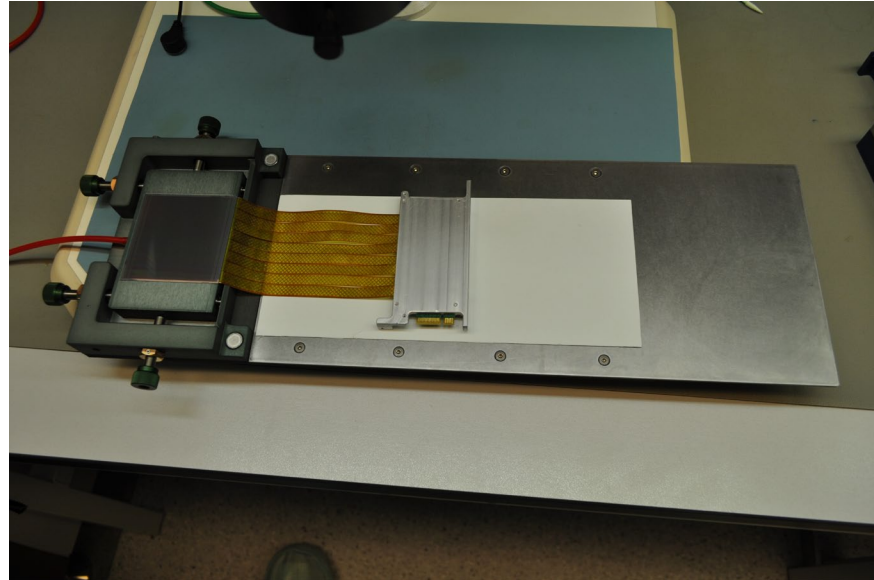
Позиционирование детектора

УЗ сварка

Инкапсуляция

Функциональное тестирование





Тестирование кремниевых трековых модулей СВМ/ВМН

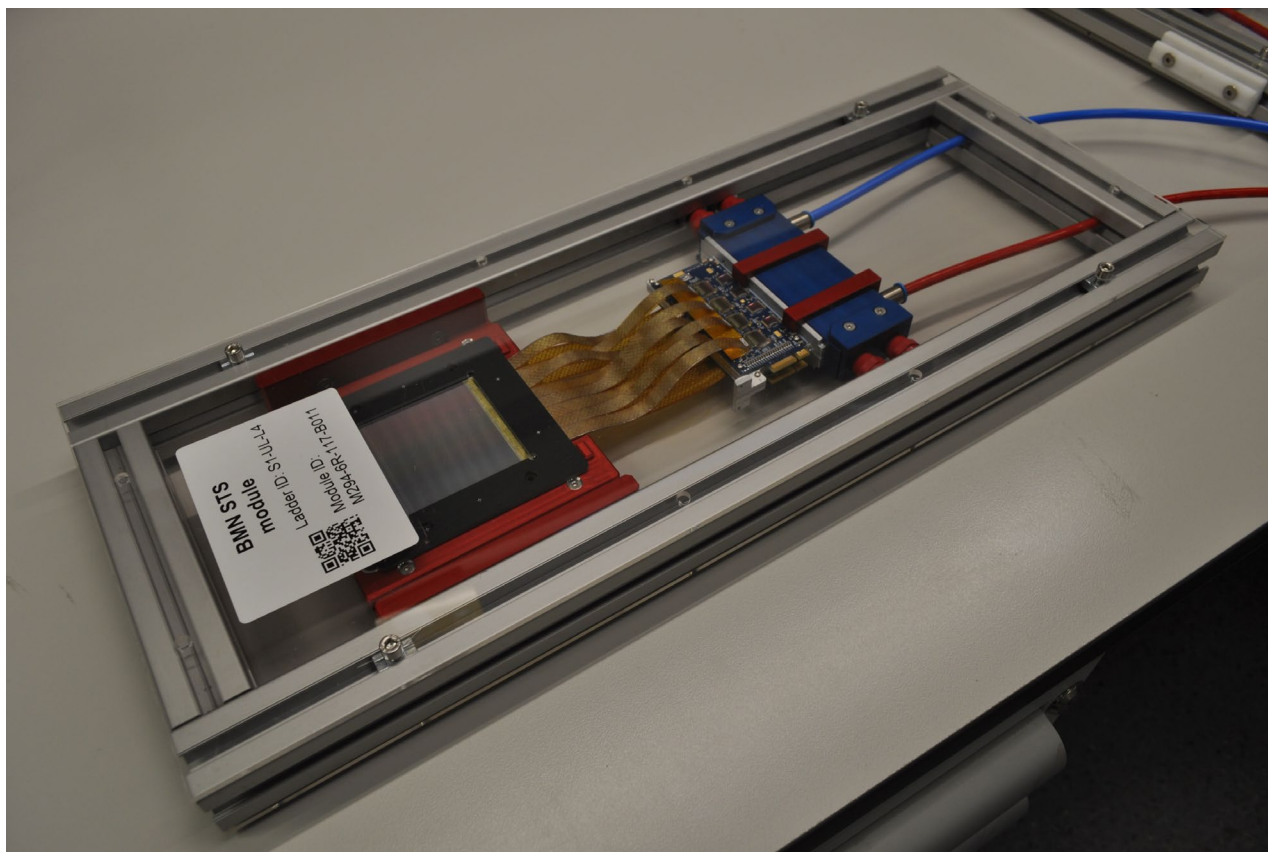
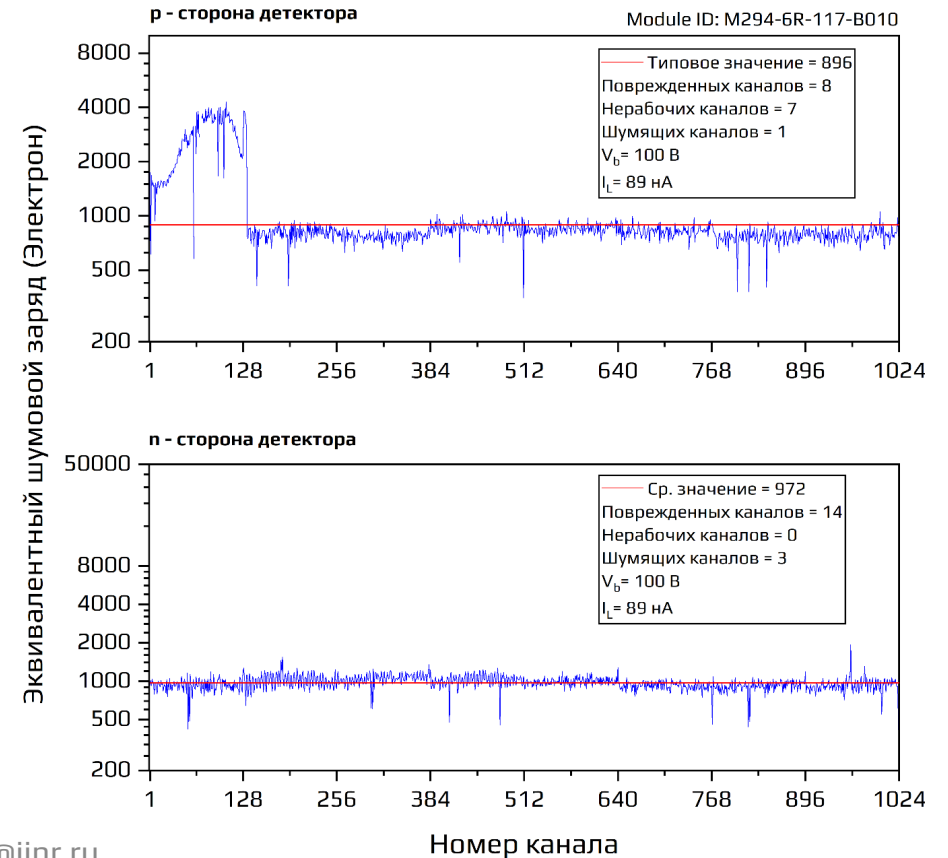
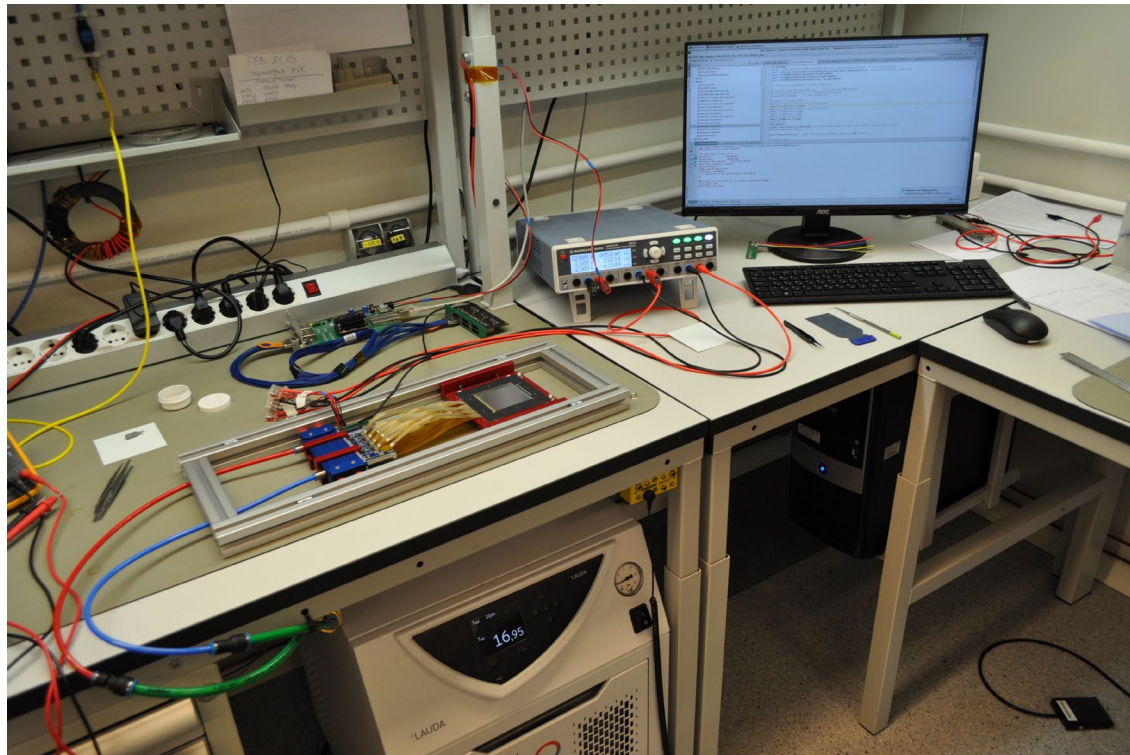
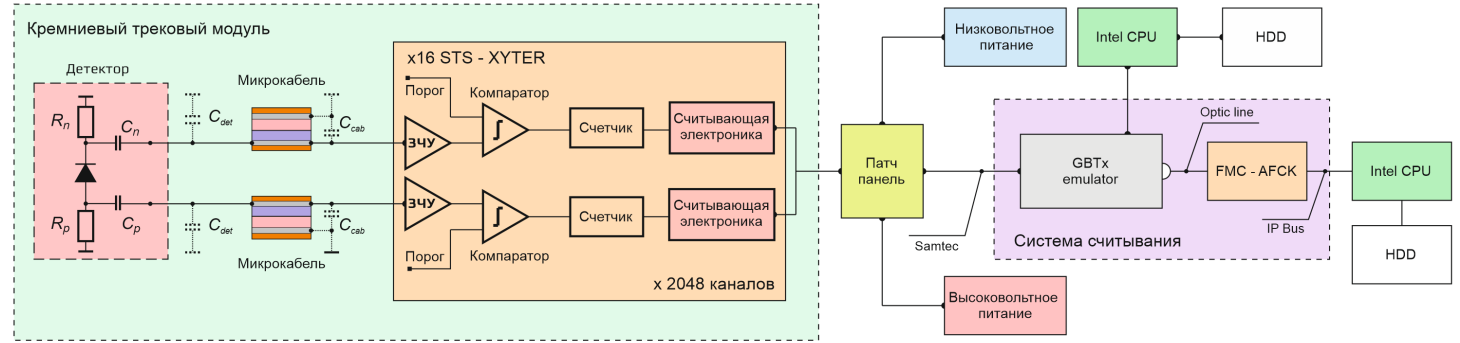
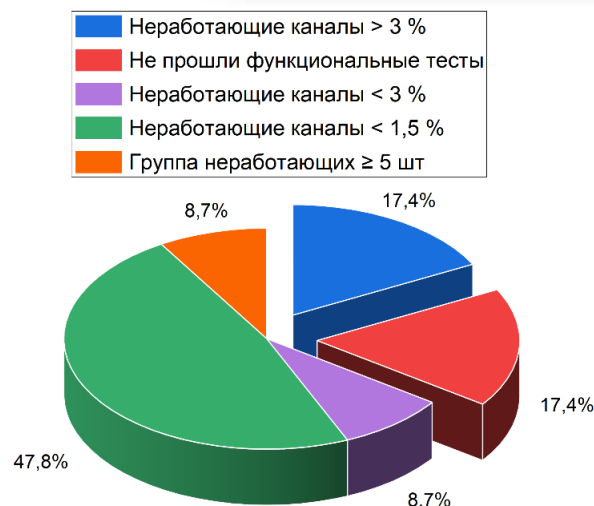
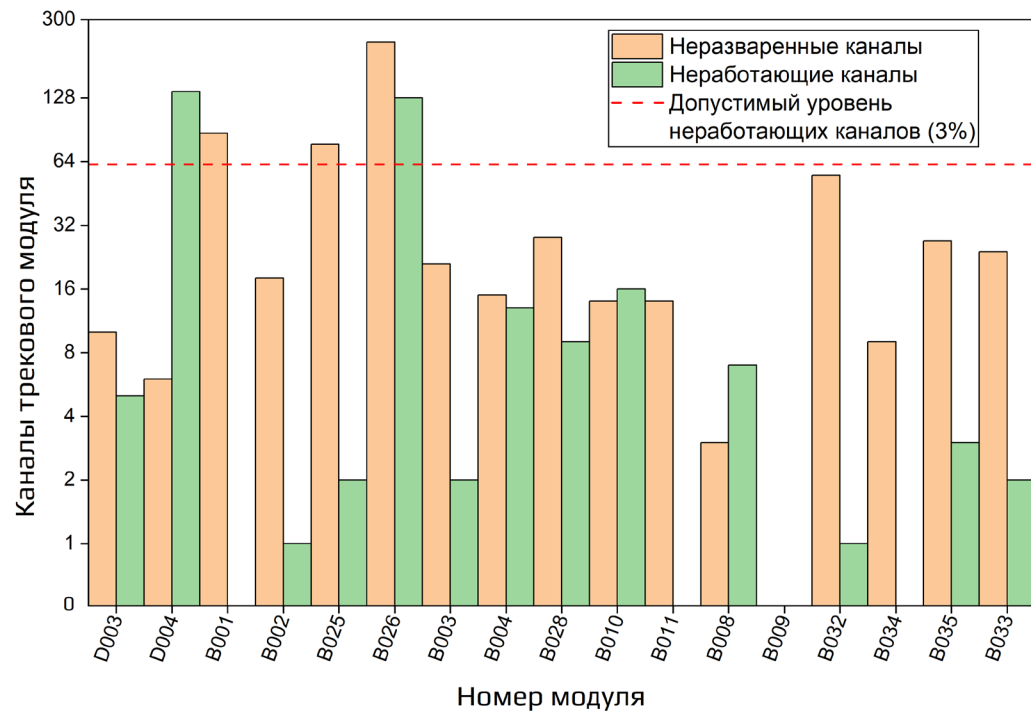
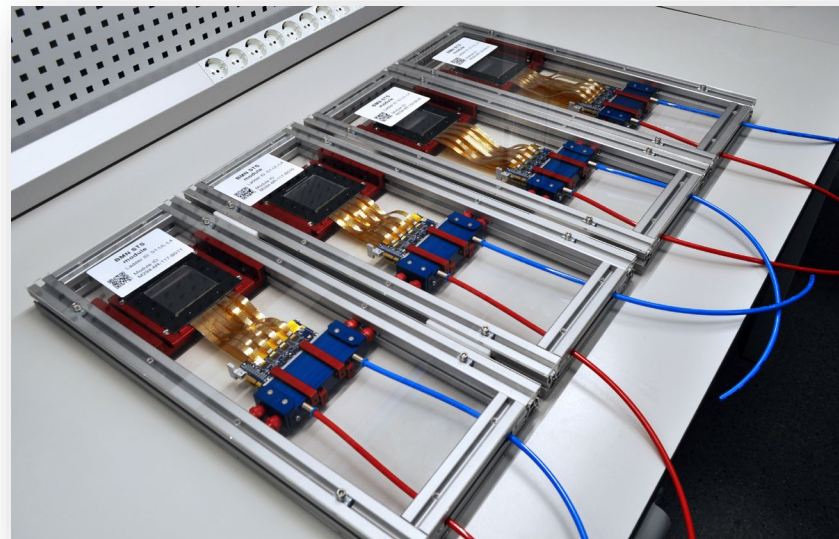
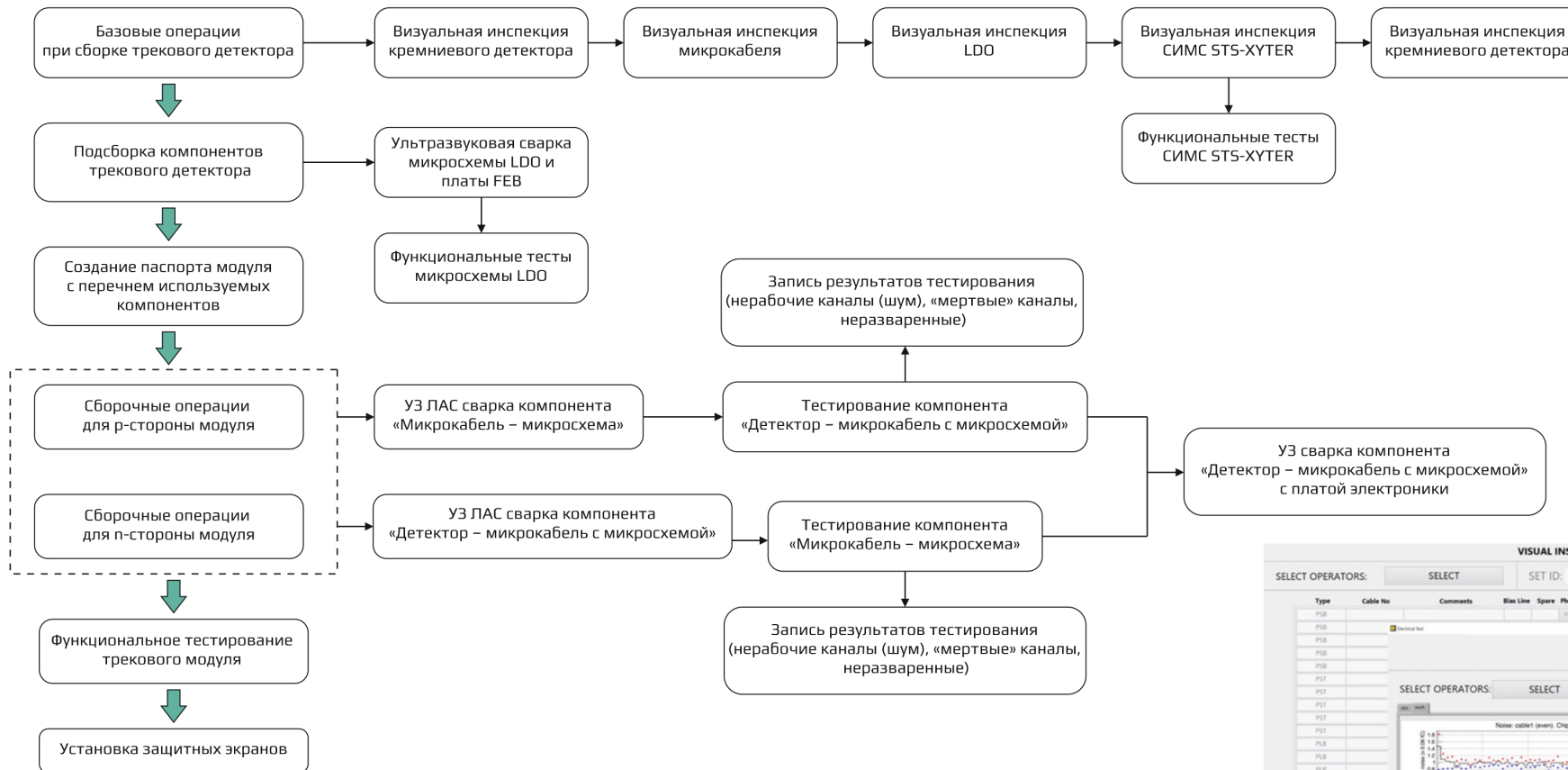


Схема подключения кремниевого трекового детектора для измерения уровня шума в каналах



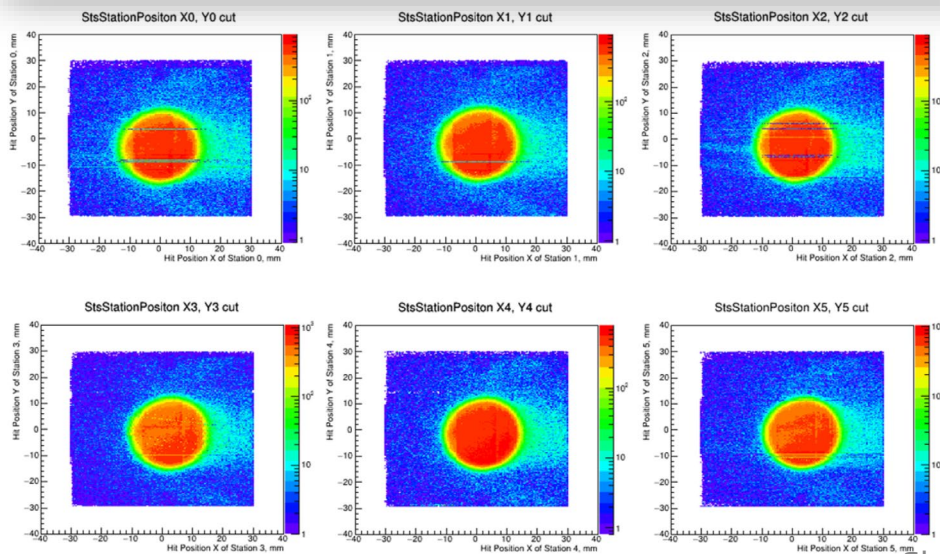
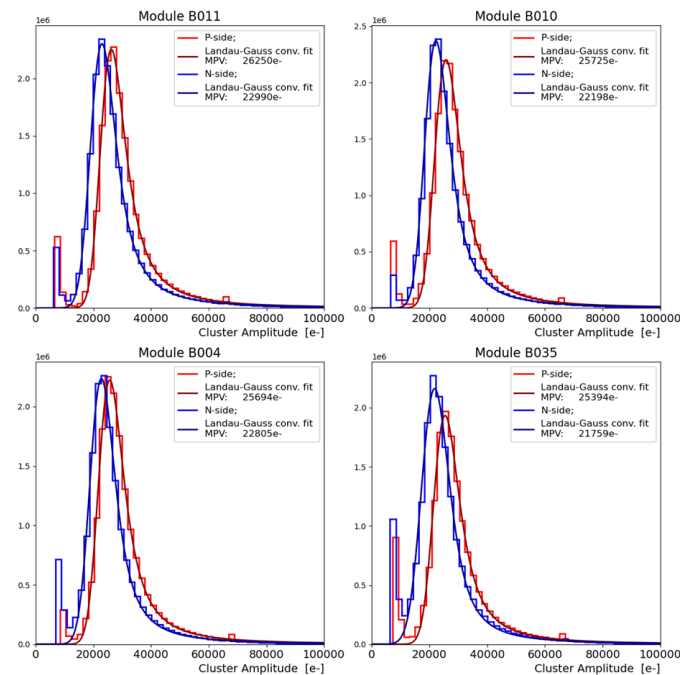
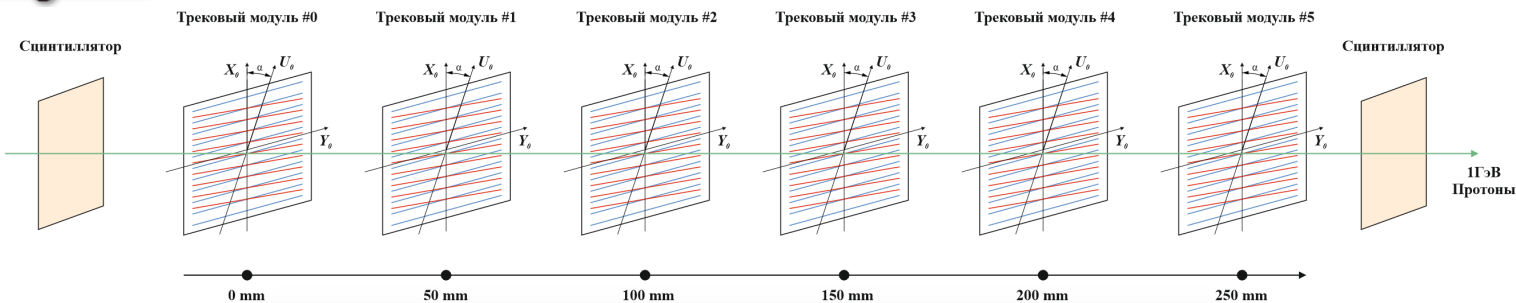
Среднее время, необходимое на сборку 4 модулей, составило 90 часов.



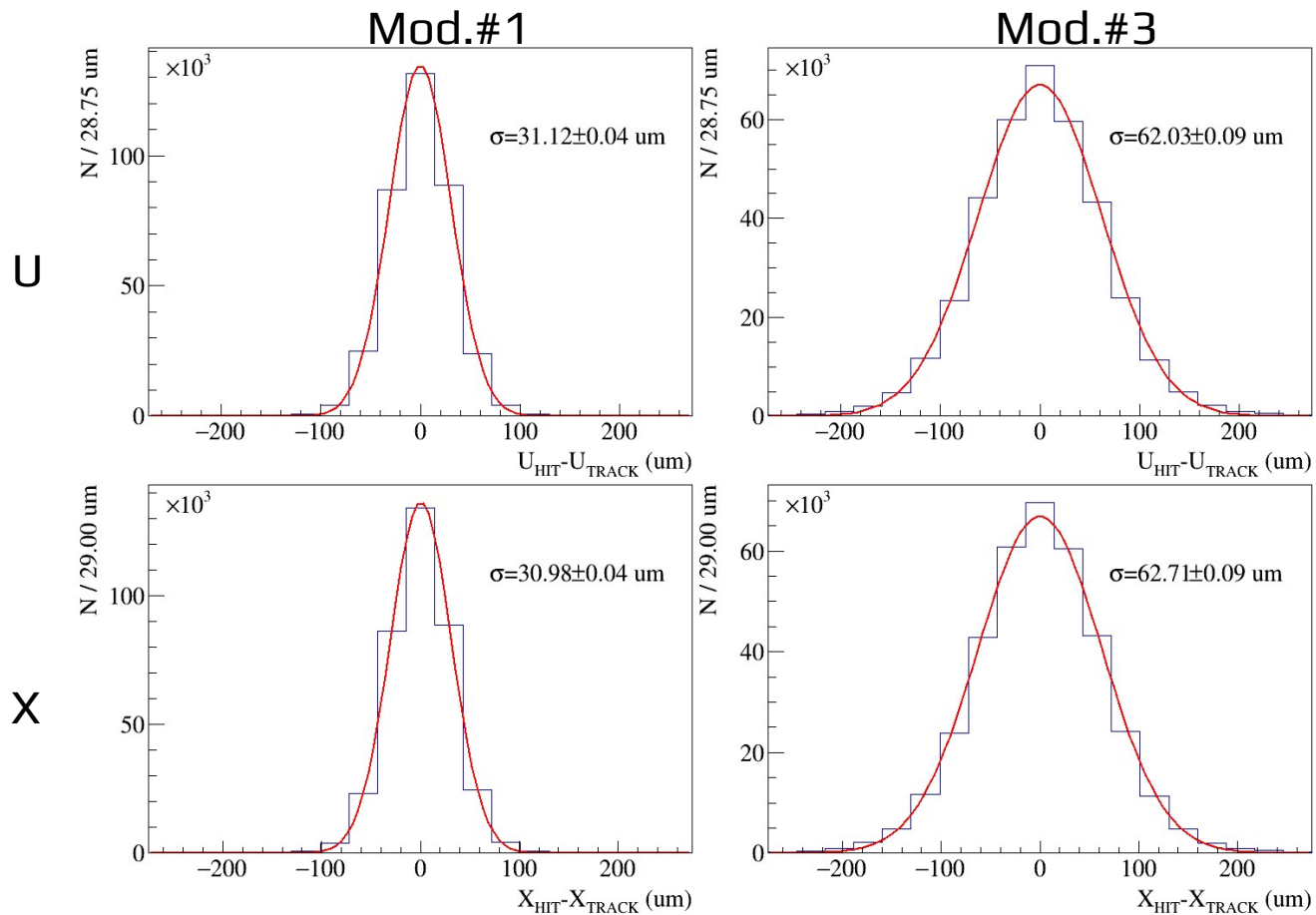


Пример графического интерфейса на основе LabVIEW для регистрации операций сборки модулей СВМ/ВМН в CMIS

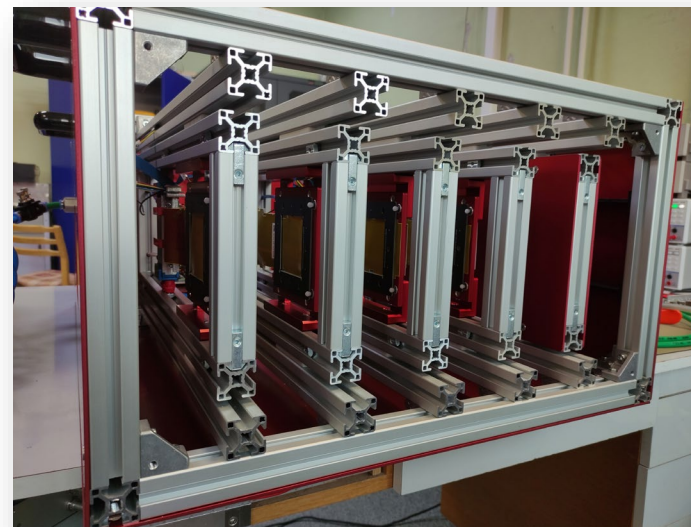
Chip ID	Type	Cable ID	Bias	Comments	PHYSICAL STATUS	Upload Photos
C0020205	PSB	213	✓	Direct channel through 1	✓	LOAD
C0020206	PSB	214	✓	Direct channel through 1	✓	LOAD
C0020207	PSB	215	✓	OK	✓	LOAD
C0020208	PSB	216	✓	OK	✓	LOAD
C0020209	PLB	217	✓	OK	✓	LOAD
C0020210	PLT	218	✓	OK	✓	LOAD
C0020211	PLT	219	✓	OK	✓	LOAD



Распределение амплитуд сигналов кластеров на p- и n- сторонах трекового модуля СВМ/ВМН



Residuals for 1-str. clusters Mod.#1 (left) and #3 (right)

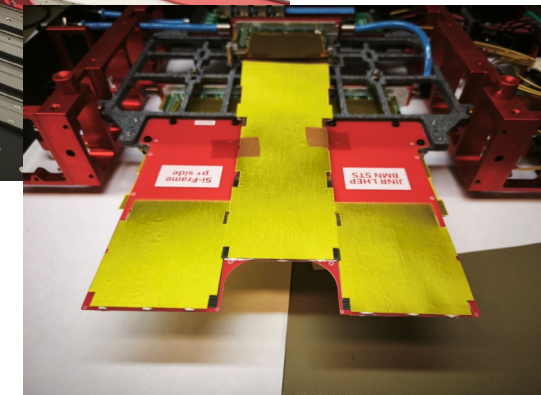
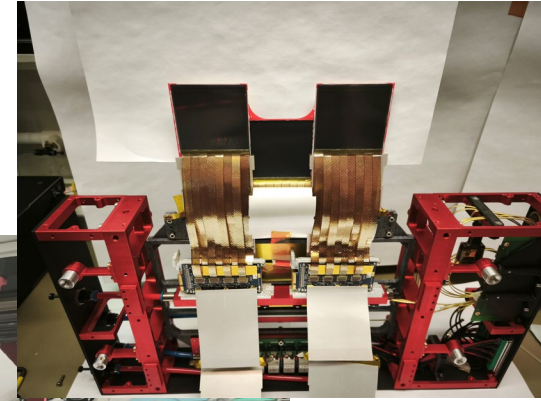
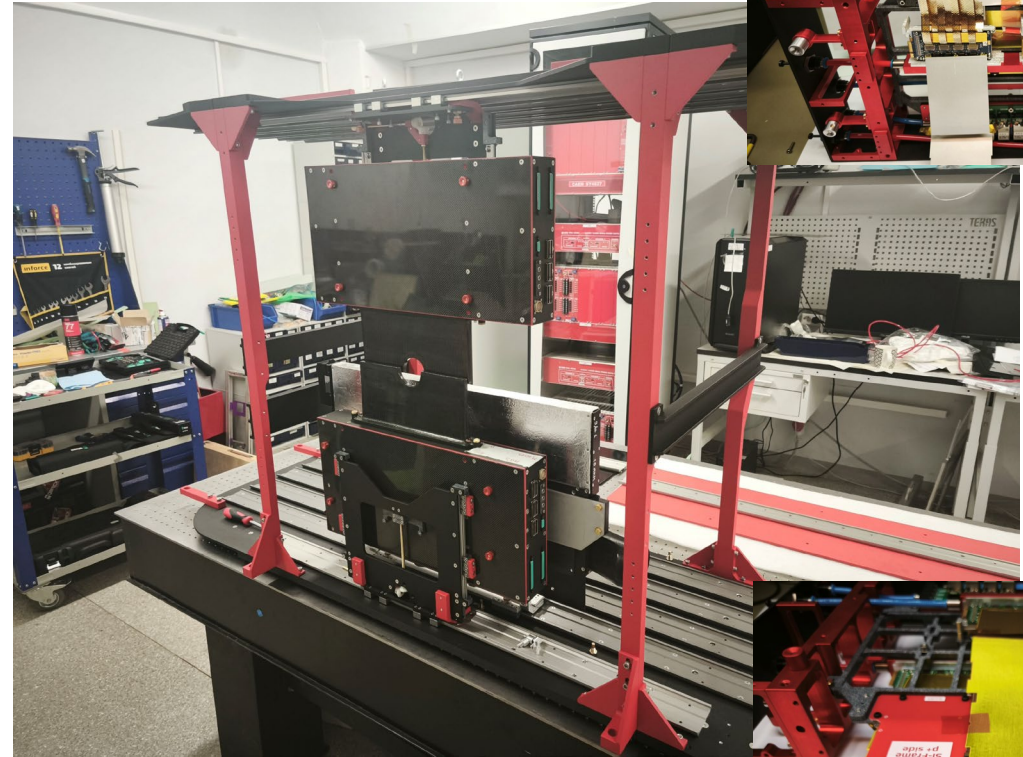


Telescope with 4 modules

- **Сигнал/шум: N(21-25), P(28-35), Z(8-16)**
- **Порог: 4600 - 6300 e-;**
- **Разброс усиления < 15%;**
- **Разрешение: $15,6 \pm 0.4 \text{ мкм}$.**

Результаты работы были высоко оценены на 135 сессии Ученого совета ОИЯИ и неоднократно представлялись на общелабораторных и методических семинарах ЛФВЭ ОИЯИ.

Материалы диссертационной работы опубликованы в **23** печатных работах, **4** из которых в рецензируемых журналах, включенных в список ВАК и/или международные базы данных Web of Science и/или Scopus [74, 80, 92, 95], по результатам работы был получен патент на изобретение № **281624**.



- **Разработана оригинальная конструкция кремниевого трекового модуля** на основе двухстороннего микрополоскового детектора с пространственным разрешением не хуже 15 мкм и возможностью удаленного от детектора (до 450 мм) размещения входной электроники считывания данных.
- **На практике доказана возможность изготовления** трекового модуля с использованием гибких аналоговых алюминиево-полиимидных микрокабелей, удовлетворяющих техническим требованиям кремниевых трековых модулей СВМ/ВМН. Разработана технология изготовления надежного электрического и механического соединения трехслойных алюминиево-полиимидных микрокабелей с контактными площадками кристаллов на кремниевом микрополосковом детекторе и СИМС для чтения данных.
- **Разработан метод ультразвуковой ЛАС сварки** гибких алюминиево-полиимидных микрокабелей, позволяющий соединить 2048 каналов микрополоскового детектора со считывающей электроникой на расстоянии до 450 мм.

- **Разработана и экспериментально проверена математическая модель** оценки качества сварного соединения 25 мкм проволокой на основе зависимости деформации проводника в процессе УЗ соединения. Данный алгоритм позволяет оценить качество ультразвукового соединения без применения разрушающего механического тестирования.
- Представлены **результаты пошагового функционального тестирования** трековых модулей во время изготовления, подтверждающие оптимизацию и высокий уровень отладки технологического процесса их изготовления.
- **Создана исследовательская инфраструктура** для изучения характеристик изготавливаемых кремниевых трековых детекторов в процессе производства. Адаптирована информационно-производственная система CMIS в ОИЯИ, открывающая возможность автоматизации контроля производства сложных детекторных систем на географически удаленных производственных площадках.



Основные параметры УЗС:

Диаметр проволоки: от 17 до 150 мкм;

Частота колебаний: 60-150 кГц;

Мощность УЗГ генератора: < 3 Вт;

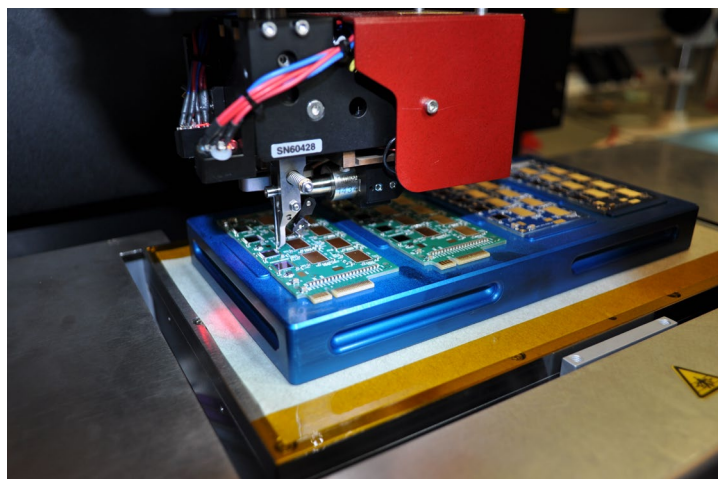
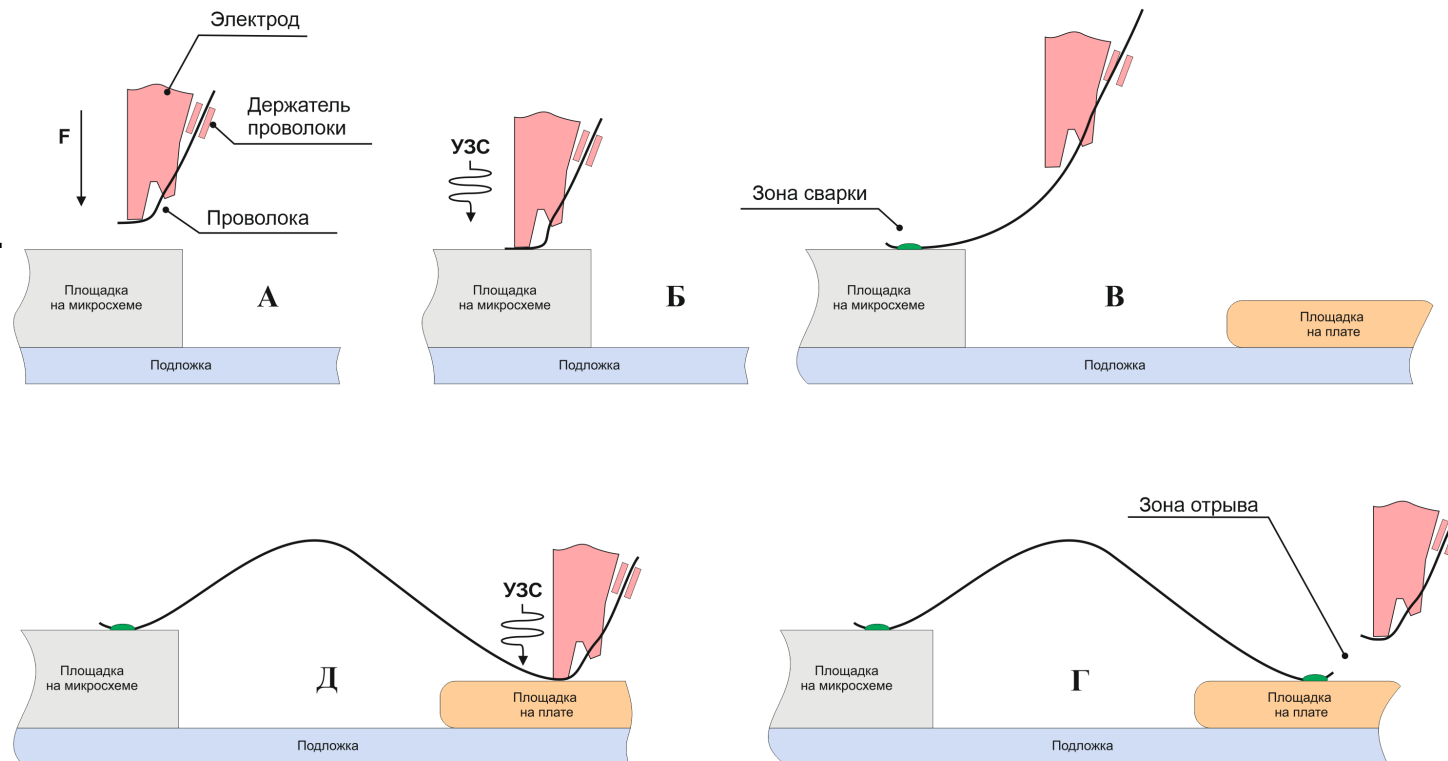
Усилие прижима: 0 - 250 гр.

Среднее время сварки: 25-150 мксек;

Амплитуда движения электрода: 1-5 мкм.

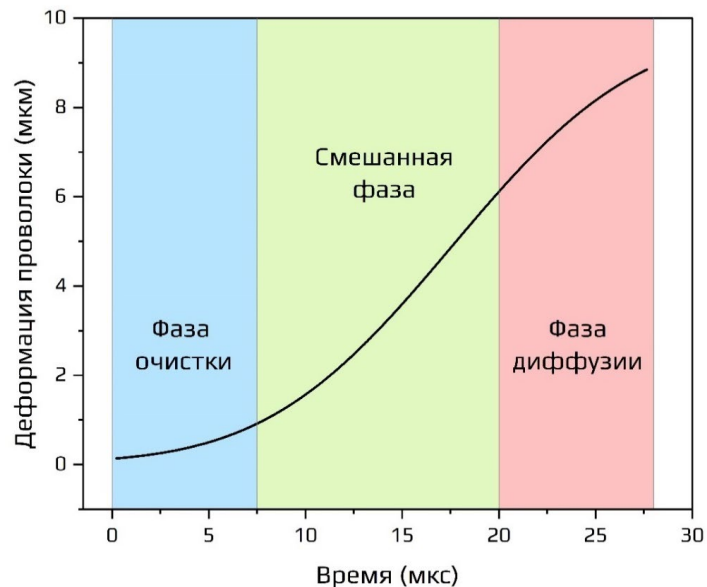
Два ключевых фактора, влияющих на качество сварки:

- Точный подбор параметров УЗ генератора;
- Правильное формирование петли.

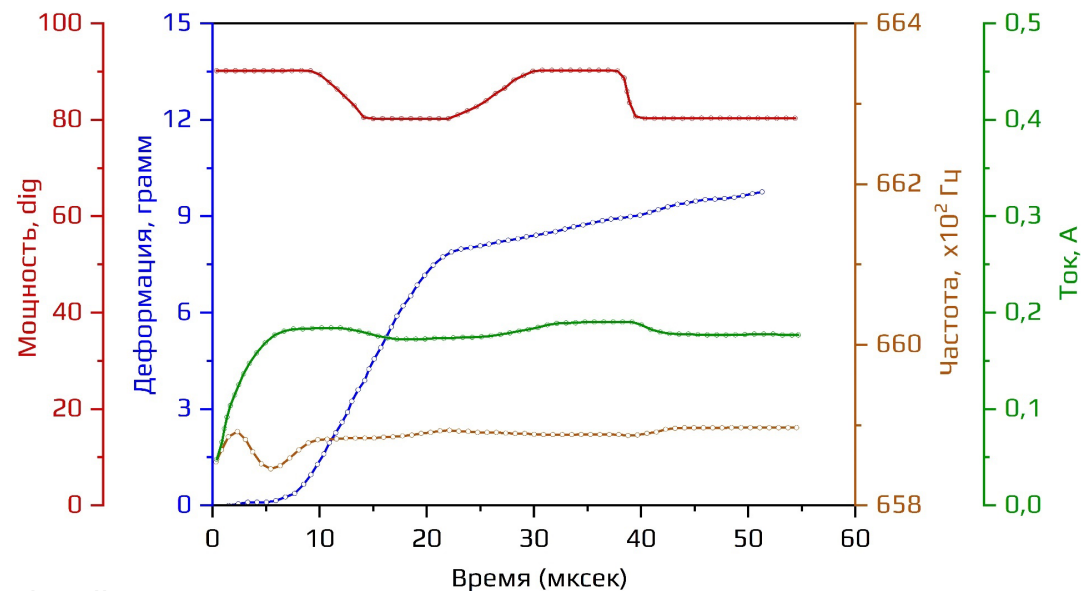


Деформация. Параметр изгиба проводника в месте контакта с электродом, измеряющийся во время ультразвуковой сварки. Измеряется при помощи тензодатчика, установленного на волноводе (в граммах). Позволяет оценить на сколько деформировалась проволока во время сварки между электродом и свариваемым объектом.

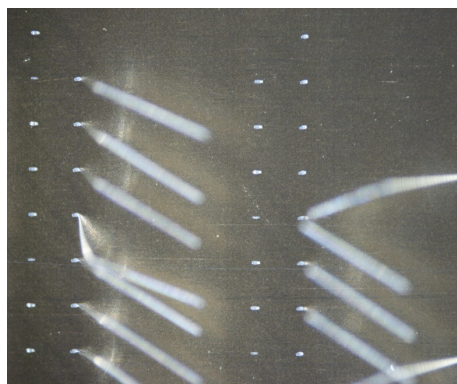
Идеальные параметры деформации проводника в процессе сварки



Результаты измерения параметров сварки Al проволоки 25 мкм



Набор тестовых образцов с разным качеством поверхности



А

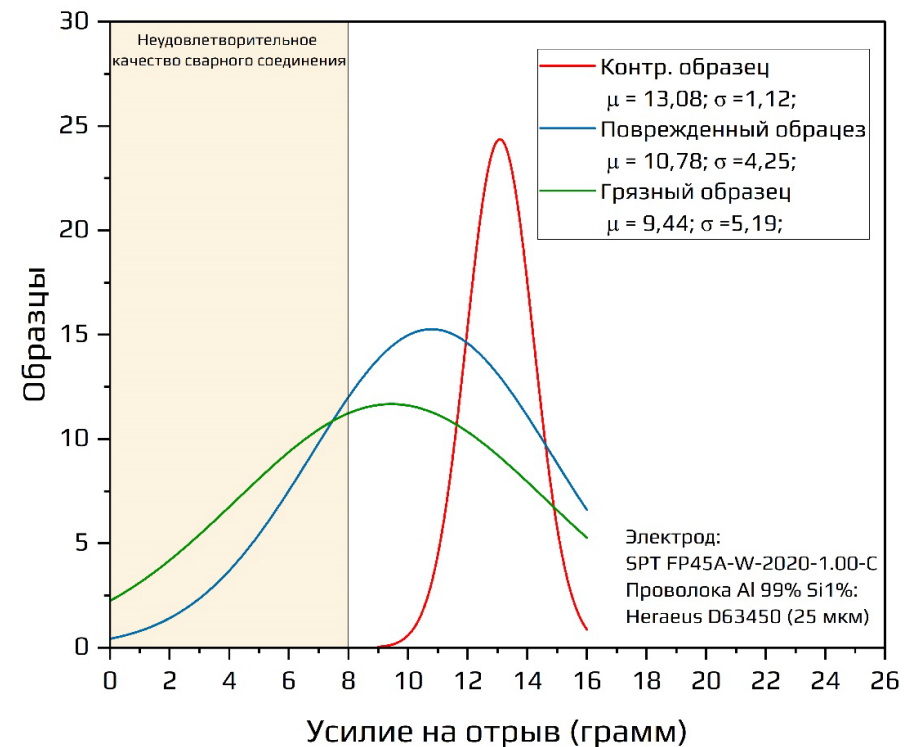


Б



В

- а) Контрольный образец;
- б) Образец с поврежденной поверхностью;
- в) Образец с остатками органических соединений



Распределение усилия на отрыв в зависимости от качества поверхности свариваемых образцов для 25 мкм проволоки

Преимущество конструкции трекового модуля:

- Используются специальный алюминиево-полиимидные микрокабели разной длины, что дает возможность располагать интегральные микросхемы входной электроники; считывания данных в периферийной области кремниевой трековой станции;
- Высокая радиационная прозрачность конструкции в области взаимодействия;
- Возможность проектирование развитой системы охлаждения;
- Планарная конструкция модуля позволяет создавать трековые системы большой площади.



Способы соединения микросэлектронных компонентов в точном приборостроении:

➤ **Термокомпрессионная сварка;**

Использования проволоки Au, высокое давление в точке сварки, подогрев до ~450 °С.

➤ **Термозвуковая сварка;**

Проволока Au или Cu (Покрытие гальваникой Au, Ag, Pd, Ni), использование формер газа N₂/H₂, формирование шарика разрядом.

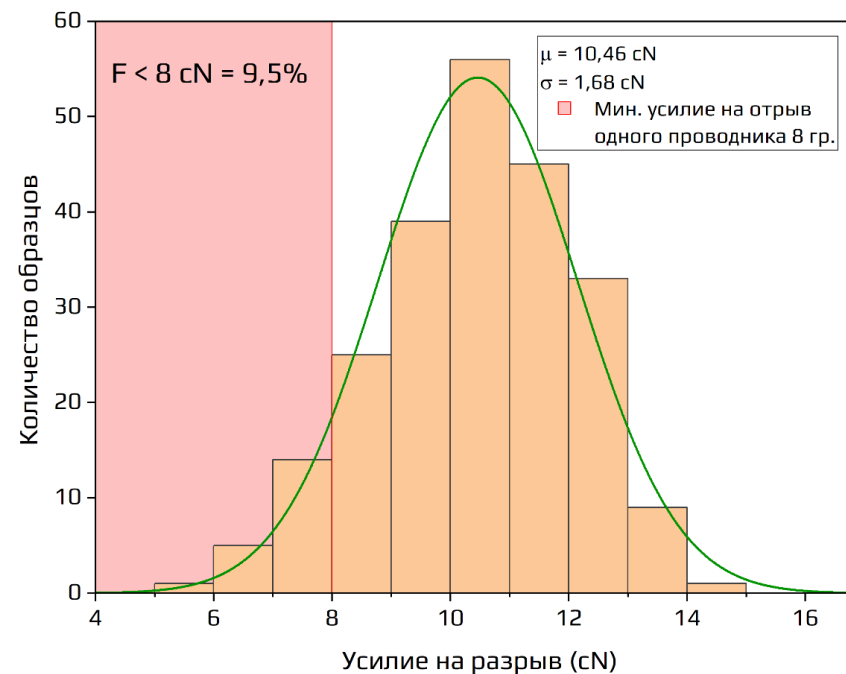
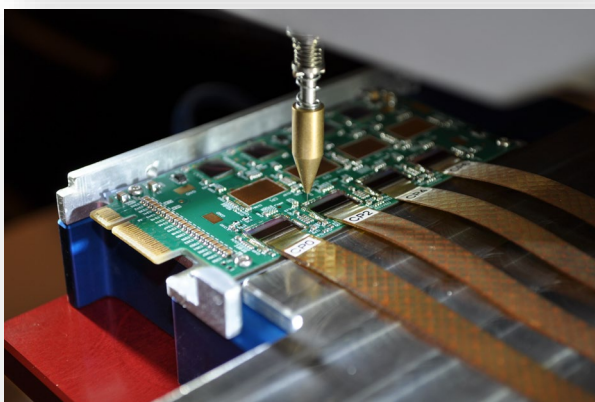
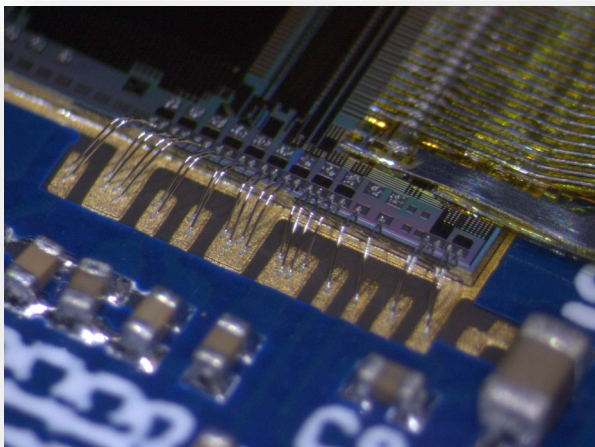
➤ **Ультразвуковая сварка;**

Сложность подбора параметров соединения.

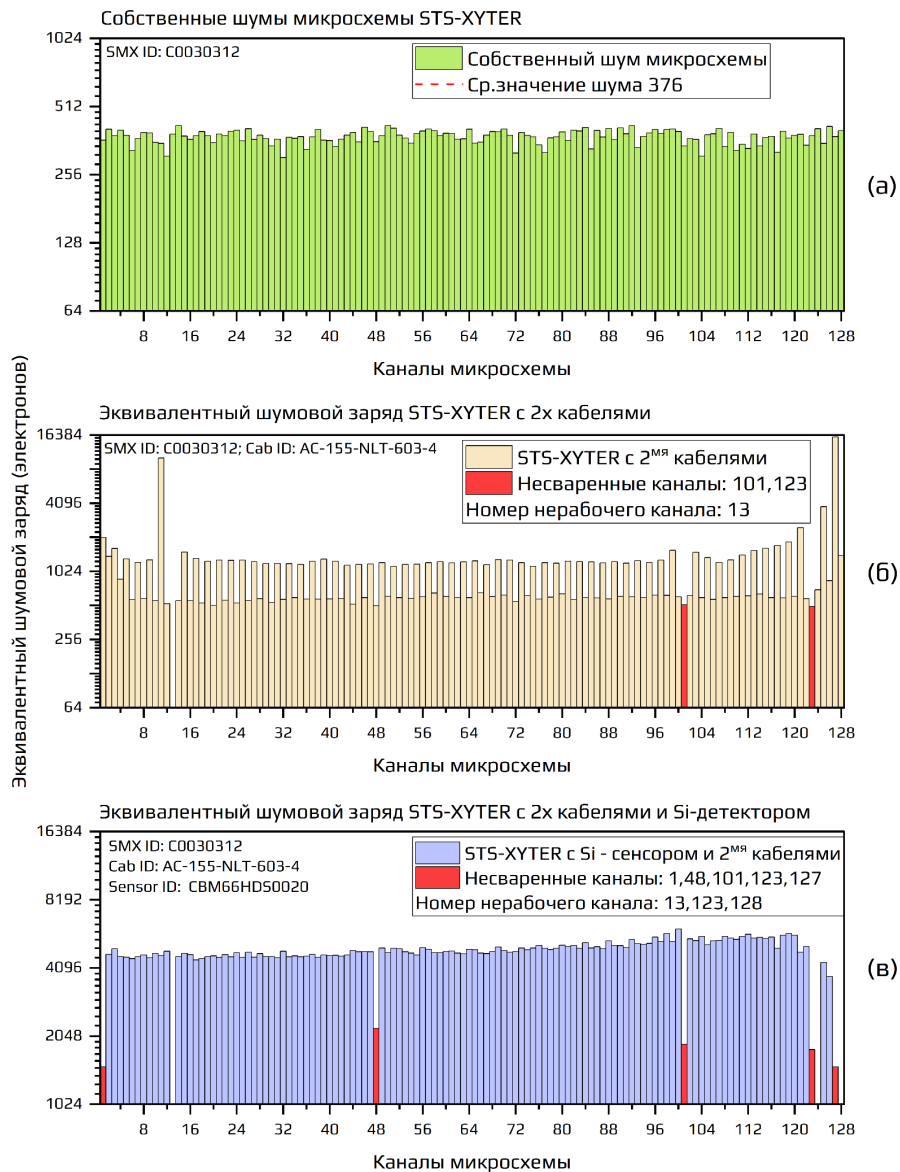
➤ **Лазерная пайка**

Высокая степень отчистки поверхностей материалов соединения.

Расчетное значение на отрыв отличается от полученного в процессе сборки на 15 %.



Принято считать, что минимальная прочность на разрыв качественного сварного соединения, полученного при помощи проволоки диаметром 25 мкм, составляет ~ 8 сН [Bond Lab CERN]



(а)

(б)

(в)

Результаты функциональных тестов в процессе изготовления компонента «Детектор – микрокабель – микросхема»:

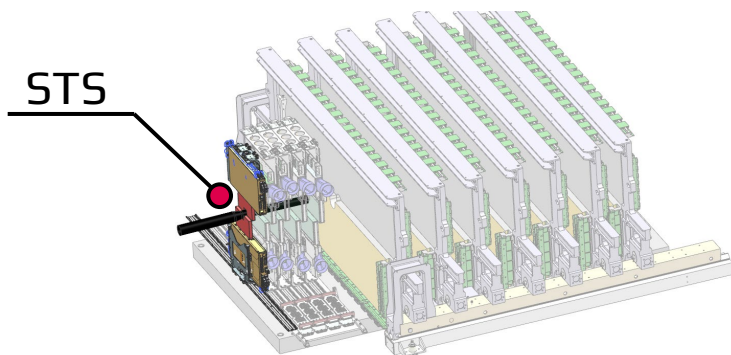
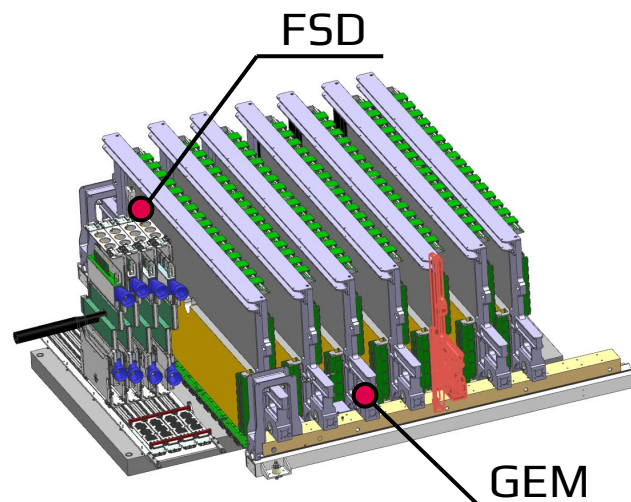
а) Результаты измерения собственного уровня шума в каналах микросхемы;

б) Результаты измерения уровня шумов в каналах микросхемы в подборке «Микрокабель – микросхема»;

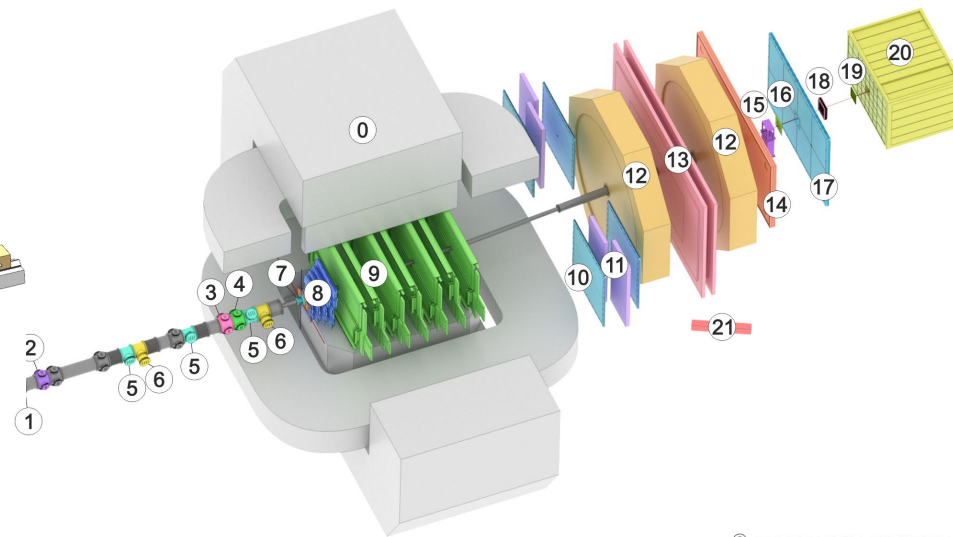
в) Результаты функционального тестирования полностью собранного компонента «Детектор – микрокабель – микросхема».

*A. Sheremetev, A. Kolozhvari, D. Dementev, M. Shitenkov, Yu. Murin
 "The Quality Assurance Test System for Assembly of STS Modules for the BM@N Experiment", Physics of elementary particles and atomic nuclei Vol. 20 p. 613-618*

Строение внутреннего трекера VM@N



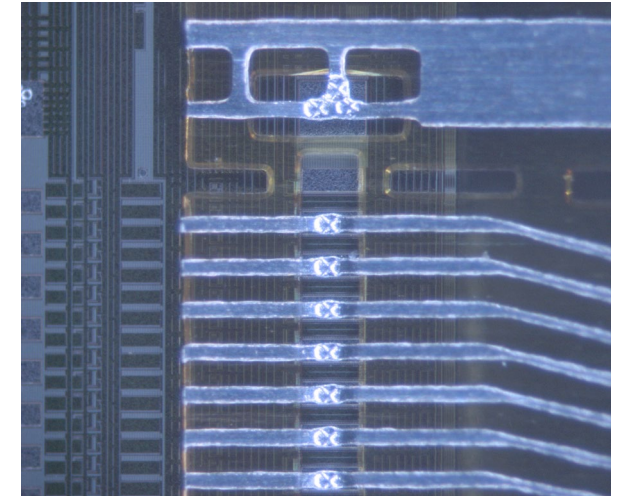
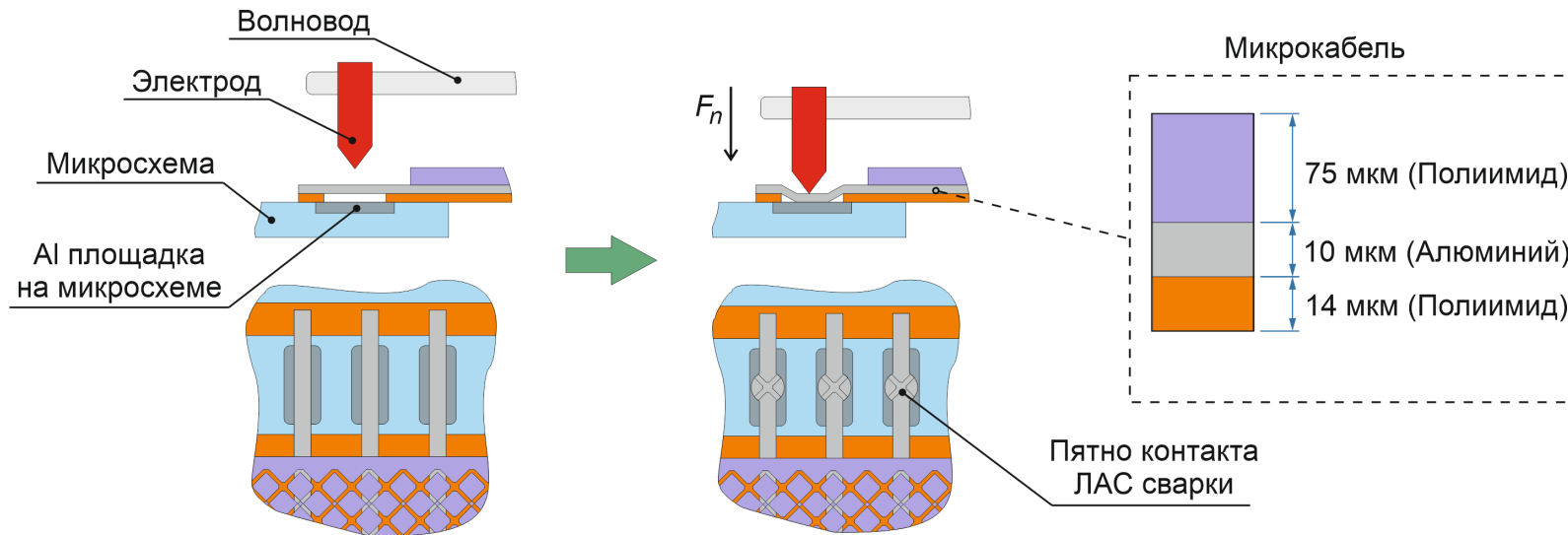
Конструкция установки в 2023



- Magnet SP-41 (0)
- Vacuum Beam Pipe (1)
- BC1, VC, BC2 (2-4)
- SiBT, SiProf (5, 6)
- Triggers: BD + SiMD (7)
- FSD, GEM (8, 9)
- CSC 1x1 m² (10)
- TOF 400 (11)
- DCH (12)
- TOF 700 (13)
- ScWall (14)
- FD (15)
- Small GEM (16)
- CSC 2x1.5 m² (17)
- Beam Profilometer (18)
- FQH (19)
- FHCaI (20)
- HGN (21)

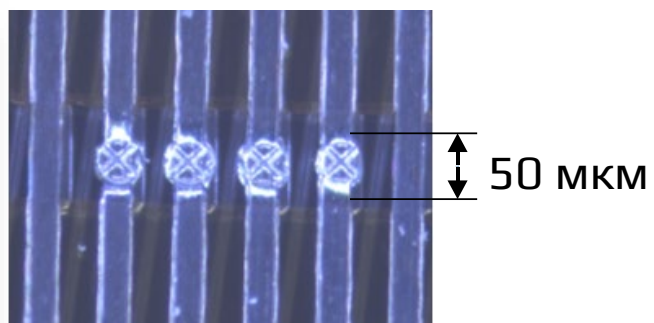
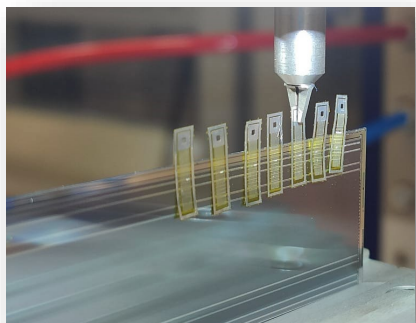
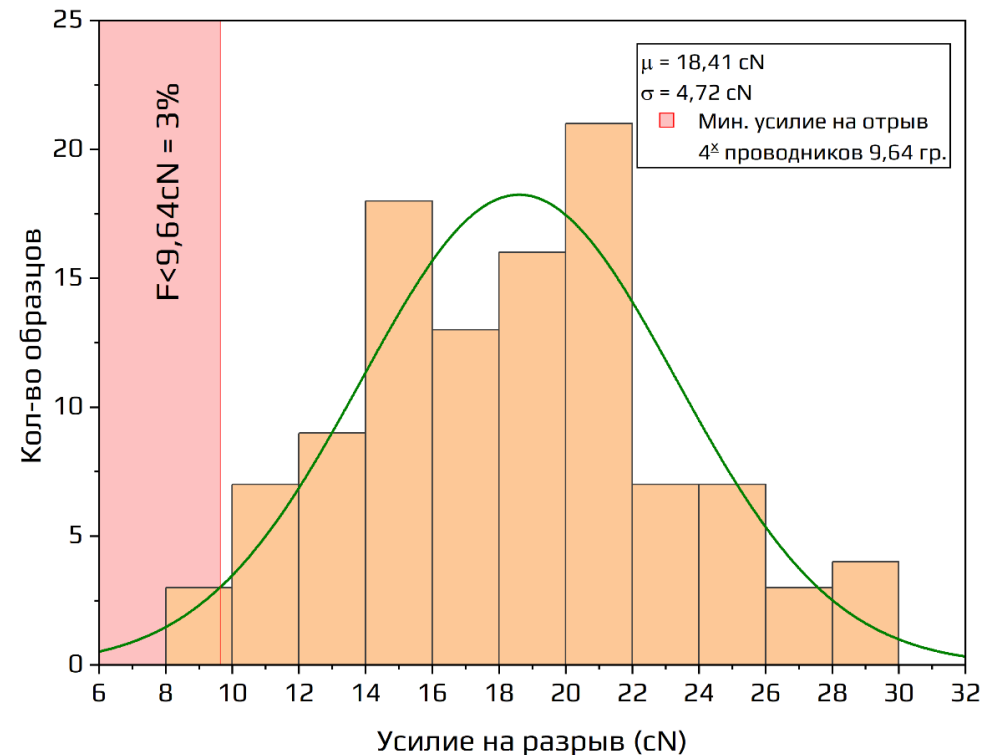
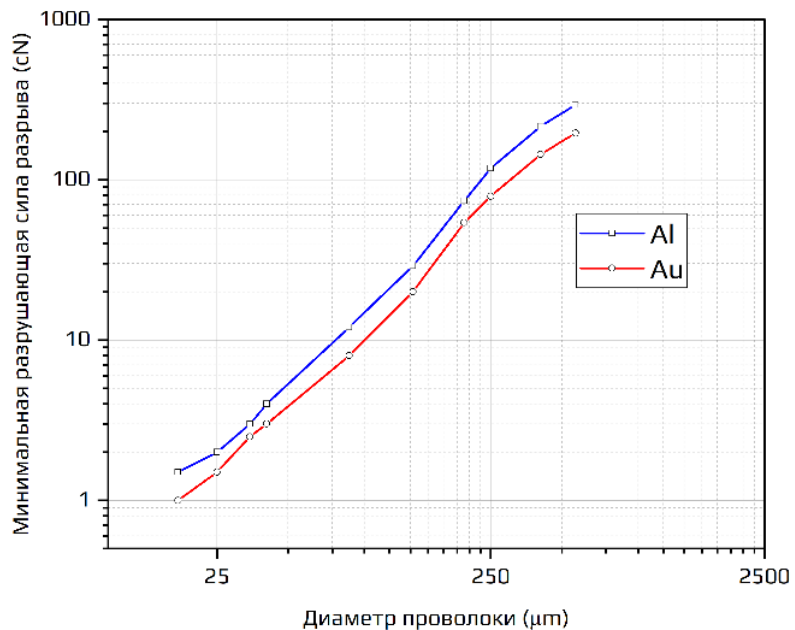
© BARANOV DMITRY

Линейная автоматическая ультразвуковая сварка (ЛАС)



- Positioning of the electrode;
- Deepening of the electrode to the level of the aluminum welding pad on the detector;
- УЗ сварка проводника толщиной 10 мкм шириной 40 мкм происходит за 80 мксек;
- Процесс ультразвуковой сварки останавливается при достижении либо времени, либо диапазона деформации.

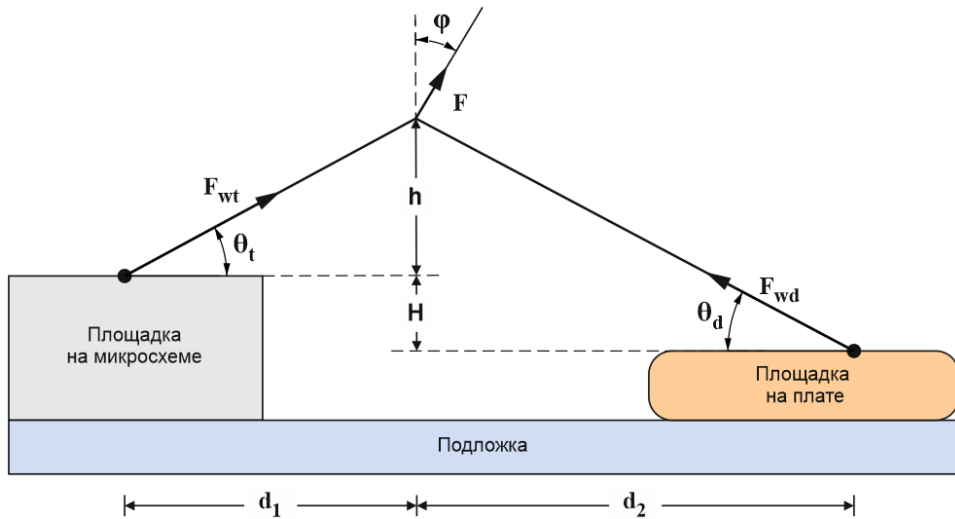
Стандарт MIL STD 883 2011.9



Среднее значение усилия на отрыв для тестовой зоны с четырьмя точками сварного соединения на кристалле составило $18,4 \pm 0,9$ сН, что соответствует усилию 4,6 сН для каждого проводника в образце

Технологический процесс изготовления одной стороны трекового модуля включает следующие основные этапы:

- Подготовку компонентов трекового модуля;
- Входной контроль (визуальная инспекция, измерение основных характеристик компонентов);
- Изготовление подборки **«Микросхема – микрокабель»**;
- Обрезку технологической зоны подборки «Микросхема – микрокабель»;
- Функциональное тестирование подборки «Микросхема – микрокабель»;
- Изготовление компонента **«Детектор – микрокабель – микросхема»**;
- Функциональное тестирование компонента «Детектор – микрокабель – микросхема»;
- Установку компонента **«Детектор – микрокабель – микросхема» на плату** считывающей электроники;
- Функциональное тестирование компонента «Детектор – микрокабель – микросхема», установленного на плате считывающей электроники.



$$F_{wt} = F \left[\frac{1 - \varepsilon}{\left(1 + \frac{\varepsilon H}{h}\right)} \times \left(1 + \frac{\varepsilon^2 d^2}{h^2}\right)^{1/2} \right],$$

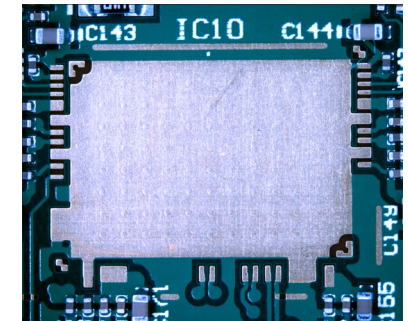
$$F_{wd} = F \left[\frac{\varepsilon \left(1 + \frac{H}{h}\right)}{1 + \frac{\varepsilon H}{h}} \times \left(1 + \frac{(1 - \varepsilon)^2 d^2}{(h + H)^2}\right)^{1/2} \right],$$

Идеальные геометрические условия:

- Вектор сил $\vec{F}_{wt} = \vec{F}_{wd}$
- Угол растягивания связи по отношению к подложке $\varphi = 0^\circ$
- Отношение расстояние между точками связи $\varepsilon = 1/2$
- В реальных условиях УЗС:
- Вектор сил $\vec{F}_{wt} \neq \vec{F}_{wd}$
- Точки сварки находятся на разных уровнях $1/4 \leq \varepsilon \leq 3/4$
- Положение инструмента для отрыва $\varphi \neq 0$

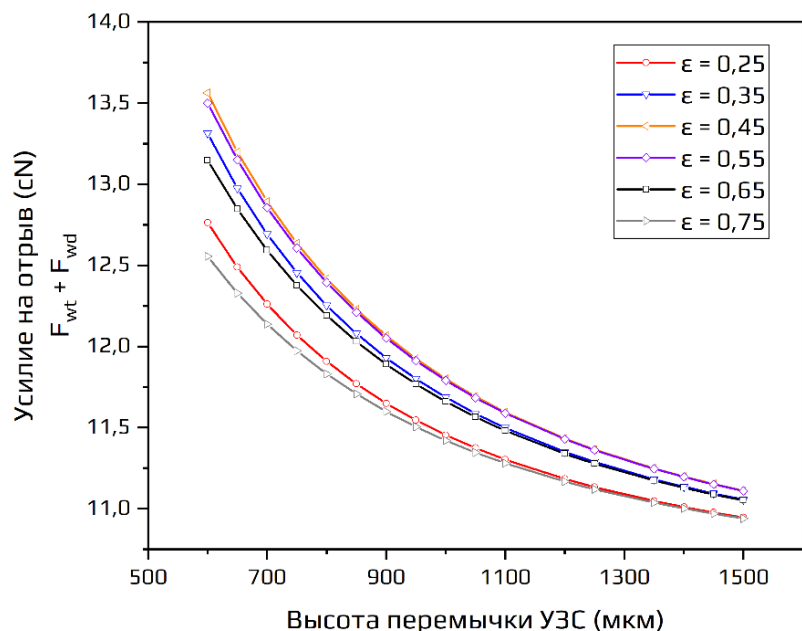
Расстояние: $d_1 + d_2 \leq 1150$ мкм

Высота микросхемы: $H = 200$ мкм



Расчет оптимальных геометрических параметров ультразвукового соединения проволокой

Наибольшее значение усилия на отрыв при $\epsilon = 0,45$

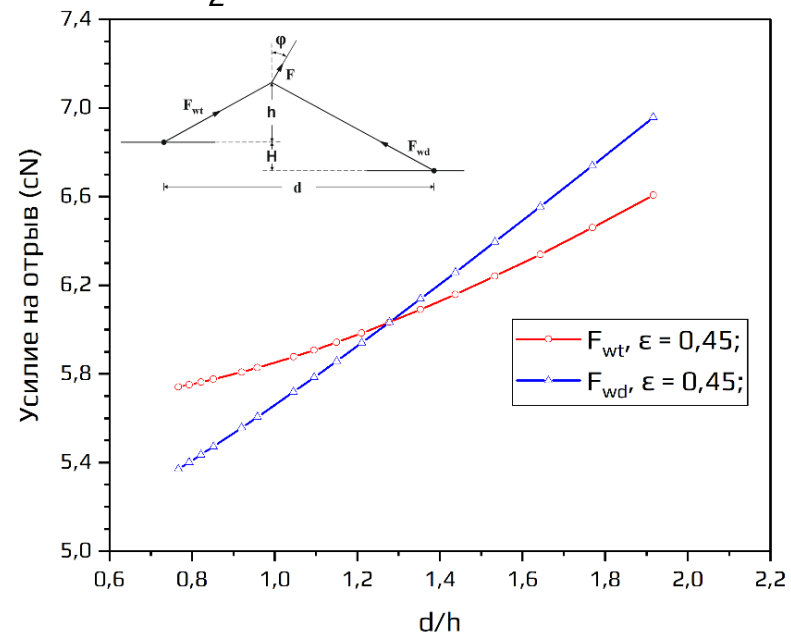


Зависимость усилия на отрыв от высоты перемычки при разных отношениях между двумя точками связи

Одинаковое распределение усилий на отрыв:

$$\vec{F}_{wt} = \vec{F}_{wd} = 6,032 \text{ сН}, d/h = 1,27.$$

$$d_1 = 402 \text{ мкм}, d_2 = 748 \text{ мкм}$$



Зависимости усилия отрыва в точках \vec{F}_{wt} и \vec{F}_{wd} от геометрических параметров петли сварки при $\epsilon = 0,45$ и угле натянутой проволоки по отношению к подложке ($\varphi = 0^\circ$).