

Разработка и создание координатных плоскостей на основе двухсторонних стриповых кремниевых детекторов

Замятин Н.И.

Объединенный Институт Ядерных Исследований (г. Дубна)

Современная ситуация по разработке и изготовлению планарных Si-детекторов в России:

- 1980-е и 2000-е годы в России на технологической базе НИИ МВ им. Малинина и НПО ЭЛМА (г. Зеленоград) была разработана и создана технология планарных кремниевых детекторов на пластинах $\varnothing 100$ мм. Группу высококвалифицированных экспертов по материаловедению, физике ППД, технологии, топологии возглавляли: А.И.Сидоров, Ю.Ф.Козлов, С.А.Голубков, К.Коньков, и др. Инициаторами и Заказчиками разработок детекторов для экспериментов ФВЭ и ЯФ были: НИЯФ МГУ, ОИЯИ, ФТИ им. А.Ф.Иоффе, СНИИП и др.;
- 2020 год – была остановлена в НИИ МВ единственная линия детекторной технологии на пластинах $\varnothing 100$ мм;
- 2020 год - была успешно освоена в АО ЗНТЦ (г. Зеленоград) детекторная технология на новой линии с пластинами $\varnothing 150$ мм, что позволяет сейчас разрабатывать и изготавливать в РФ современные планарные кремниевые детекторы

С чего начинается разработка планарного Si-детектора:

- Необходимое условие успеха: наличие в экспериментальной группе (1÷2) экспертов по физике, технологии п/п и детекторов с практическим опытом применения низко шумящей детекторной электроники (для обсуждения на профессиональном уровне с разработчиками детекторной фирмы);
- Сформулировать назначение детектора: физическая задача, что измеряется: (координата, время, ΔE , E и др.), особые требования: (t° , радиационные условия, длительность работы и др.);
- Составить спецификацию на детектор - составление и согласование основных параметров на разрабатываемый детектор проводится с экспертами Поставщика детекторов (параметры, топология ДССД/ОССД, толщина детектора, контакты для зондов и УЗС, толщина металлизации, способ резки и др.);

В мире существует несколько известных детекторных фирм:

НРК(НАМАМАТСУ); MS(Micron-Semiconductors); CANBERA; SINTEF; CGS-T; Китай; Россия (ЗАО ЗНТЦ, Зеленоград);

- Составить спецификацию на исходные FZ-Si-пластины, где указываются основные параметры закупаемых пластин: кристаллографическая ориентация, диаметр, толщина, качество поверхности, тип проводимости, удельное сопротивление, время жизни н.н.з., количество пластин и выбор Поставщика пластин (сделать запрос на КП);

Существует несколько известных мировых Производителей FZ-Si пластин Ø150мм: *Wacker; Topsil; Siltronix; SiMat; Китай*

Примеры вариантов спецификации для FZ-Si-пластин и для 2-х сторонних стриповых детекторов (ДССД)

Спецификация на пластины высокоомного монокристаллического кремния

Параметр	Единицы измерения	Значение
Метод выращивания		<u>Бастигельная</u> зонная плавка (FZ)
Диаметр	мм	150±0.5
Ориентация		<111>±1°
Тип проводимости/ легирующая примесь		n/Фосфор
Сопротивление	Ом*см	10 000 – 18 000
Время жизни неосновных носителей заряда	мкс	≥1000
Концентрация углерода	см ⁻³	<2×10 ¹⁴
Концентрация кислорода	см ⁻³	<2×10 ¹⁴
Базовый срез		Согласно стандартам SEMI
Вторичный срез		Отсутствует
Толщина	мкм	750±10
Обработка поверхности		Двусторонняя полировка
Разброс толщины по пластине (TTV)	мкм	≤7
Прогиб/коробление	мкм	≤30
Обработка кромки		Согласно стандартам SEMI
Количество приобретаемых пластин	шт.	150

Спецификация на двухсторонние микростриповые DSSD:

- двухсторонние микростриповые детекторы имеют структуру для съема сигнала по постоянному току (DC-coupling, без интегральных резисторов и конденсаторов на детекторе);

- толщина детекторов – 320^{+15/-15} мкм;

- топология детекторов:

- прямоугольник (93×63×0.32) мм³ (параллельные линии реза p+ стрипы и наклонные под углом 2.5° n+ стрипы);

- число годных детекторов – 50 шт.;

- габариты детекторов по центру дорожек реза - (93000×63000)^{0/-50} мкм;

- на p+ стороне детектора расположены 640 стрипов (p+), параллельных вертикальной линии реза, с шагом 95 мкм и длиной 90870 мкм;

- на n+ стороне детектора расположены 603 наклонных n+ стрипов под углом 2.5° относительно p+ стрипов со средним шагом 107,25 мкм и переменной длиной;

- наклон стрипов n+ – слева направо;

- полный темновой ток детектора (93×63×0.32) мм³ при одновременной подаче напряжения обратного смещения на все стрипы – не более 1,5 мкА/+20° при 150 В;

- напряжение полного обеднения детектора – не более 50 В;

- число стрипов для одного детектора с повышенными значениями темновых токов (более 20 нА/150 В/+20°) не должно превышать - 25 штук (3%);

- толщины высоколегированных p+ и n+ слоев детектора могут быть более 1 мкм, (оптимизировать для получения максимального напряжения пробоя и минимальных токов);

- толщина Al-металлизации равна - (0.7±1.0) мкм (под УЗ-сварку);

- обе стороны детектора должны быть без пассивации (Al-металлизация после вакуумного напыления);

- размеры контактных площадок - 75×150 мкм;

- детекторы изготавливаются на пластинах из БЗП (FZ) n-типа кремния Ø150±0,5мм;

Основные статические параметры (ВФХ и ВАХ) двухсторонних стриповых детекторов размером $(93 \times 63 \times 0.3) \text{ мм}^3$ и с топологией $(640\text{p}+/640\text{p}+)$, изготавливаемых в АО ЗНТЦ (г. Зеленоград)

Рис.1. Обратная ВФХ $(1/C^2) = f(V_{op})$, (pF^{-2}) :

- Определена величина полного обеднения: $V_{fd} < 35 \text{ В}$;
- Рабочее напряжение должно быть не менее: $V_{op} > 40 \text{ В}$

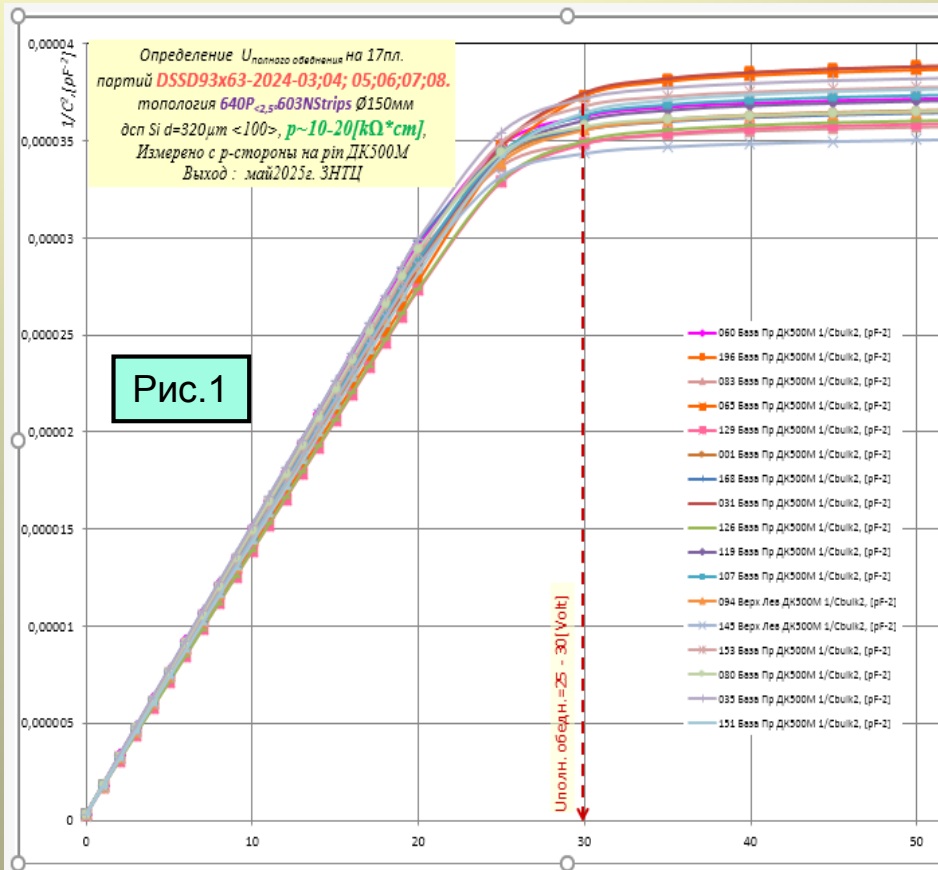
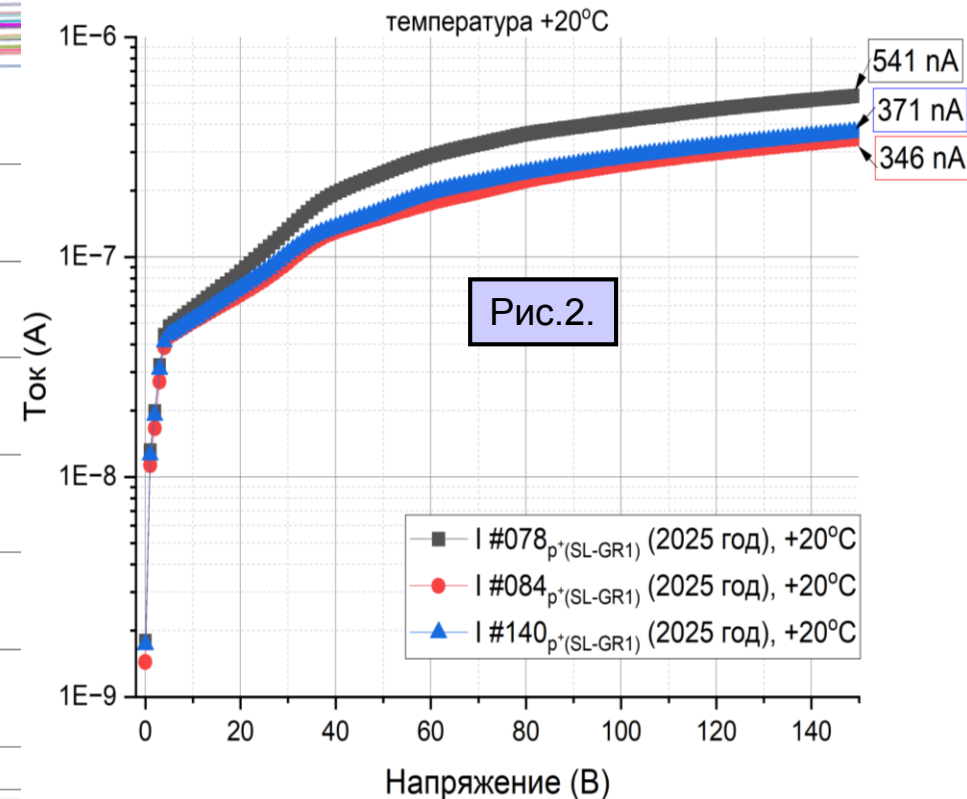


Рис.2. Обратная ВАХ = $(I-V)$:

- показывает низкую величину $(541 \div 346) \text{ нА}/150 \text{ В}$ генерационного тока (шум), в среднем менее $1 \text{ нА}/\text{стрип}/+20^\circ$ при $V_{op} = 150 \text{ В}$



Топология микрострипового детектора (93×63×0.3)мм³/(640n+/640p+), применяемого в вершинном трекере VM@N

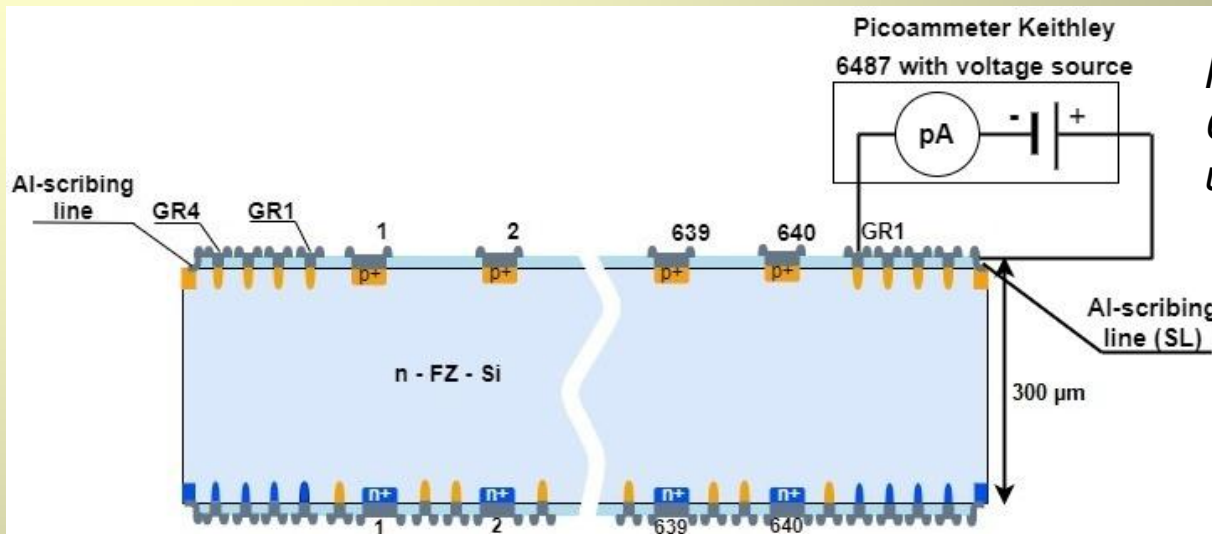
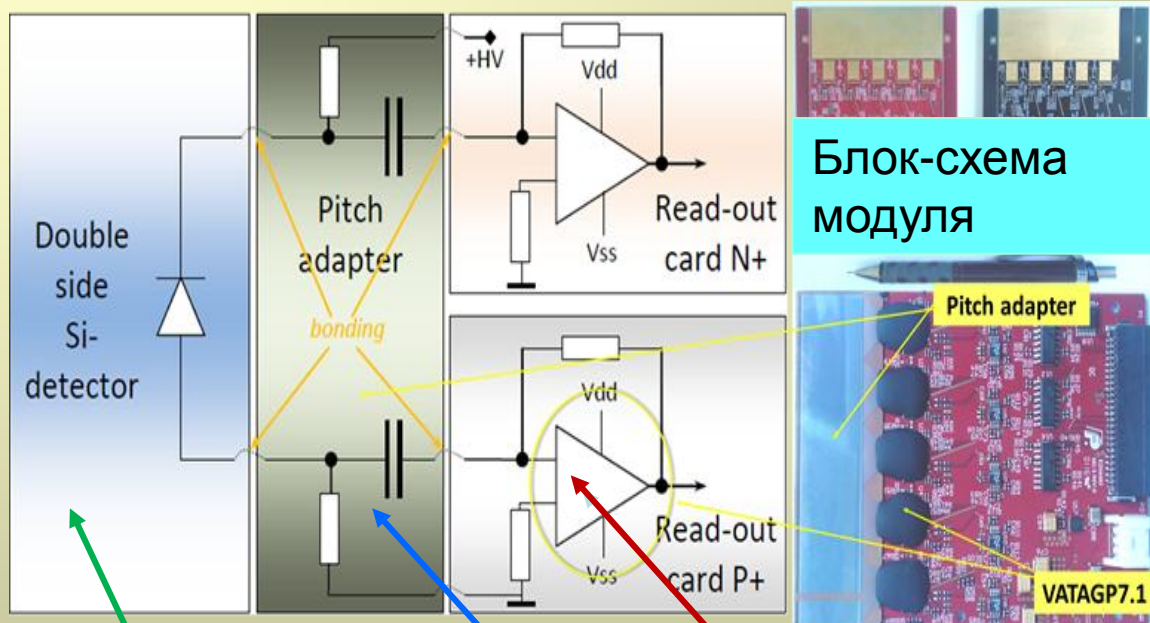


Рис.3. Сечение детектора 640n+/640p+ и схема измерения тока детектора

- перед сборкой детектора необходим входной контроль - измерение обратного тока детектора);
- ток детектора измеряется с помощью двух зондов в цепи охранные кольцо (GR1) ÷ линия реза (SL);
- процесс сборки координатного модуля включает следующие тесты:
 - шум пьедесталов (ENC_0) после разварки ИС-128к (контакты, к.з., шумящие каналы);
 - шум пьедесталов (ENC_{0+PA}) после разварки питч-адаптера PA-640 (контакты, к.з., большой ток конденсаторов);
 - шум пьедесталов ($ENC_{0+PA+Si}$) после разварки Si-детектора (контакты, к.з., большой ток (шум) стрипов);
 - тест собранного модуля с β -источником

Создание двух-координатного модуля (640X+640Y) начинается с разработки блок-схемы, принципиальных схем и технологии сборки



Блок-схема модуля

Один двух-координатный модуль содержит 1280 каналов (стрипов), попарно объединенных между собой от двух детекторов. Все 1280 стрипов, по 640 на n+ и p+ сторонах детектора, соответственно, подключаются через PA-640 на входы 10-ти ИС (VATAGP7.1)



Рис.4. Вид модуля со стороны n+стрипов

Процесс УЗ-сварки ИС-VATAGP-7.1 и стрипов детектора с питч-адаптером (РА-640)

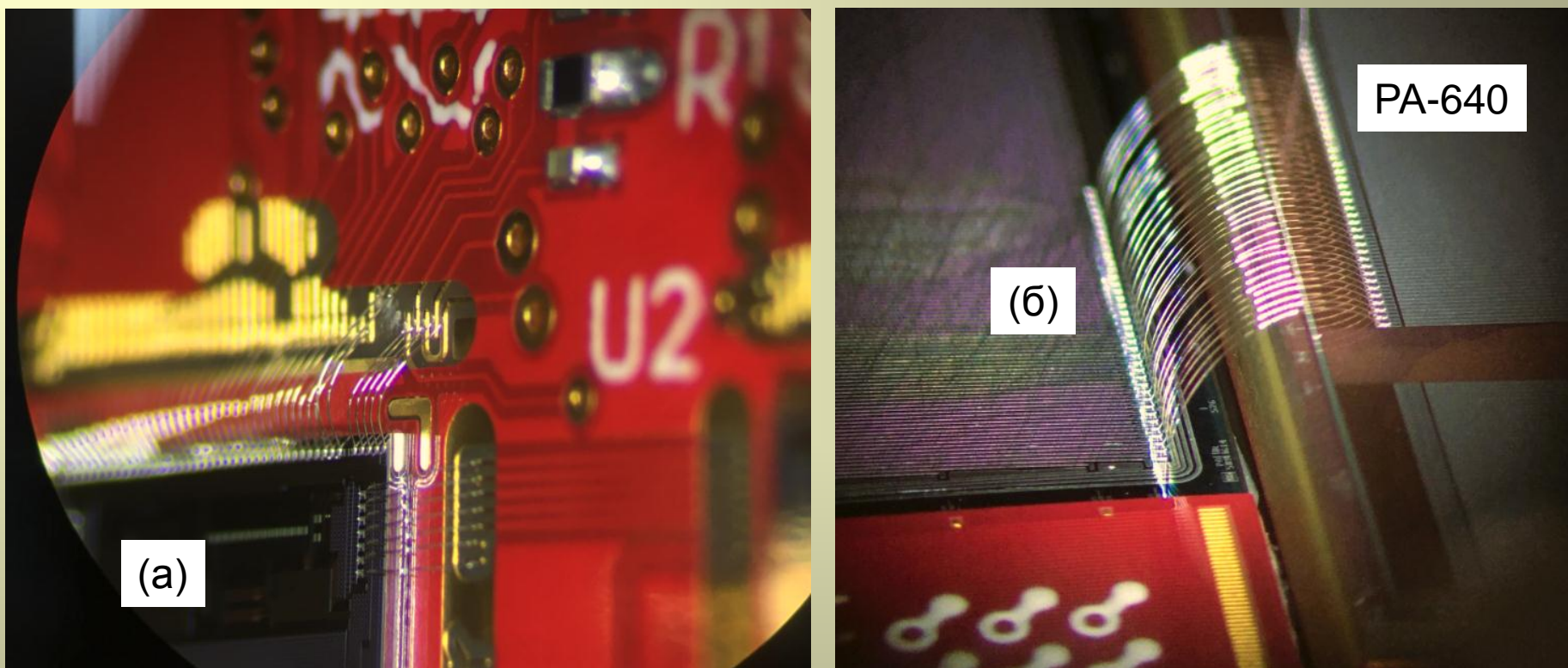
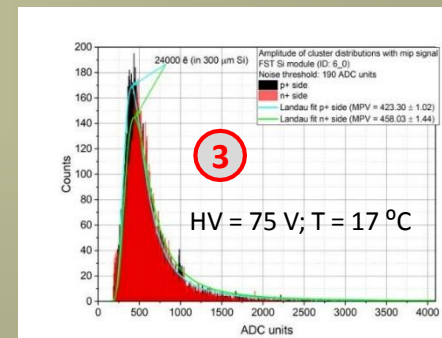
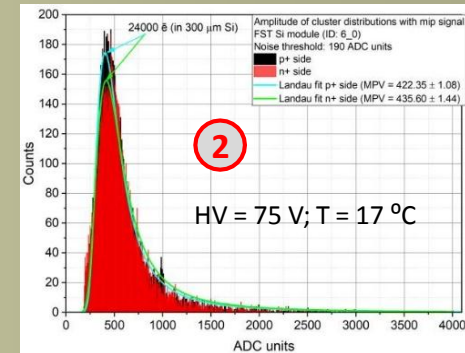
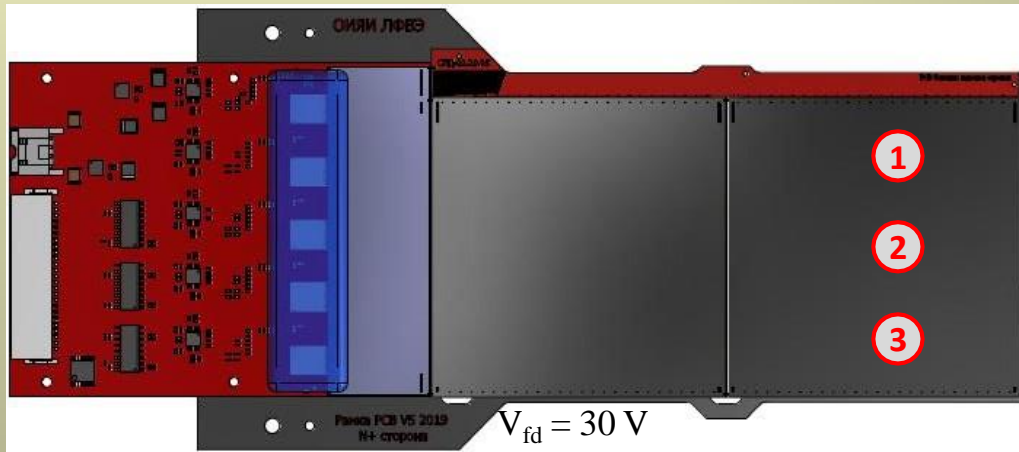
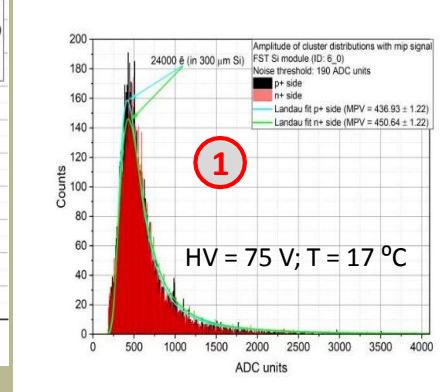
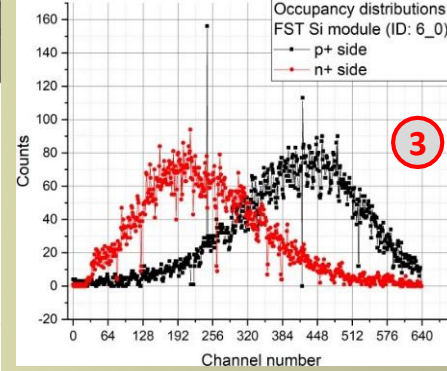
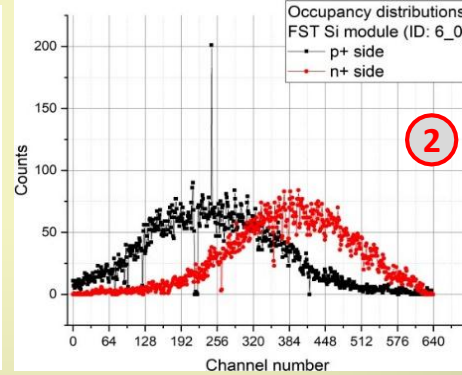
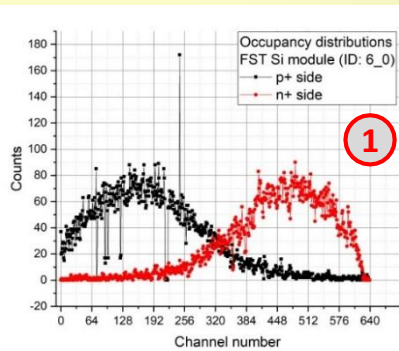


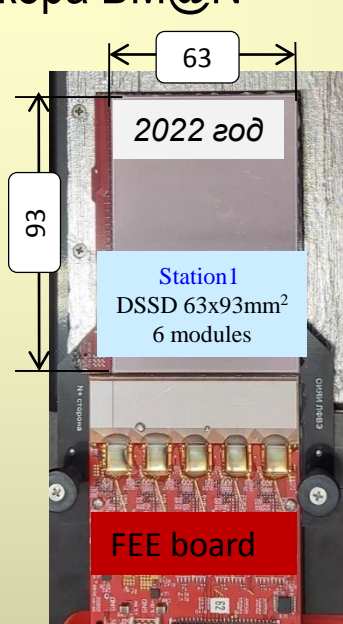
Рис.5. (а) - соединение методом УЗС контактов кристалла ИС-VATAGP-7.1 с контактами на печатной плате; (б) - соединение $n+$ стрипов полной длины (наклонные под углом 2.5°) с контактами РА-640, стрипы с неполной длиной разварены на боковую плату для соединения с контактами РА-640, сварка выполнена Al-проволокой, $\varnothing 25$ мкм.

Последний тест модуля в процессе сборки: измерение β - спектров в 3-х положениях источника на модуле и загрузка по стрипам



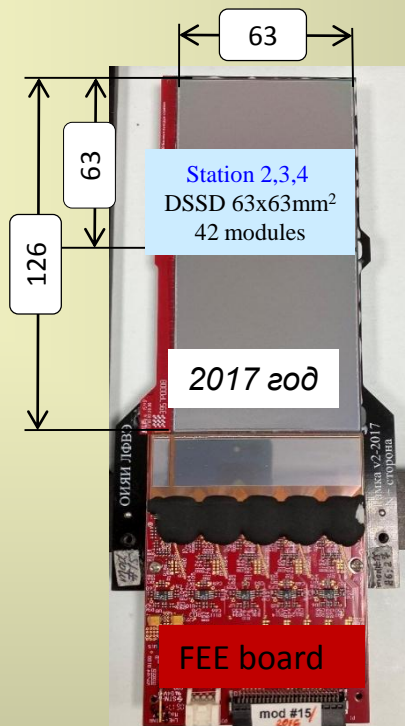
Module ID	<ENCP+> \bar{e} RMS	<ENCn+> \bar{e} RMS	SNR p+	SNR n+	Bad channels ratio, %
6_0	1963.60	2 237.88	12.22	10.72	1.25

Разработано и изготовлено три типа размеров двух-координатных Si-модулей для трекера BM@N



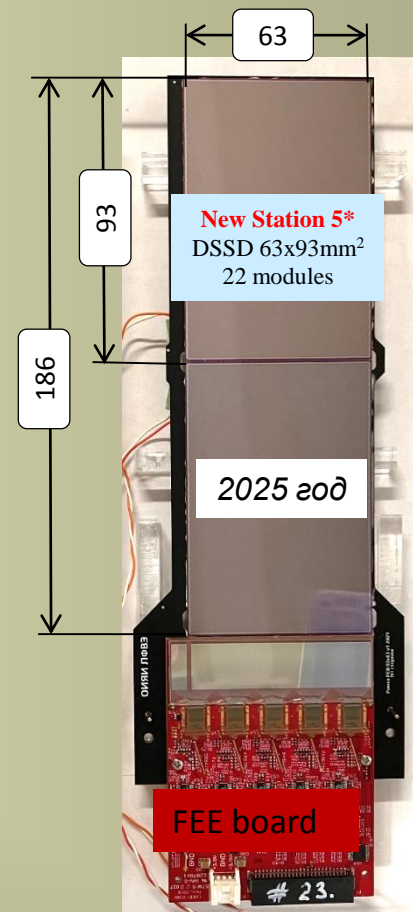
Габариты детектора: (63×93×0,3) mm³ (на 6" – FZ-Si-n пластинах)

Топология: двух-сторонний стриповый детектор (DSSD);
 стрипы соединены с ИС по переменному току/AC;
 шаг p⁺ стрипов: 95 μm;
 шаг n⁺ стрипов: 107,1 μm;
 угол между p⁺/n⁺ стрипами: 2.5°;
 Число стрипов DSSD: 640p⁺+ 603n⁺;
 число стрипов в модуле: 640p⁺+ 603n⁺



Габариты детектора: (63×63×0,3) mm³ (на 4" – FZ-Si-n пластинах);

Топология: двух-сторонний стриповый детектор (DSSD);
 стрипы соединены с ИС по переменному току/AC;
 шаг p⁺ стрипов: 95 μm;
 шаг n⁺ стрипов: 103 μm;
 угол между p⁺/n⁺ стрипами: 2.5°
 Число стрипов DSSD: 640p⁺+ 614n⁺;
 Число стрипов в модуле: 640p⁺+ 640n⁺



Габариты детектора: (63×93×0,3) mm³ (на 6" – FZ-Si-n пластинах);

Топология: двух-сторонний стриповый детектор (DSSD);
 стрипы соединены с ИС по переменному току/AC;
 шаг p⁺ стрипов: 95 μm;
 шаг n⁺ стрипов: 103 μm;
 угол между p⁺/n⁺ стрипами: 2.5°;
 Число стрипов DSSD: 640p⁺+ 603n⁺;
 Число стрипов в модуле: 640p⁺+ 640n⁺

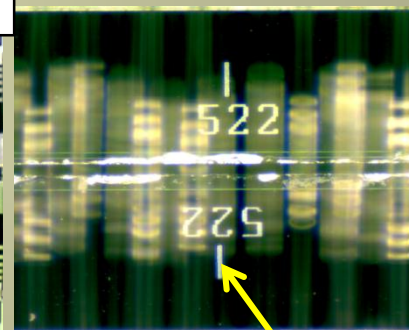
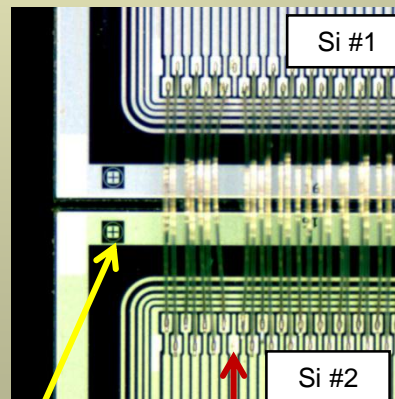
* Сборка детекторов в модуль проводится на точном кондукторе по совмещению линий реза кристаллов с точностью +/- 10 мкм;

* Реальное положение собранных Si-детекторов в модулях относительно реперных точек каждой плоскости проводится на бесконтактном видеоизмерительном микроскопе «NORGAU» NVM II-5040D.



«NORGAU» NVM II-5040D	
Диапазон перемещений по осям X и Y (мм)	500 x 400
Диапазон перемещений по оси Z (мм)	250
Допускаемая абсолютная погрешность линейных измерений по осям X и Y (мкм)*	$\pm(2.5+L/200)$
Допускаемая абсолютная погрешность линейных измерений по оси Z (мкм)*	$\pm(2.5+L/100)$

* L –измеряемая длина в мм



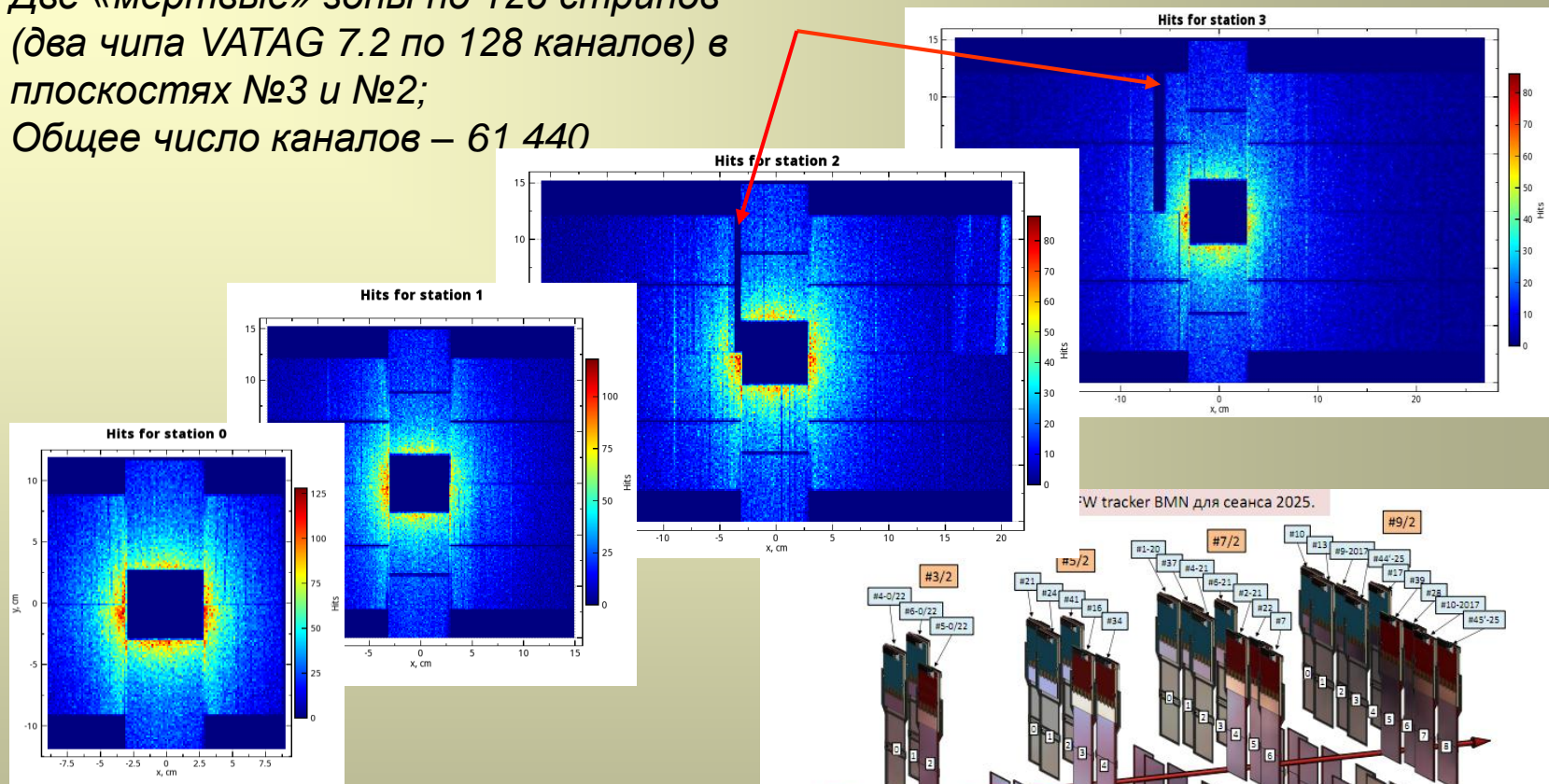
реперный крест детектора

отсутствие сварки

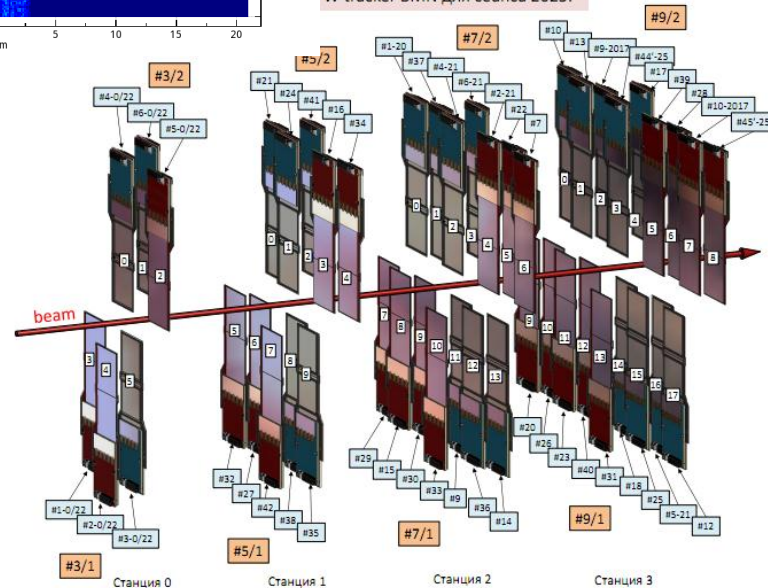
Топологические знаки на детекторе можно использовать в качестве реперов

Конфигурация передней части Si-трекера состояла из 4-х плоскостей (сеанс BM@N – 2026) :

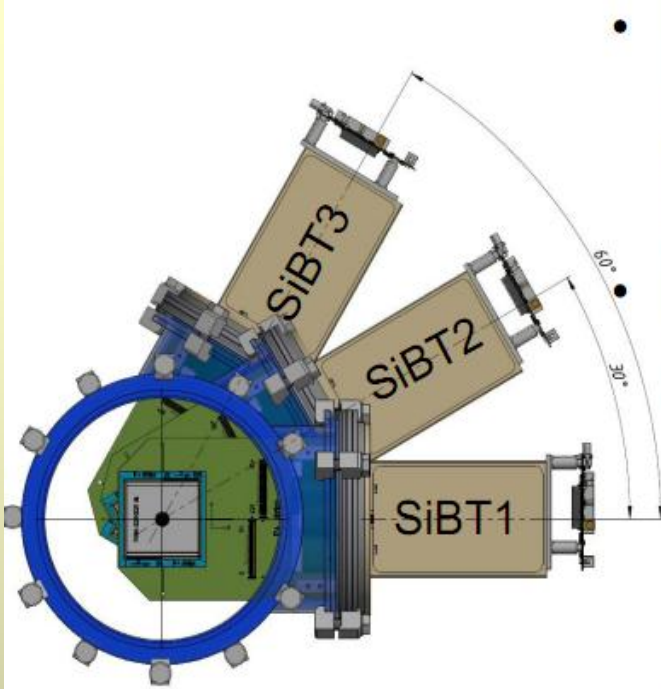
- Две «мертвые» зоны по 128 стрипов (два чипа VATAG 7.2 по 128 каналов) в плоскостях №3 и №2;
- Общее число каналов – 61 440



W tracker BMN для сеанса 2025.

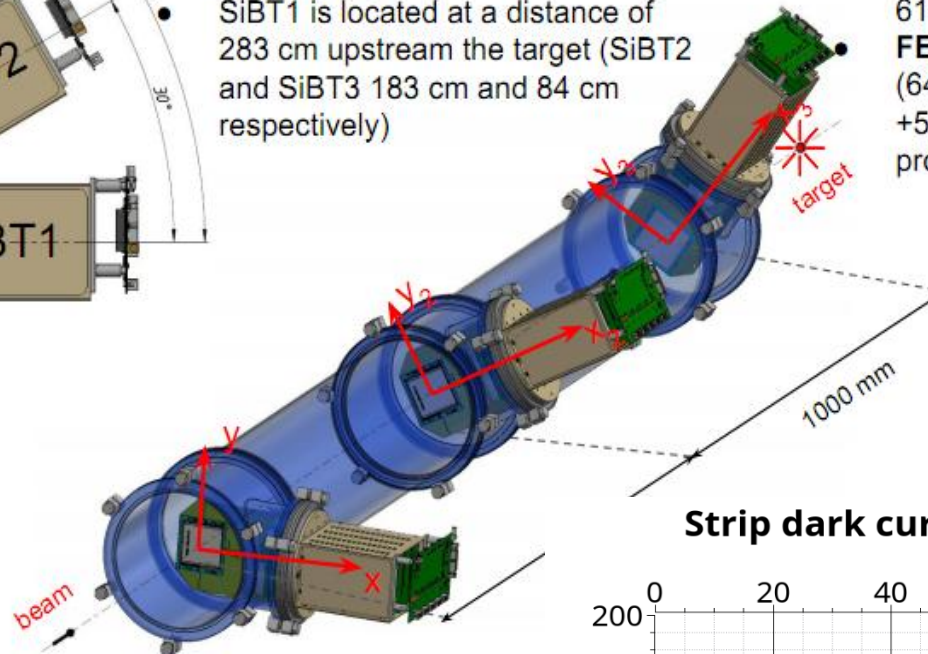


2. Пучковый трекер (BT1÷BT3) и немного о радиационных повреждениях



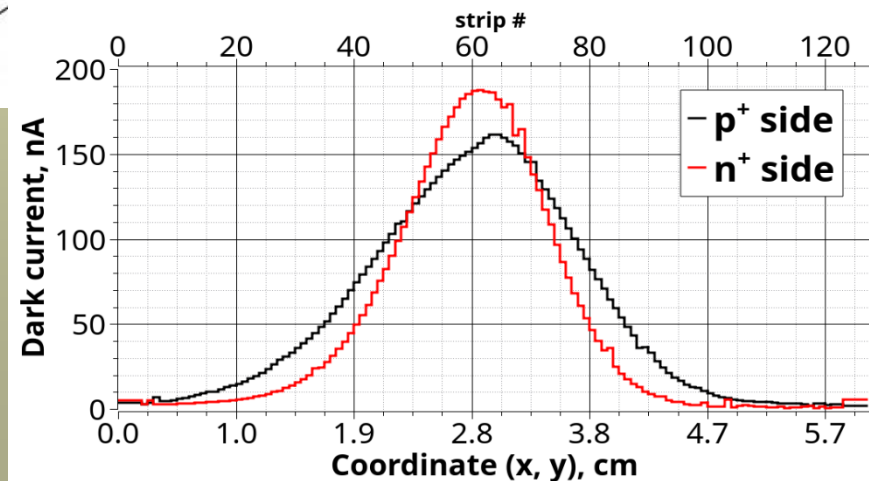
- SiBT1 is positioned inside the beam pipe such that the strips are aligned along the X and Y axes whereas the plates of the SiBT2 and SiBT3 detectors are rotated azimuthally by 30° and 60° respectively;
- SiBT1 is located at a distance of 283 cm upstream the target (SiBT2 and SiBT3 183 cm and 84 cm respectively)

- **Physical purpose:** determination of the reaction plane, *refinement of the vertex definition*, beam profilometry
- **detector:** DSSD, 128×128 strips, pitch p+ / n+ strips 0.47 mm, thickness 175 μm, active area 61×61 mm²
- **FEE:** based on VATA64HDR16.2 (64 ch, dynamic range: -20 pC + +50 pC; 50, 100, 150, 300 ns programmable shaping time)



Radiation autograph of the ¹²⁴Xe beam (3.8 AGeV) from the 2022-2023 run.

Strip dark current distribution SiBT #3



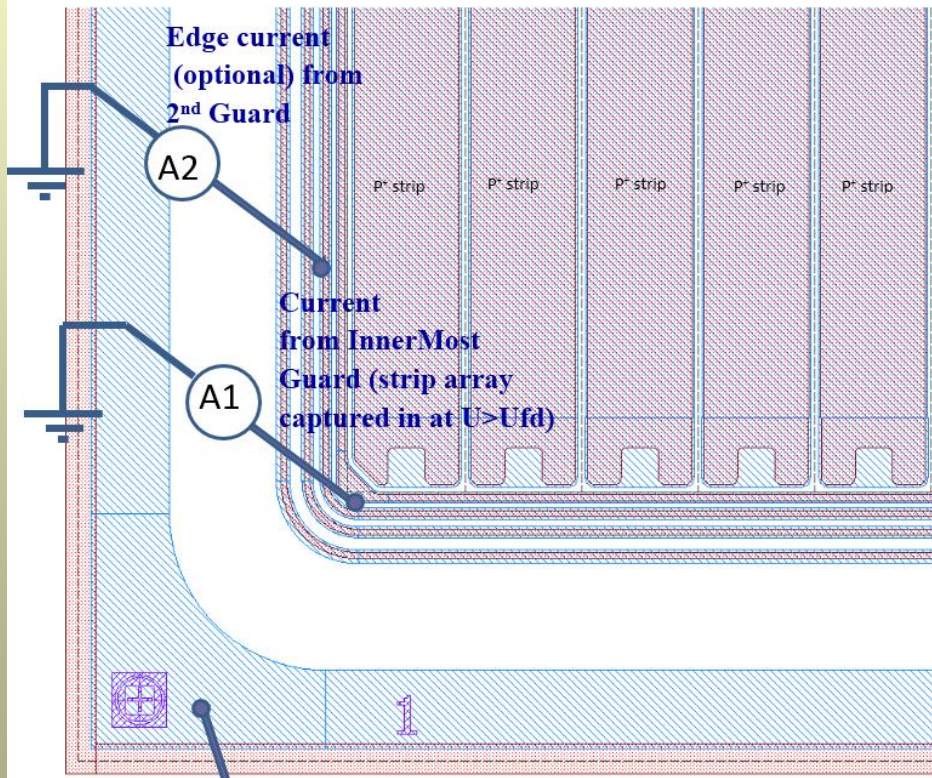
Подробнее в постер-докладе Чемезов Д.Д.

Топология ДССД детектора для пучкового трекера VM&N:

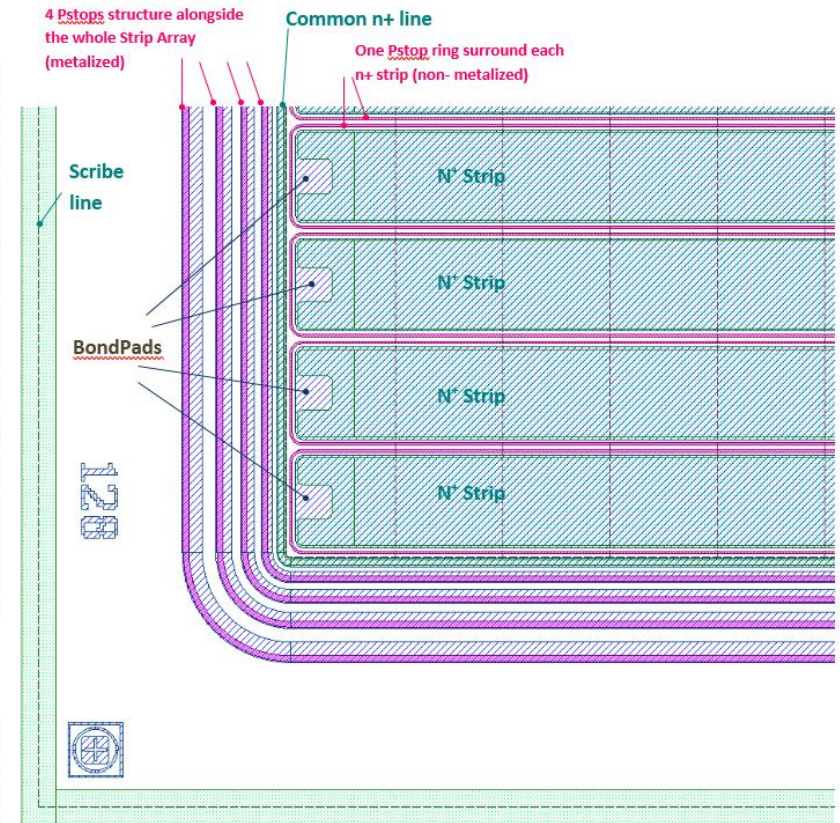
Габариты: 63x63 мм² (технология на 4" – Si-пластинах); Шаг стрипов: 470 мкм;

Сtereo угол между p⁺ и n⁺ стрипами: 90°; Число стрипов: 128x128; Толщина детектора: 175 мкм

DSSD 128P⁺N⁺_SQ_63mm Pside Topology
(Measure Scheme/ N side isolated)



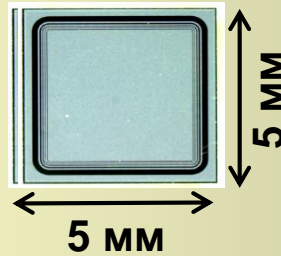
DSSD 128P⁺N⁺_SQ_63mm
Nside Topology detail



Один из методов измерения эквивалентного флюенса нейтронов ($E_n = 1 \text{ МэВ}$) Патент RU 2553840 С1

Si-pin-detector (rad_monitor) :

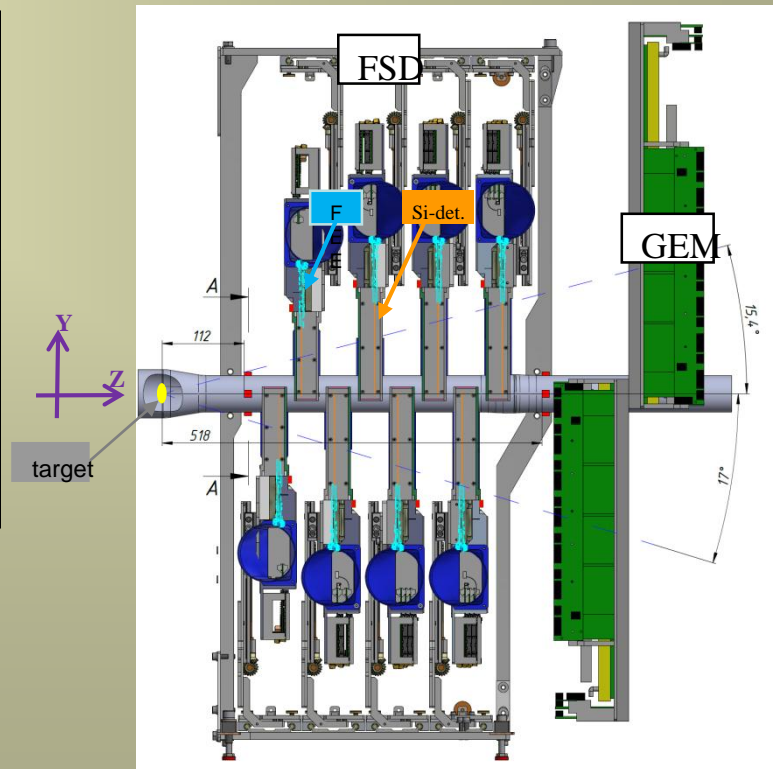
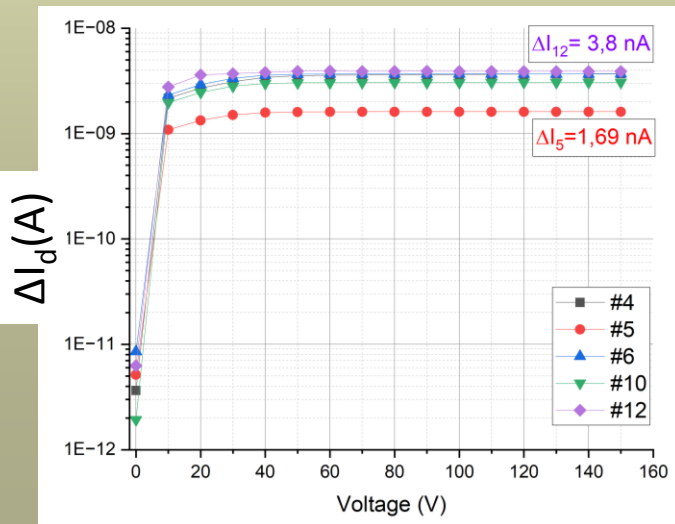
- Detectors size: $(5 \times 5 \times 0,3) \text{ mm}^3$
- Detectors thickness: $300 \text{ }\mu\text{m}$
- Active area: 13 mm^2



$$\Delta I = \alpha_I \times V \times \Phi$$

- $\alpha_I = (5 \pm 0,5) \cdot 10^{-17} (\text{A} \times \text{cm}^{-1})$ – radiation damage constant-Si (for neutrons 1 MeV at $+20^\circ$);
- V , (cm^3) – volume of SCR (space charge region at U_{fd});
- Φ , (cm^{-2}) – eq. neutron fluence (1 MeV)

#Si-монитор	Эквивалентный n- флюенс (1МэВ), cm^{-2}
10	$1,86 \times 10^{10}$
12	$2,47 \times 10^{10}$
4	$2,26 \times 10^{10}$
5	$1,03 \times 10^{10}$
6	$2,27 \times 10^{10}$
2,3,7,8,9	Ниже порога чувствительности и
1,7,11	Механически повреждены



Выводы:

- Существующая планарная технология в АО ЗНТЦ (г. Зеленоград, РФ) позволяет разрабатывать и изготавливать двухсторонние координатные Si-детекторы (кристаллы) высокого качества с активной площадью одного кристалла более 50 см²;
- Разработка и изготовление координатных плоскостей и модулей является задачей сотрудников экспериментов (ФВЭ и ЯФ), в готовом виде такие изделия купить невозможно;
- Регистрация сигналов релятивистских частиц с минимальной ионизацией (m.i.p.) предполагает применение специализированных многоканальных (128 к), низко шумящих ($ENC_0 < 150$ r.m.s.e) ИС;
- Задача разработки и изготовления таких ИС остается востребованной и актуальной;
- Необходимо обратить внимание на разработки и существующие ИС типа MAPS (на одном кристалле пиксель-детектор и FEE), для экспериментов с большой множественностью это идеальный вариант детектора;
- Двух сторонние стриповые Si-детекторы имеют ряд преимуществ: высокое E-разрешение, большая активная площадь, высокий уровень технологии, высокая эффективность регистрации заряженных частиц, прогнозируемое и детально изученное поведение параметров при радиационном повреждении.