

Четверть века развития кремниевых детекторов в России - от УНК до NISA

Михаил Меркин

НИИЯФ МГУ

Содержание

- Кремниевые детекторы. Немного истории
- Падовые детекторы. Особенности и применение.
- Микростриповые координатно-чувствительные кремниевые детекторы.

Начало

- В 1988 году группой НИИЯФ было выдвинуто предложение о разработке кремний-вольфрамового электромагнитного калориметра для проекта УНК, предложение поддержано, выделены средства.
- В 1989 - 1994 велись активные работы с различными организациями: ГИРЕДМЕТ, ЗТМК, НИИ КТТ, НИИ МЭ, НИИ ТТ, НИИ МВ

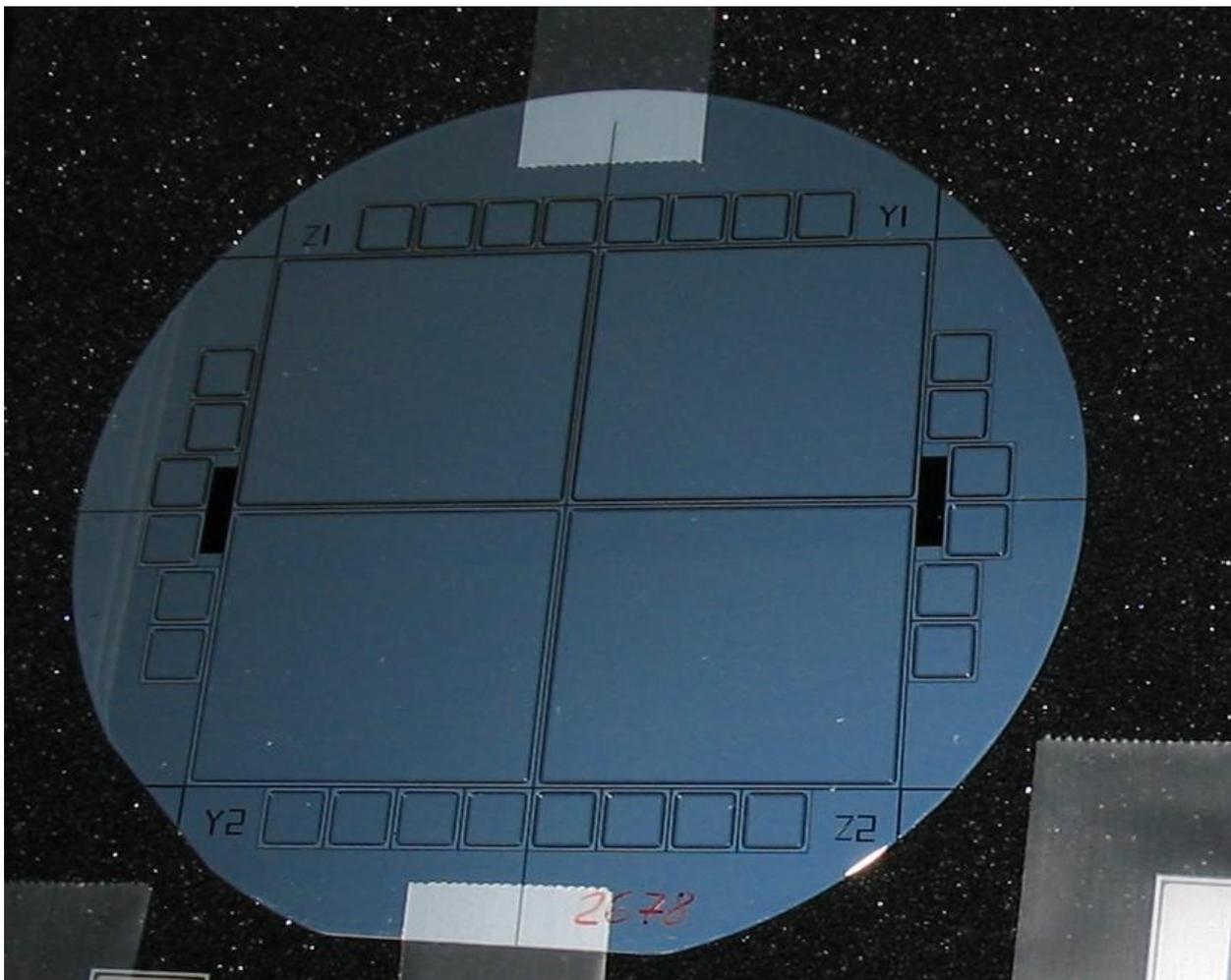
Прототип модуля ЕСАЛ УНК (1992)



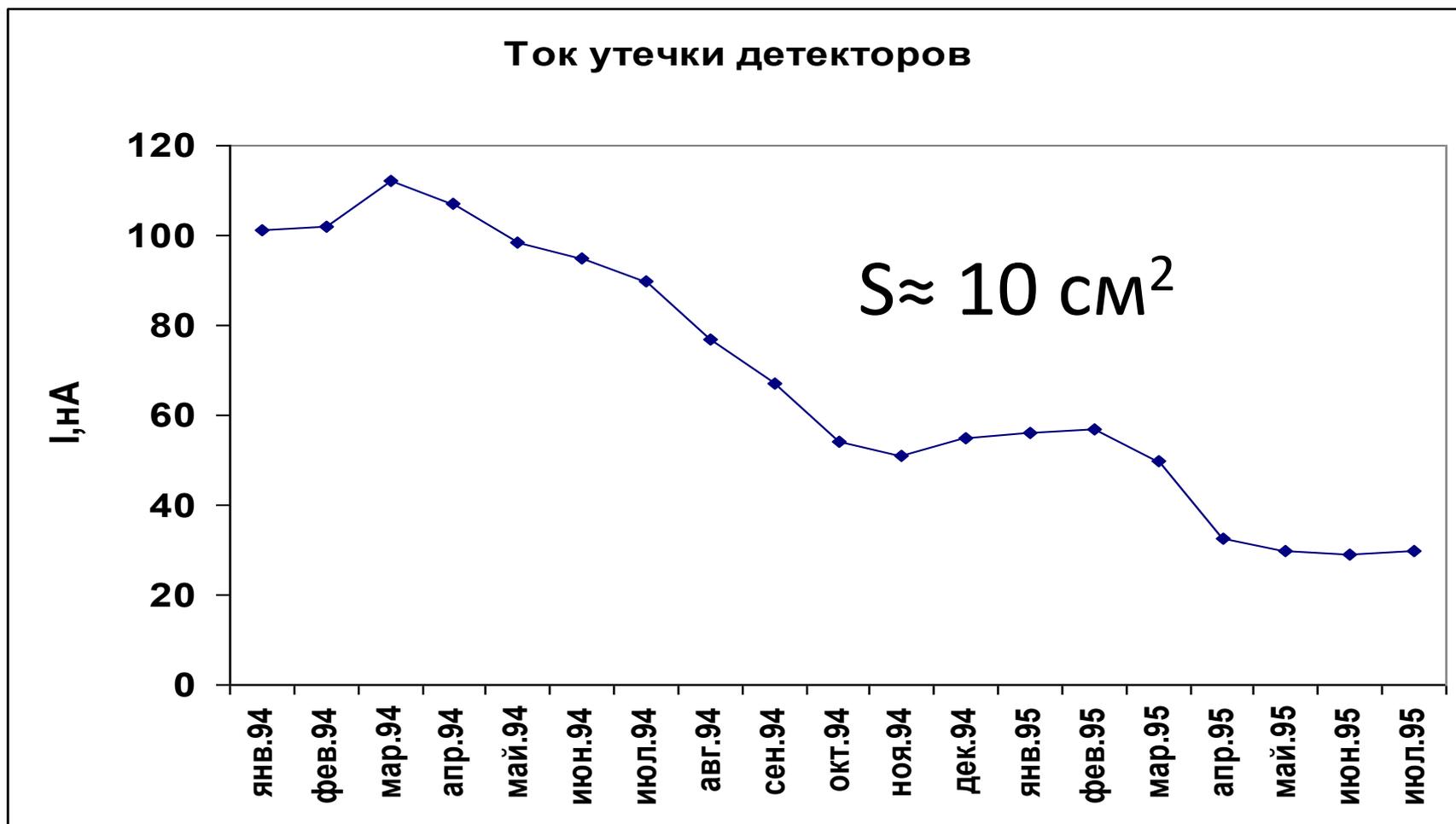
Падовые детекторы.

- В первую очередь хотелось бы упомянуть падовые детекторы для адрон-электронного сепаратора (HES) экспериментальной установки ZEUS (DESY, Гамбург). Исторически это были первые детекторы, которые нашли применение в большом эксперименте и, именно, с этих детекторов было начато массовое производство кремниевых планарных детекторов в России.
- Общее количество детекторов изготовленных в 1992 - 1996 гг., - более 17000.

100 мм пластина с детекторами



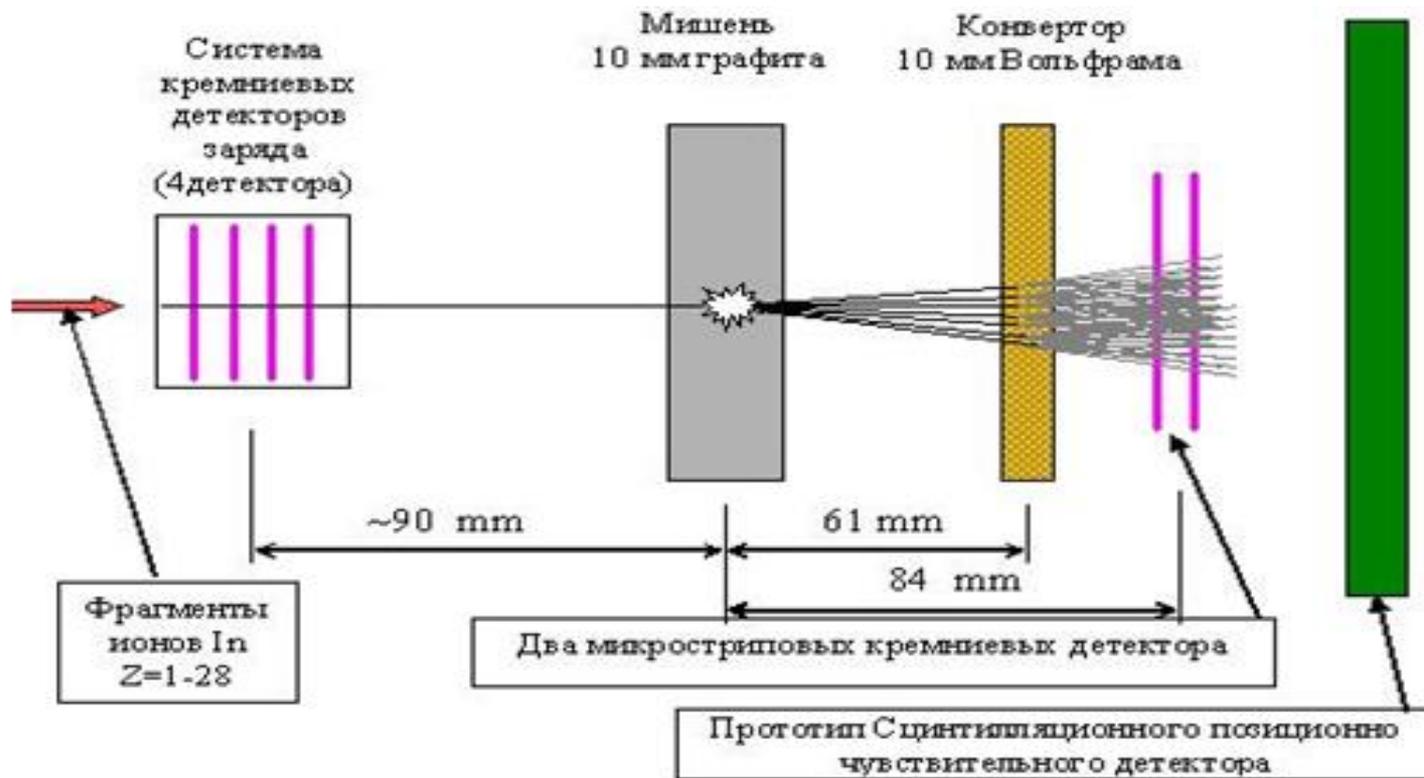
Ток утечки детекторов



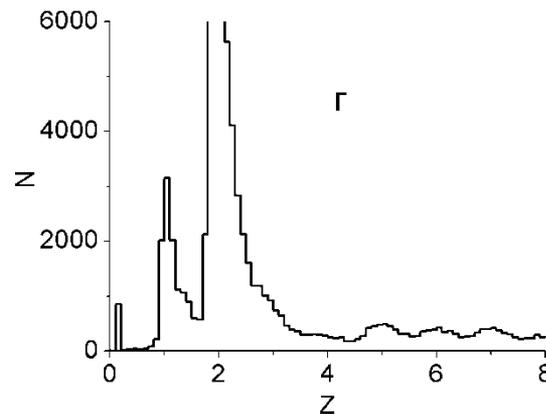
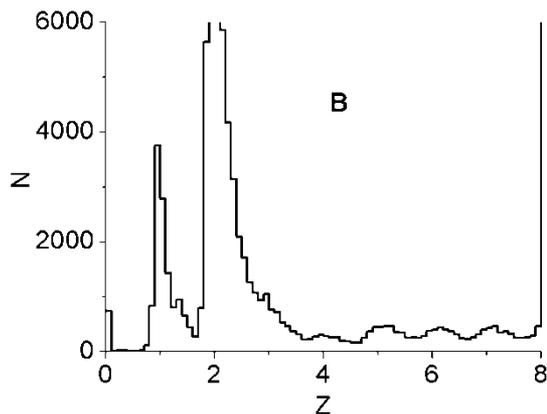
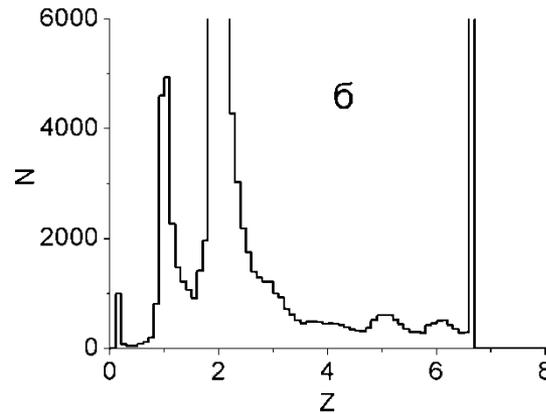
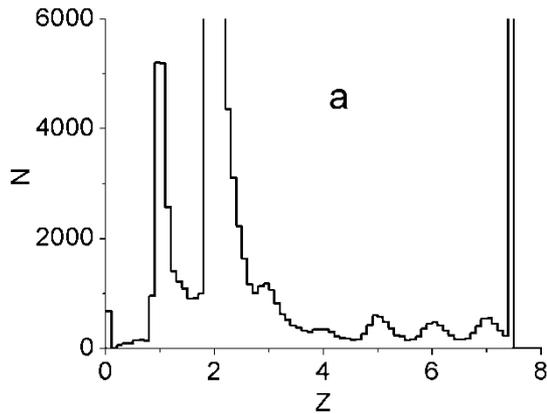
Падовые детекторы.

- Падовые детекторы оказались наиболее простым и надежным прибором определения заряда релятивистского иона, что особенно важно при исследовании состава и энергетического спектра космических лучей.
- Широкое применение падовые детекторы находят в калориметрии большей частью электромагнитной, однако, последние годы все больше внимания начинает уделяться и применению в адронной калориметрии.

Схема испытаний прототипа зарядовой системы НУКЛОН



Зарядовые распределения фрагментов для чувствительного канала



а – первый слой,

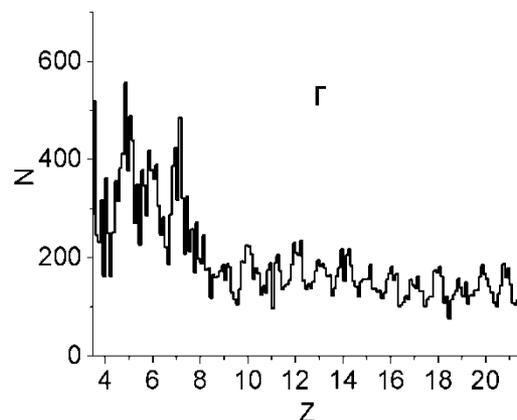
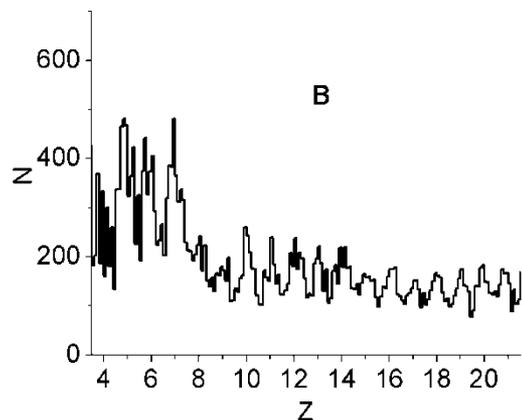
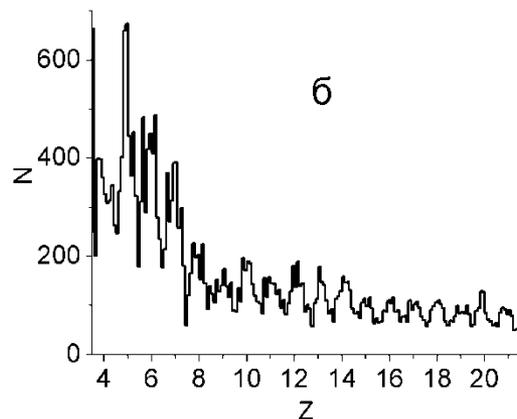
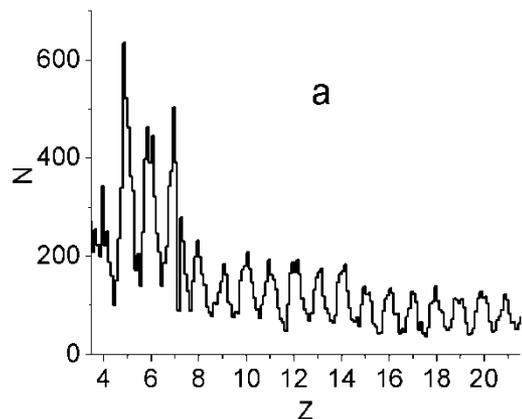
б – второй слой,

в – третий слой,

г – четвертый слой.

339 ГэВ/Z.

Зарядовые распределения фрагментов для грубого канала



а – первый слой,

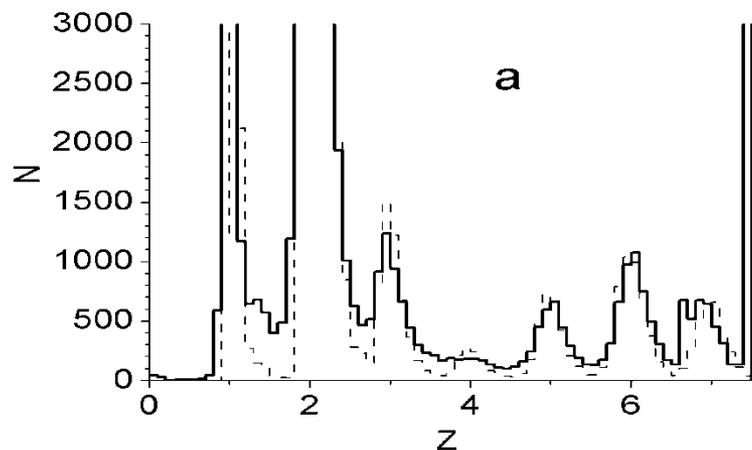
б – второй слой,

в – третий слой,

г – четвертый слой.

339 ГэВ/Z.

Зарядовые распределения фрагментов 315 ГэВ/Z



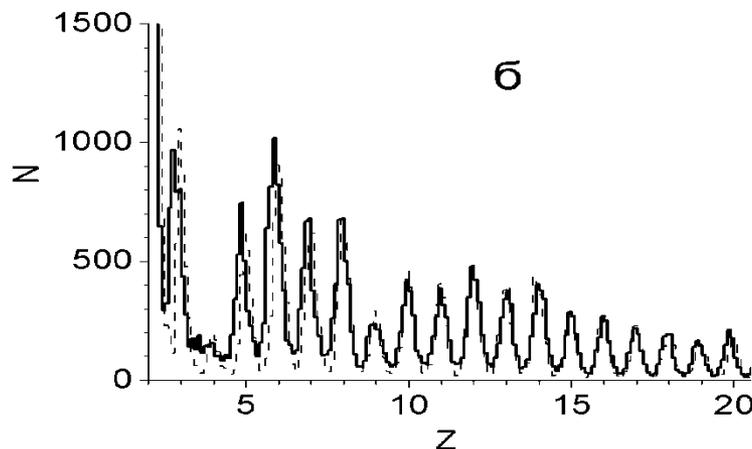
а – чувствительный канал;

б – грубый канал.;

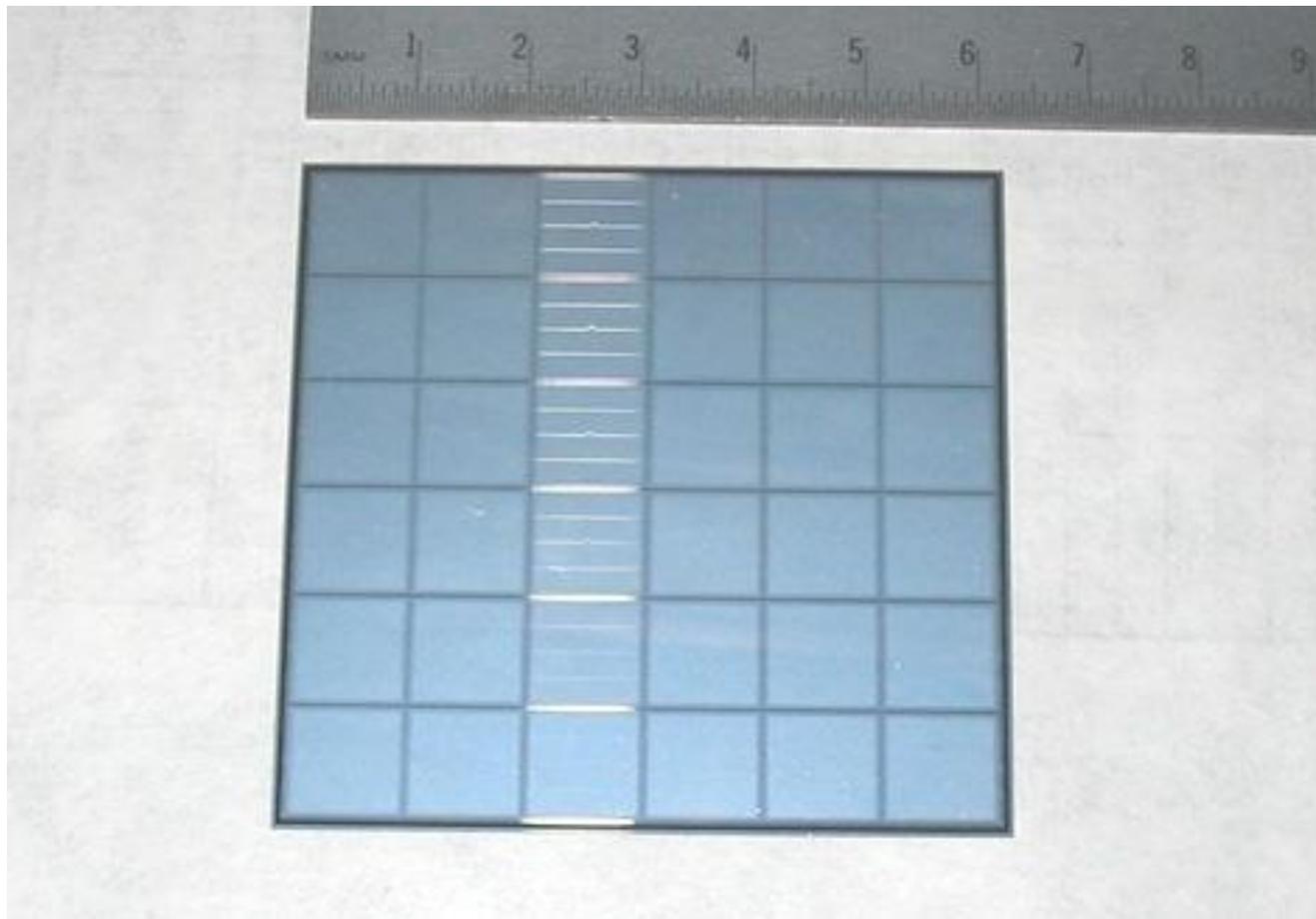
Эксперимент –

сплошная линия,

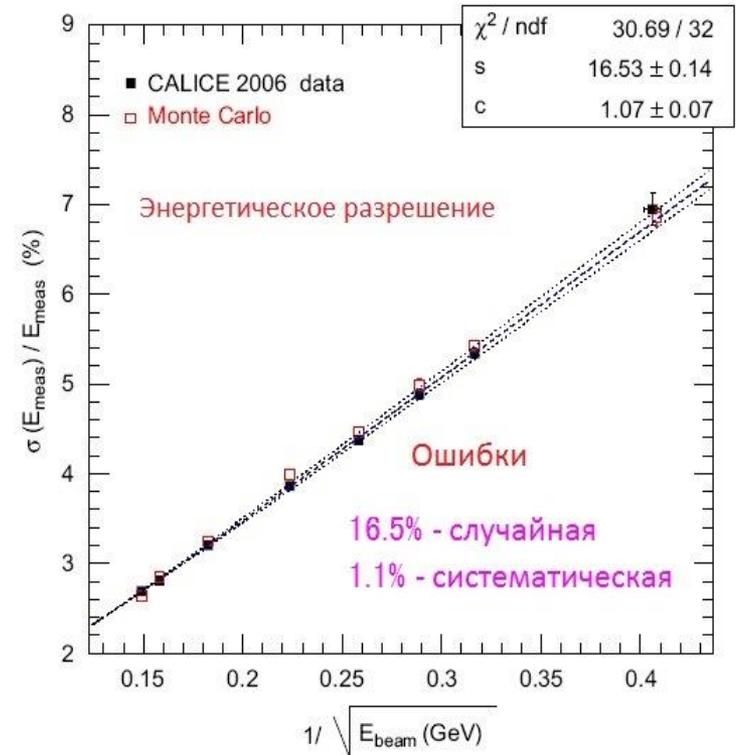
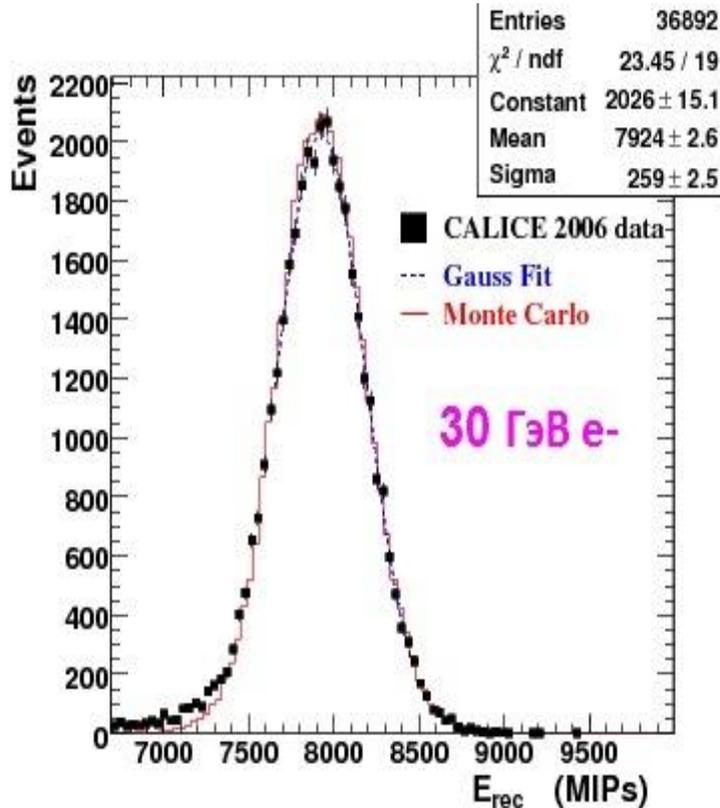
GEANT – штриховая



Детектор прототипа ILC (коллорабoрация CALICE)



Восстановленная энергия и разрешение калориметра

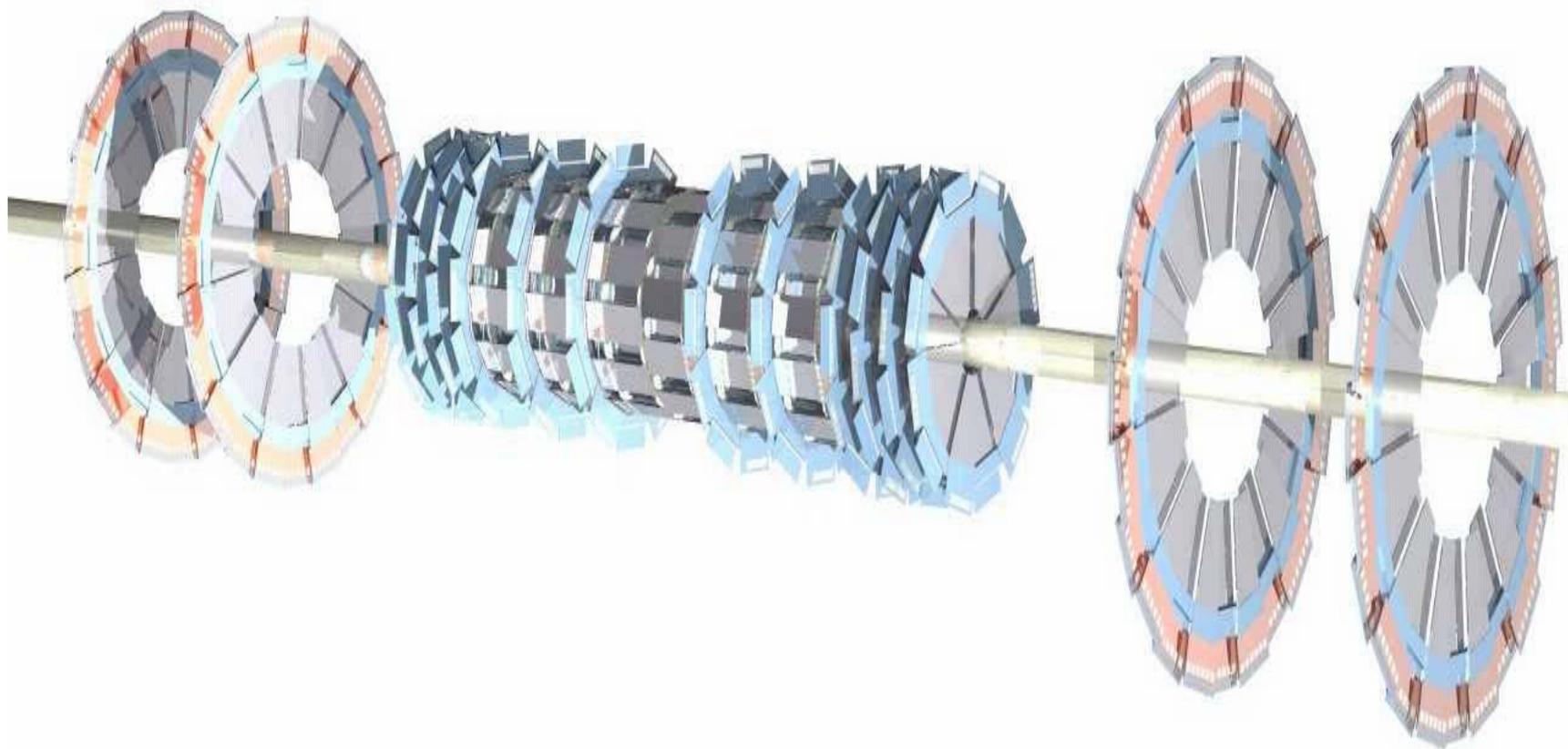


$$\frac{\Delta E}{E} = \left[\frac{16.5 \pm 0.1}{\sqrt{E [\text{GeV}]}} \oplus (1.1 \pm 0.1) \right] \%$$

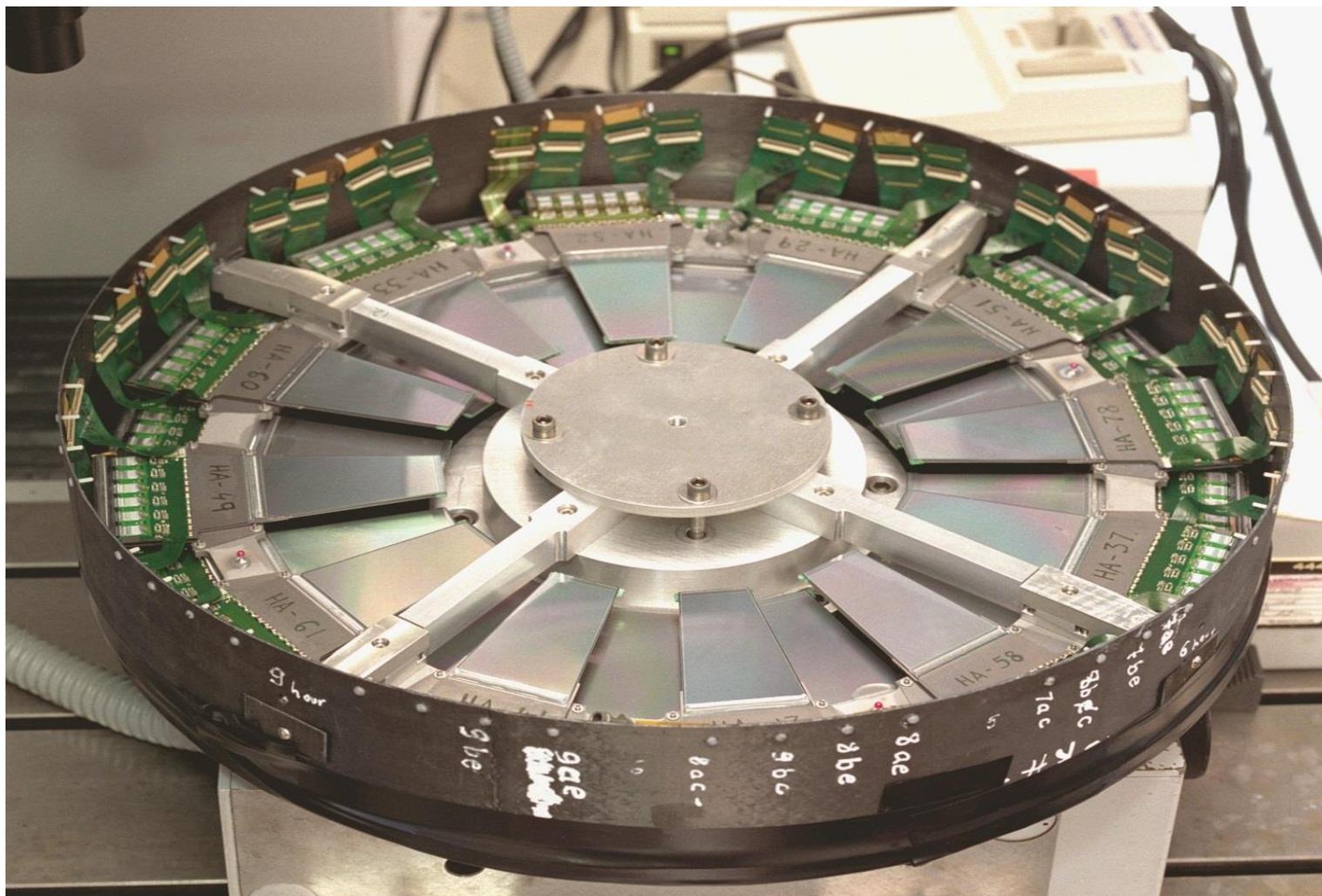
Координатно-чувствительные кремниевые детекторы

- Микростриповый (микрополосковый) детектор представляет собой значительно более сложный прибор по сравнению с падовым детектором. Если число фотолитографий для изготовления падового детектора обычно 4 или 5, то для микростриповых минимальное число фотолитографий - 7. Двухсторонний до 17.
- Детектор представляет собой множество длинных и узких диодов, сформированных на одной пластине, окруженных общими охранными кольцами и системой подачи смещения.

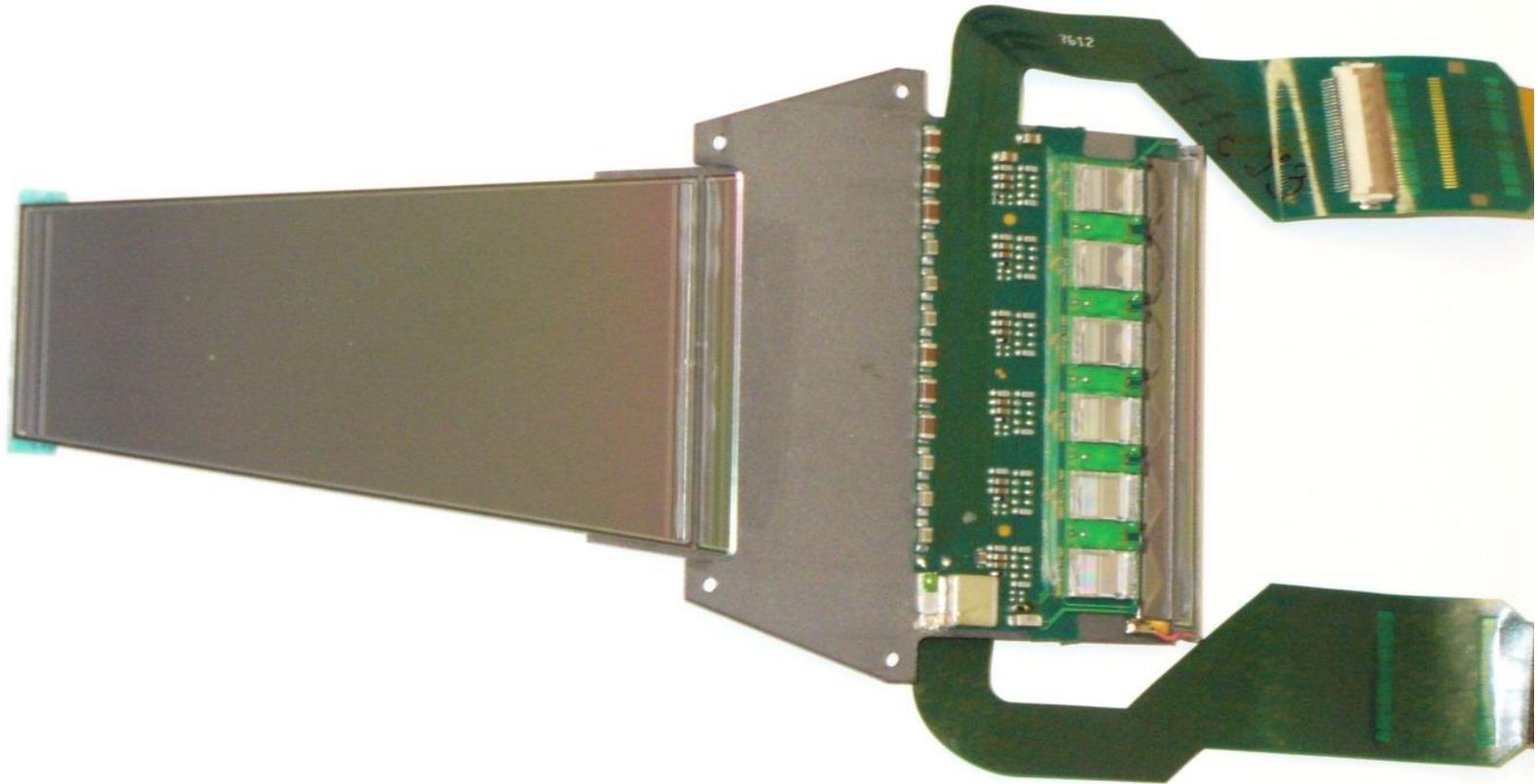
Структура кремниевого трекера (SMT) эксперимента D0



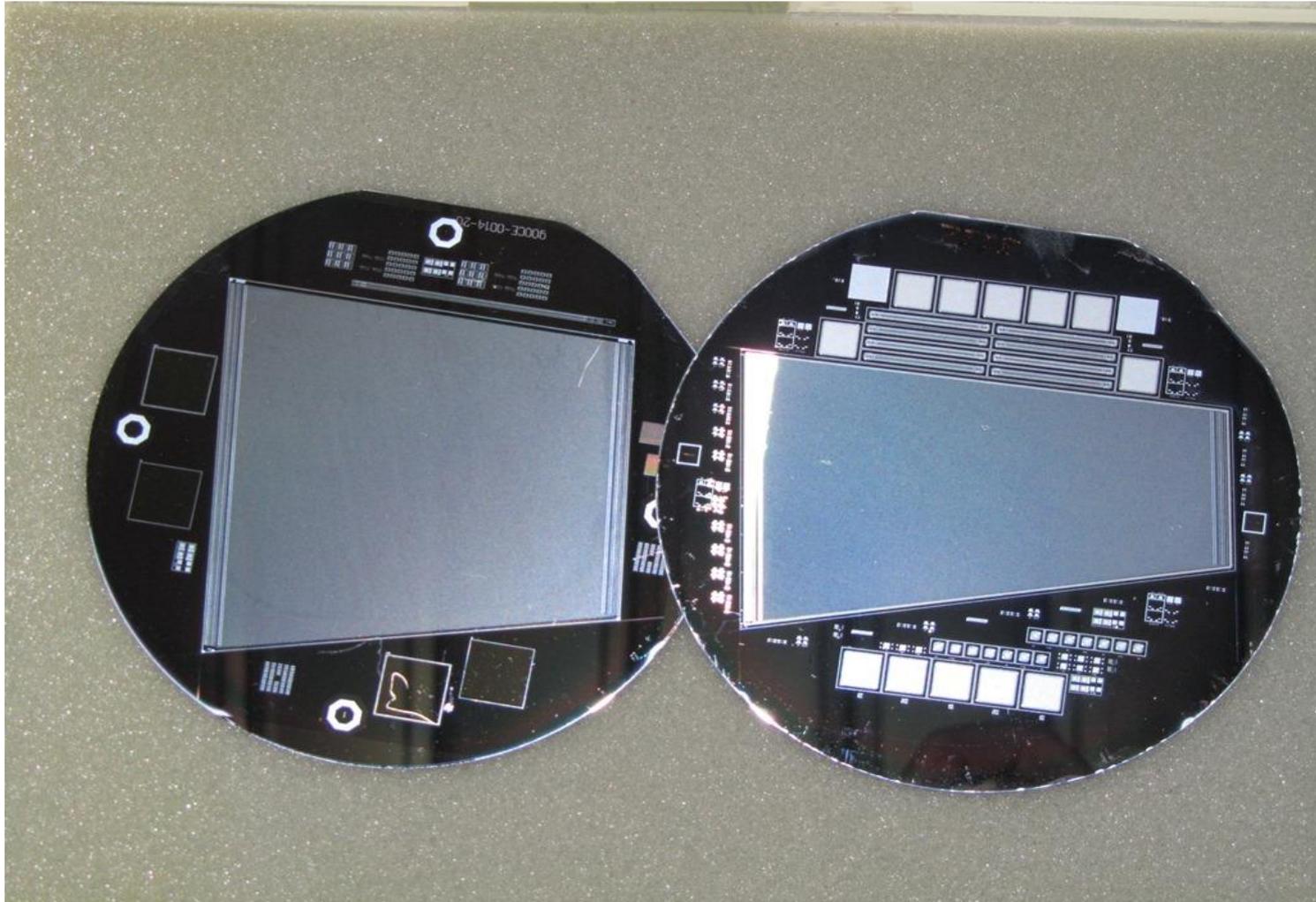
Внешний вид торцевого диска



Модуль передней части трековой системы



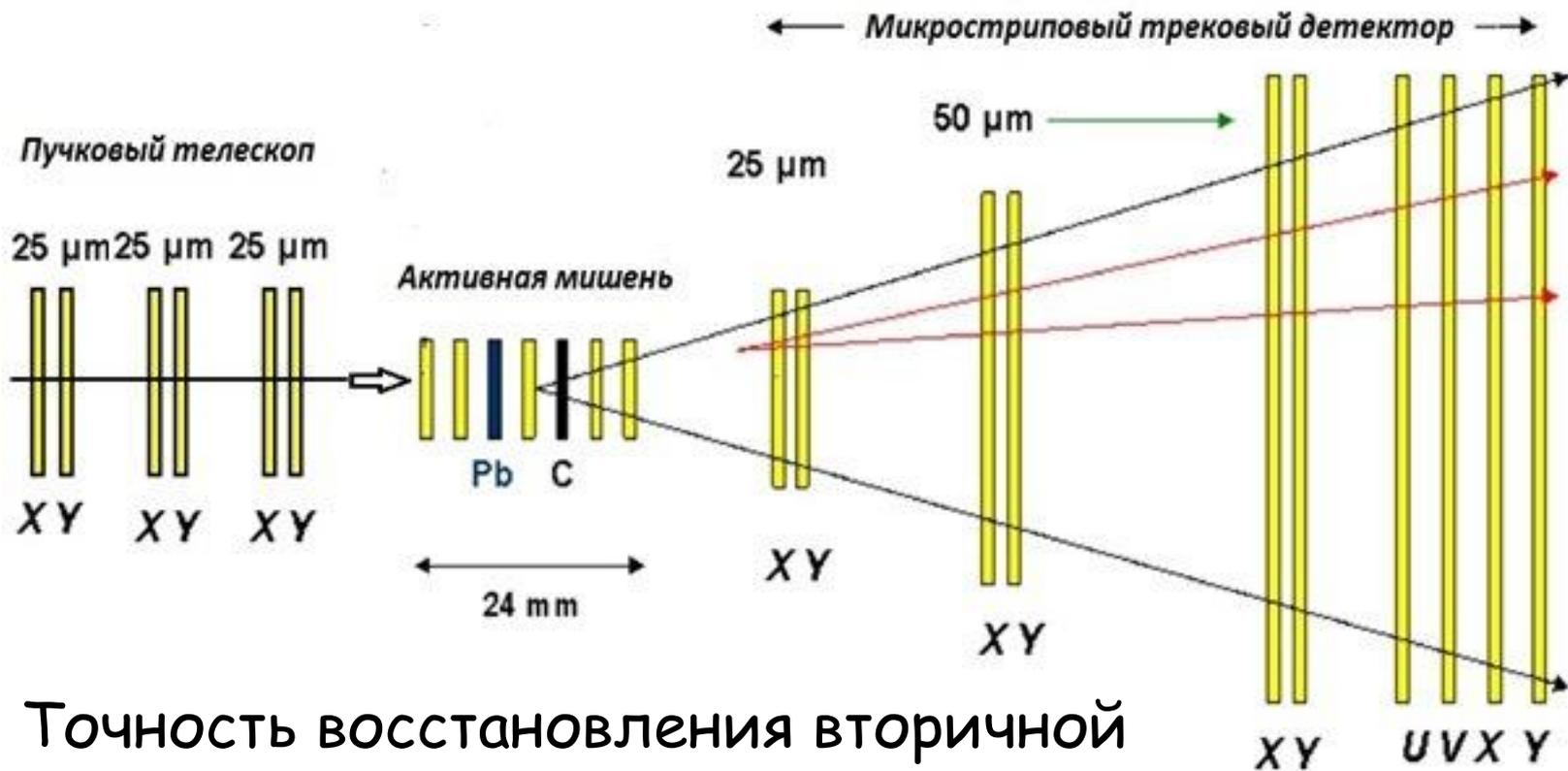
Детекторы торцевых дисков



Параметры детекторов

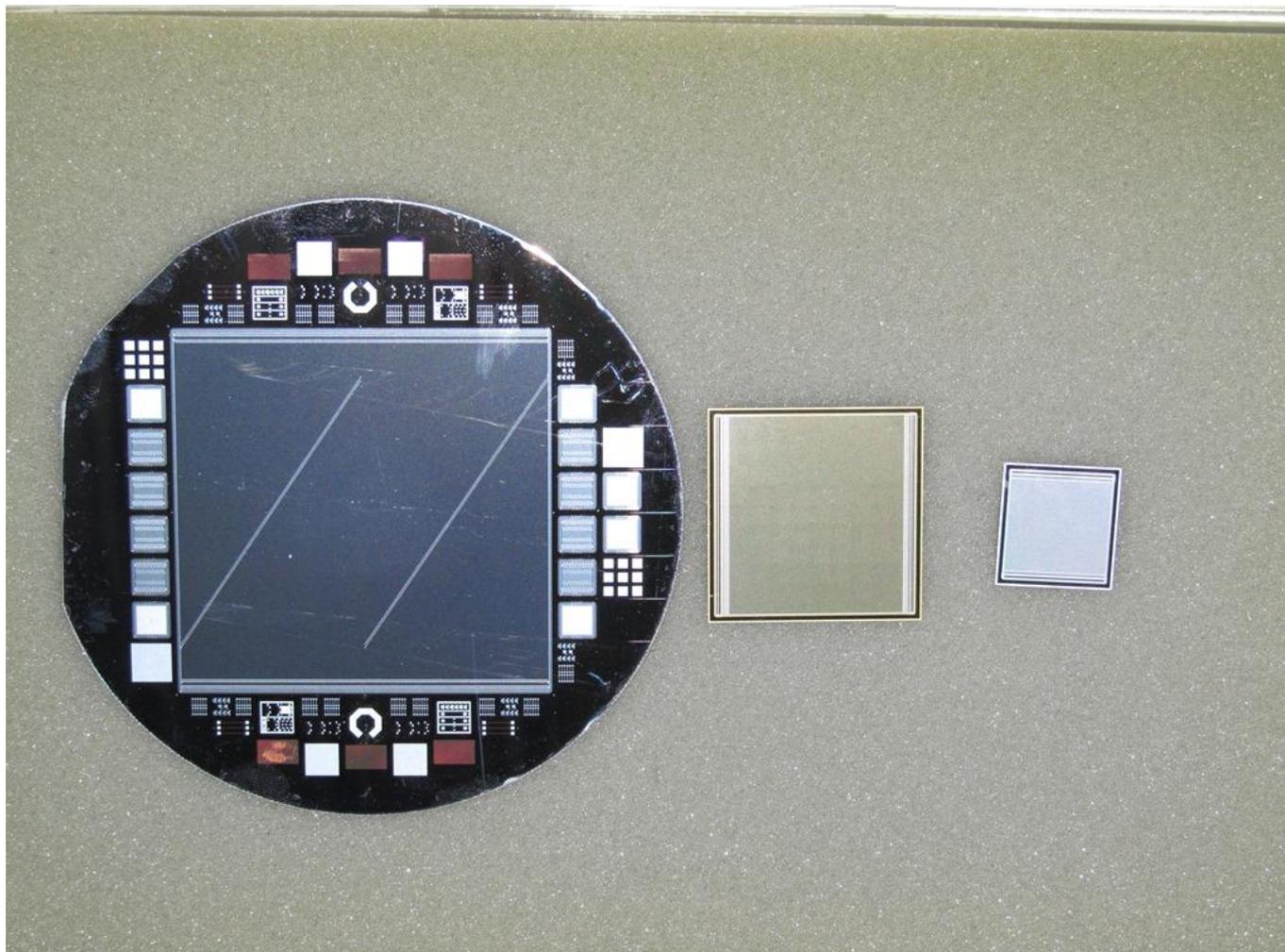
- Средний общий ток утечки $I_{bias}=1.1$ мкА или $i_{bias}=35$ нА/см² при полном обеднении, т.о. $\tau_0 = 1.1$ мс.
- Напряжение полного обеднения $V_{fd} = 39 \pm 15$ В (удельное сопротивление кремния $\rho_n = 6 \div 13$ кОм×см)
- Величина сопротивления поликремниевых резисторов $R_b = 1$ МОм $\pm 20\%$.
- Ёмкость переходного конденсатора - 13 пФ/см.
- Межстриповая ёмкость и соотношение $C_{is}/C_b = 4.5$.
- Дефектные каналы. Среднее количество текущих конденсаторов составило 1.7 конденсатора на детектор, что составляет $\sim 0.15\%$ от общего числа каналов.

Прецизионный вершинный детектор эксперимента СВД-2

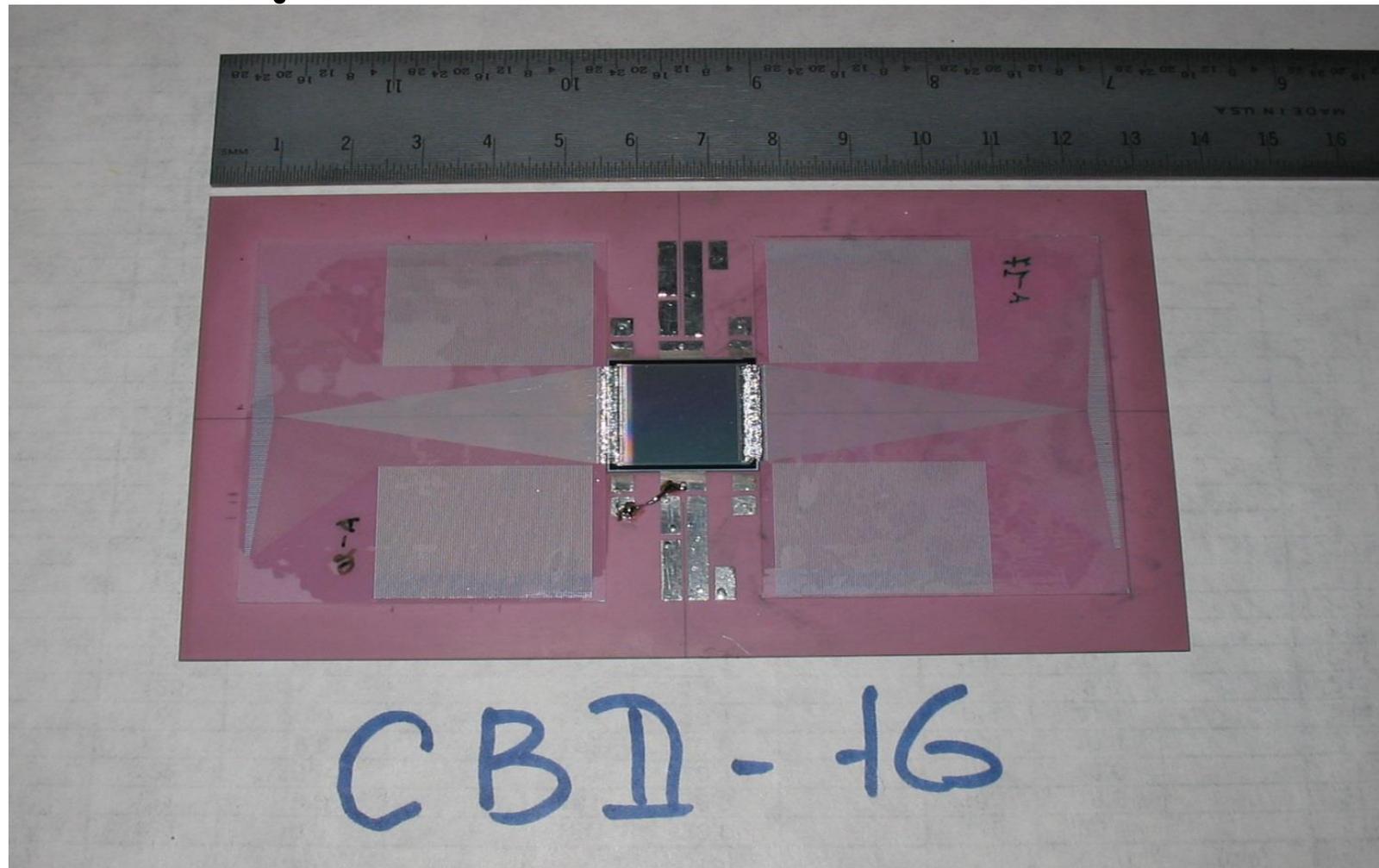


Точность восстановления вторичной вершины: X, Y - 30 мкм; Z - 250 мкм

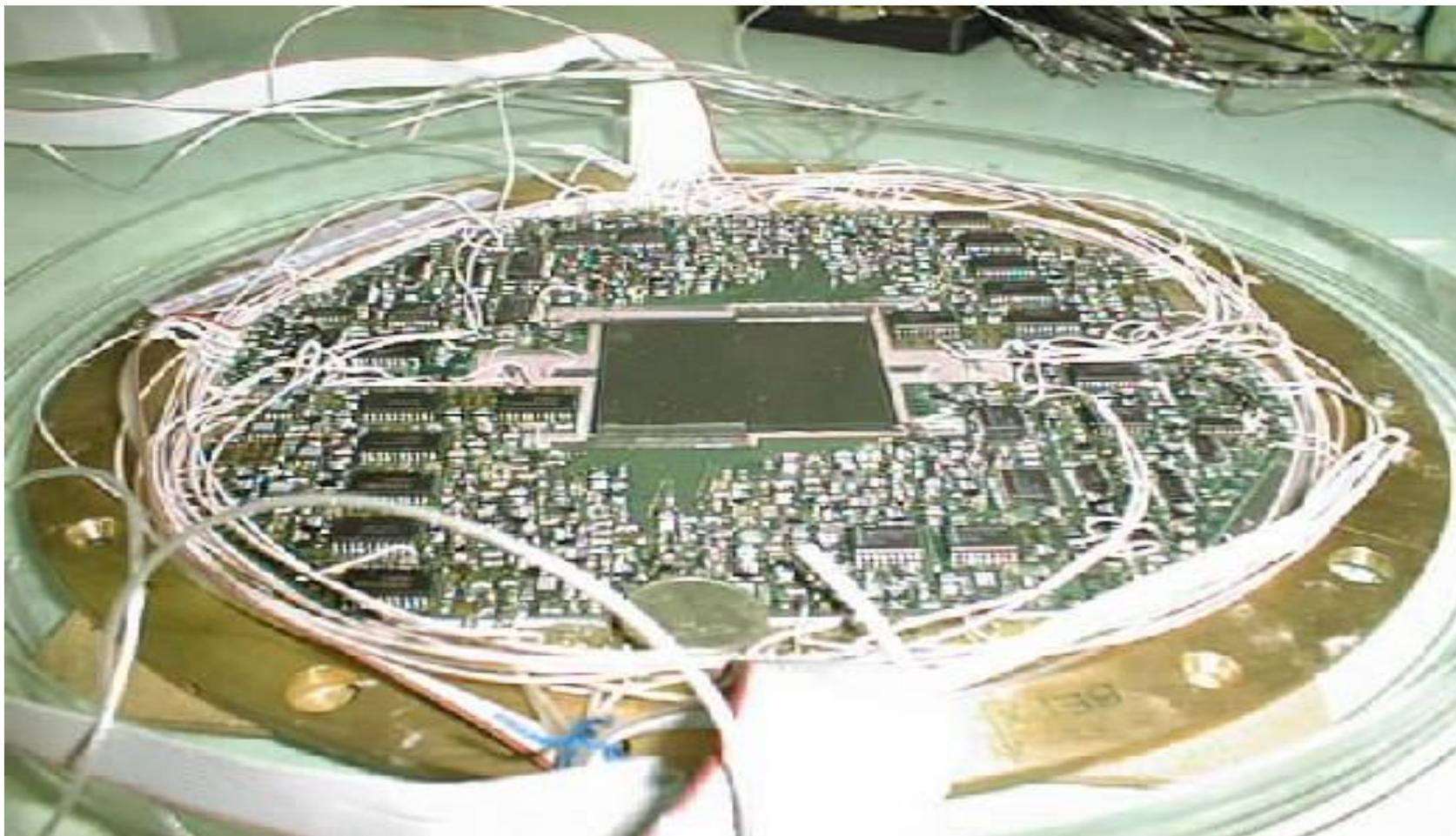
Детекторы эксперимента СВД-2



Детектор SVD-16 на керамической подложке

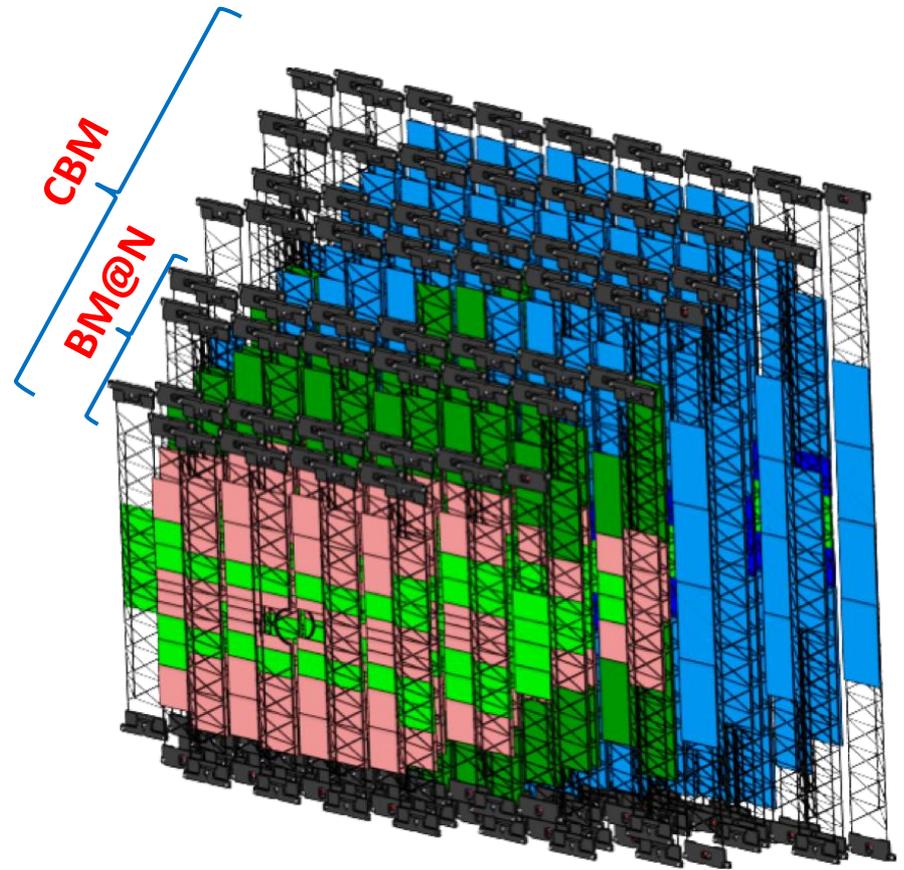


Элемент вершинного детектора эксперимента СВД-2



BM@N / CBM STS

- Основные детекторы, для восстановления треков с разрешением по импульсу
- 8 (CBM)/4 (BM@N), трековых станции, включающие ~ 900 (CBM) / ~ 300 (BM@N) кремниевых детектора
- Быстрая электроника с тепловыделением производит до ~ 40 / ~ 20 кВт в непосредственной близости от детекторов

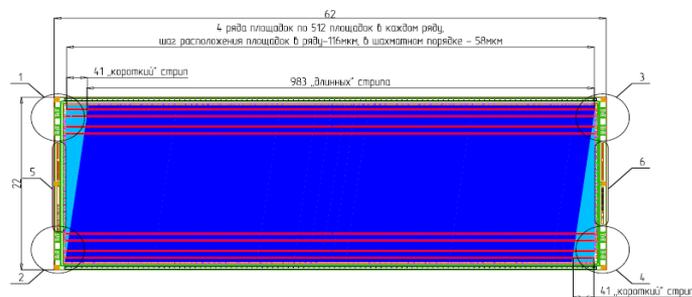
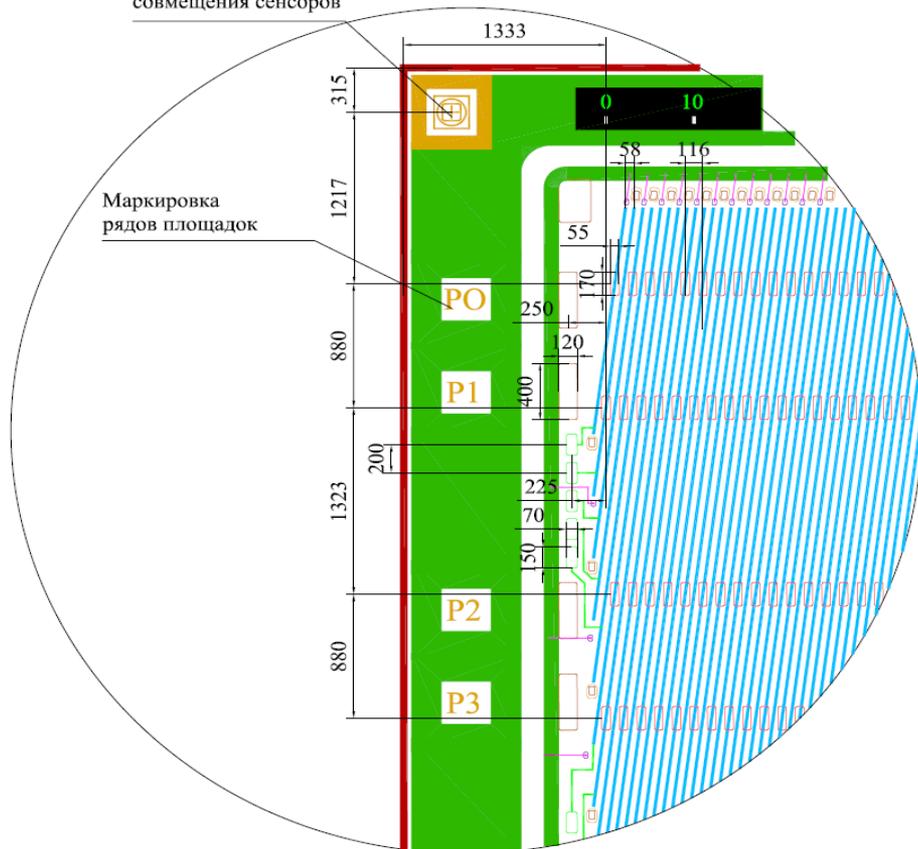
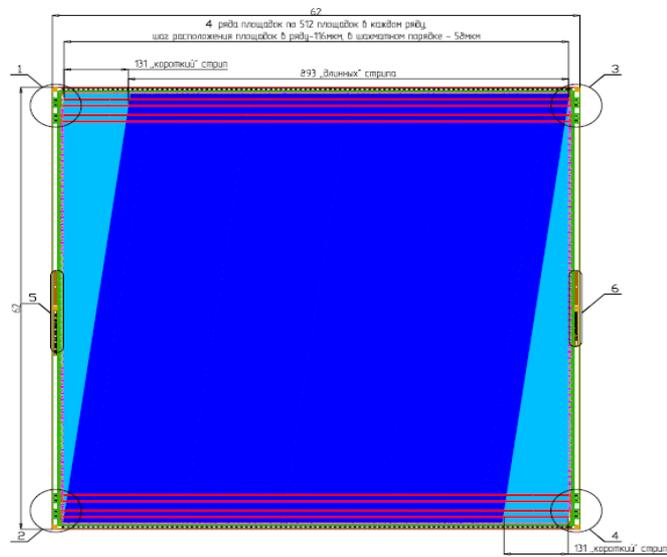
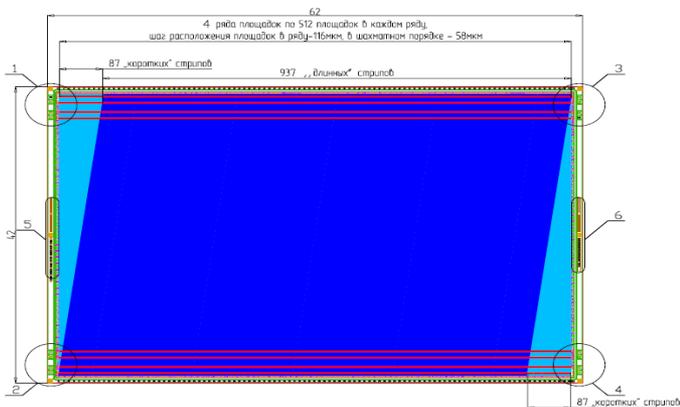


View of the CBM-STS detector without thermal enclosure and services

Детекторы экспериментов VM@N и CBM - DSDM

Знак для совмещения сенсоров

Маркировка рядов площадок



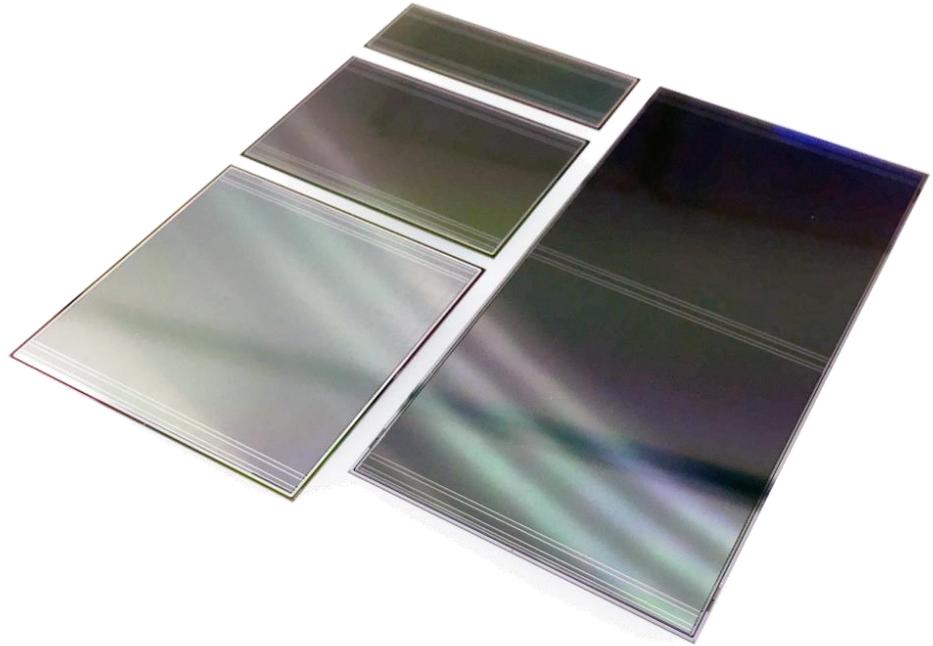
Детекторы экспериментов $BM@N$ и CBM - DSDM

Современные двухсторонние
микростриповые детекторы

Обеспечивают
пространственное
разрешение не хуже 25 мкм

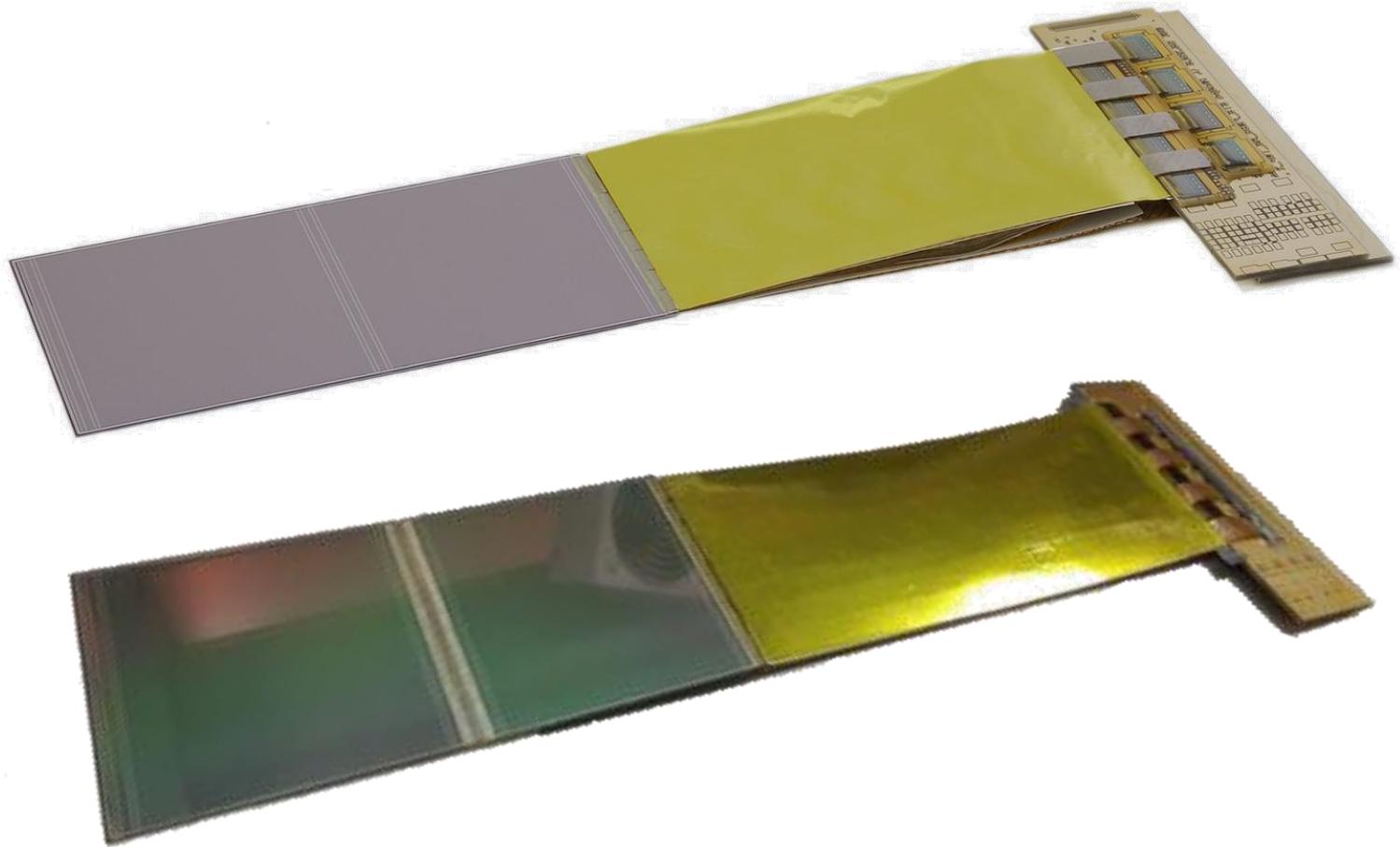
4 основных размера

Для $BM@N$ часть сенсоров
уже изготовлено



Фотография прототипов кремниевых детекторов.
Показано 4 различных размера.

Модули



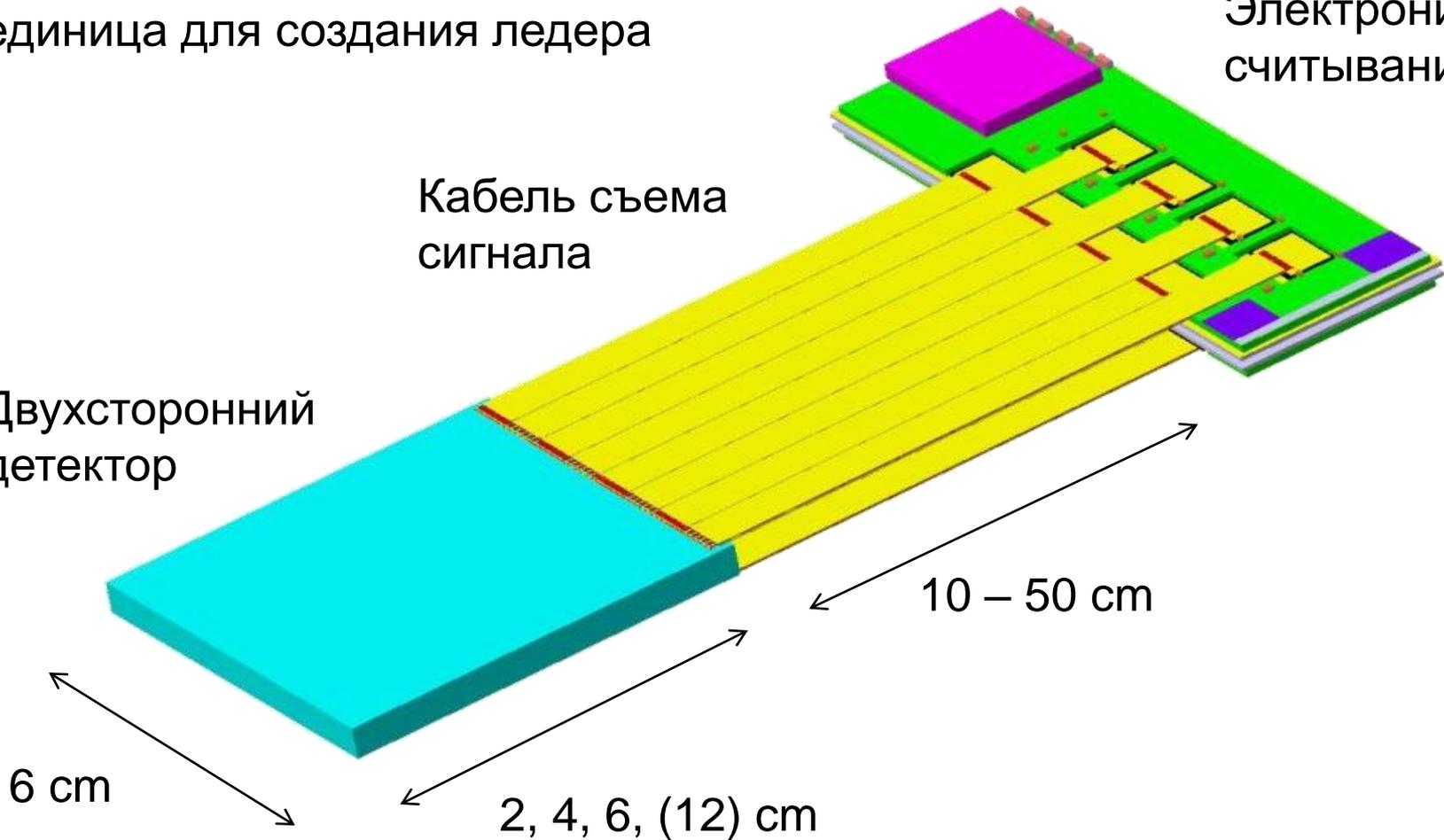
Концепция модуля

Основная функциональная
единица для создания ледера

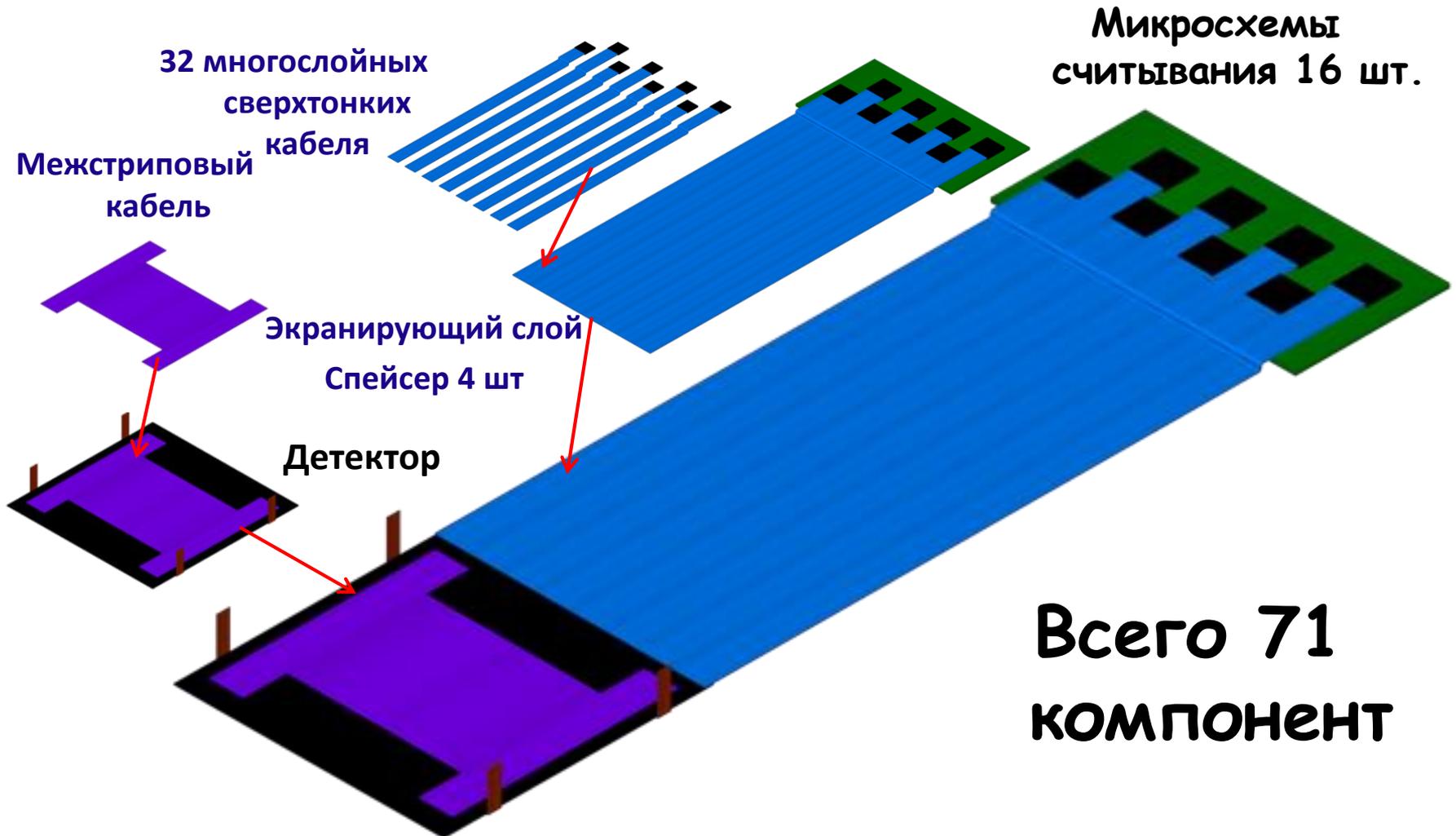
Электроника
считывания

Кабель съема
сигнала

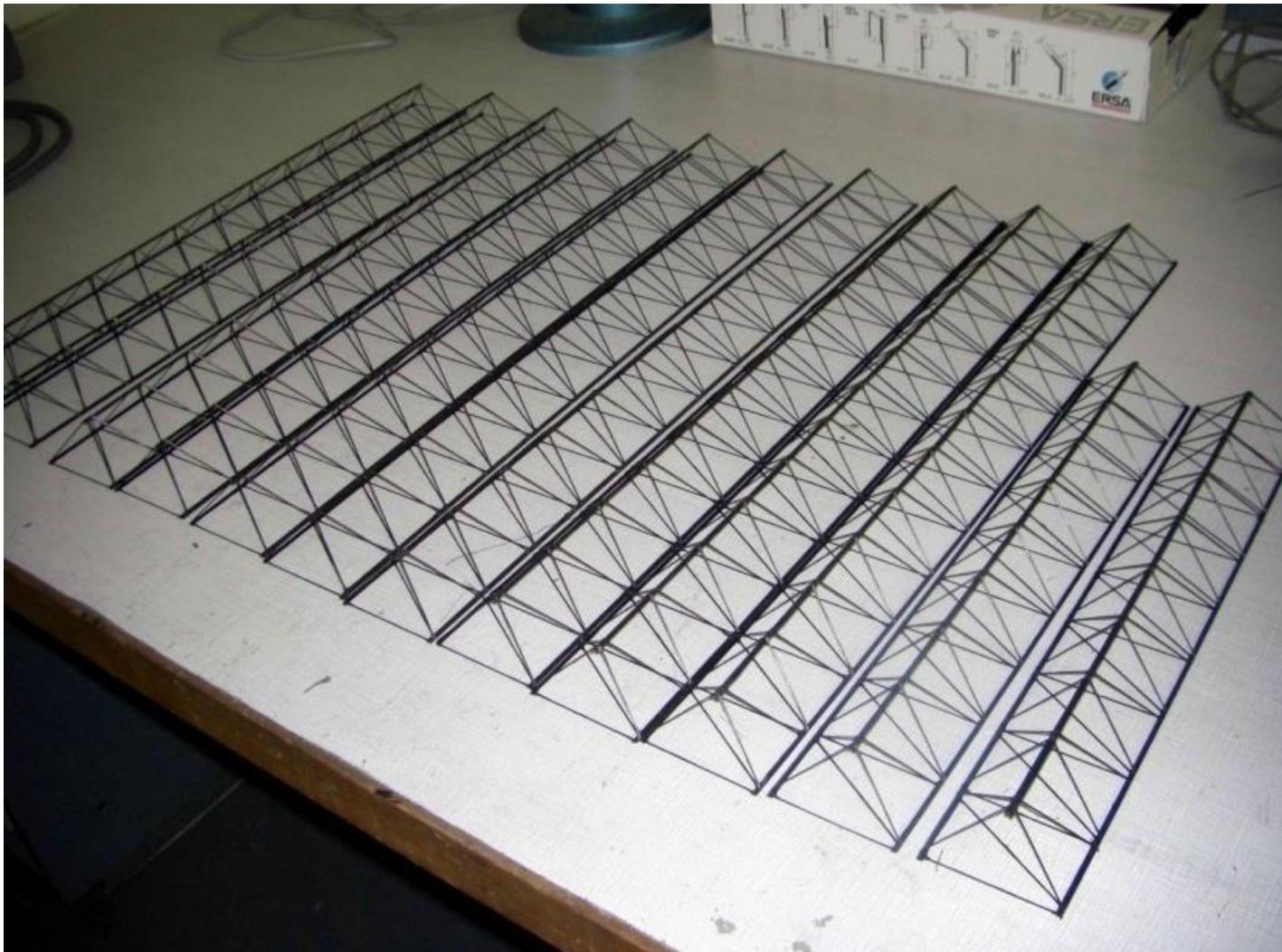
Двухсторонний
детектор



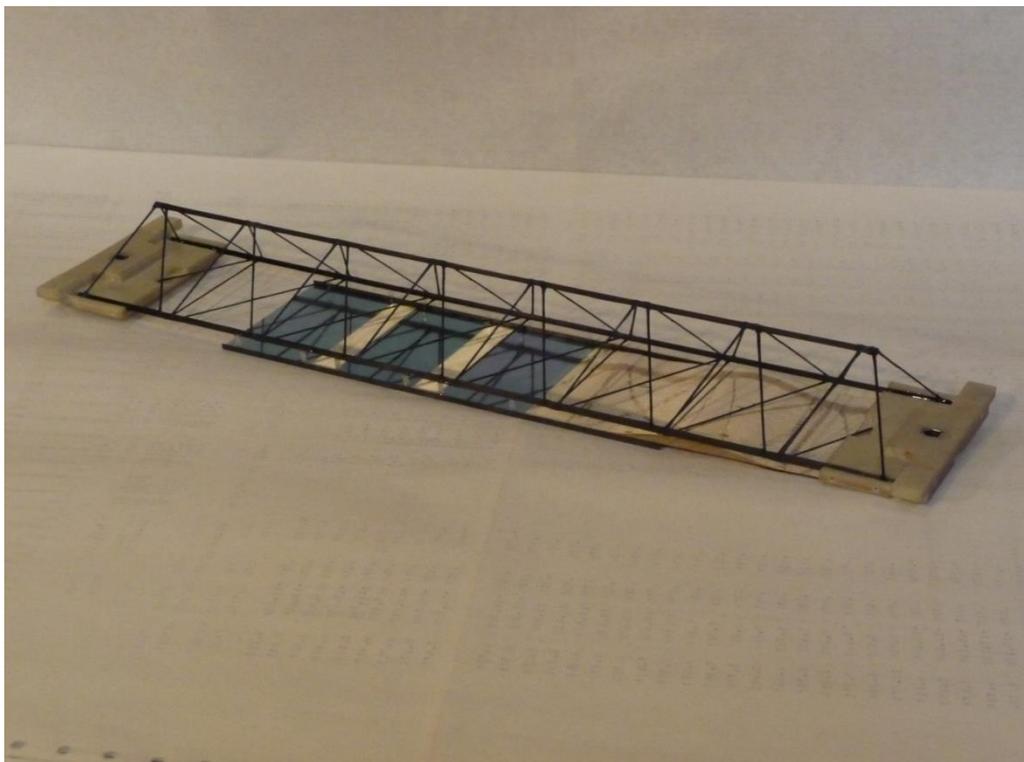
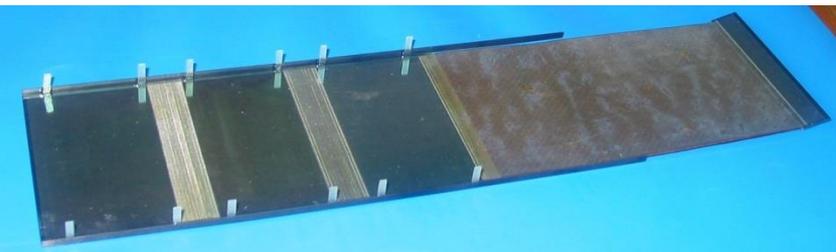
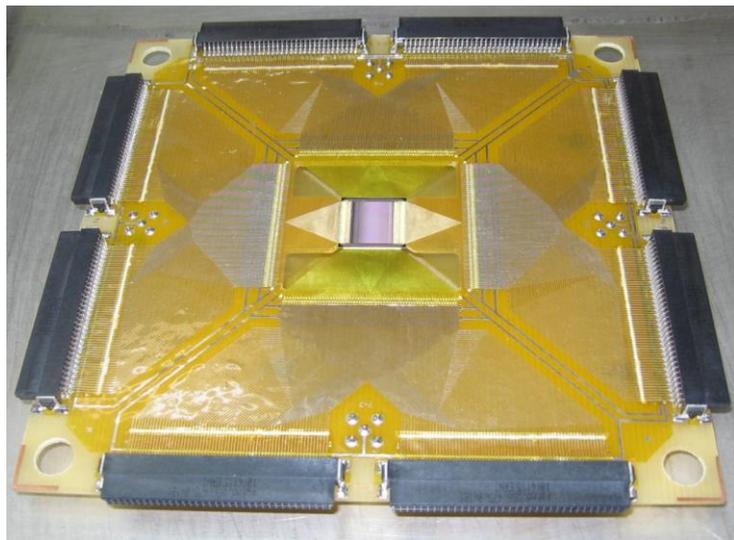
Состав модуля



Углепластиковые фермы



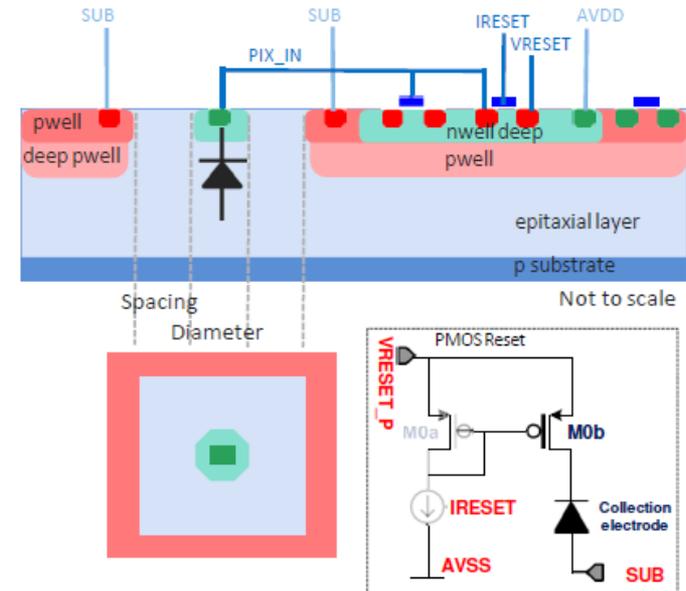
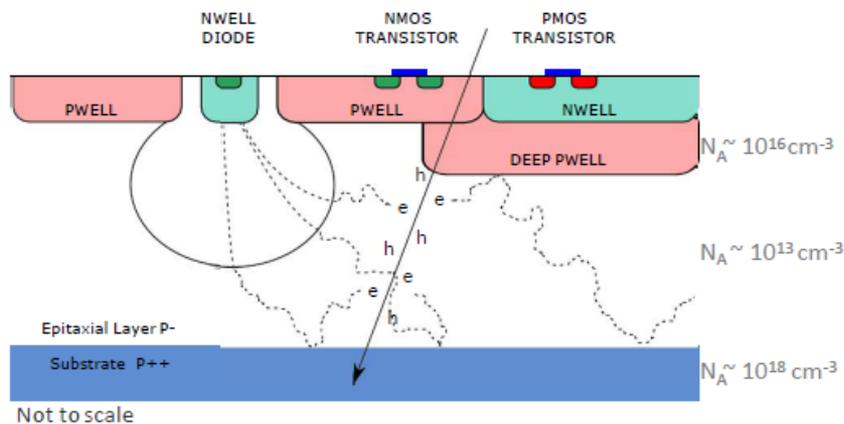
Прототипы



ALPIDE Technology

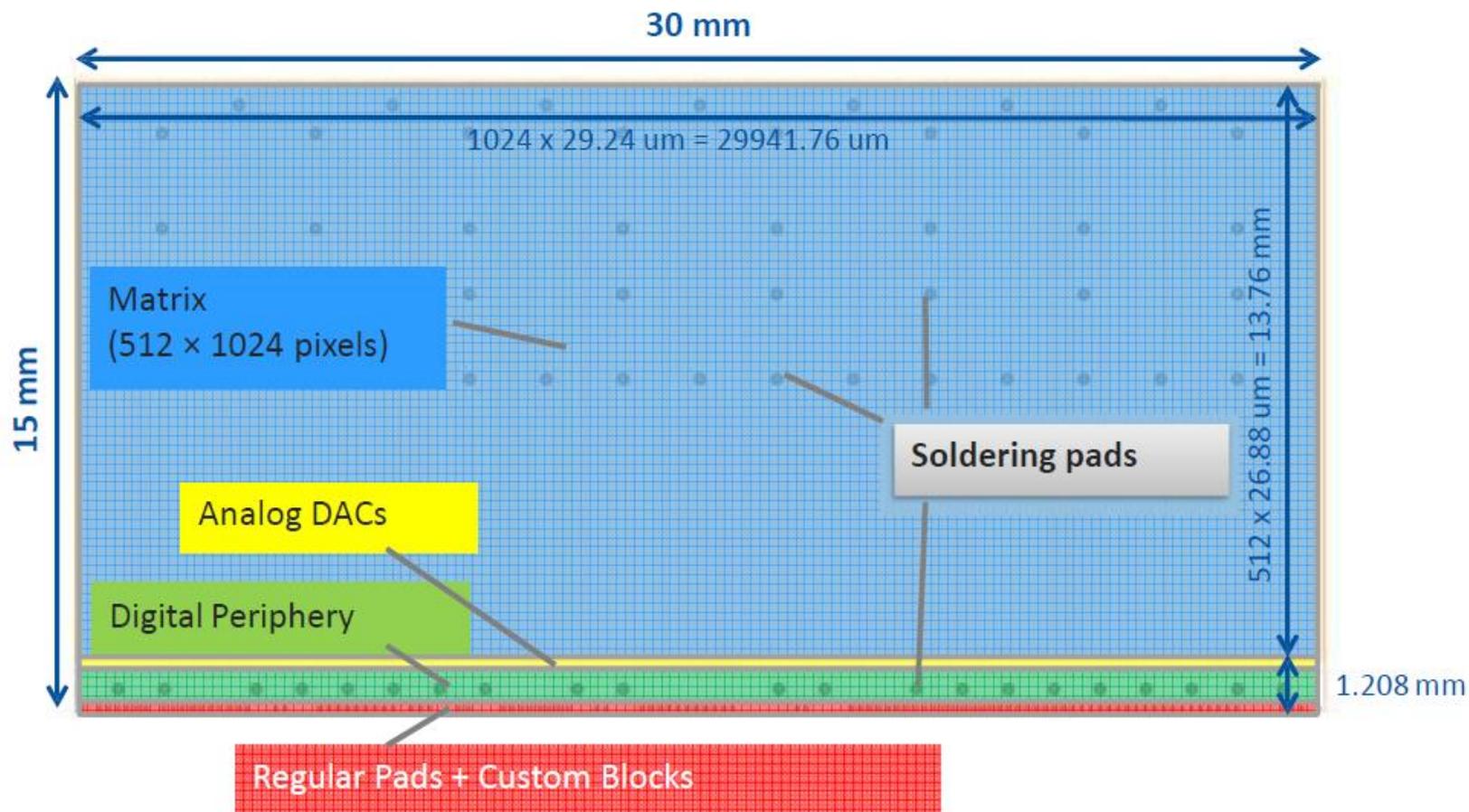
Pixel Sensor CMOS 180 nm Imaging Process (TowerJazz)

3 nm thin gate oxide, 6 metal layers



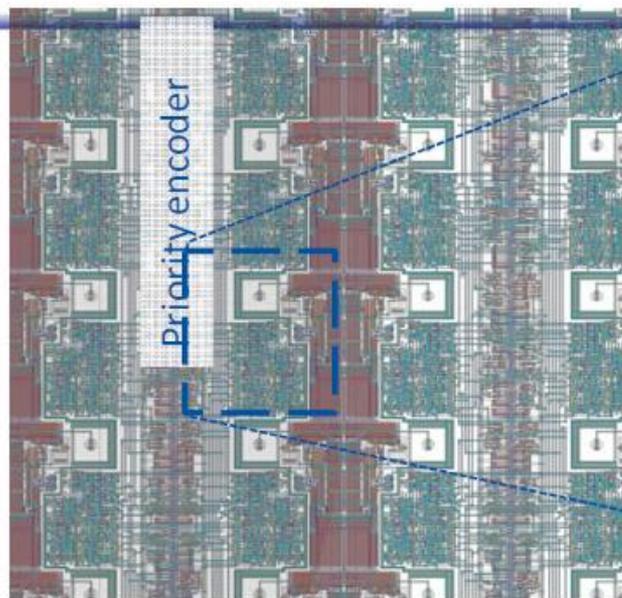
- High-resistivity ($> 1\text{k}\Omega\text{ cm}$) p-type epitaxial layer ($18\ \mu\text{m}$ to $30\ \mu\text{m}$) on p-type substrate
- Deep PWELL shielding NWELL allowing PMOS transistors (full CMOS within active area)
- Small n-well diode ($2\ \mu\text{m}$ diameter), ~ 100 times smaller than pixel \Rightarrow low capacitance \Rightarrow large S/N
- Reverse bias can be applied to the substrate to increase the depletion volume around the NWELL collection diode

ALPIDE Chip Floorplan

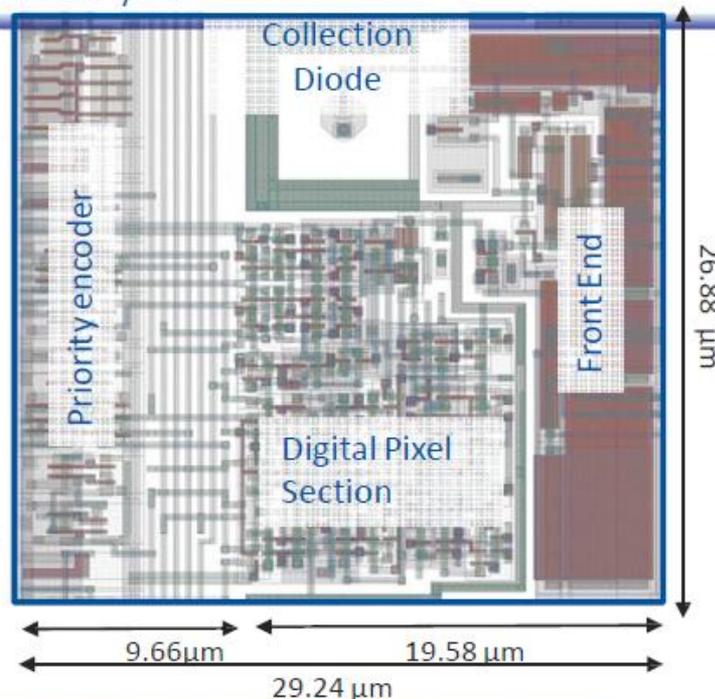


Layout Features

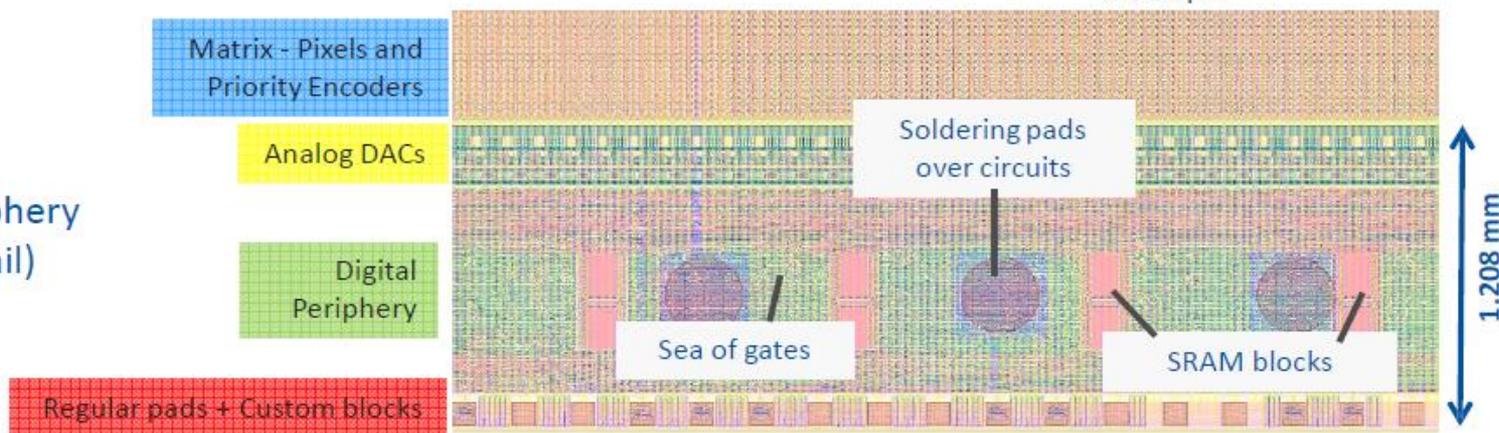
Matrix (detail)



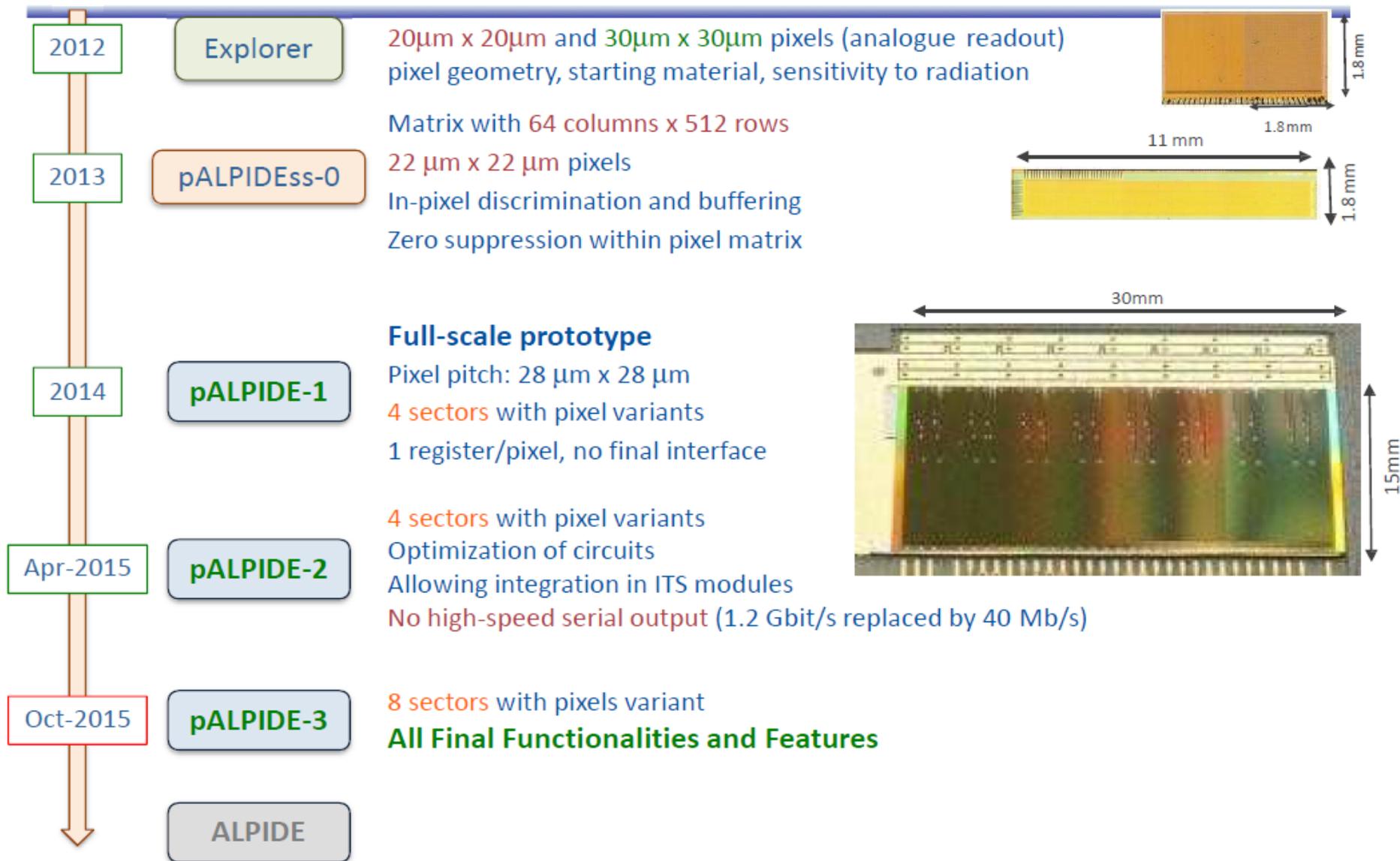
Pixel layout



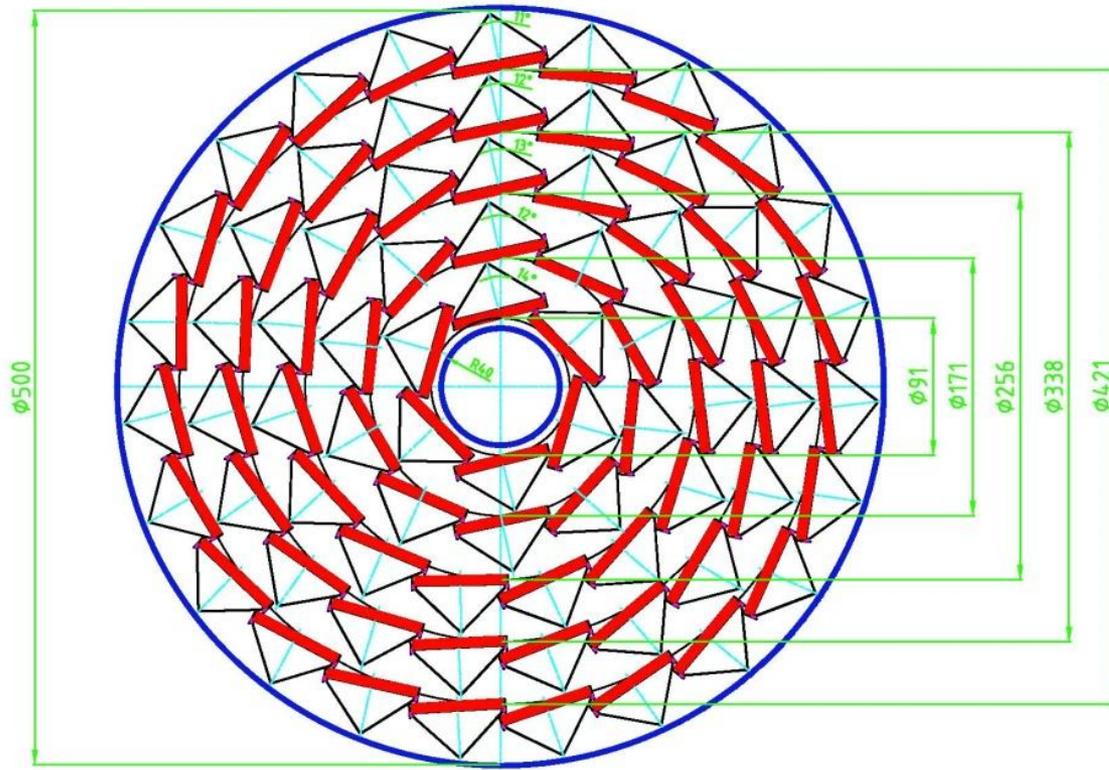
Periphery (detail)



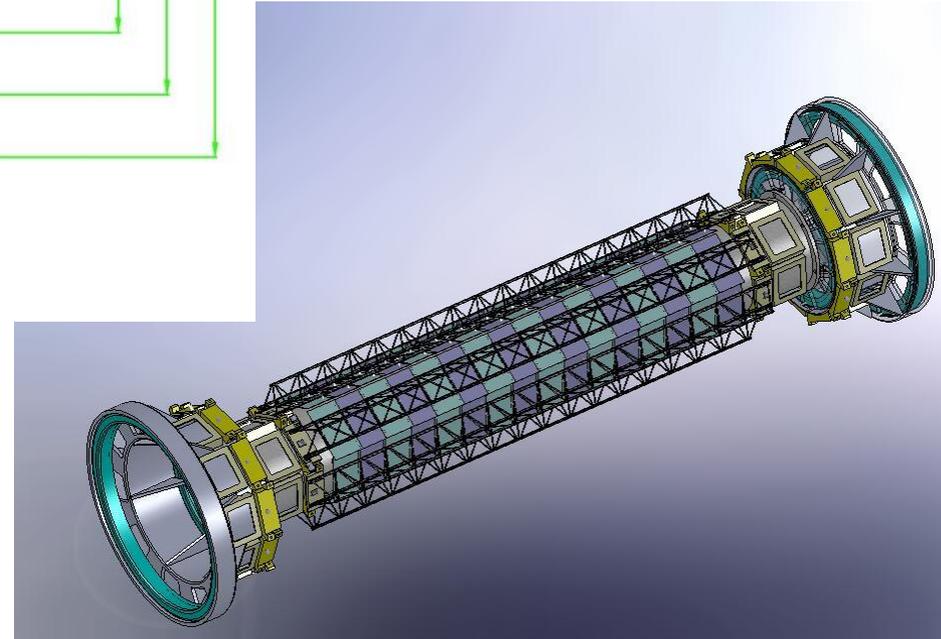
ALPIDE Development



MPD @ NICA



6, 10, 15, 19, 23 ледеров в слое



Спасибо за внимание!