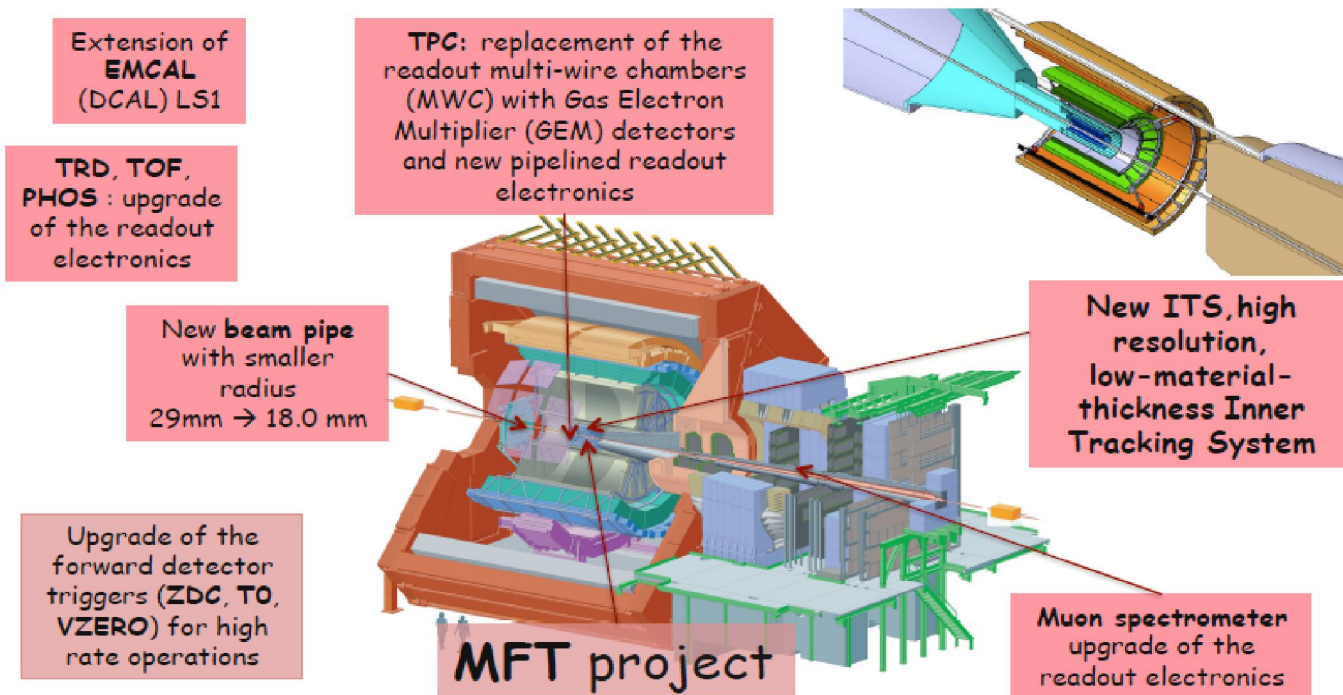


# Детекторная электроника мюонного спектрометра

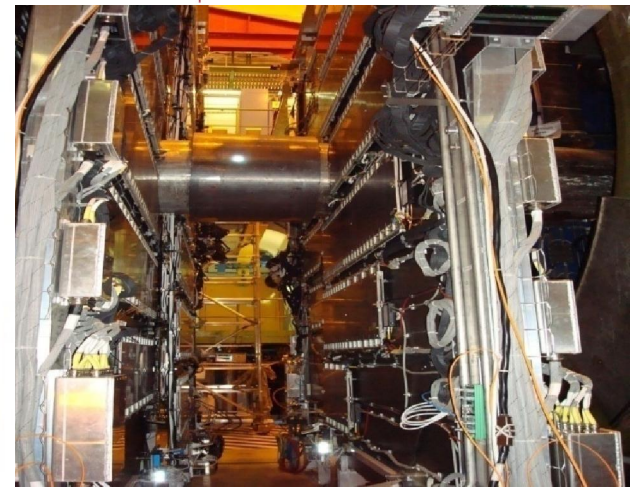
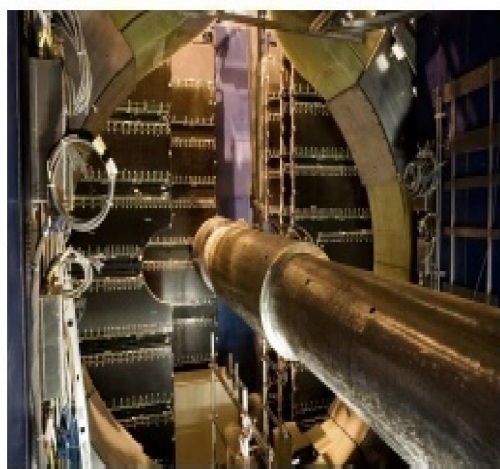
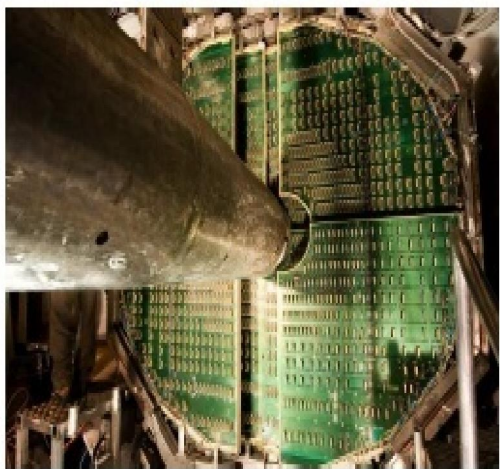
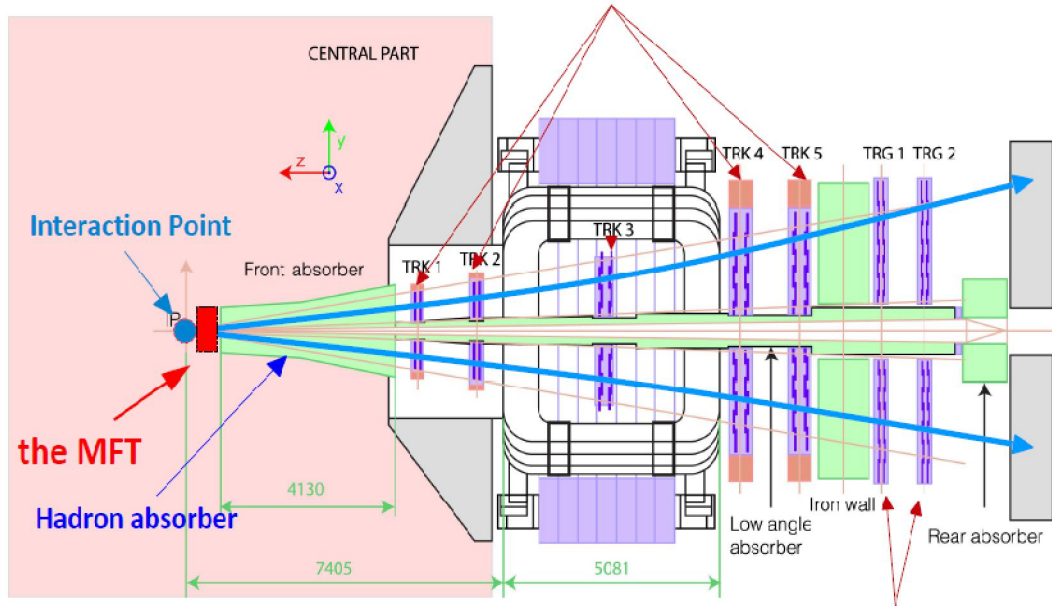
## АЛИСА

Иванов В.В.  
Никулин В.Н.  
Роцин Е.В.  
Самсонов В.М.



ALICE — детектор, изучающий столкновения тяжелых ядер.  
Центральные столкновения порождают кварк-глюонную плазму.  
Время жизни: иоктосекунды ( $10^{-24}$  s),  
Температура: 300 МэВ ( $3.48 \cdot 10^{12}$  K)  
Изучают по вторичным продуктам – в частности мюон-антимюонным парам

### 5 tracking stations



## Внешний детектор

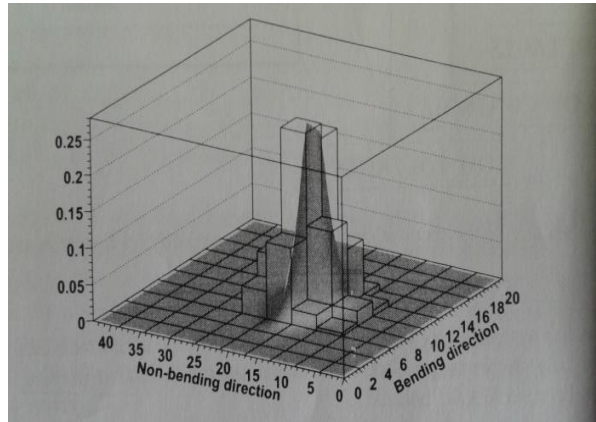
- Пропорциональные проволочные камеры, падовая структура:  $S=100 \text{ m}^2$
- Вычисление координат мюонных треков по амплитудам сигналов ( Матиссон-Гатти)
- Слат:  $h=40 \text{ см}$ ,  $l_{\text{max}}=2.4 \text{ м}$
- Пады:  $w=4 \text{ мм}$ ,  $l=6\text{-}24 \text{ мм}$ ,  $Cd=40\text{-}80 \text{ пФ}$ .
- Рабочий газ  $\text{ArCO}_2$ ,  $HV=1650\text{-}1800 \text{ В}$ ,  $\text{gas gain}=20\,000$ .
- Общее число детектирующих сегментов 156:  
140 слатов и 16 квадрантов
- Суммарное число измерительных каналов:  $1.1 \times 10^6$ .

$$\frac{\rho(\lambda)}{q_{\text{total}}} = K1 \frac{1 - \tanh^2(K2\lambda)}{1 + K3(\tanh^2(K2\lambda))}$$

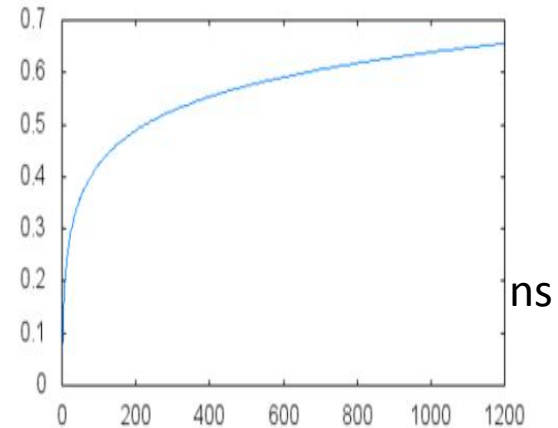
$$\lambda = \frac{x}{h}$$

$x$  – позиция,  $h$  – анод/катод,  
 $\rho$  – плотность заряда

Charge distribution

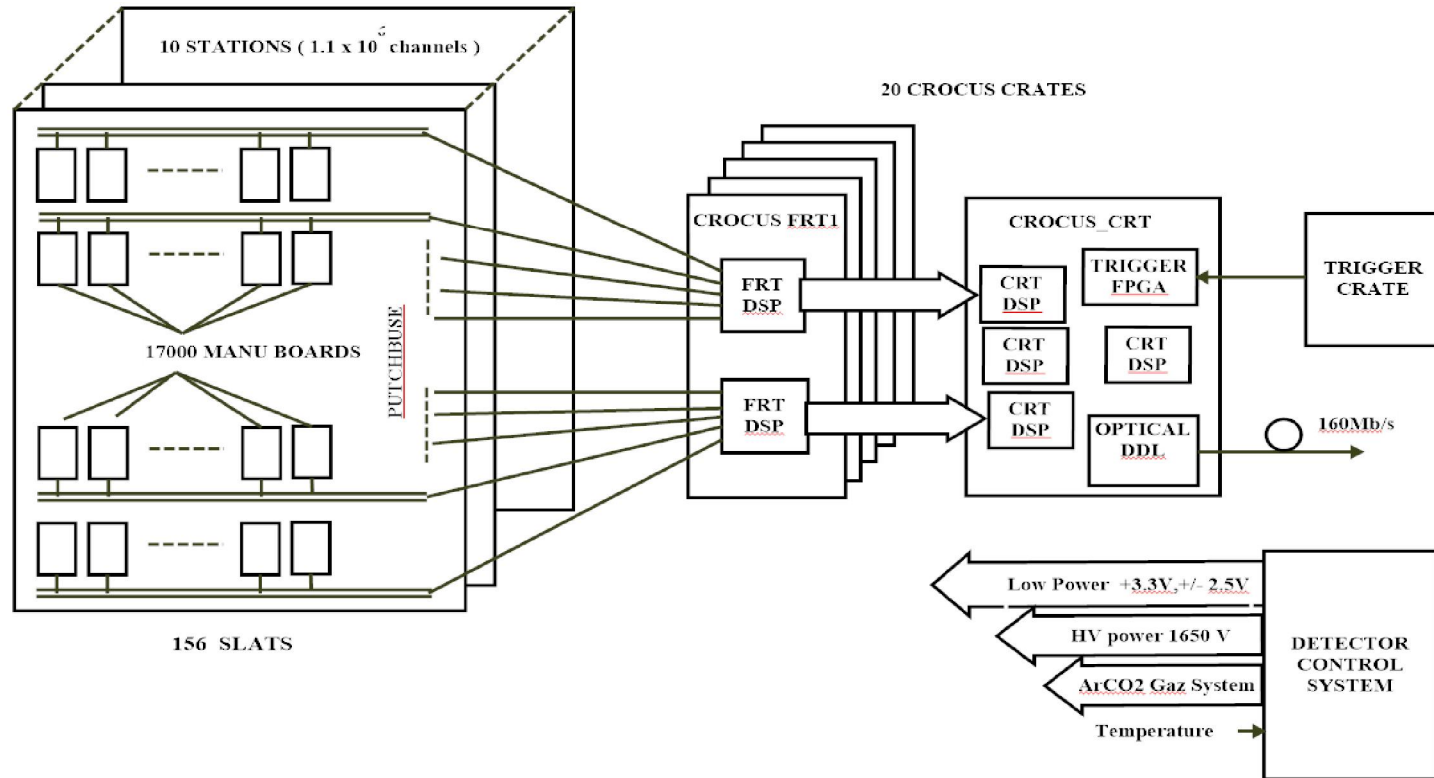


Collection time



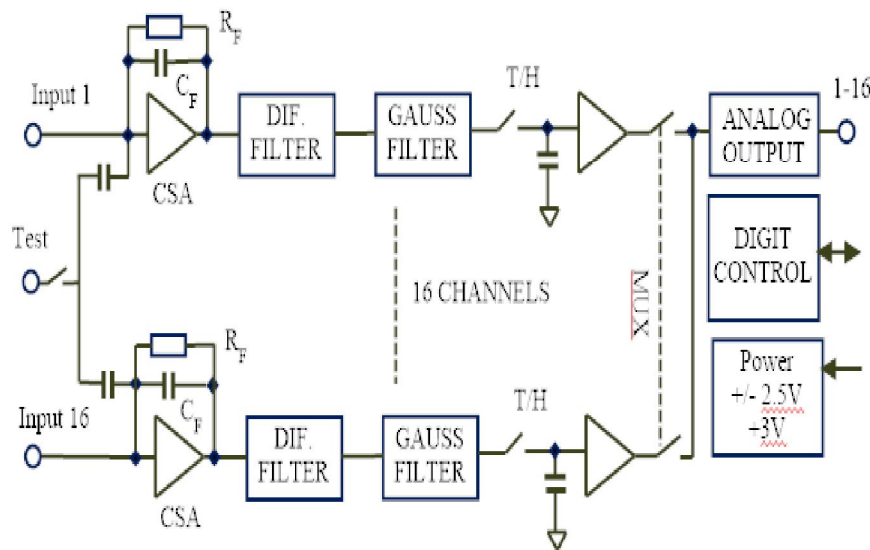
## Электроника первого поколения

- Front-End непосредственно на детекторных слатах
- Системы считывания - 10 однотипных VME миникрейтов CROCUS (Cluster ReadOut Concentrator System), которые принимают данные с 50 линий связи (PatchBuses)
- Связь осуществляется оптической линией связи DDL (Detector Data Link)

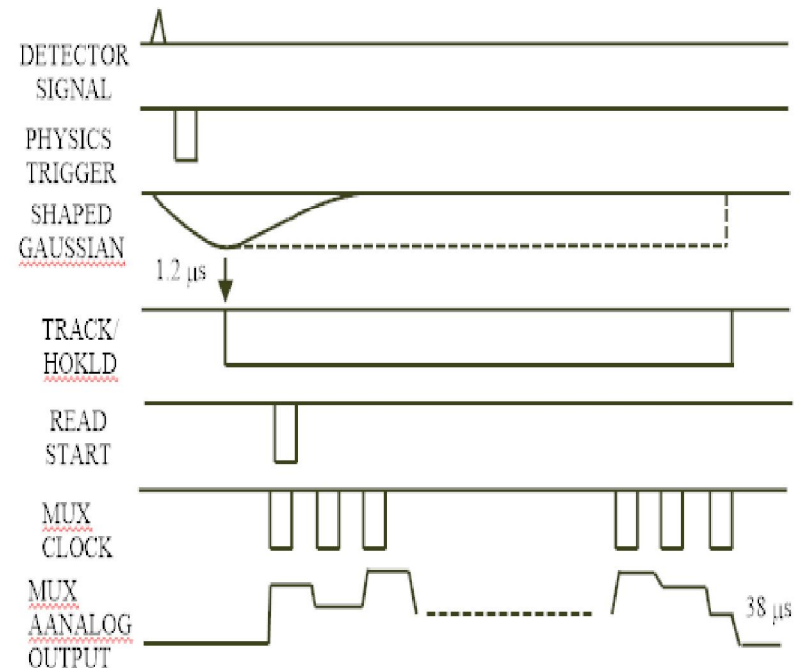


MANAS (GASSIPLEX) 16 ch: ЗЧУ, CR-RC фильтр Гаусса 4-го порядка,  $T_m = 1.2\mu s$ , схема выборки хранения, выходной мультиплексор, BLR -нет

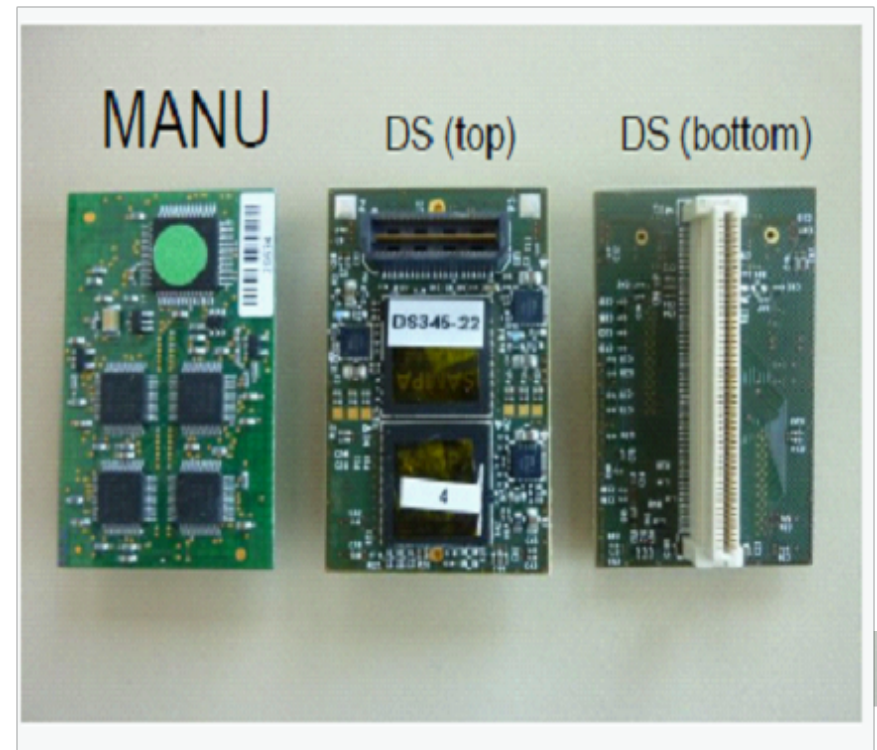
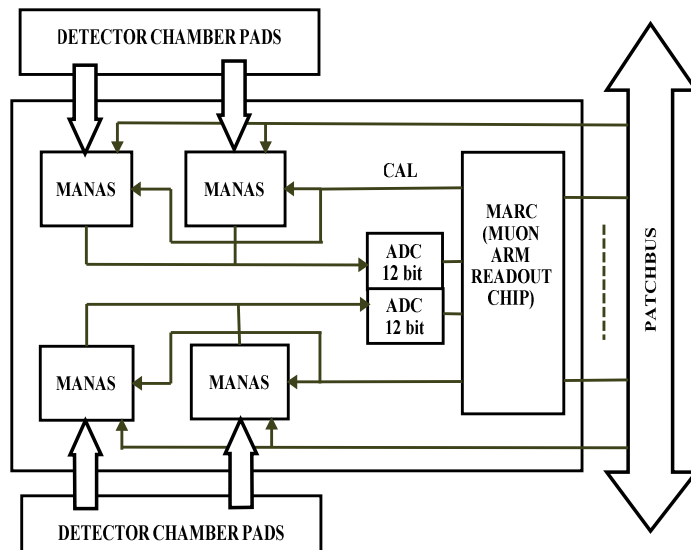
- Передача аналоговых сигналов последовательная. Запуск внешним триггерным сигналом
- Технология CMOS 1.2  $\mu m$ , Параметры входного транзистора:
- р канал,  $L=1.5\mu m$ ,  $W=9000\mu m$ ,  $I_d = 300\mu A$ ,  $g_m = 6.5 mS$
- $C_{in} = 15,4 pF$ ,  $ENC = 600 e + 15 e/pF$ , питание +/- 2.5V, +3V,  $P = 13 mW/channel$ .



**GASSIPLEX vs MANU**  
 41-55  $\mu m$       52 -61  $\mu m$



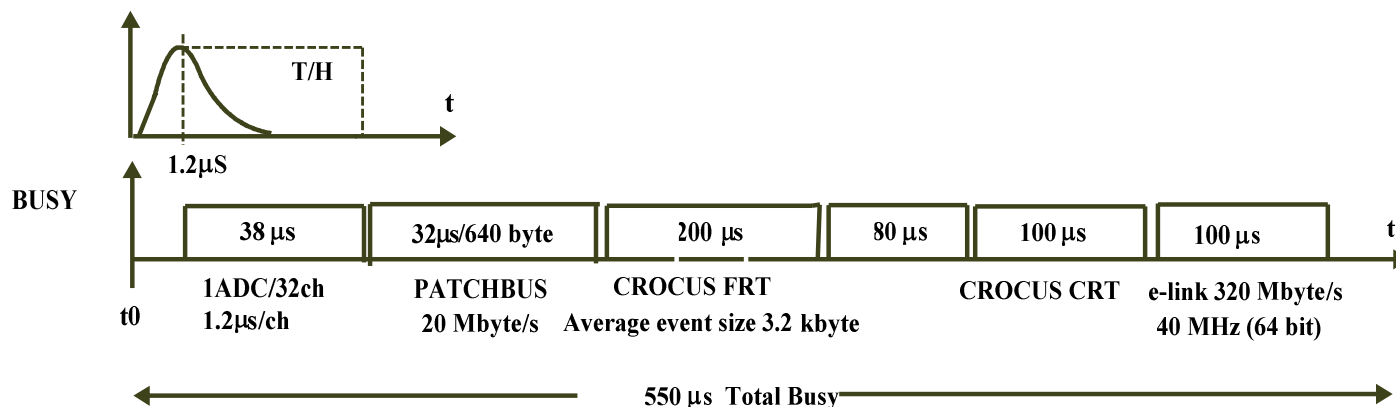
## FRONT-END PCB (MANU)



Микросхема монтируется на 64 канальной печатной плате

- аналоговый мультиплексор
- два 12 разрядных АЦП 0.5  $\mu$ s (Analog Devices AD7495 )
- интерфейс управления и передачи данных заказная цифровая микросхема MARC разработка и производство INFN (Италия)
- интерфейс последовательный (token-ring).

## Временная диаграмма



- Триггер три уровня: L0, L1, L2 Задержка  $t_0 = 1.2 \mu\text{s}$ ,  $6.2 \mu\text{s}$  и  $88 \mu\text{s}$
- В момент времени L0 фиксируется амплитуда измеряемых сигналов и стартует процесс аналого-цифрового преобразования  $38 \mu\text{s}$ .
- Затем данные по шинам данных передаются со скоростью  $20 \text{ Mbyte/s}$ . Время передачи по шине  $640 \text{ bytes/s} = 32 \mu\text{s}$ . В случае когда физические условия в момент времени L1a ( $6.2 \mu\text{s}$ ) не выполняются, аналого-цифровой процесс прекращается и происходит сброс сигнала BUSY.
- CROCUS\_FRT busy =  $200 \mu\text{s}$
- CROCUS\_CRT  $\Delta t = 270 \mu\text{s} + 80 \mu\text{s}$ ,
- при средней плотности данных  $3.2 \text{ kbyte}$  по конвейерной линии в DDL оптической линии передаются в компьютерный зал.
- Результирующее время занятости ( мертвое время) равно  $550 \mu\text{s}$ .

- Система питания централизованная. Питающие напряжения отдельные для аналоговой и цифровой электроники подаются от отдельных источников по шинам питания через дистрибьюторные блоки. Питание спектрометрической системы собрано по схеме с общей землей между высоковольтной и низковольтной системами. Низковольтное питание: 30 блоков WIENER PL512.  $P = 15 \text{ kW}$ , водяное охлаждение. Высоковольтное питание HV : CAENSY1527.

### Опыт эксплуатации

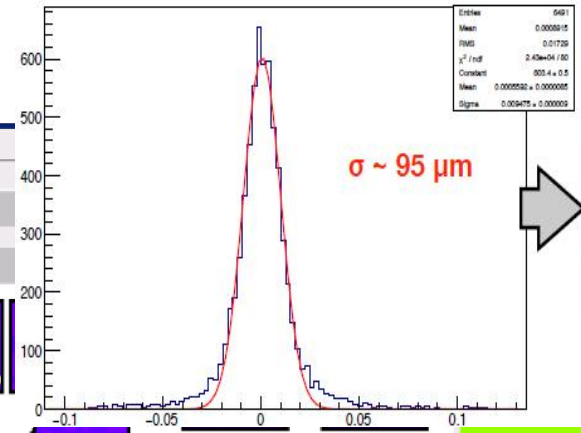
- Коэффициент преобразования:  $3.6 \pm 0.3 \text{ мВ/фКл}$ , линейный динамический диапазон 695 фКл, ENC (1000-1800) эл,  $C_{det} = (30-105) \text{ пФ}$ . Сбор заряда 65%.  $MPV = 54 \text{ (of 82) fC}$
- Потребовалась точная настройка аналоговых источников питания ( $\pm 1 \text{ мВ}$ )
- Возникли проблемы типичные для сложных систем централизованного питания. Эти проблемы обусловлены внешними паразитными наводками, многочисленными контурами заземления и другими видами нестационарных шумов. Много времени отняли контактные проблемы.
- Коррекция усиления на основе базы данных
- 400 MANU (2.3% ) было заменено
- Основной причиной замены электроники является то , что она была рассчитана на работу при низких входных загрузках  $1 \text{ kHz}$  и не способна работать при высоких входных загрузках (50-100 kHz)



# Экран монитора в измерительном зале

## Синий цвет-шум (ENC) < 2000 е

Residuals (all clusters)



File History

Agent Status | QA shifter | QA expert | Error report | Data display

Cathode:  DC 1 | Plane:  Bending  NonBending | ViewPoint:  Front  Back | Print | Print As...

Responder:  Chamber  DE  BUSPATCH  MANU  PAD  PCB

Outline:  Chamber  DE  BUSPATCH  MANU  PAD  PCB

Plot:  Chamber  DE  BUSPATCH  MANU  PAD  PCB

Sources:  none  OCC0  PED0  LowMultiplicity\_AllEvents

PED0:  Mean  Sigma  occ  N  n

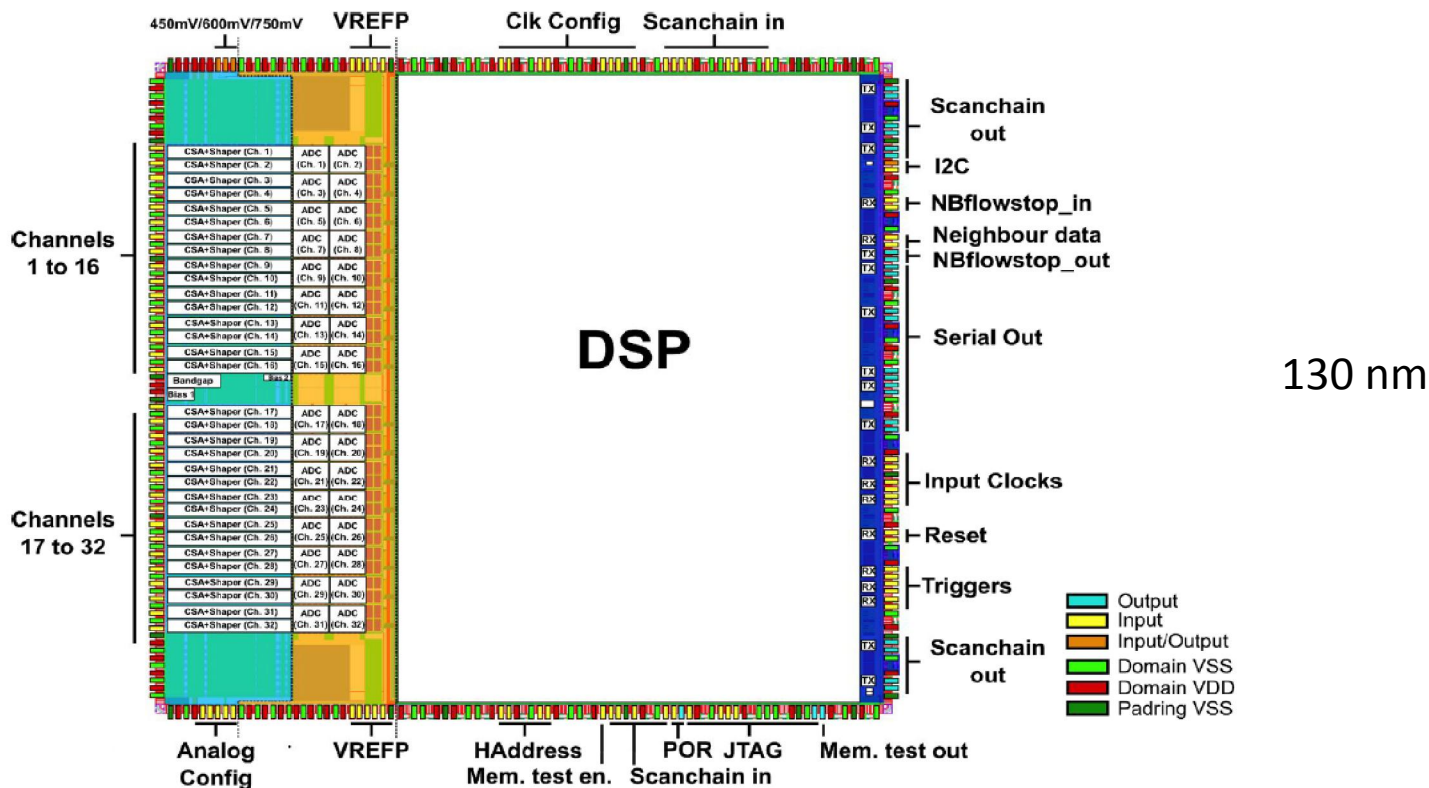
4090  
0  
Auto  
Lock  
Back to default  
Set as default

Init | Start | Stop | Update View Period (sec) 30 | Update

## ЭЛЕКТРОНИКА ВТОРОГО ПОКОЛЕНИЯ

- Модернизация направлена на обработку сигналов с высокой пропускной способностью при входных нагрузках 100 kHz
- Детекторные слаты, включая сигнальный разъем не модернизируются
- Принципиально меняется методика и алгоритм обработки сигналов. Триггерный режим заменяется на режим самозапуска, аналоговое формирование сигналов заменяется на цифровое с предварительным аналоговым фильтром гаусса
- Головной элемент 32 канальная заказная микросхема SAMPA. Конструкция 372 ножек BGA
- Устройства считывания, предварительной обработки и передачи входной информации также меняются, причем скорость передачи данных повышается до 4.8 Gb/s.
- Функционально состав электроники упрощается до 2-х : ---
  - SAMPA головная микросхема
  - SOLAR модуль VME передачи данных

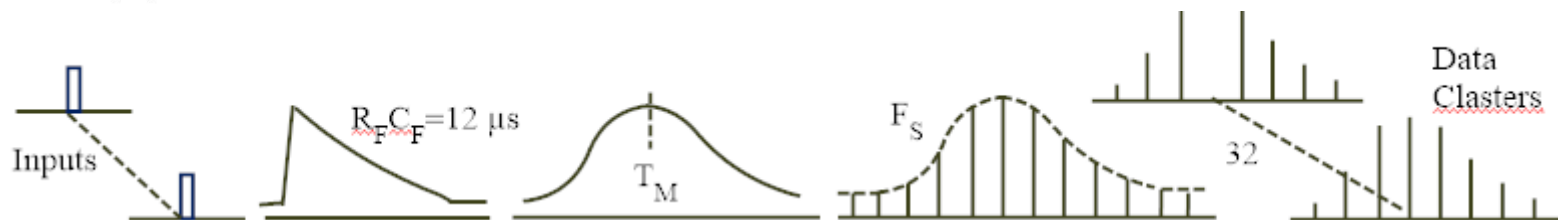
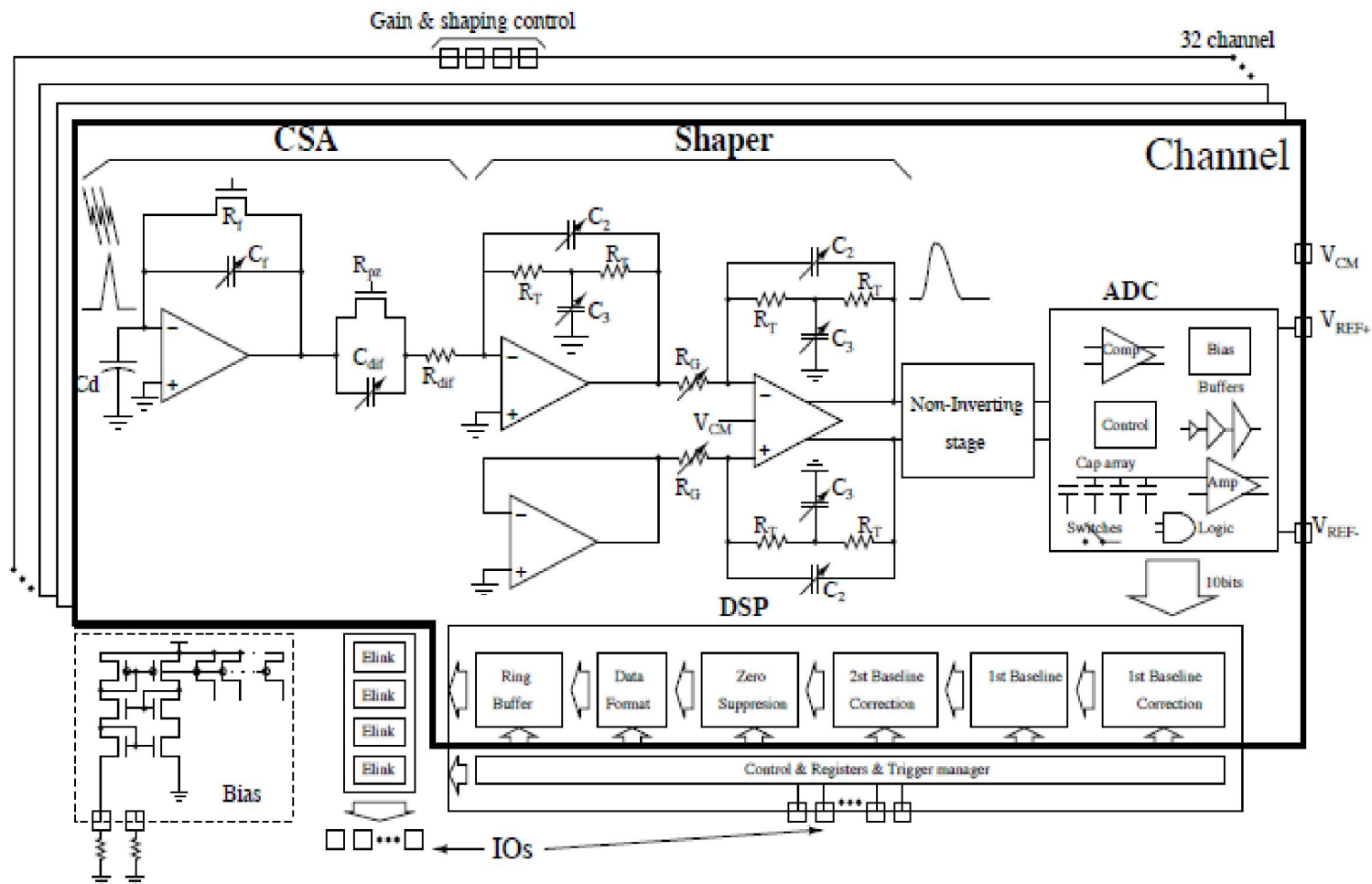
# Структура чипа SAMPA



- TFBGA package
- 15 mm x 15 mm body size
- 1.2 mm thickness
- 0.65 mm ball pitch.
- 372 balls
- 4-substrate layers

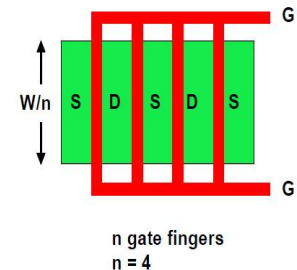
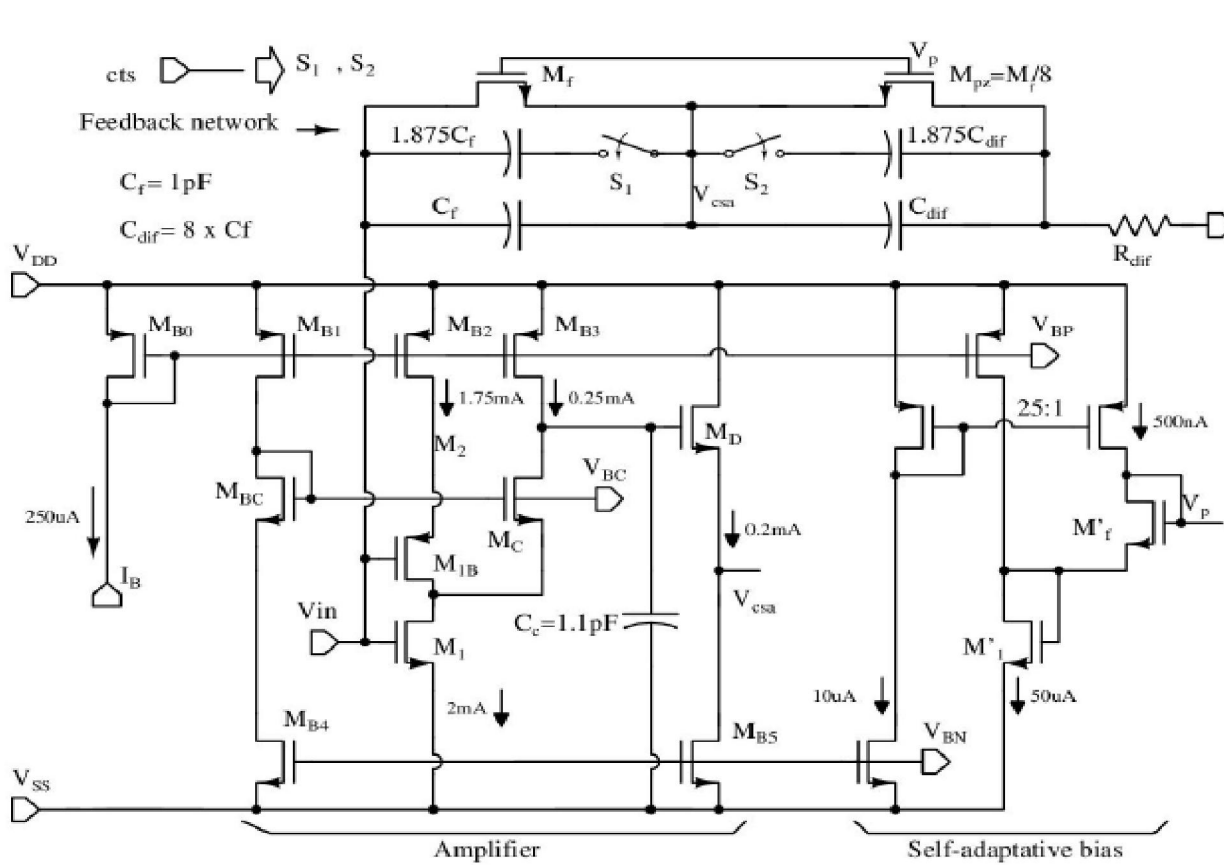
## Спецификация

	MUON	TPC
Входной сигнал	положительный	Отрицательный
Емкость детектора	40-80 pF	12-20 pF
Чувствительность	4 mV/fC	(20-30)mV/fC
Cfb, Rfb	2.4 pF, 6 MΩ	(0.6 -1.2)pF,
Формирование	300ns 43 fC	160 ns
ENC	950 e (40 pF) 1600 e (80 pF)	580e (18.5 pF)
Диапазон	500 fC, 2 V	(100-67 ) fC,
Взаимные наводки	0.2%	0.3%
Число разрядов АЦП	10 (9.2) bit	
Частота АЦП	10 MHz	(10- 20) MHz
Нелинейность	0.65 LSB	
Интегральная		
Дифференциальная	0.6 LSB	
Мощность/канал	12mW	

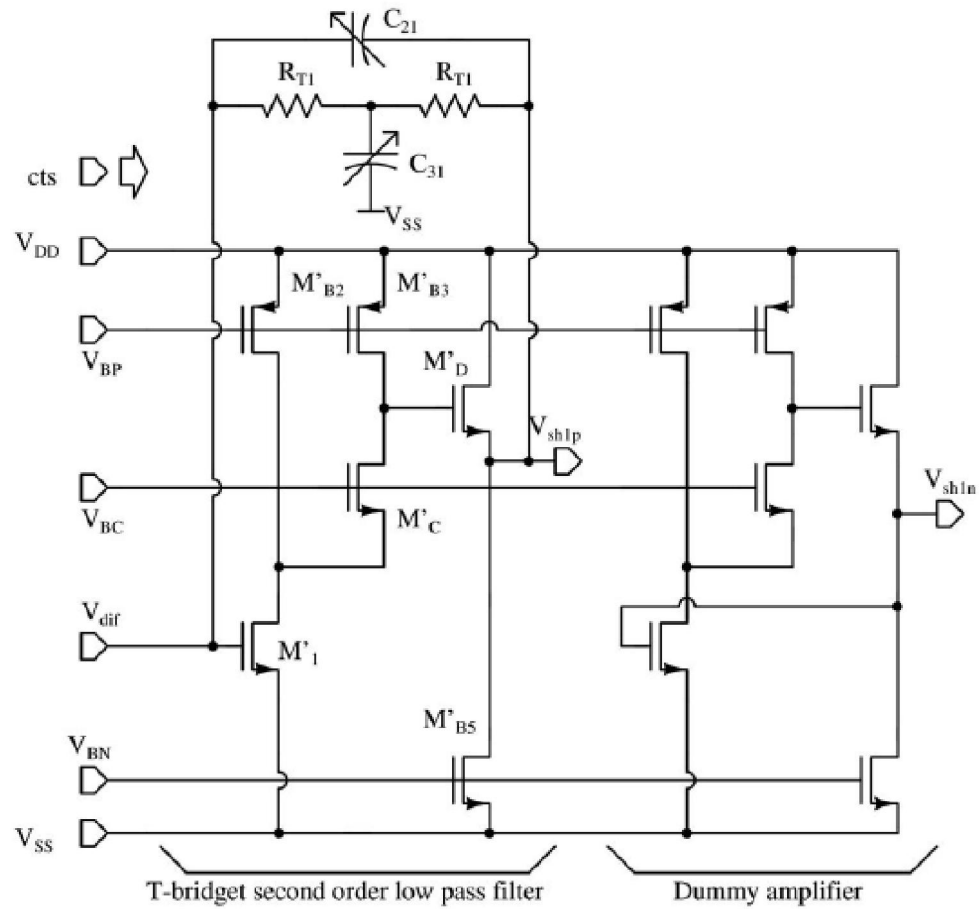


## Зарядочувствительный предусилитель

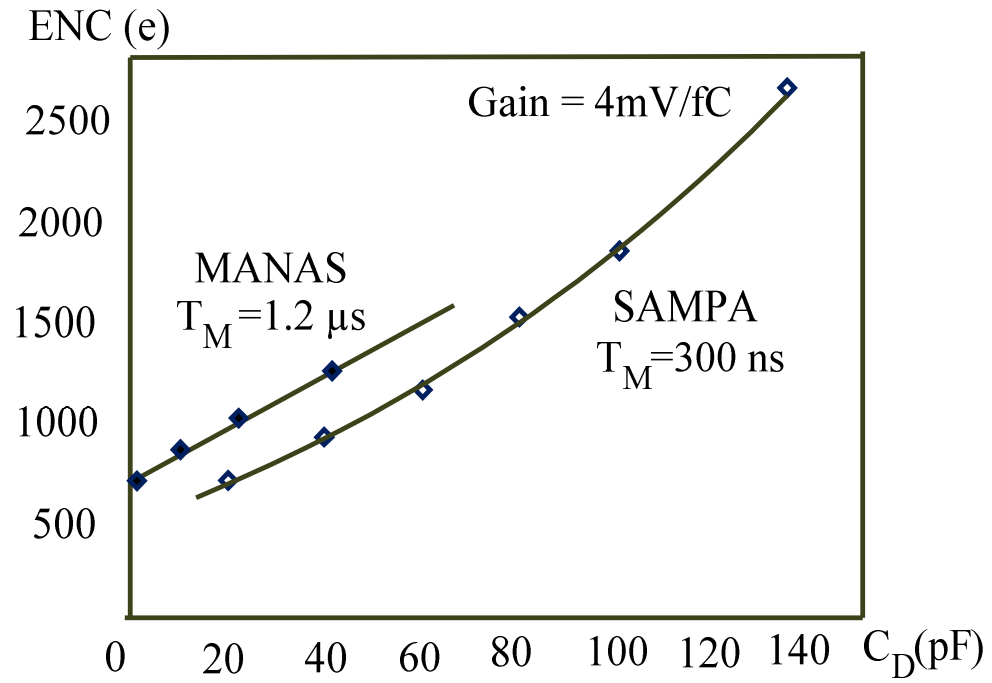
- $R_{fb} = 6\text{M}\Omega$ . входной резистор  $70\ \Omega$  , емкость обратной связи  $C_{fb} = 0.8\ \text{pF}$
- Параметры входного транзистора: n -канал, разделен на 40 стрипов,  $L=130\ \text{nm}$ ,  $W=2000\ \mu\text{m}$ , режим сильной инверсии, ток стока  $I_D = 2\text{mA}$ , крутизна  $g_m = 44\text{mS}$ , входная емкость  $C_d = 13\ \text{pF}$



# Фильтр второго порядка ( T-мост)

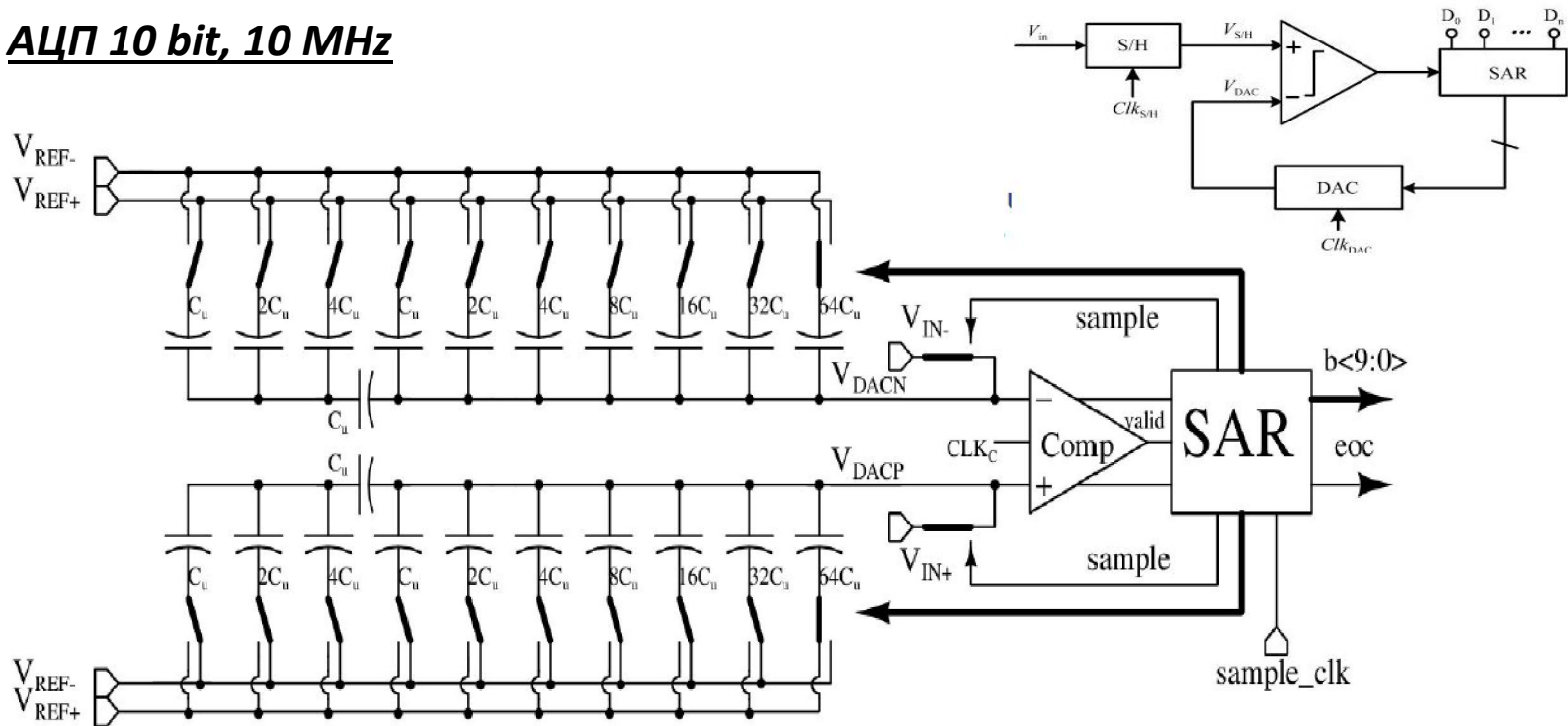


# ENC





## АЦП 10 bit, 10 MHz

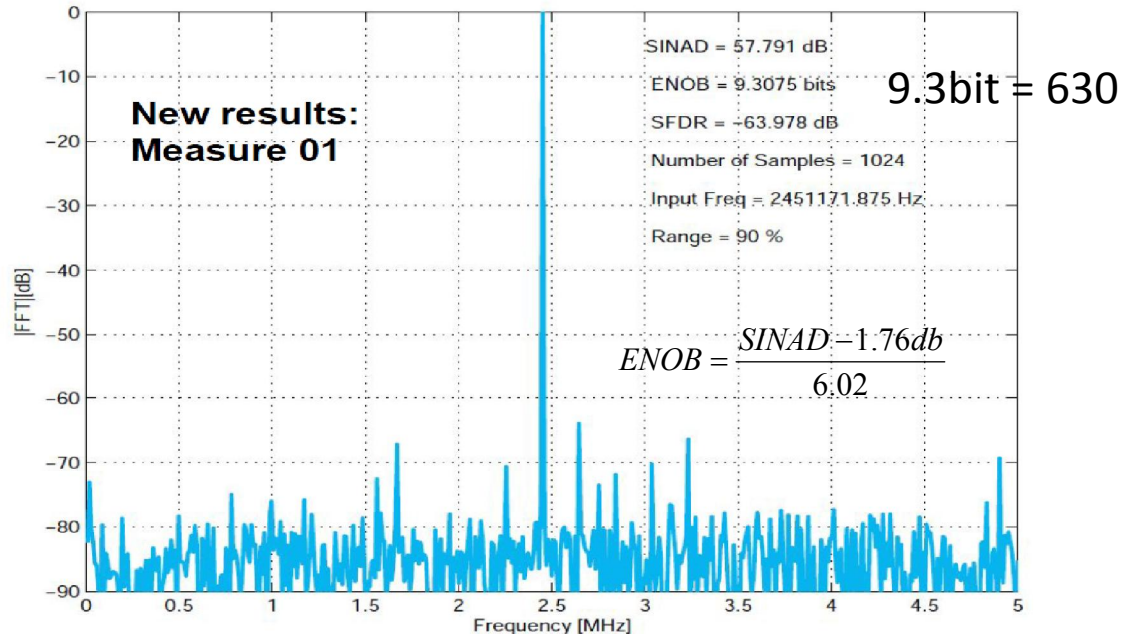


- конденсаторная матрица ( $C_{min} = 45 \text{ fF}$ ,  $4\mu\text{m} \times 7\mu\text{m}$ )
- внутренняя частота 80 MHz
- схема выборки хранения на один цикл измерения
- коммутирующие ключи
- компаратор из 15 транзисторов и 5 логических элементов
- схема логики последовательного приближения.

$$ENOB = \frac{1.76 - 20 \log \left( \frac{6.6V \text{ r.m.s}}{V_{\max}} \right)}{6.02} \quad \begin{array}{l} 1.76 = 10 \log_{10} 3/2 \\ 6.02 = 20 \log_{10} 2 \end{array}$$

$$ADC_{noise \text{ r.m.s.}} = q / \sqrt{12} \quad 10 \text{ bit} / 2 \text{ V max} - ENOB = 9.3$$

**ENOB Fin=2.5 MHz Fs=10MSPS VDD=1.25 VREFP=1.1V**



SAMPA + 60pf (Cdet ) noise analog +ADC : Vr.m.s = 0.6 ch x 2 mV,  
 $ENC_{\Sigma} = 1800 e$

## Цифровая обработка –стабилизация базовой линии

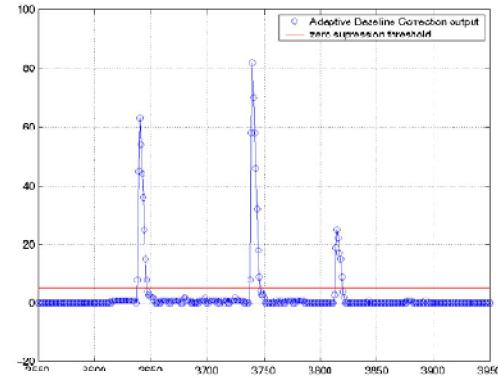
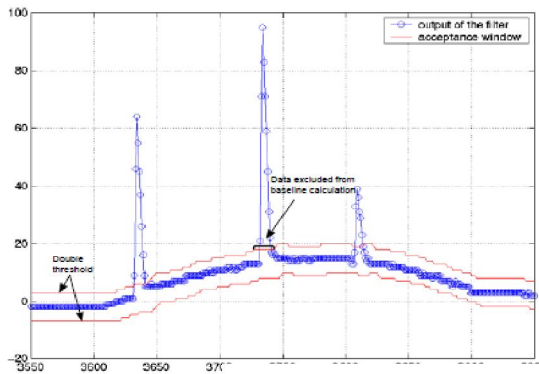
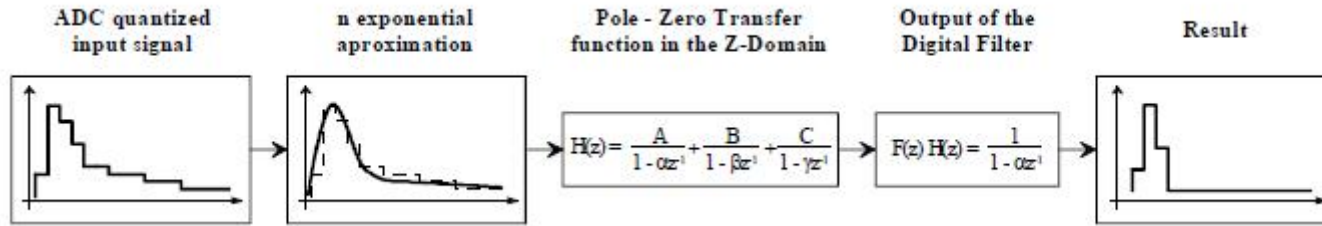
- ВС1 выполняет функцию подавления ионных хвостов. IIR фильтр 4-го порядка (два последовательных 13 разрядных фильтра) + схема вычитания.

Конфигурация фильтра устанавливается 8 коэффициентами

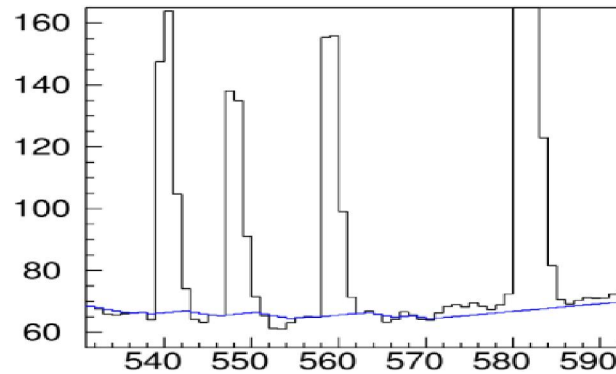
- ВС2 корректирует флуктуации сигнала обусловленные нестационарными шумами.

Фильтр скользящего среднего моделирующий базовую линию e + схема вычитания. Формирование сигнала моделирующего базовую линию происходит в амплитудном окне ее колебаний.

- ВС3 нелинейная схема . Работает без порогов поэтому более адаптивна: не имеет мертвых зон и не требует точной настройки параметров. Основная идея состоит в том, что моделируемая базовая линия не фиксируется на время действия сигнала, а пролонгируется с выбранным наклоном. Крутизна наклона регулируется индивидуально.



$$y(n) = \frac{1}{M+1} \sum_{k=0}^M x(n-k) \quad M = 1, 3, 5 \text{ or } 7$$

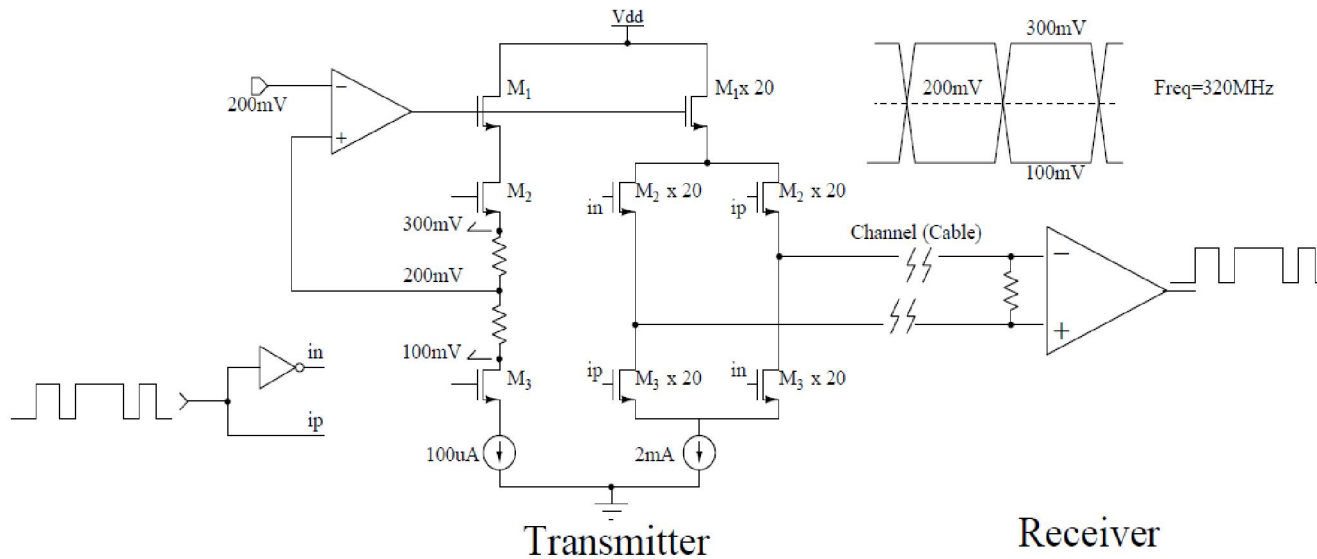
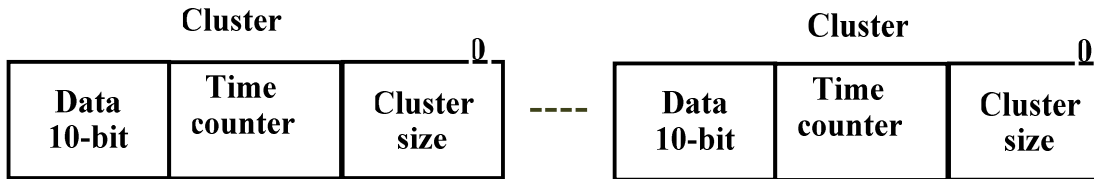


## Чтение данных

- Чтение данных в непрерывной моде по четырем линиям 80 Mbs (e-link)
- В триггерном режиме пакет данных формируется по внешнему сигналу, чтение данных осуществляется по сигналу триггера с минимальным временем ожидания 9.6  $\mu$ s.
- Размер кластера данных одинаков для всех 32 каналов и зависит от амплитуды сигнала. Кластеры объединяются в пакет выходных данных из 1024 10 разрядных слов.
- В случае наложений, временной кадр останавливается и немедленно начинает формироваться новый полноценный пакет данных, а сигнал наложений маркируется.
- При работе в условиях высоких входных загрузок когда буферная память микросхемы переполняется контроллер микросхемы формирует усеченный пакет данных, который маркируется в заголовке пакета данных. Структура пакета данных показана на рисунке Сжатие данных реализуется: кодами Хофмана и подавлением пустых каналов.
- SLVS линия связи это высокоскоростная дифференциальная линия с волновым сопротивлением 100 Ом и амплитудой сигнала 200 мВ.

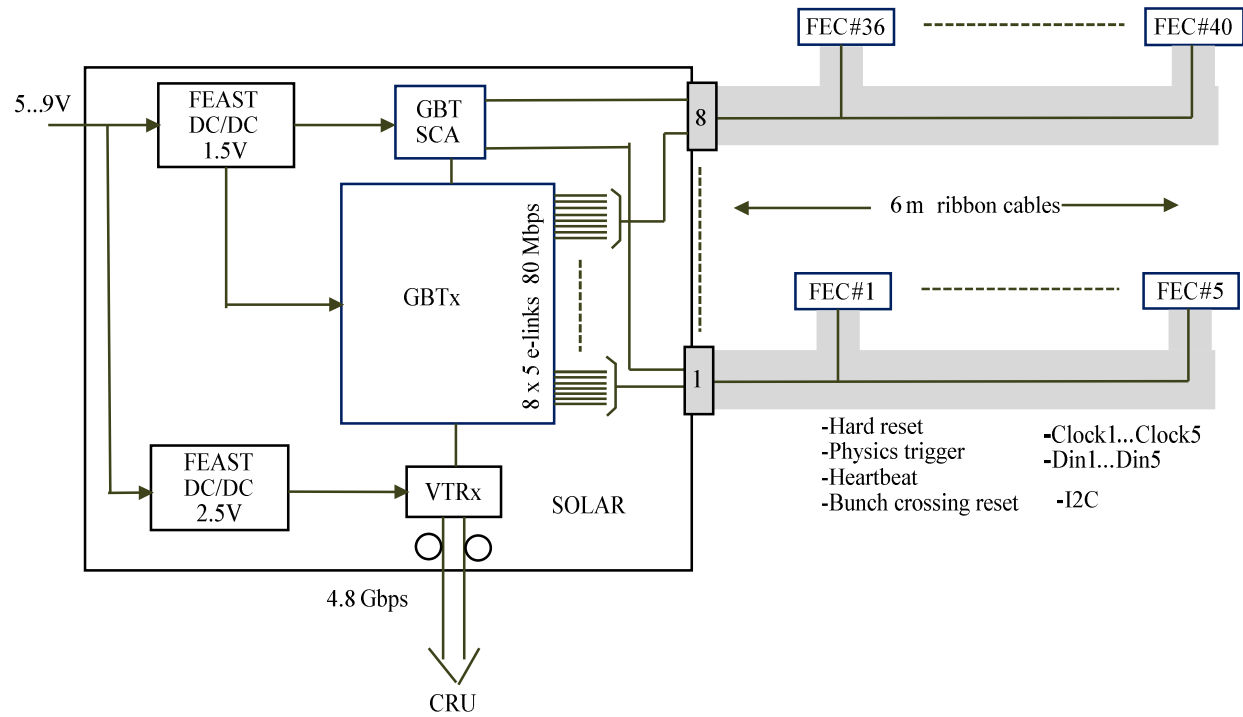
<b>Parity</b> 2 bit	<b>Bunch counter</b> 20-bit	<b>Cluster Q-ty</b> 10- bit	<b>Channel number</b> 5-bit	<b>Chip Number</b> 4 bit	<b>Data Pacet</b> 3- bit	<b>Heming code</b> 6 -bit
------------------------	--------------------------------	--------------------------------	--------------------------------	-----------------------------	-----------------------------	------------------------------

Data (variable length)

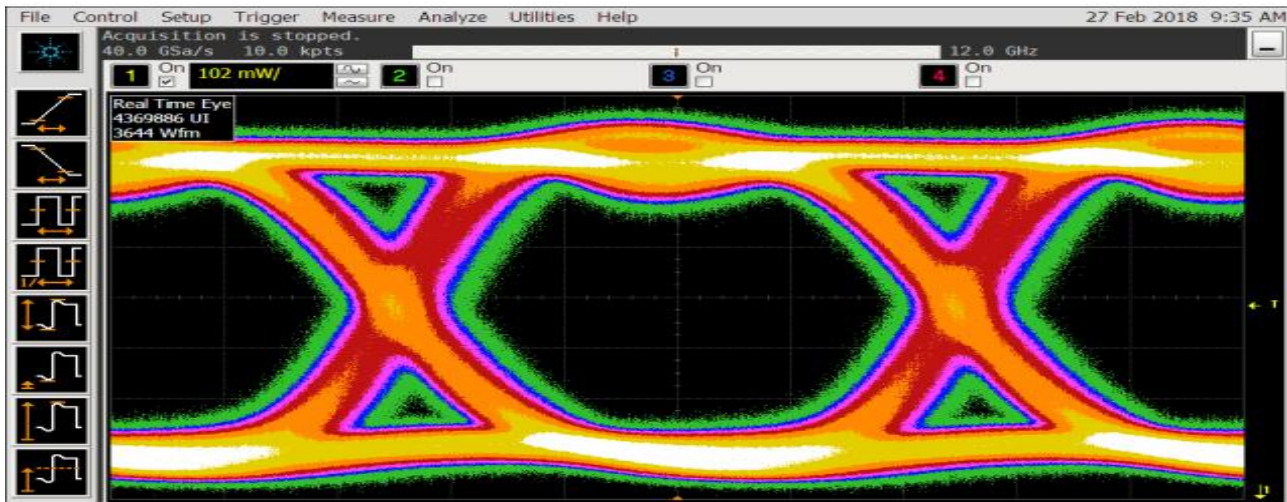


## SOLAR

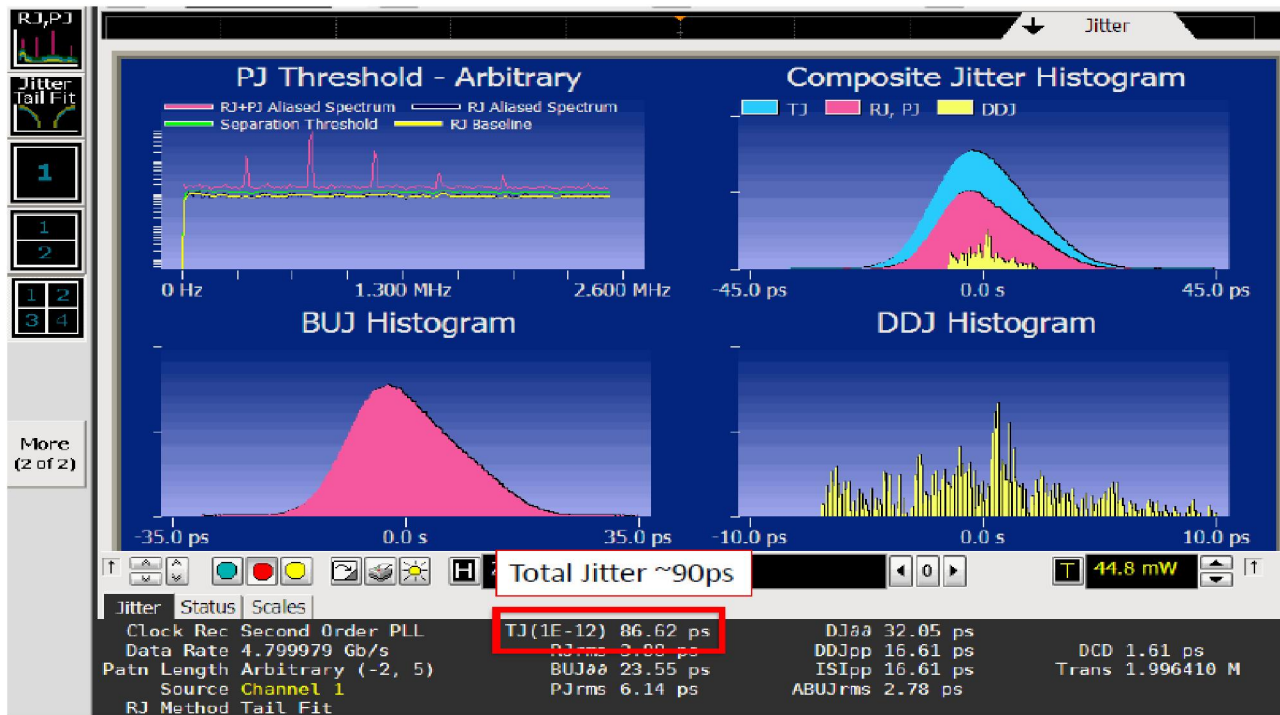
- Двухнаправленная связь между детекторной электроникой и компьютерным залом. осуществляется по оптическим линиям 4.8 Gb/s. Функционально линия связи осуществляет три действия: передачу измеряемых данных, передачу временной информации, включая триггерные сигналы, и передачу управляющих сигналов (slowcontrol).
- Конструктивно линия разделена на детекторную часть, которая работает в тяжелых физических условиях включая радиационную стойкость, и лабораторную часть, которая работает в компьютерном зале. Модуль SOLAR, расположенный в непосредственной близости от детектора обслуживает 80 микросхем SAMPA.
- Базовый элемент микросхема GBTX (26 авторов)





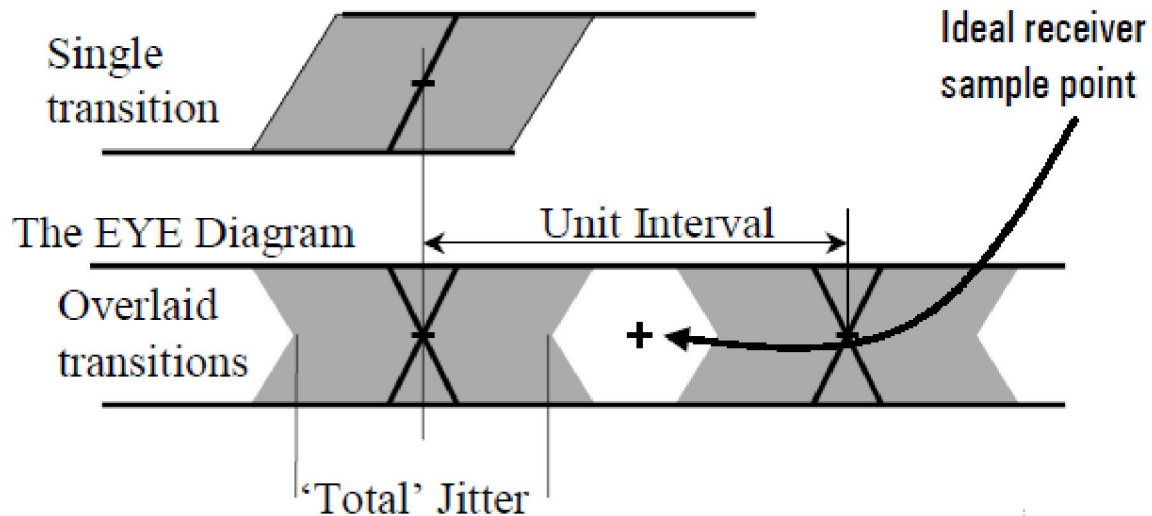


Time Jitter at Output of Solar (PRBS mode)



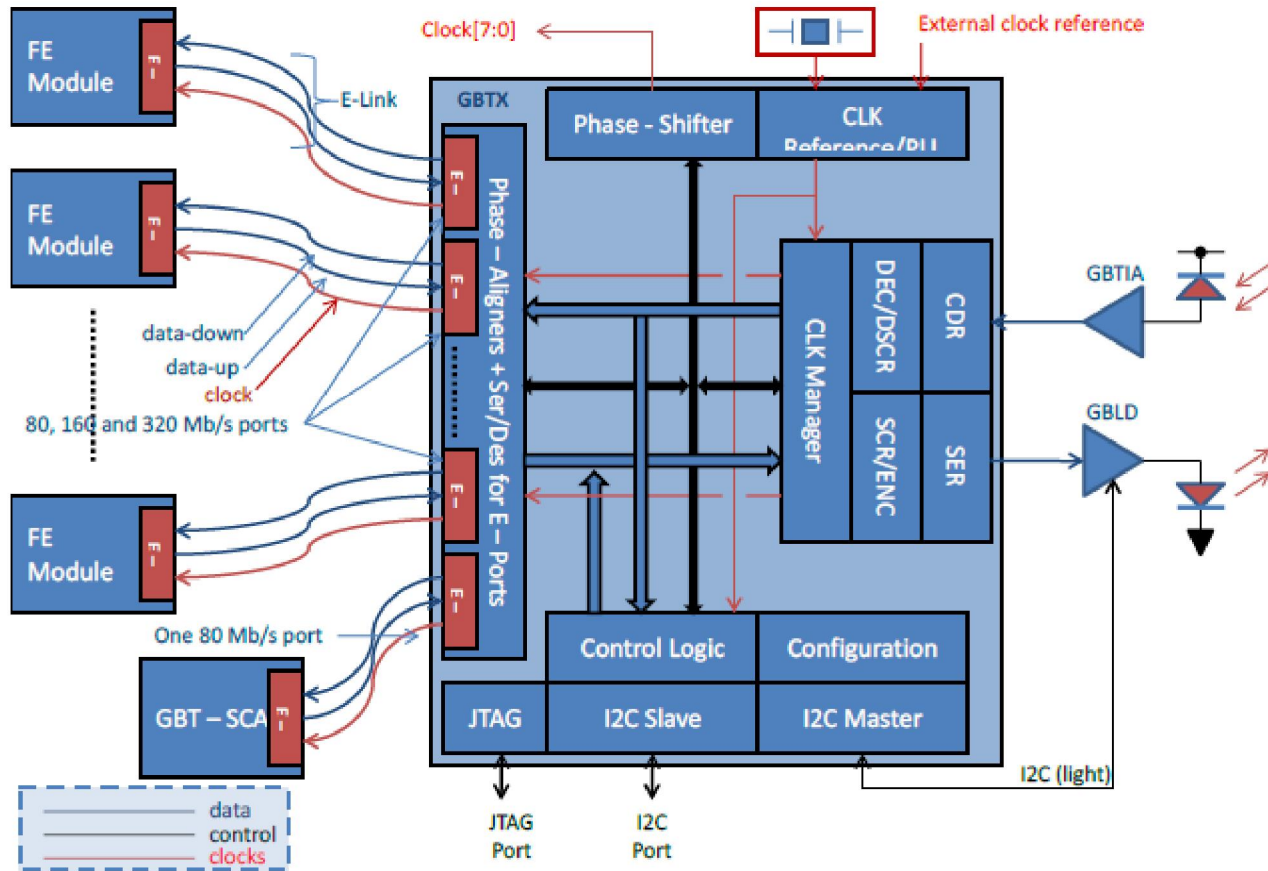
# Jitter

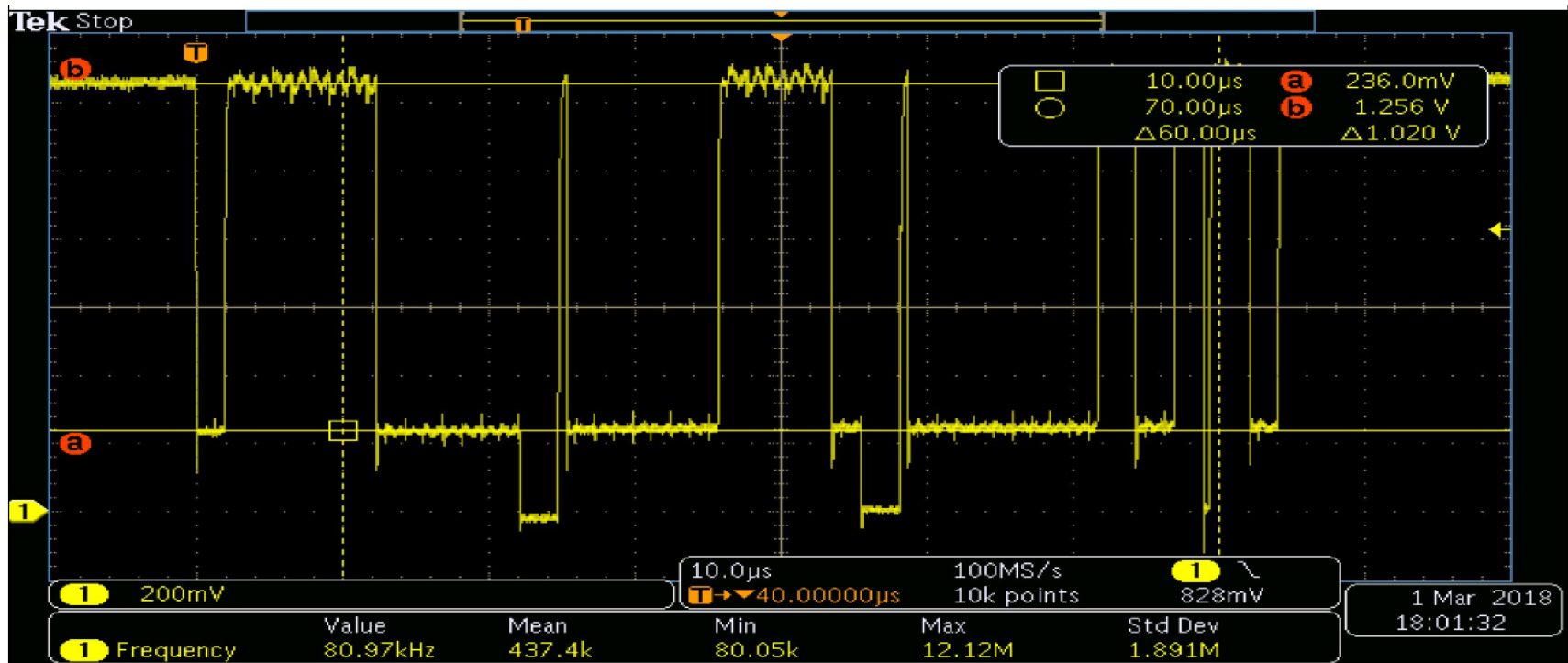
- ITU-T Definition:  
*A Measure of the short term time variations of the significant instances of a digital signal from their ideal positions in time.*
- MJSQ Definition:  
*The deviation of a signal edge time at a defined amplitude of the signal from a reference time.*



TJ –total jitter, PJ –periodic, RJ -random  
BUJ- bounded uncorrelated jitter  
DDJ- data dependant

# GBTX

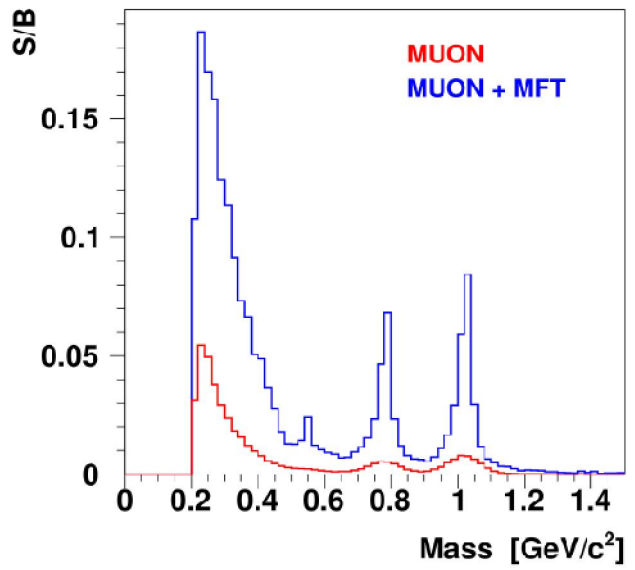
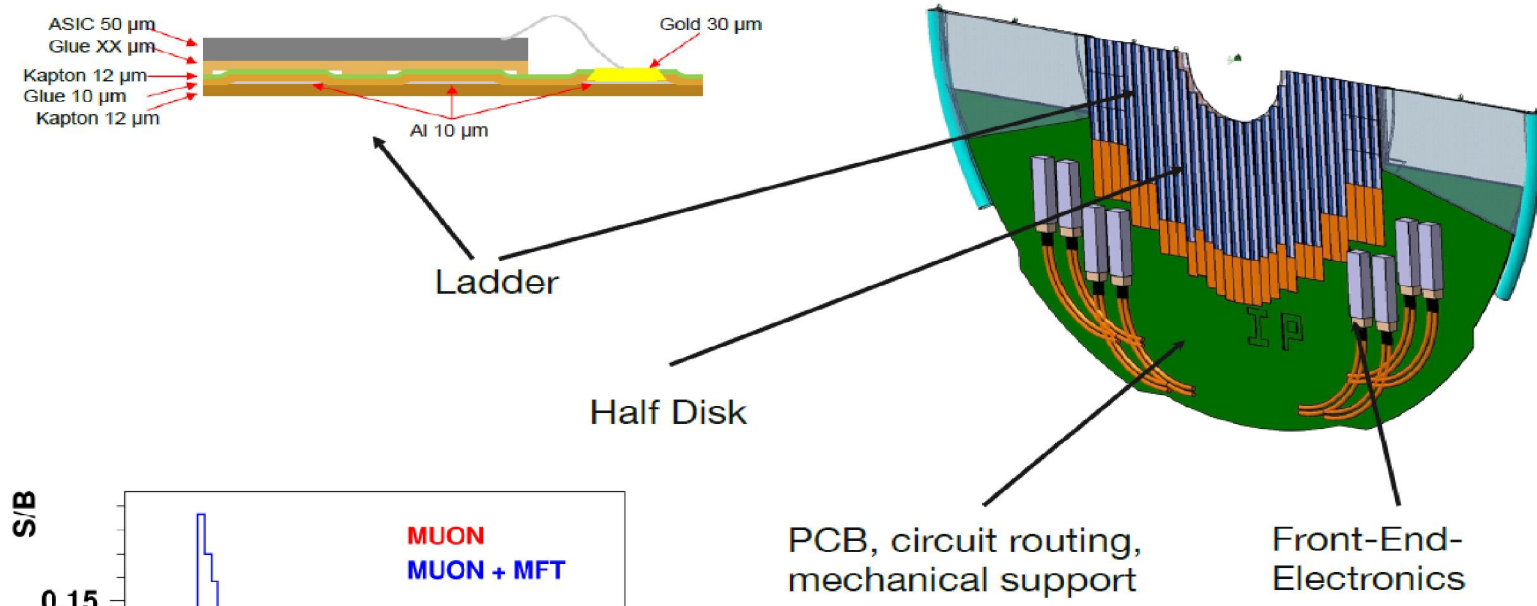




I2C

# MFT

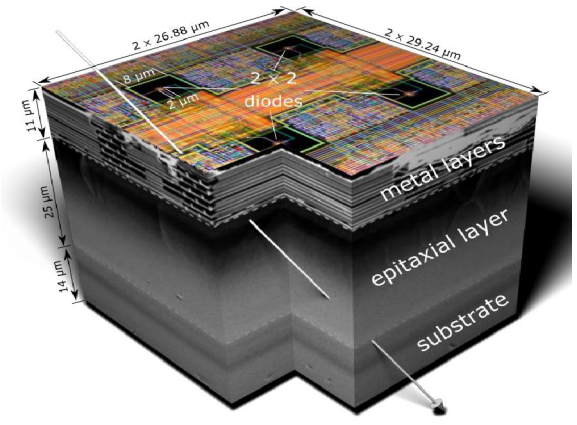
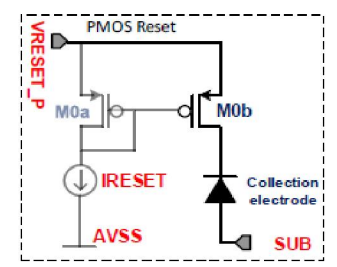
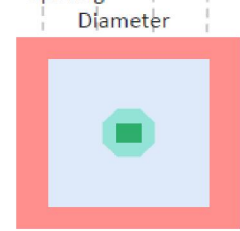
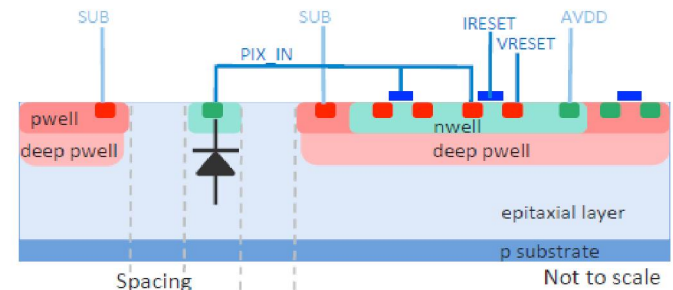
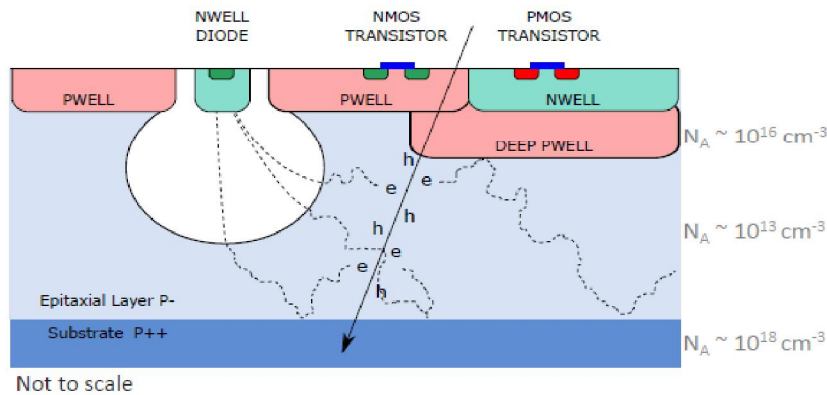
- Пиксельный Si детектор, всего  $\times 10^9$  каналов,  $S = 10 \text{ м}^2$ , разрешение  $5 \mu\text{м}$ .

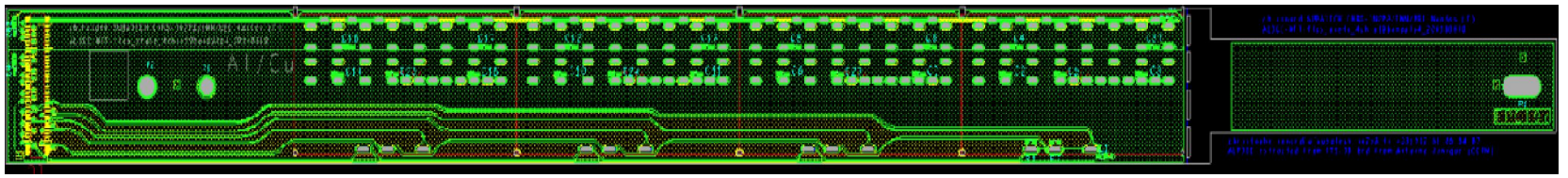
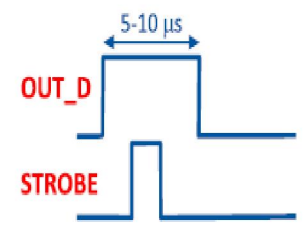
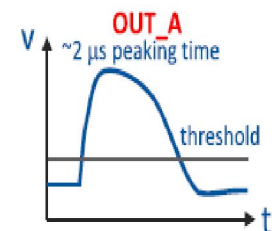
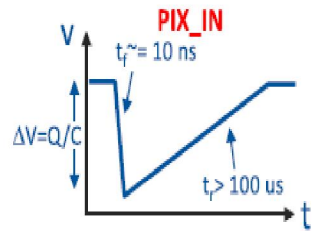
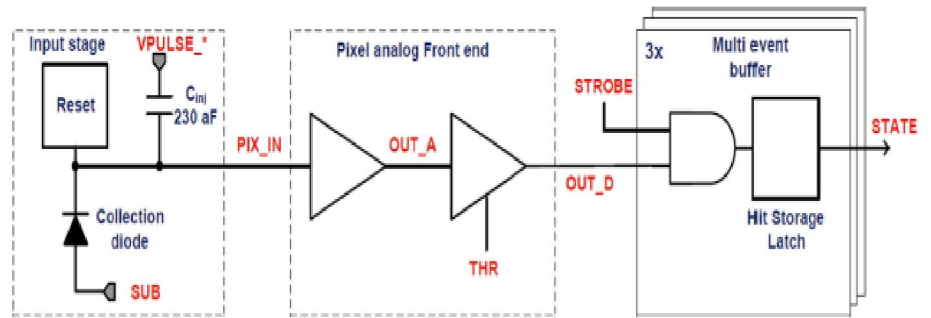
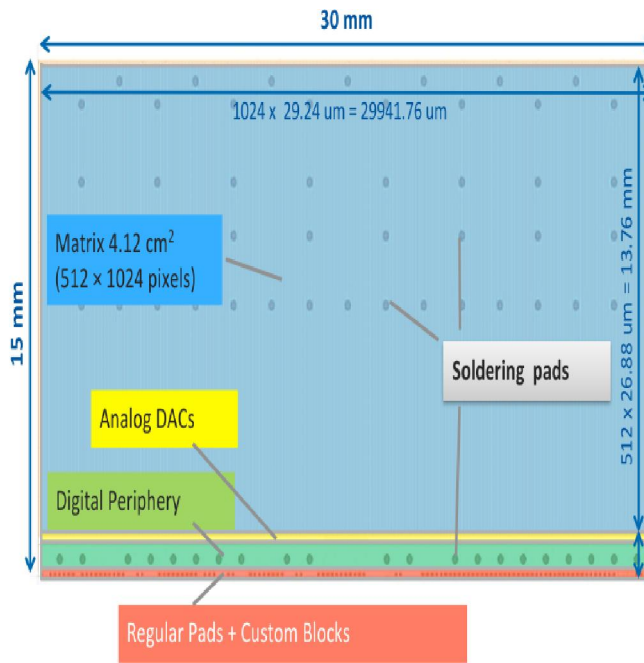


Параметр	MFT	OuterBarrel
Площадь микросхемы (mm)	15x30	
Площадь пикселей ( $\mu\text{m}$ )	28 x 28	28 x 28
Толщина пикселя ( $\mu\text{m}$ )	50	100
Число пикселей	524288	
Коэффициент преобразования	4mV/e	
Пространственное разрешение ( $\mu\text{m}$ )	5	10
Эффективность	99%	
Число ложных срабатываний	$<10^{-5}$	
Время формирования сигнала ( $\mu\text{s}$ )	$<4$	
Мертвое время		
Пропускная способность (kHz)	100	
Рассеиваемая мощность (nW/pixel)	40	
(mW/cm <sup>2</sup> )	20-35	
Максимальная поглощенная доза TID (krad)	2700	100
Радиационная стойкость к не ионизирующему излучению NIEL1 MeVn <sub>eqv</sub> /cm <sup>2</sup>	$1.7 \times 10^{13}$	$1.7 \times 10^{12}$
Радиационная стойкость к ионизирующему излучению 1MeVn <sub>eqv</sub> /cm <sup>2</sup>	5 M	

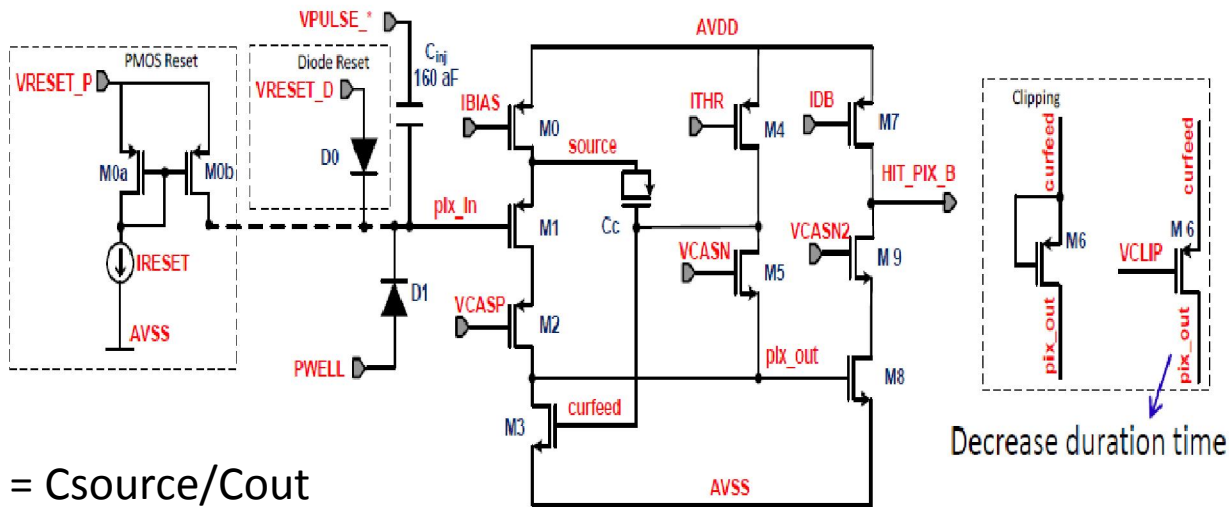
Технологическая база - 0.18  $\mu\text{m}$ . Структура микросхемы:

- Si подложка типа p с высокоомным эпитаксиальным слоем ( $>1 \text{ k}\Omega/\text{cm}$ )
- Пиксельная матрица 512 x 1024. Генерируемый заряд 80 e/ $\mu\text{m}$ ,
- $V_{\text{bias}} < 10\text{V}$
- Собственно детектор - диод n канал,  $d = 2 \mu\text{m}$ , напряжение смещения  $< 10 \text{ V}$
- CMOS 180nm  
3 nm thin gate oxide, 6 metal layers







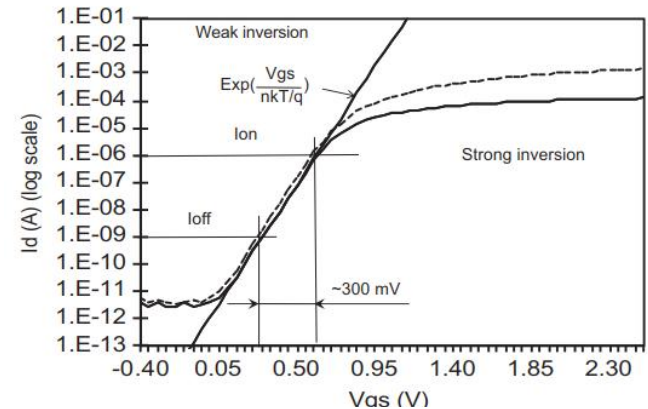


$$\text{Gain} = C_{\text{source}}/C_{\text{out}}$$

$$\Delta V_{\text{out}} = Q_{\text{in}}/C_{\text{in}} \times C_{\text{source}}/C_{\text{out}}$$

Напряжение в точке полюса pix\_out управляет затвором транзистора M8, который вместе с транзистором M7 выполняют функцию дискриминатора. Рабочая точка дискриминатора установлена так, что  $I_{M8} < I_{DB}$ , а выход компаратора соответствует высокому уровню. Порог срабатывания дискриминатора определяется уровнем сигнала при котором  $I_{M8} = I_{DB}$ . При  $I_{M8} > I_{DB}$  транзистор M8 открыт и выход компаратора равен нулю. Для ограничения длительности выходного импульса при амплитудных перегрузках введен транзистор M6, включенный диодом. В исходном состоянии он закрыт и открывается для увеличения разрядного тока. Открытие M6 происходит когда сигнал превышает порог в 1.4 раза. Статические параметры входной цепи:  $I_{\text{bias}}=20\text{nA}$ ,  $I_{\text{thr}}=0.5\text{nA}$

Головной каскад детекторной электроники оптимизируется по двум параметрам: максимальному отношению сигнал/шум и минимуму потребляемой мощности. Минимизация потребляемой мощности диктует режим работы транзистора в промежуточной зоне слабой и сильной инверсии  $I_d$ .



Inversion coefficient

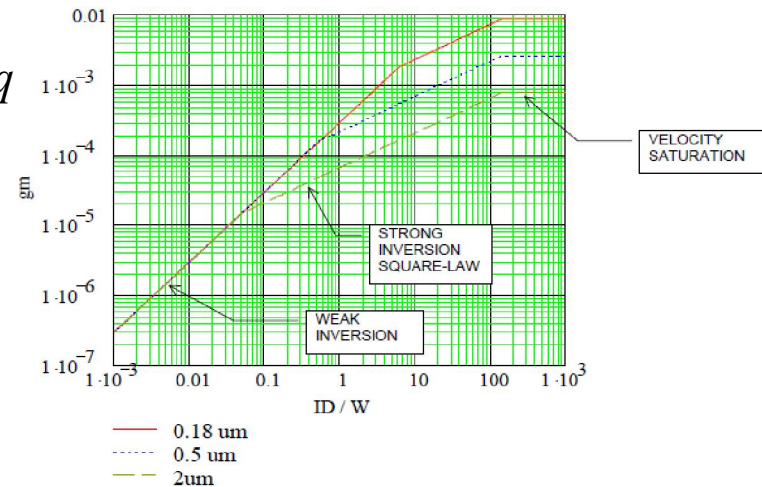
$$i = \frac{I_d}{I_0} \rightarrow I_0 = 2n\beta U_T^2 \rightarrow \beta = \mu C_{ox} \frac{W}{L} \rightarrow U_T = kT/q$$

$$ENC^2 = ENC_{sw}^2 + ENC_f^2$$

$$ENC_{sw}^2 = \frac{a_1}{2\tau_p} e_{n,sw}^2 (C_d + C_{in})^2$$

$$e_{n,sw}^2 = \frac{4kTn\gamma}{g_m}$$

$$ENC_f^2 = a_2 \pi \frac{K_F}{C_{ox} WL} (C_d + C_{in})^2$$



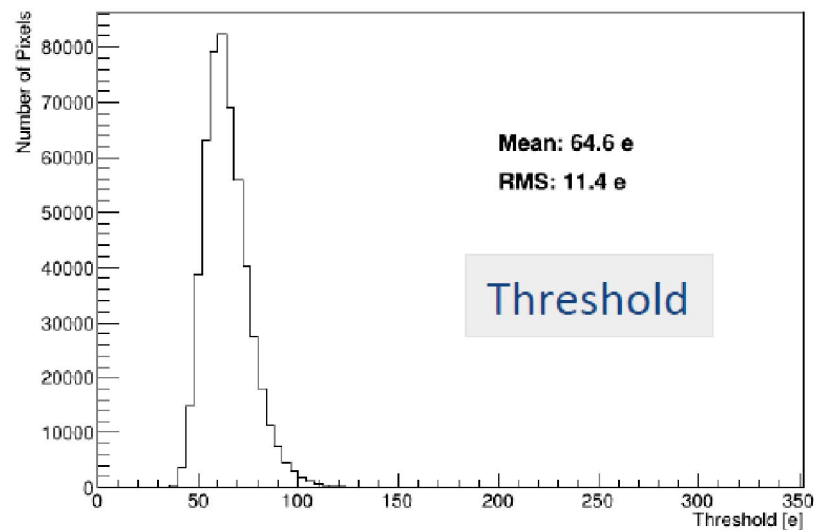
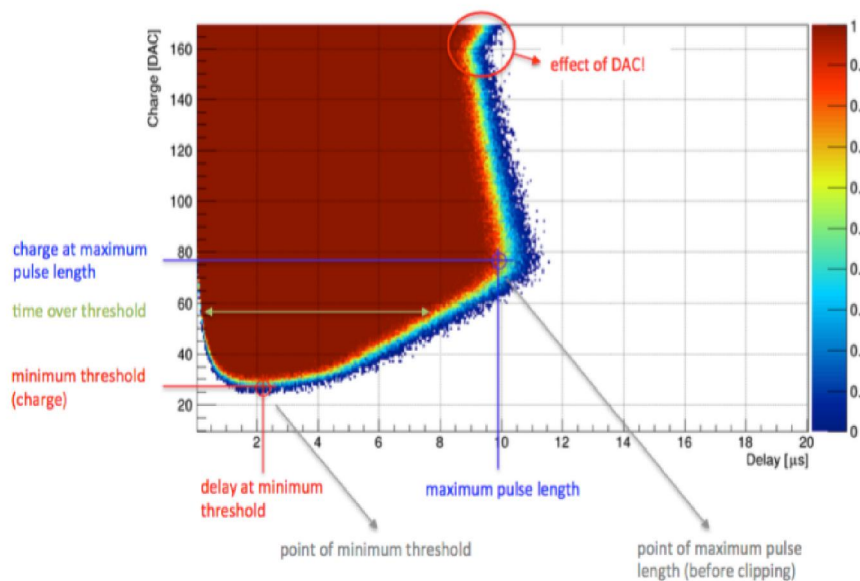
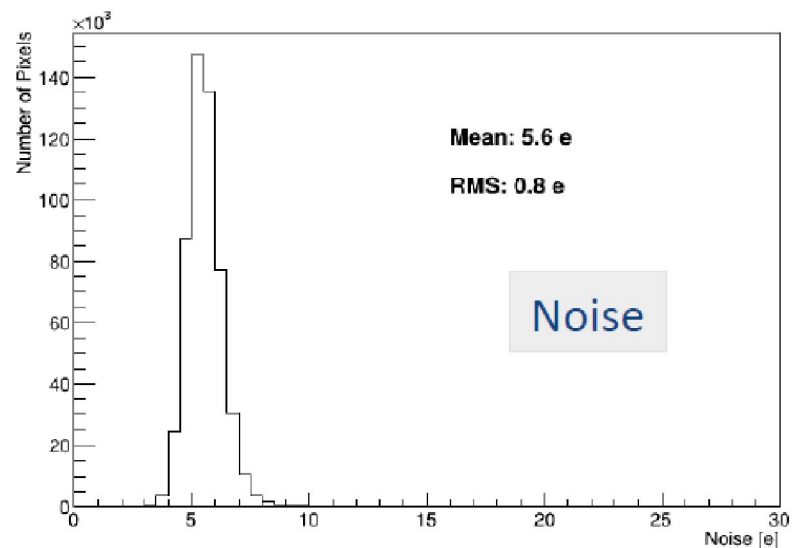
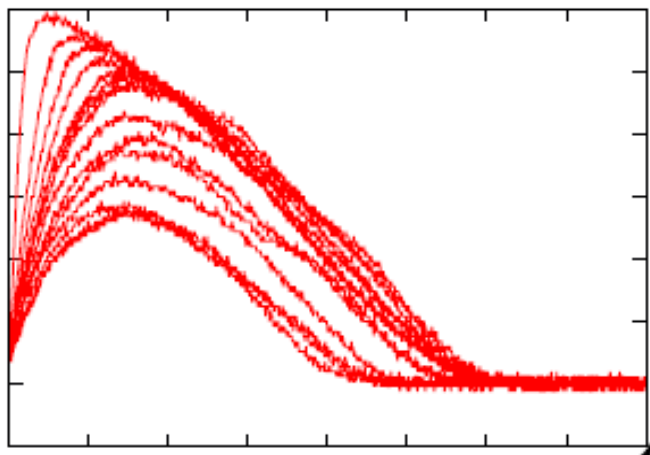
	$\gamma$	$g_m$
weak	1/2	$qI_D / nkT$
strong	2/3	$\sqrt{2\mu C_{ox} \frac{W}{L} I_D}$

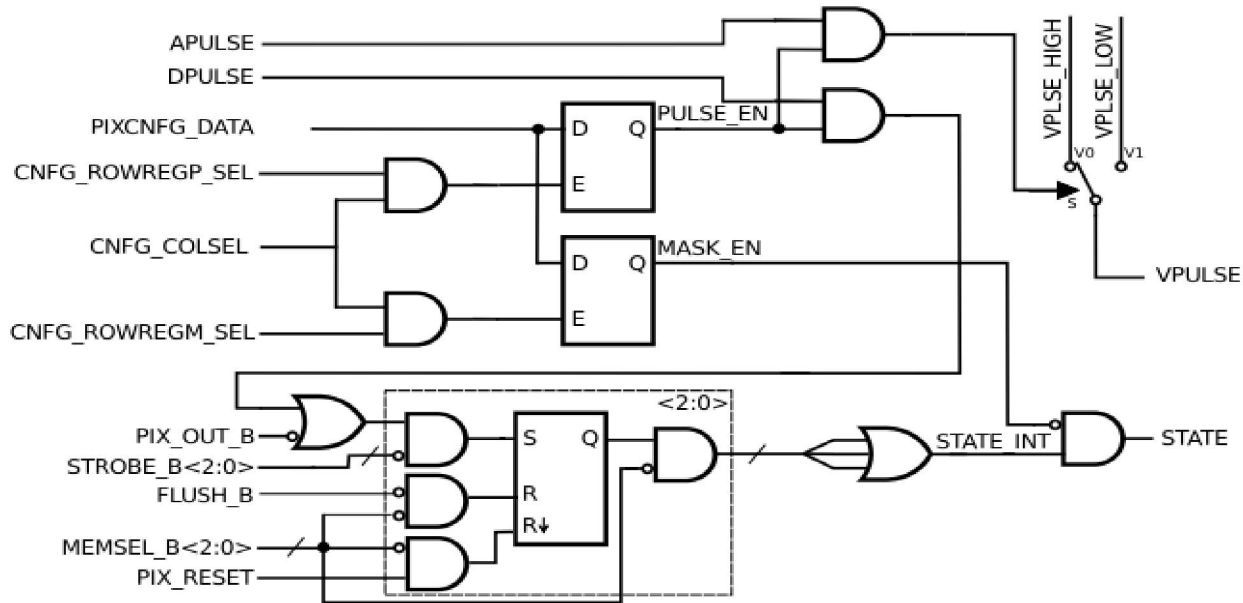
- Важнейший параметр - отношение  $S/N - Power - C_{in}$

$$\frac{S}{N} = \frac{Q_{in}}{C_{in}} \frac{1}{\sqrt{\frac{2KTn\Delta F}{g_m}}} \sim \frac{Q_{in}}{C_{in}} \sqrt{g_m} \sim \frac{Q_{in}}{C_{in}} \sqrt{P}$$

В режиме слабой инверсии для заданного отношения сигнал/шум уменьшение входной емкости в два раза позволяет снизить потребляемую мощность в четыре раза.

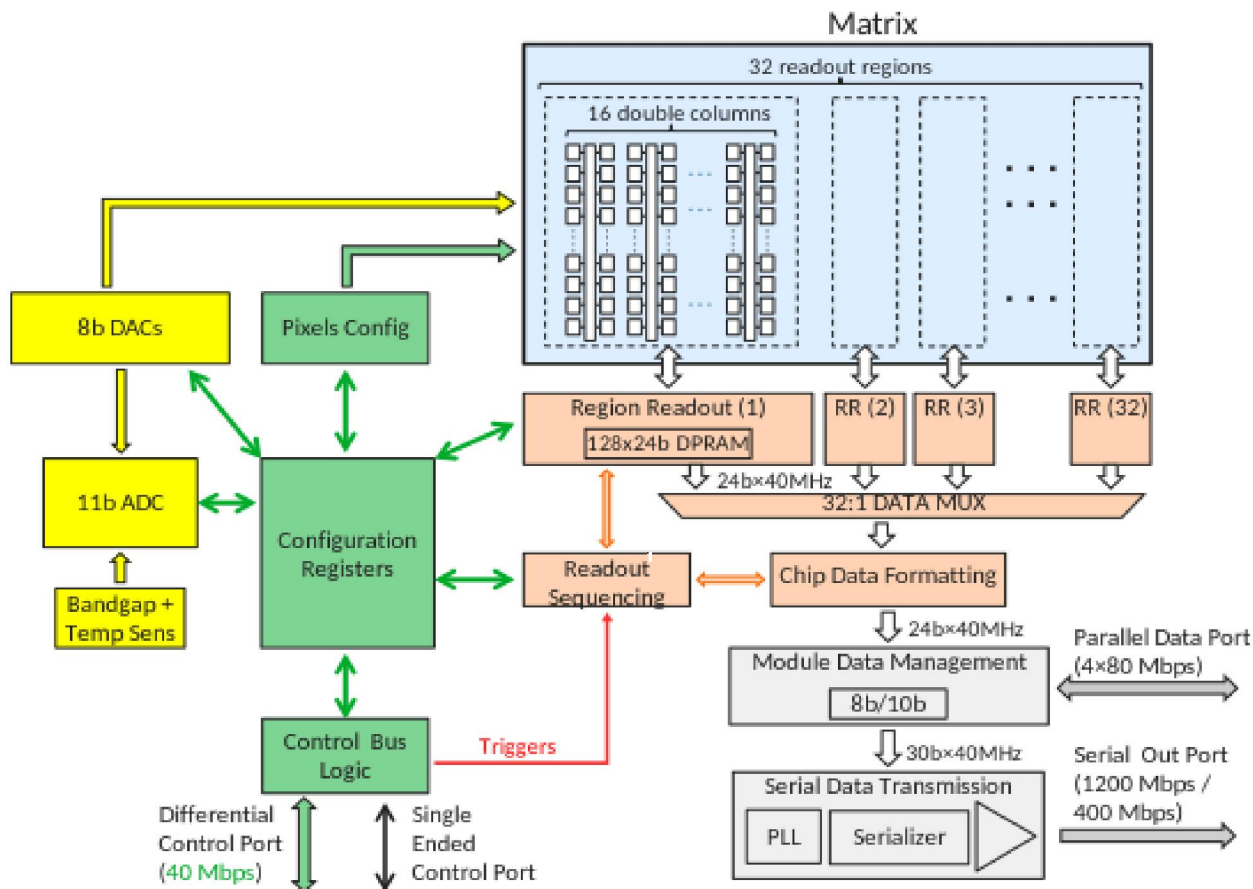
- При отношении  $Q_{in}/C_{in} = 250-360 \text{ mV}$  и в принципе в пиксельной электронике можно обеспечить режим аналоговой электроники в отсутствие сигнала достаточно близкий к спящему.
- Параметры ALPIDE:  $Q_{in} = 80 \text{ e}/\mu\text{m} \times 50 \times 1.6 \cdot 10^{-19} = 0.64 \text{ fC}$ ,  
 $C_{in} = 4 \text{ fF}$ ,  $Q/C_{in} = 160 \text{ mV}$ ,  $\text{gain} = 4 \text{ mV/e}$ ,  $V_{noise} = 250-300 \mu\text{V}$ ,  $\text{ENC} = 5-7 \text{ e}$ ,  
 $P = 40 \text{ nW/pixel}$ . Входной транзистор:  $W = 0.92 \mu\text{m}$ ,  $L = 0.18 \mu\text{m}$ ,  
 Режим слабой инверсии:  $I_D = 20 \text{ nA}$   
 Время формирования сигнала:  $4 \mu\text{s}$





Головная логика ALPIDE включает в себя три регистра: статусный регистр, регистр маски и регистр тестового импульса. При совпадении входного сигнала (компаратора) со считывающим стробом, информация записывается в статусный регистр и затем передается в кодировщик адреса. Статусный регистр сбрасывается сигналом RESET или PIXRST. Регистр маски в активном состоянии запрещает выдачу информации, что уменьшает число наложений и обеспечивает защиту от шумовых срабатываний.

## Функциональная схема



Data -1.28 Gbit, Slow Control -40 MHz, P -225 mW/sensor

Система питания – распределенная DC/DC convertors (FEASTAMP)

## Радиационная стойкость ALPIDE

