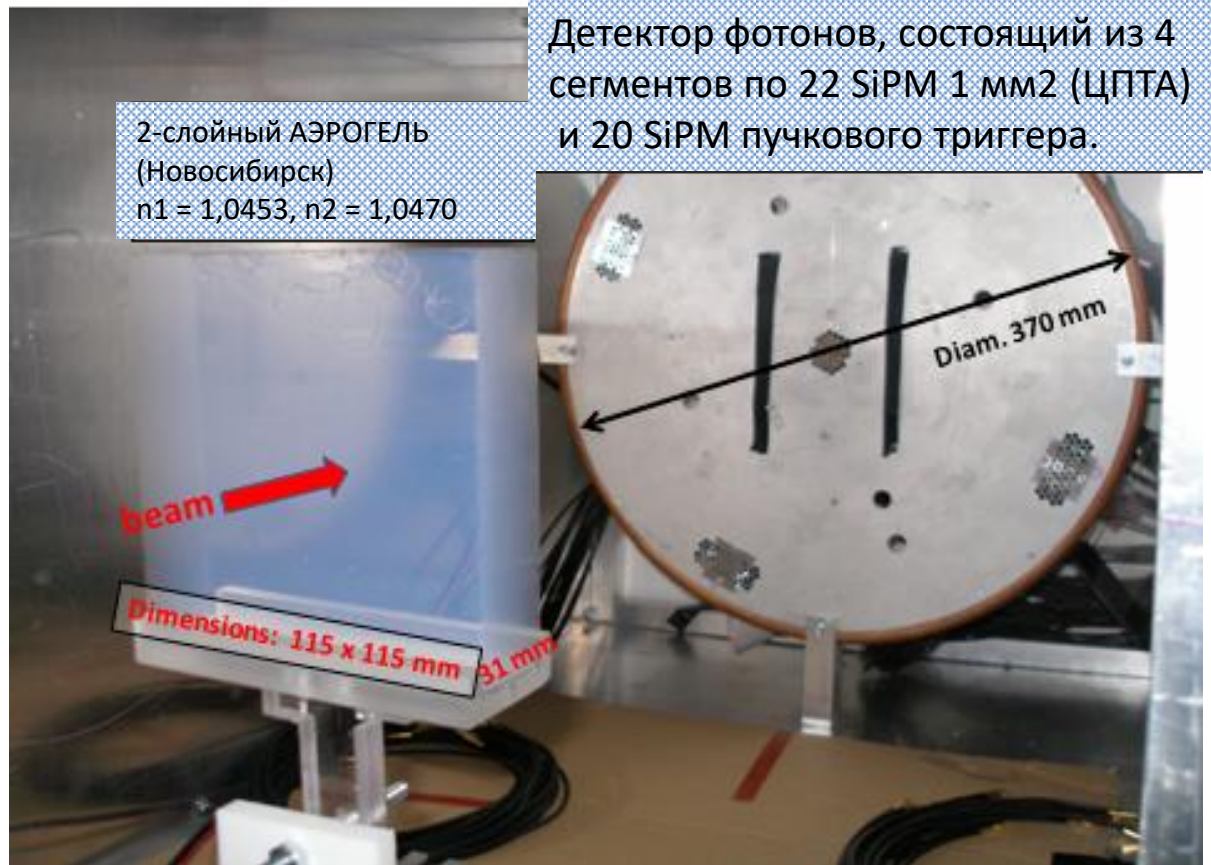


RICH-детектор для эксперимента NICA SPD: концепция построения фоточувствительной Digital SiPM-матрицы и интегрированной фронт-энд электроники.

Е.А. Усенко, А.И. Решетин
от имени Научной группы ИЯИ РАН –
участника Международных коллаборации RD-51 (ЦЕРН)
и NICA SPD (ОИЯИ).

Вступление.

Предложение основано на R&D прототипа FARICH детектора, проведенное в 2009-2012 г.г. в CERN на тестовом пучке ускорителя PS для апгрейда эксперимента ALICE.



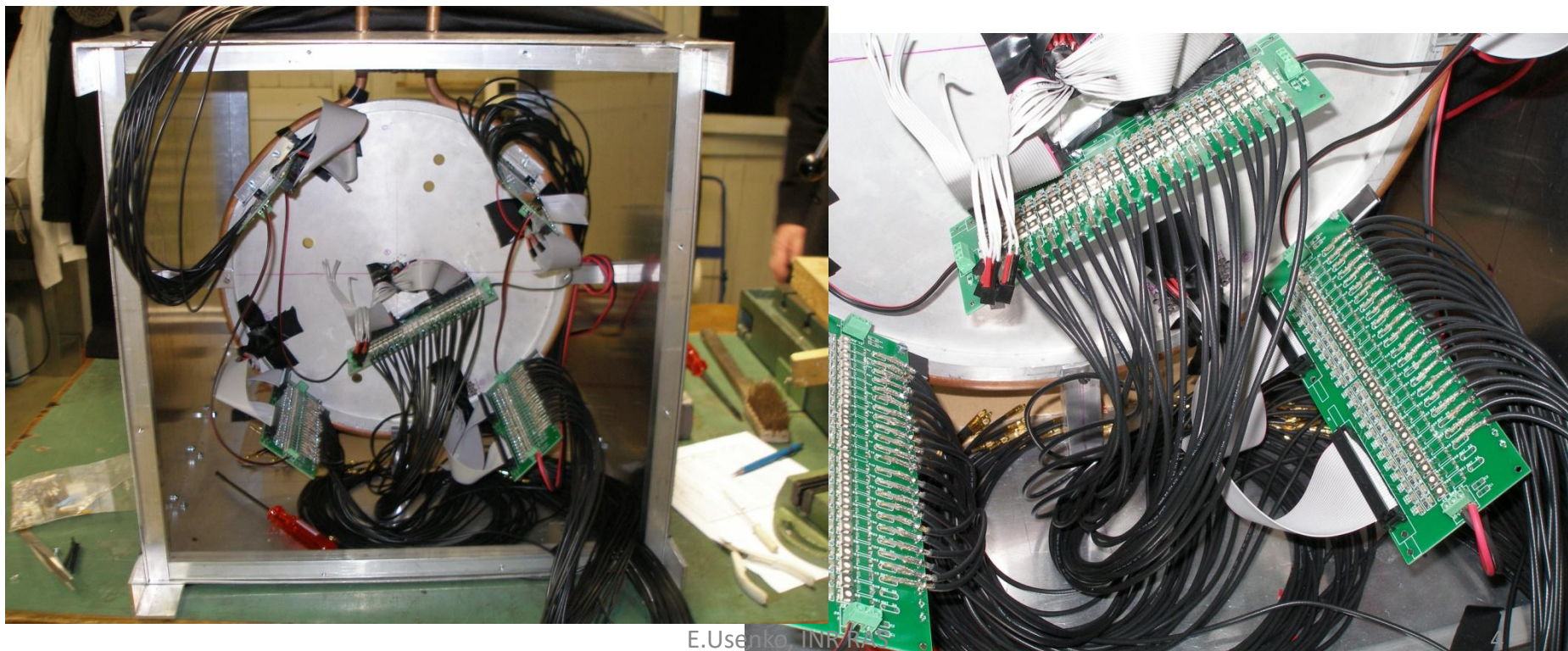
Первая фаза исследований FARICH прототипа в тестовой зоне CERN PS T10.

- Первый прототип светочувствительной матрицы для Черенковского детектора был основан на аналоговых SiPM 1x1mm и состоит их 108 каналов считывания.
- Прототип светочувствительной матрицы состоял из четырех сегментов по 22-а SiPM, расположенных симметрично по кругу, и центральной группы из 20-ти SiPM для триггирования к пучку посредством сцинтиллятора.



Кабельные соединения детектора.

- Интерфейсные печатные платы с цепями поканального смещения для каждого SiPM в группе,
- Считывающая электроника с приведенным ко входу порогом около 1 мВ подключалась через коаксиальные кабели к интерфейсным платам, где осуществлялась емкостная развязка и соединение с группами SiPM по плоскому кабелю.



Электроника считывания и оцифровки.

Использован 128-канальный комплект камерной электроники, состоящий из:

- 128-канального усилителя-дискриминатора **TOF AddOn**, основанного на **NINO ASIC**,
- многофункционального модуля **TRB2 (Trigger Readout Board)**, содержащего 128-каналов TDC на основе **ASIC HPTDC**.

Аналоговый модуль TOF AddOn

- модифицирован для работы с **SiPM**:
- минимальный порог около **0,5mV (50 Ом)**,
- временной отсчет каждого канала сопровождается амплитудной информацией по **TOT методу**,
- временной и TOT отсчеты выполняются в одном канале многохитового TDC,
- настройка режимов работы модуля производится через цифровой протокол SPI из мастер модуля **TRB2**.

Модуль TRB2 (Trigger Readout Board) содержит

- 128 каналов многохитовых TDC **100ps/bin**.
- две 32-х разрядные шины для управления **TOF AddOn** в уровнях **TTL & LVDS**,
- интерфейсы LAN, Optical Link, JTAG, SPI.
- общий источник питания с **TOF AddOn**.

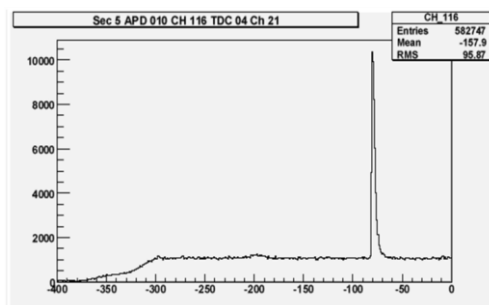
The TRB TOF AddOn – 128-Channel TOF TOT FEE



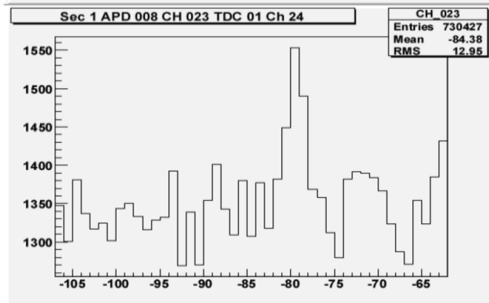
Электроника считывания и оцифровки.

- Модуль TOF AddOn имеет два канала обработки - быстрый для получения точного времени и медленный амплитудный с преобразованием заряда во временной интервал по TOT методу.
- ВЦП, работает в многохитовой моде 100ps/bin.

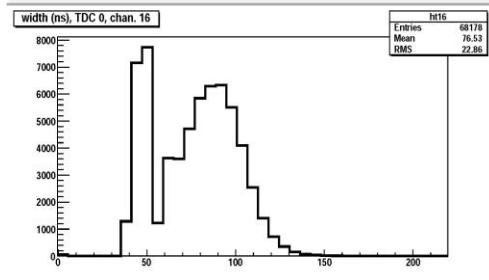
Временной спектр для фото-чувствительного центрального сектора (сцинтилляционные фотоны)



Временной спектр для фото-чувствительного радиального сектора (фотоны Черенкова из двухслойного Аэрогеля)



Амплитудный TOT спектр для фото-чувствительного радиального сектора (фотоны Черенкова из двухслойного Аэрогеля) использовался для настройки системы.



The TRB TOF AddOn – 128-Channel TOF TOT FEE



Выводы по итогам первого этапа исследований. Ограничения на количество каналов матрицы аналоговых SiPM.

1. Применение **аналоговых SiPM** ограничивается построением реальных многоканальных матриц с числом каналов **100-500**.
2. Рост размеров матрицы и числа каналов считывания сопряжен с неизбежным снижением качества детектора:
 - Рост паразитной емкости межсоединений,
 - Кабели в многоканальной системе займут больше места, чем сам детектор,
 - Рассеиваемая мощность накамерной электроники при высокой плотности потребует ее отвода, а также удаления от детектора.
 - Даже применение специализированных ASIC-ов не решает проблемы.
 - Рассеиваемая мощность самой современной **DAQ – 300-400 мВт/канал**, что при минимальной размерности светочувствительной матрицы **50-70тыс. ячеек составит 15-20 кВт**.

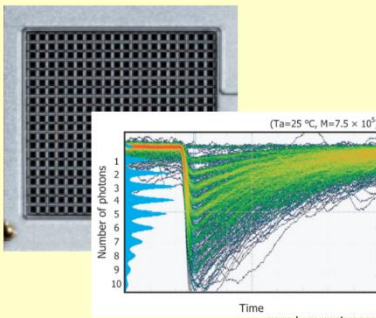
Только интеграция электроники на одном кристалле кремния с SiPM позволяет преодолеть проблему.

Переход к концепции Digital SiPM.

Digital SiPM от PHILIPS.

Матрица Digital SiPM не является полным прототипом для RICH детектора, но содержит элементы и решения необходимые для постановки задачи на построение матрицы с числом каналов 50-100тыс.

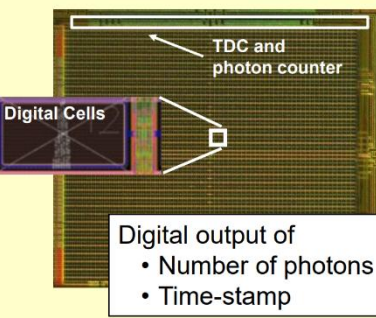
analog SiPM



The image shows a physical analog SiPM detector on the left. On the right, a graph plots the number of photons (y-axis, 0 to 10) against time (x-axis). The graph shows a series of pulses, with a color-coded background indicating the number of photons detected at each time step. The graph is labeled with parameters: $(T_{\text{an}}=25\text{ }^{\circ}\text{C}, M=7.5 \times 10^4)$. The source is cited as www.hamamatsu.com.

Summing all cell outputs leads to an analog output signal and limited performance

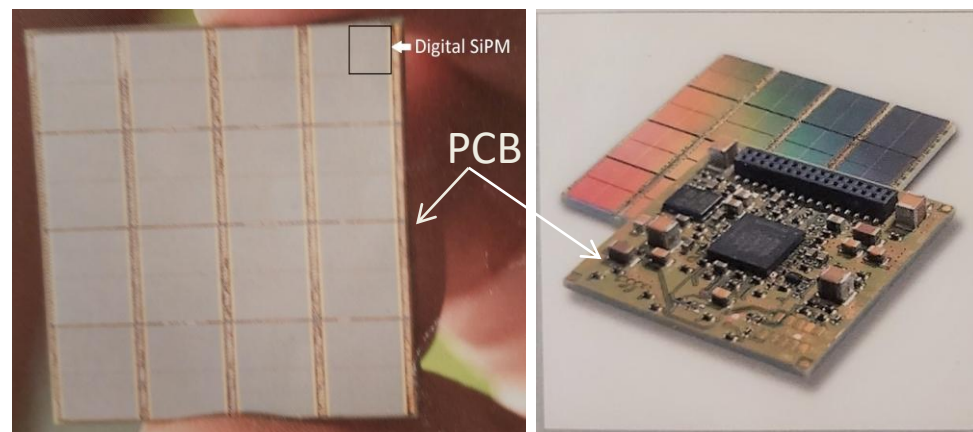
digital SiPM (dSiPM)



The image shows a physical digital SiPM detector on the left. On the right, a graph plots the number of photons (y-axis, 0 to 10) against time (x-axis). The graph shows a series of pulses, with a color-coded background indicating the number of photons detected at each time step. The graph is labeled with parameters: $(T_{\text{an}}=25\text{ }^{\circ}\text{C}, M=7.5 \times 10^4)$. The source is cited as www.hamamatsu.com.

Integrated readout electronics is the key element to superior detector performance

Кластер матрицы из 8x8 Digital SiPM размером 32x32mm
Собран на печатной плате с интерфейсной электроникой.

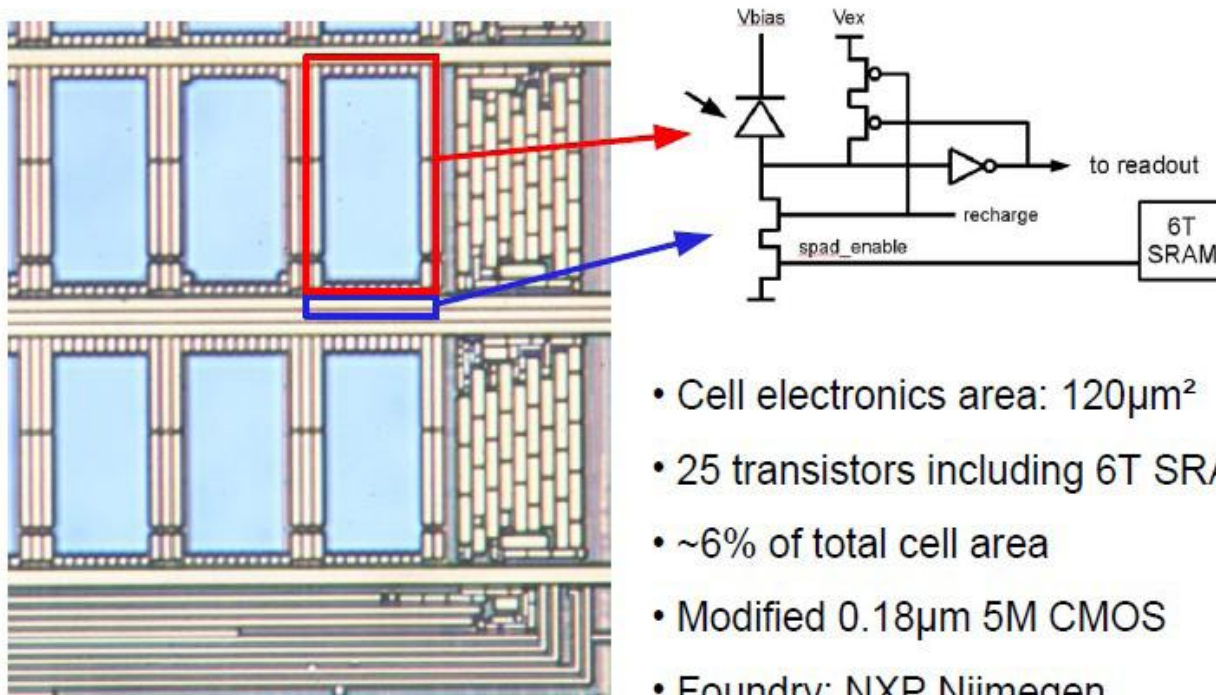


Digital SiPM в отличие от аналогового SiPM оперирует индивидуально с каждой из 3200/6400 ячеек на кристалле размером 3,5x3,5 мм:

- Каждая ячейка содержит усилитель для формирования сигнала до логического уровня, цепи регулировки индивидуального смещения, схему быстрого восстановления ячейки после срабатывания,
- 1-канальный ВЦП подключенный ко всем ячейкам через интеллектуальную сеть OR/AND,
- Контроллер управления и обмена данными.

Digital SiPM от Philips.

Цифровая светочувствительная ячейка.

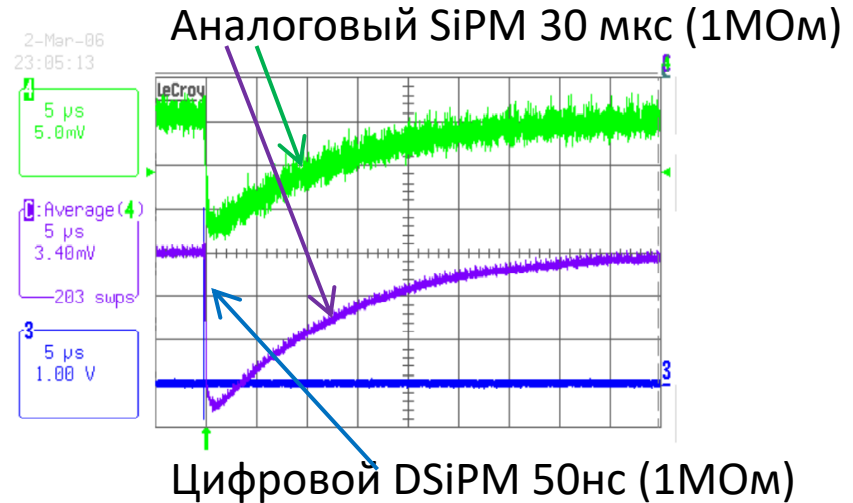
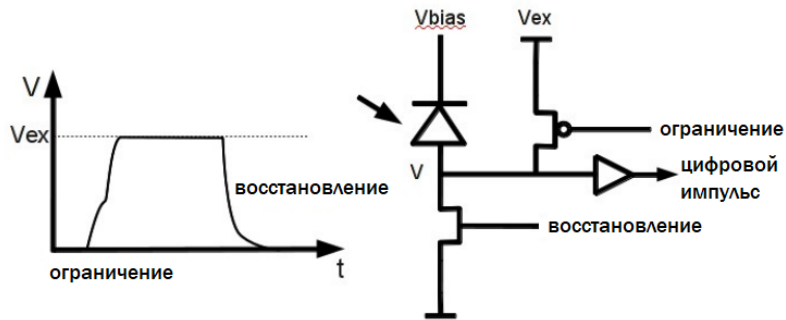


- Cell electronics area: $120\mu\text{m}^2$
- 25 transistors including 6T SRAM
- ~6% of total cell area
- Modified $0.18\mu\text{m}$ 5M CMOS
- Foundry: NXP Nijmegen

Digital SiPM содержит 3200($59,4 \times 64\mu\text{m}^2$)/6400($59,4 \times 32\mu\text{m}^2$) ячеек, каждая ячейка содержит:

- Пороговый дискриминатор,
- Цепи регулировки обратного смещения,
- Цепи быстрого восстановления ячейки после каждого срабатывания, включая шумовое.
- Статическая память значения обратного смещения.

Активное ограничение и восстановление диодной ячейки Digital SiPM.



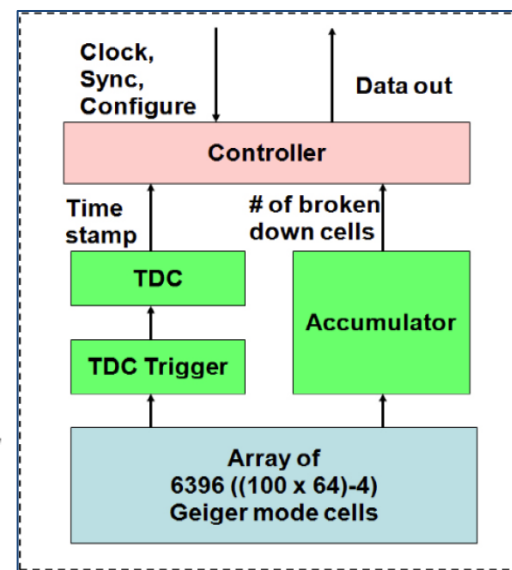
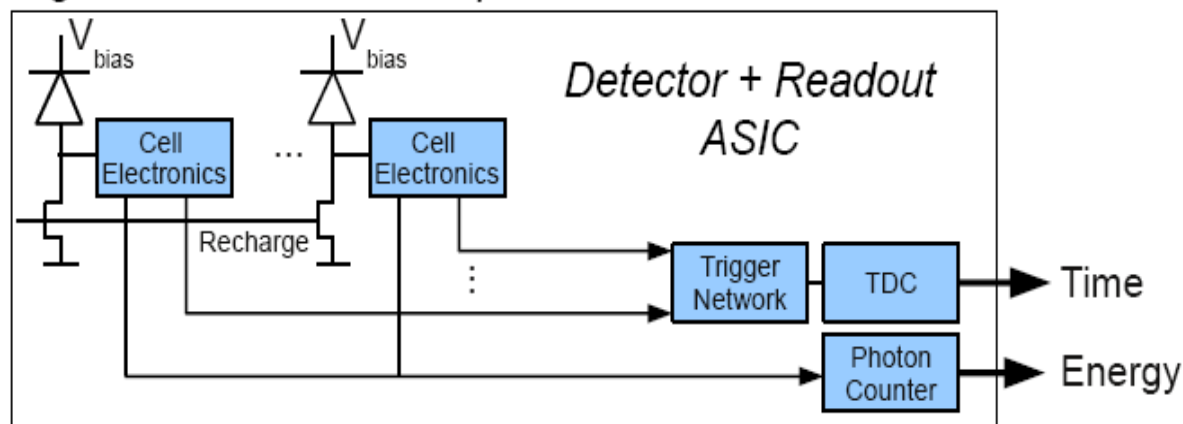
Логический импульс на выходе ячейки:

- Использование активных элементов для принудительного ограничения лавины в ячейке,
- Быстрое восстановление/перезарядка ячейки через управление цепью смещения,
- Возможность программного управления/удаления аномальных ячеек,
- Быстрый цифровой сигнал ячейки (элементарная задержка ~ 30 ps, время нарастания фронтов ~ 90 ps),
- Легкое разделение сигналов по номеру фотонов в событии,
- Совмещение времени пролета и координатной информации в одном элементе потенциально формирует новый тип детектора.

Digital SiPM от Philips.

Структура считывающей электроники.

Digital Silicon Photomultiplier Detector



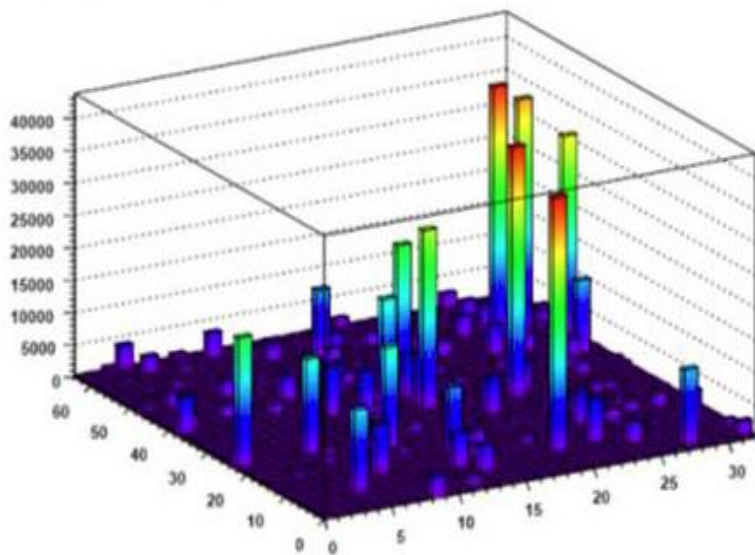
Структура считывания ячеек в Digital SiPM:

- Все ячейки соединены через многофункциональную OR/AND логическую сеть к одноканальному TDC (2xTDC, 23ps/bin, 9bit),
- Блок Аккумулятор фиксирует шумовой счет каждой ячейки и может выключать anomalно шумящие,
- Контроллер связи осуществляет прием внешних сигналов синхронизации, обмен данными по JTAG, а также передачу цифрового кода, соответствующего времени срабатывания первой сработавшей ячейки.

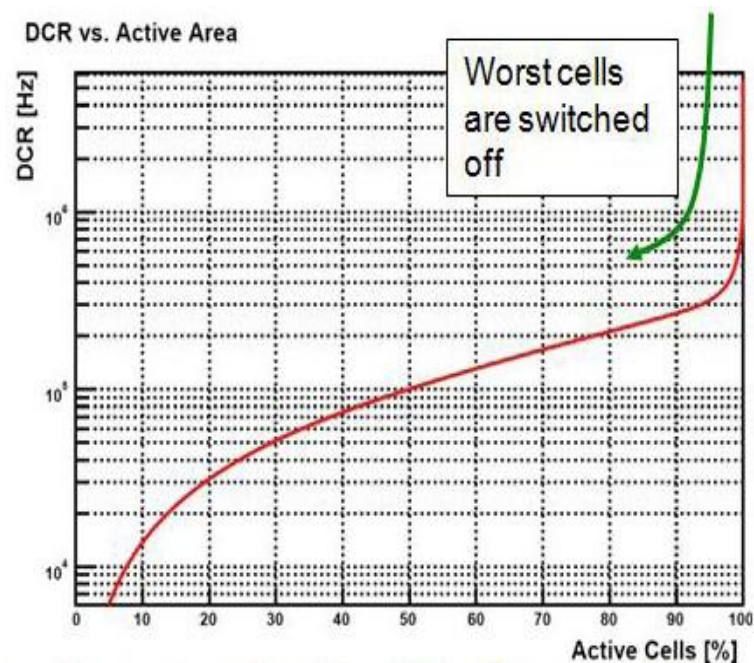
Digital SiPM от Philips.

Стратегия снижения шумов.

Dark count rate map

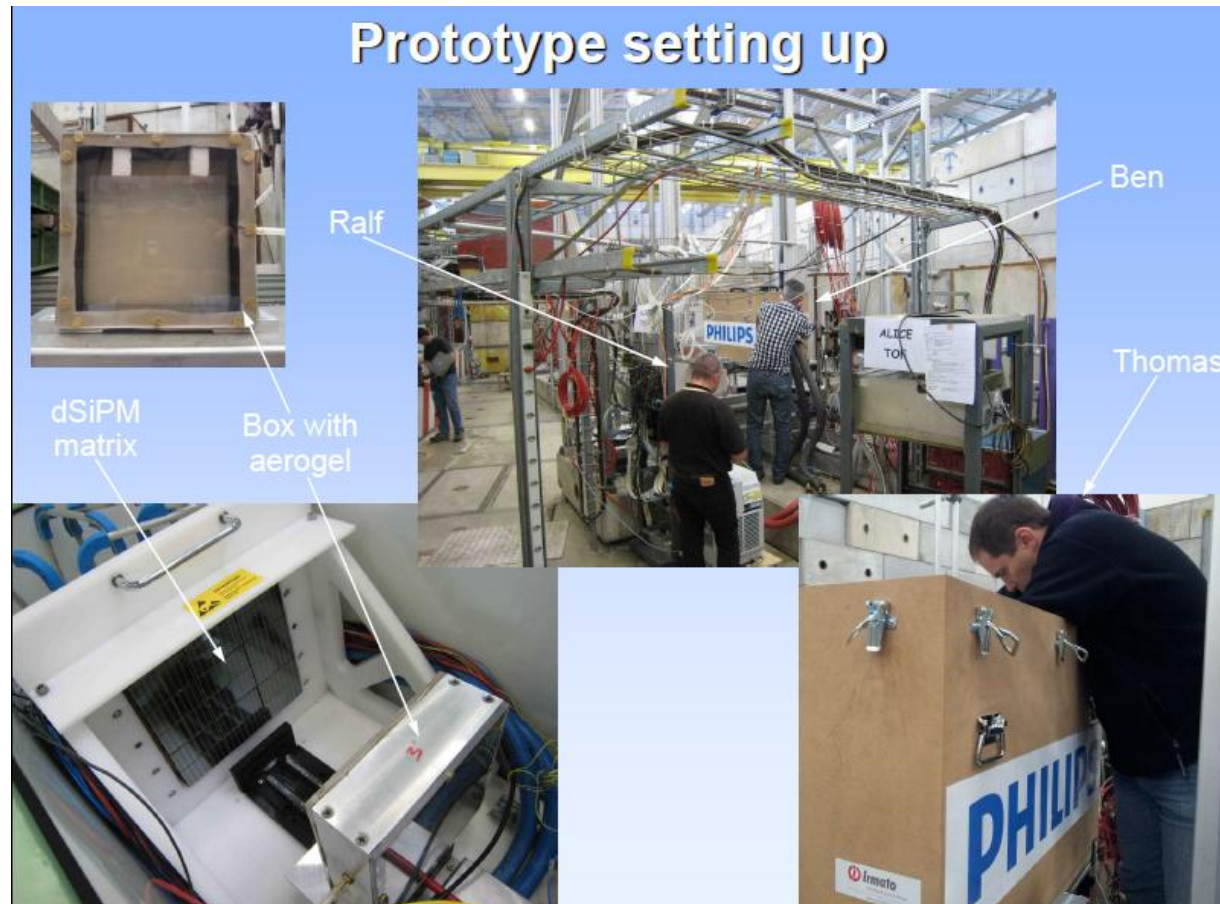


DCR vs. Active Area



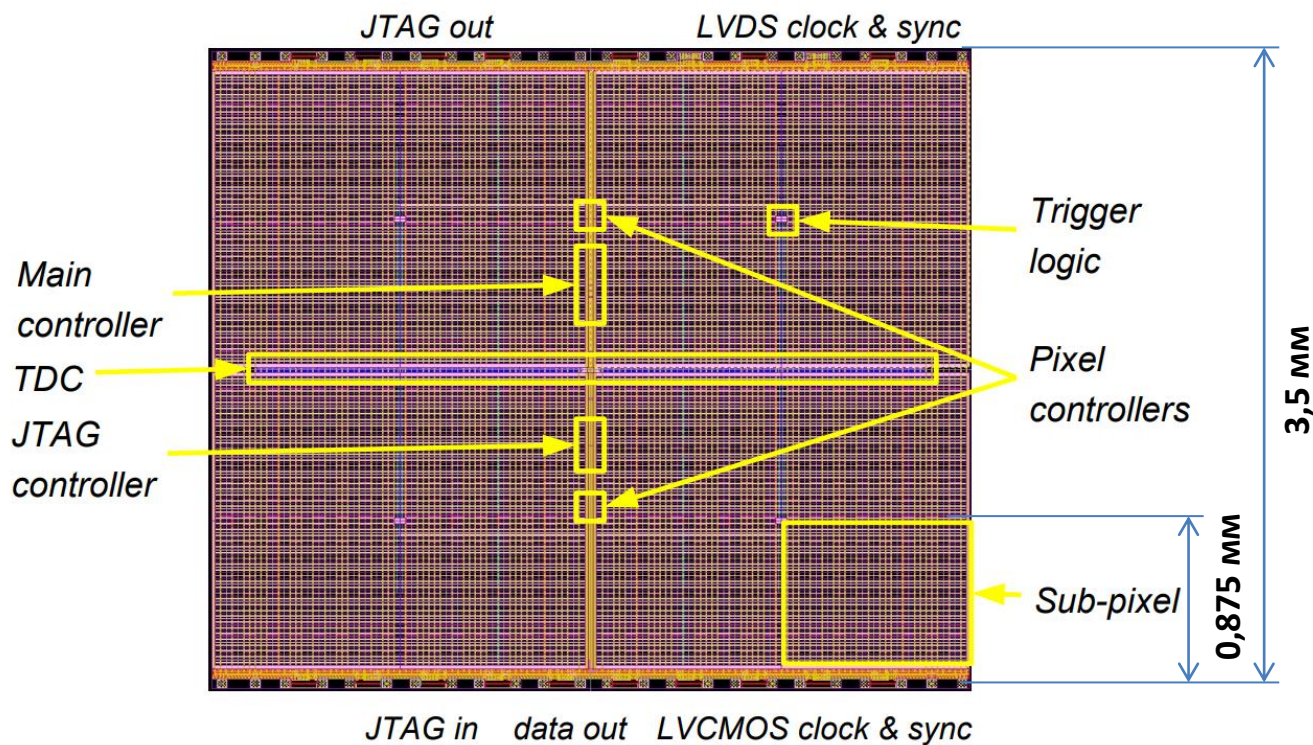
Набор темновых (шумовых) счетов всех ячеек на внутреннем счетчике,
Выбор стратегии исключения ячеек,
Возможность исключить шумящую ячейку,
10-кратное снижения общего шума после исключения 10% аномально шумящих ячеек

Совместные с фирмой Philips испытания FARICH Прототипа-2 на пучке релятивистских частиц (PS ALICE T10 канал)



- Использован технологический демонстратор DLD8K 8188 диодов,
- Изолированный бокс с температурой 2-3°C

Какова должна быть структура Digital SiPM в контексте применения в RICH детекторе?



- Существующая конфигурация не позволяет определять координату внутри чипа 3,5x3,5 мм, хотя содержит 16 СУБПИКСЕЛЕЙ размером 0,875 x 0,9 мм.
- Целесообразно сопровождать временную отметку адресом СУБПИКСЕЛЯ,
- Расширить протокол внешнего обмена до возможности соединения чипов в цепочки и квадранты, что резко снизит энергопотребление камерной системы сбора данных.

Каковы перспективы разработки Digital SiPM в России?

1. Пока есть только опыт разработки и изготовления аналоговых SiPM в небольших количествах.
2. Есть противоречивая информация о разработках SiPM в Зеленограде для целей Роскосмоса, в которых невнятно декларируется совмещение цифровой электроники на одном кристалле.
3. В Белоруссии начаты работы и получены первые образцы SiPM, созданные по C-MOS 0.36 μm технологии, совместимой с требованиями к цифровым SiPM.
4. В 2022 году в ООО МИКРОН (Зеленоград) размещен заказ на производство опытной партии специализированной интегральной схемы, прототип – NINO ASIC (ALICE CERN), на основе технологии IBM C-MOS 0.18 μm .
 - Технология совпадает с Digital SiPM,
 - Опыт начала работы с МИКРОН покажет возможности технологии и реальные перспективы сотрудничества.

Спасибо за внимание!