



НПП ДОЗА

*XVI Международное совещание
«Проблемы прикладной спектрометрии и радиометрии»
имени В.Н.Даниленко
Москва, 16-18 октября 2023г.*

SiPM – ретроспектива: история появления, этапы развития, характеристики и ограничения применения на практике

Бужан П.Ж., Каракаш А.И., Теверовский Ю.Л.
НПП «Доза», Москва, Зеленоград.
ППСР-2023

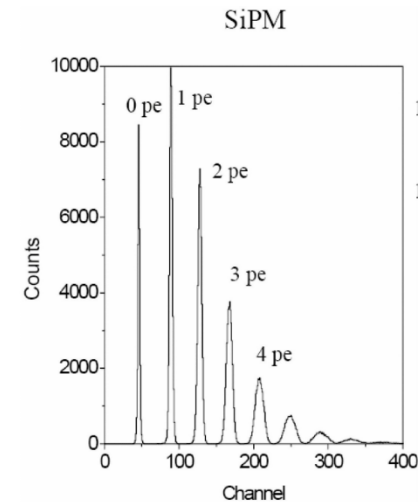
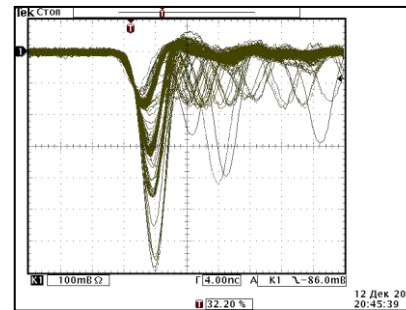
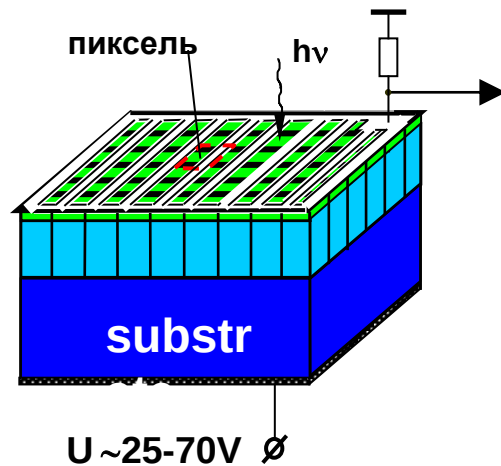
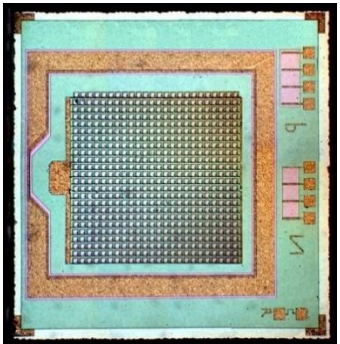


История создания

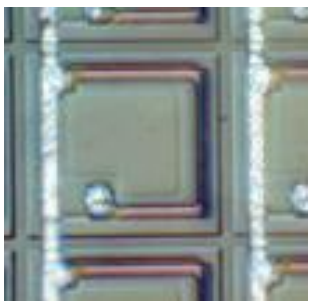
- 1960 – 80 г. Развитие теории микроплазмы [1, 2] в Si появление SPAD детектора [3]
 1. Haitz R, Goetzberger A., Scarlett R, Shockley W. “Avalanche effects in silicon p-n junctions I: Localized photomultiplication studies on microplasmas”, J. Appl. Phys. 34(6) (1963) 1581 – 1590, doi: 10.1063/1.1702639
 2. Ruge I, Keil G. “Microplasmas in silicon p-n junctions as detectors for gamma radiation”, The Review of Scientific Instruments 34(4) (1963) 390–392, doi: 10.1063/1.1718373.
 3. Cova S., Bertolaccini M., and Bussolati C., “The measurement of luminescence waveforms by single photon techniques”, Phys. stat. solid., A18 (1973) 11-62, doi: 10.1002/pssa.2210180102
- 1980-е г. MRS [4] структуры / МФЛД [5] (ФИАН, ИЯИ/МЭЛЗ)
 4. N. I. Gol’braikh, A. F. Plotnikov, V. E. Shubin. “Pulse avalanche photodetector based on a metal-insulatorsemiconductor structure”, Soviet Journal of Quantum Electronics 5(12)(1975) 1435; doi: 10.1070/QE1975v005n12ABEH012167.
 5. А. Гасанов, В. Головин, З. Садыгов, Н. Юсипов, “Лавинный фотоприемник на основе структуры металлрезистивный слой-полупроводник”, Письма в ЖТФ, 14(8) (1988) 706-70
- Начало 2000-х [6]. ЦПТА (Головин), МИФИ (Долгошеин), Пульсар (Клемин) Исследование, разработка технологии, производство в Зеленограде
 6. Bondarenko, P. Buzhan, B. Dolgoshein, V. Golovin, E. Guschin, A. Ilyin, V. Kaplin, A. Karakash, R. Klanner, V. Pokachalov, E. Popova, K. Smirnov, “Limited Geiger-mode microcell silicon photodiode: new results, Nucl. Instr. and Meth. A442(1-3) (2000) 187–192; doi: 10.1016/S0168- 9002(99)01219-X
- NDIP2005 – принято решение об открытии отдельной секции по SiPM



Кремниевый фотоумножитель (SiФЭУ) Silicon Photomultiplier (SiPM)

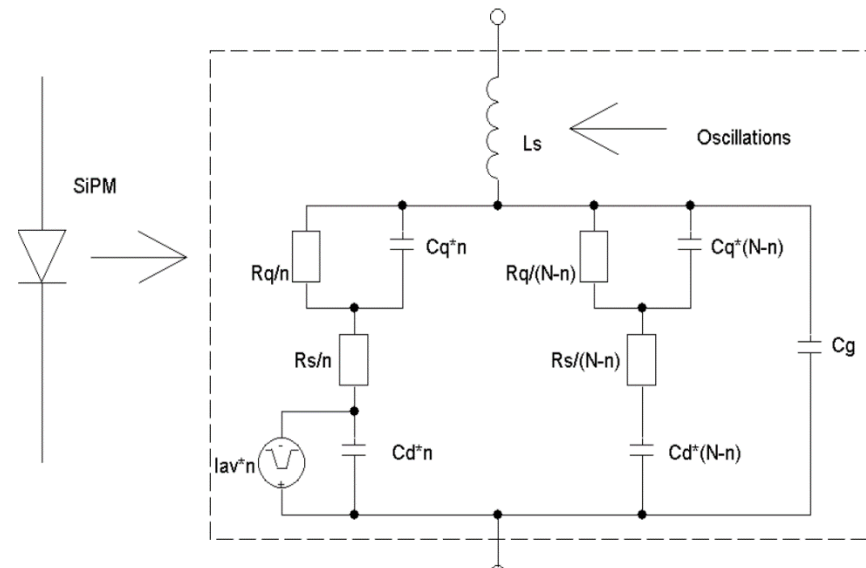


Одноэлектронный спектр



Набор одинаковых независимых полупроводниковых микрофотодетекторов (пикселей), расположенных на общей подложке и работающих в режиме самогасящегося гейгеровского разряда на общую нагрузку.

Сигнал на выходе такого детектора равен сумме сигналов со сработавших пикселей.



Заряд на ячейке:

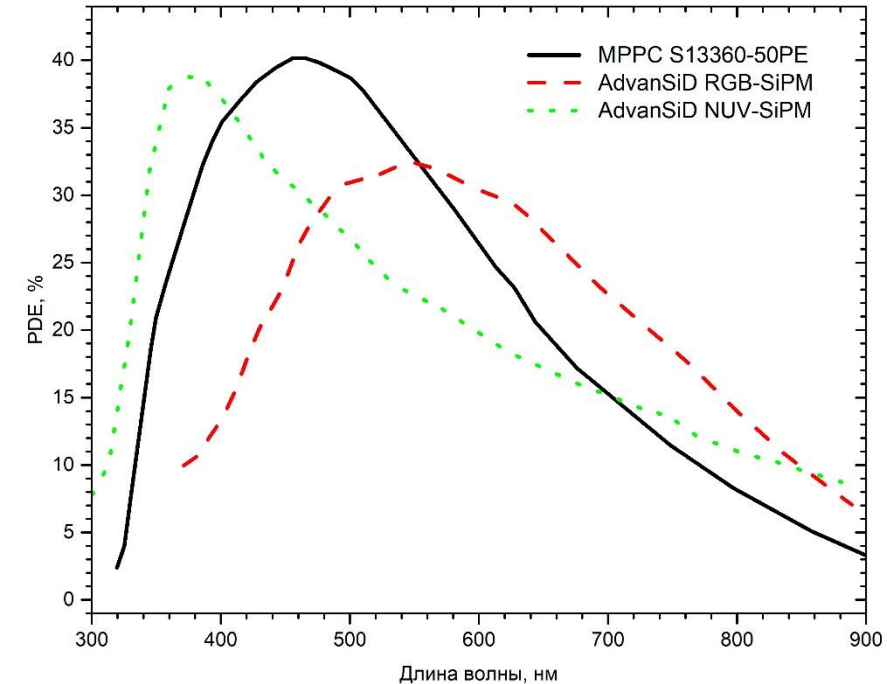
$$Q_{cell} = (U - U_{bd}) \cdot C_{cell} = (U - U_{bd}) \cdot (C_q + C_d)$$

n – число сработавших ячеек.
 $\tau_r = C_{cell} \cdot R_q$ – время восстановления ячейки после разряда.



Характеристики SiPM

- **Усиление**
- $M = Q_{\text{cell}} / e = \Delta U \cdot C_{\text{cell}} / e = (U - U_{\text{bd}}) \cdot (C_q + C_d) / e$,
- e – заряд электрона; ΔU – перенапряжение; U_{bd} – пробойное напряжение;
- C_{cell} – емкость ячейки; C_d – емкость рп-перехода (несколько десятков фФ);
- C_q – ускоряющая ёмкость, паразитная ёмкость между считывающими шинами и входным окном ячейки (несколько десятков фФ, обычно $C_q < C_d$).
- **Эффективность регистрации фотонов (Photo Detection Efficiency – PDE)**
- $\text{PDE} = \text{QE} * \text{Ge} * \text{FF}$,
- QE – квантовая эффективность (вероятность того, что падающий на поверхность SiPM фотон вызовет образование электрон-дырочной пары в ОПЗ);
- Ge – вероятность развития гейгеровского разряда в ячейке (зависит от перенапряжения);
- FF (Fill Factor) – отношение площади чувствительной области всех ячеек к площади всего SiPM (геометрическая эффективность).

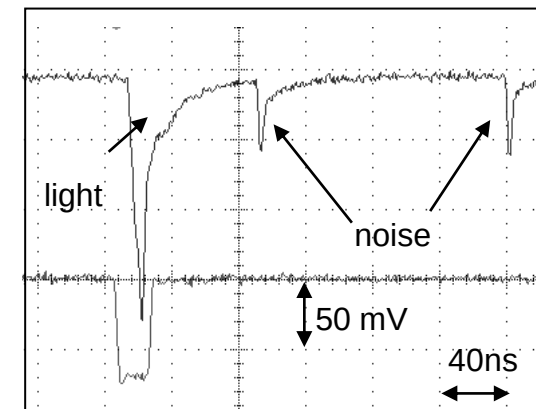


Частота темновых шумов

Под шумами для SiPM понимается срабатывание (развитие гейгеровского разряда) ячейки в отсутствии внешнего источника света. При этом «шумовой» сигнал с одной ячейки не отличается от сигнала, создаваемого в результате регистрации внешнего фотона.

Основной источник шума – это термогенерация свободных носителей заряда в объеме развития лавины в ячейке детектора.

Также возможно появление свободных носителей заряда за счёт полевых эффектов, что приводит к зависимости частоты темновых шумов от напряжения.





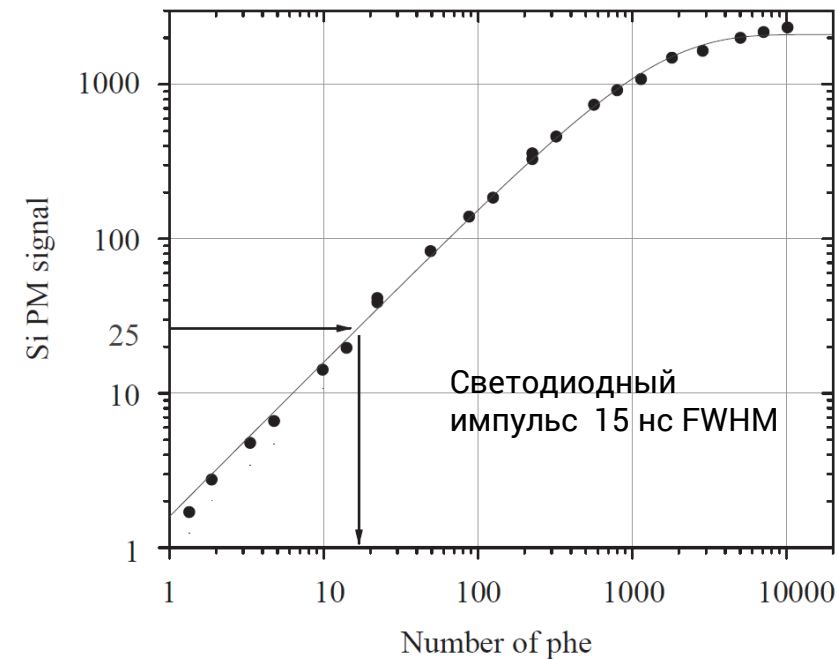
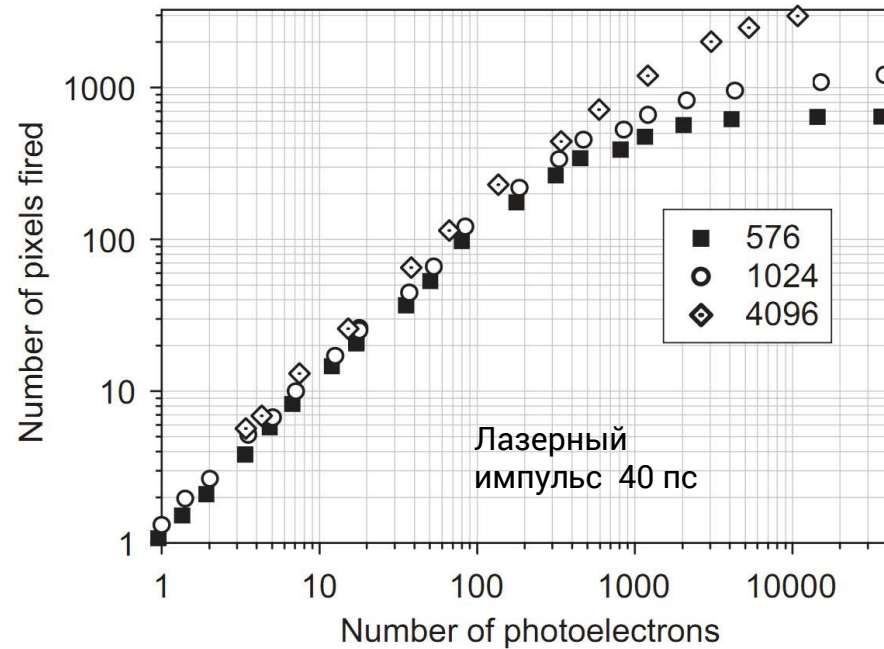
Характеристики SiPM

Динамический диапазон

Исходя из того, что в приборе ограниченное количество ячеек, выходной сигнал в зависимости от засветки будет нелинеен и определяется формулой:

$$N_{out} = N_{tot} \cdot \left(1 - e^{-\frac{N_{phot} \cdot PDE}{N_{tot}}}\right)$$

При этом надо сделать замечание, что эта формула справедлива только для вспышек, которые существенно короче времени восстановления ячейки. Для «длинных» вспышек эффективное количество ячеек возрастает.





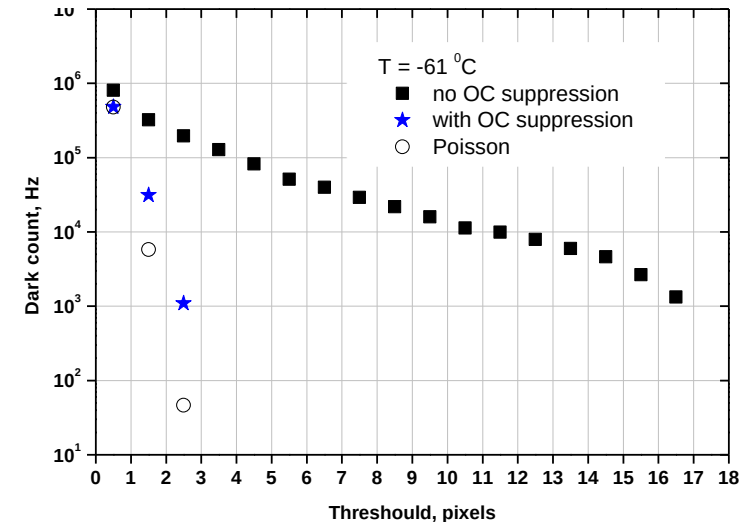
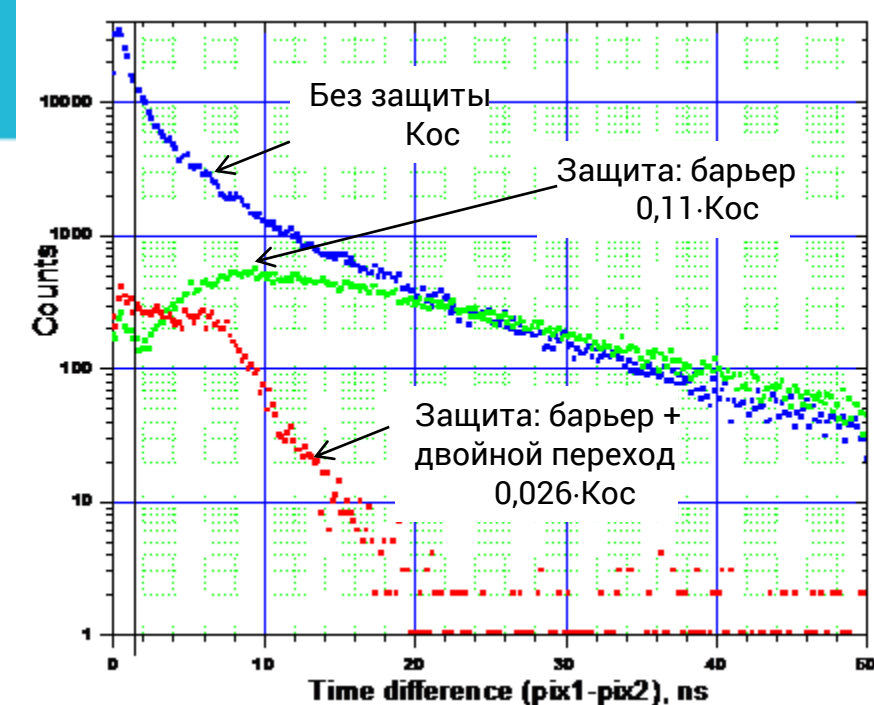
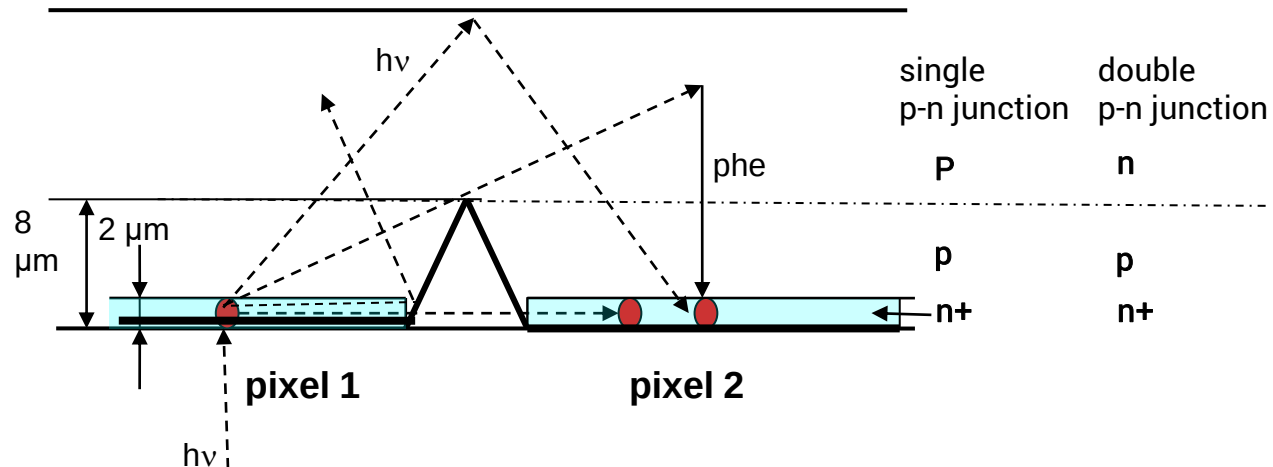
Характеристики SiPM

Оптическая связь в SiPM

При развитии гейгеровского разряда благодаря излучательной рекомбинации в ячейке с вероятностью $\sim 10^{-5}$ возникают фотоны в оптическом диапазоне спектра, которые могут инициировать разряд в другой ячейке. Подобная связь может существенно ухудшить характеристики SiPM.

Возможные пути:

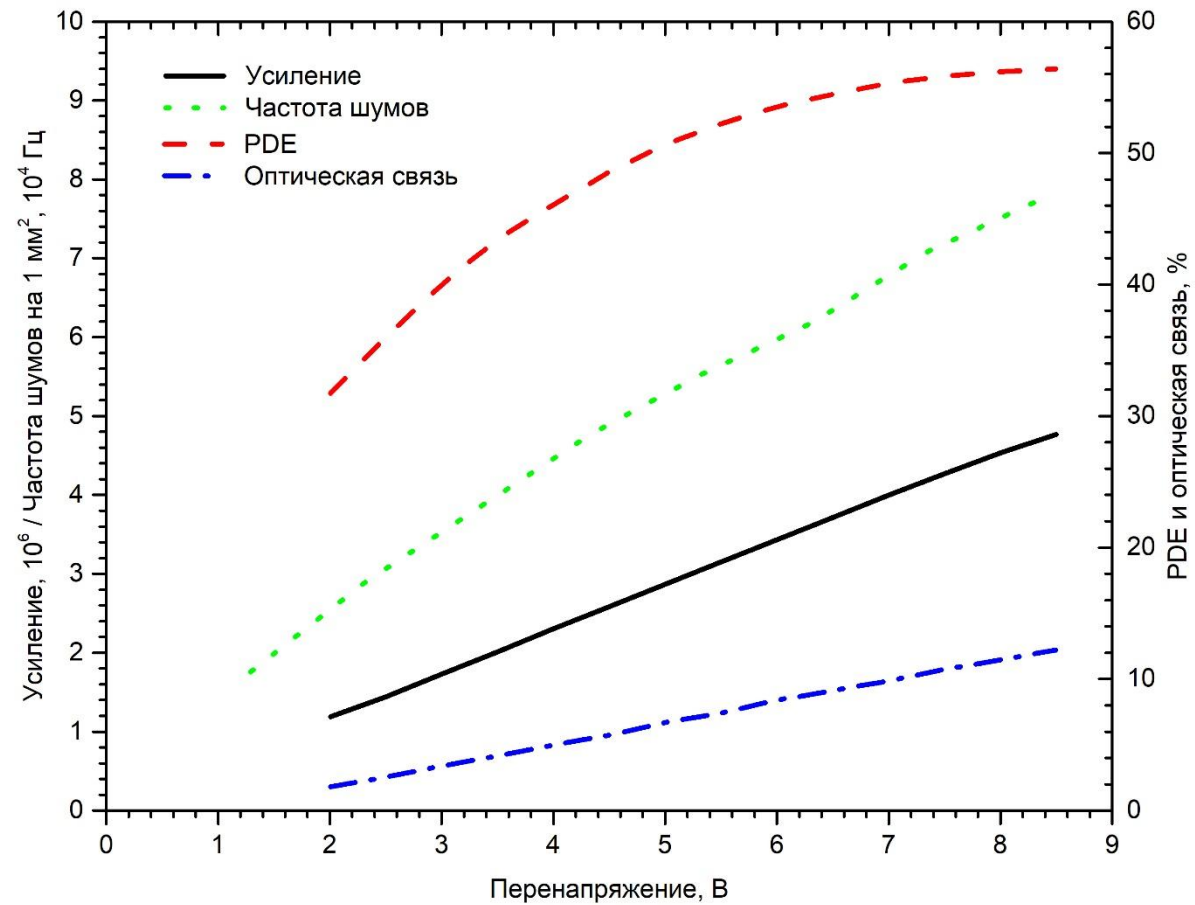
- прямая связь – защита с помощью барьера
- задержанная связь – защита двойным переходом
- отражение фотона от обратной стороны подложки – защита подбором клея (снижение коэффициента отражения)





Характеристики SiPM

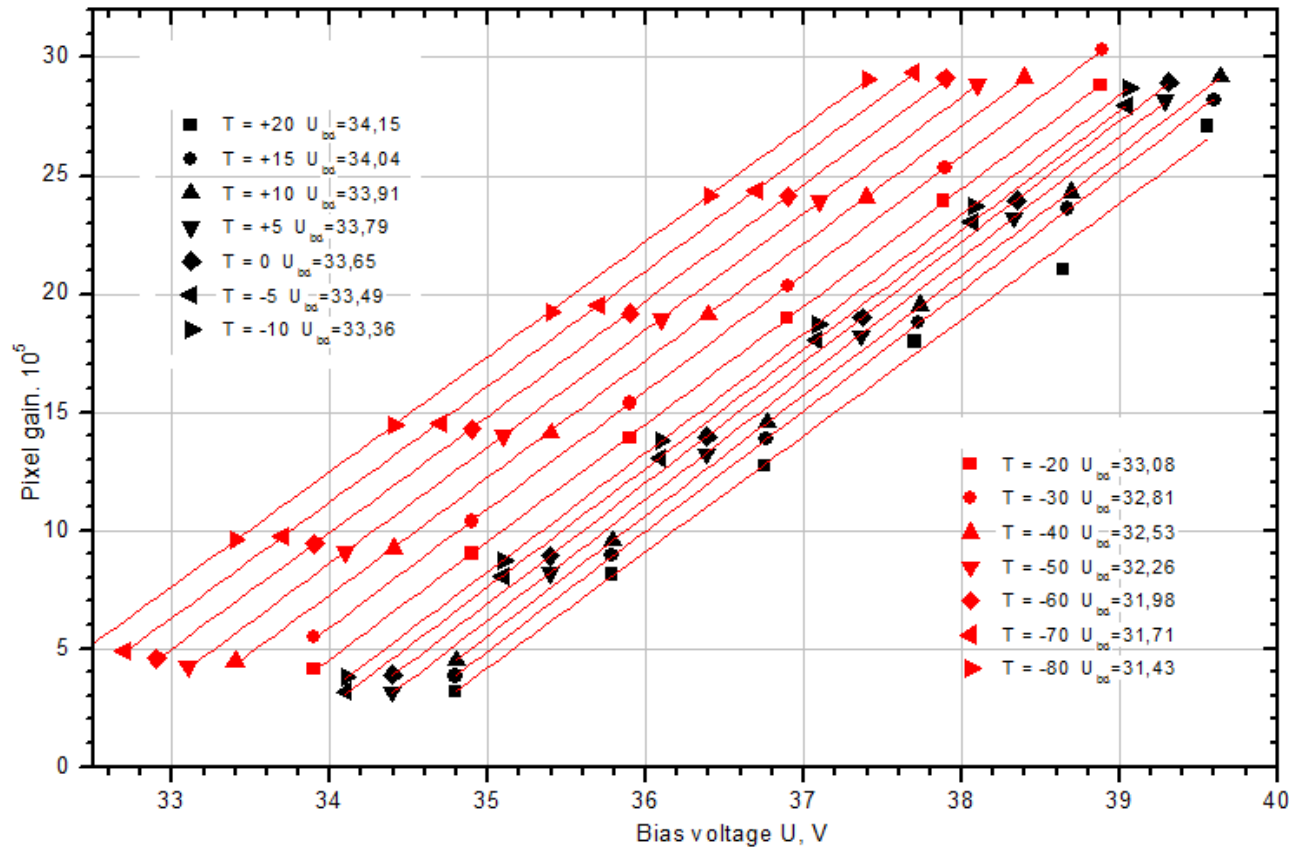
Зависимость характеристик от напряжения



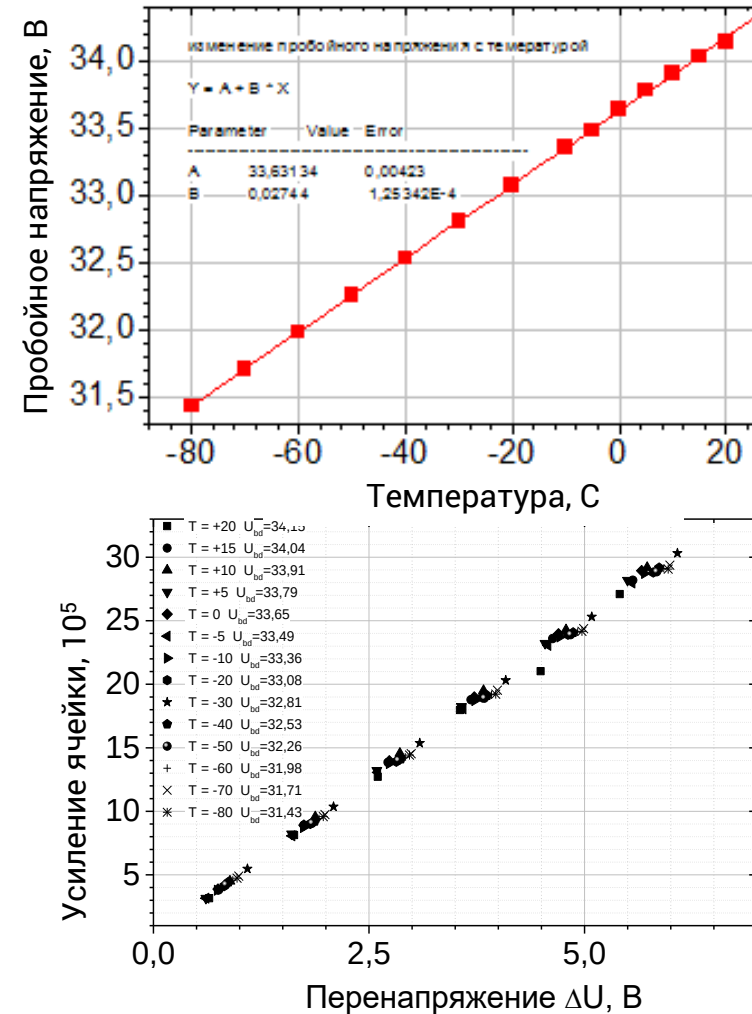


Характеристики SiPM

Зависимость характеристик от температуры



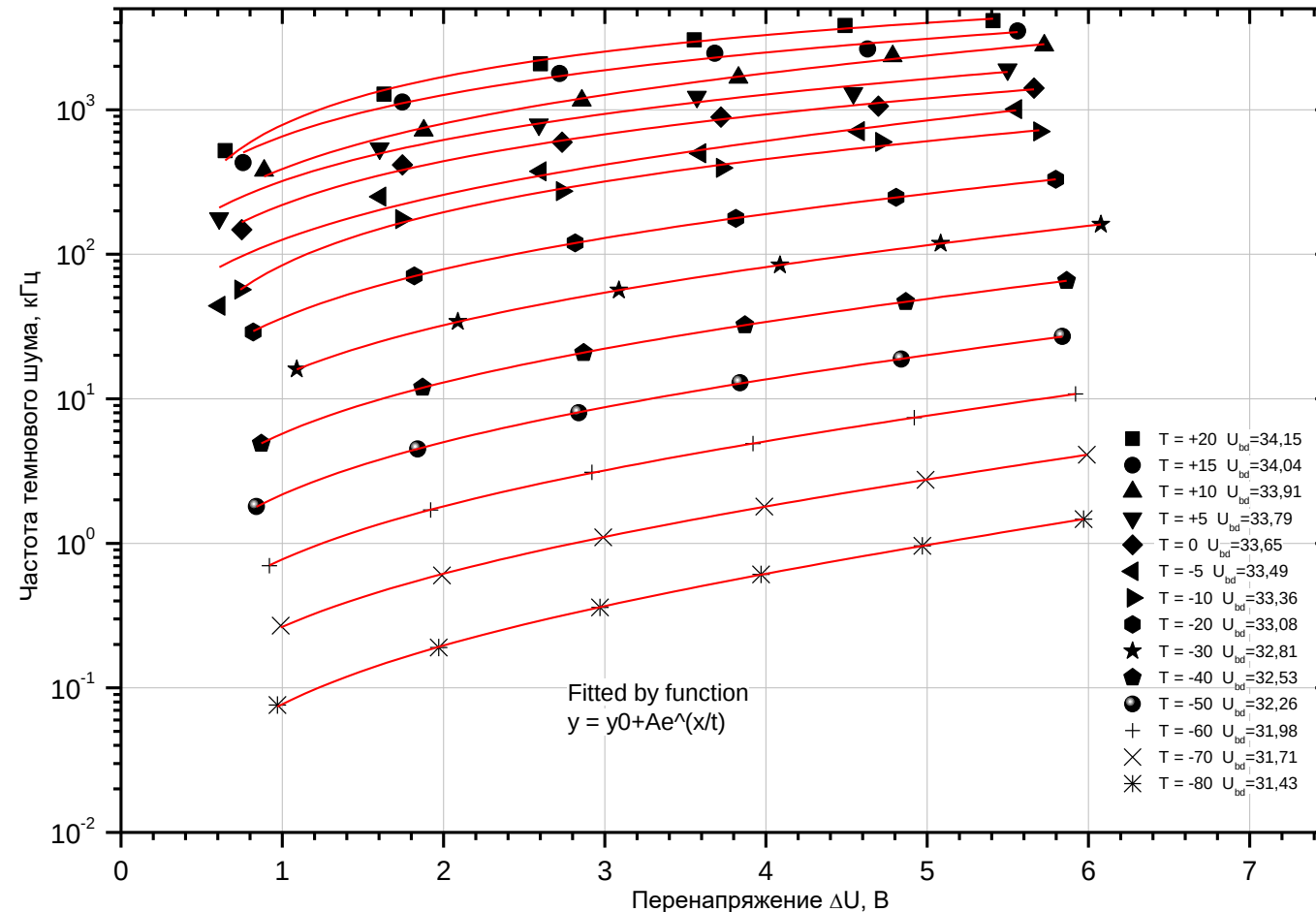
Для рабочего перенапряжения зависимость усиления от температуры составляет величину порядка 1-1,5 %/°C (при фиксированном напряжении).





Характеристики SiPM

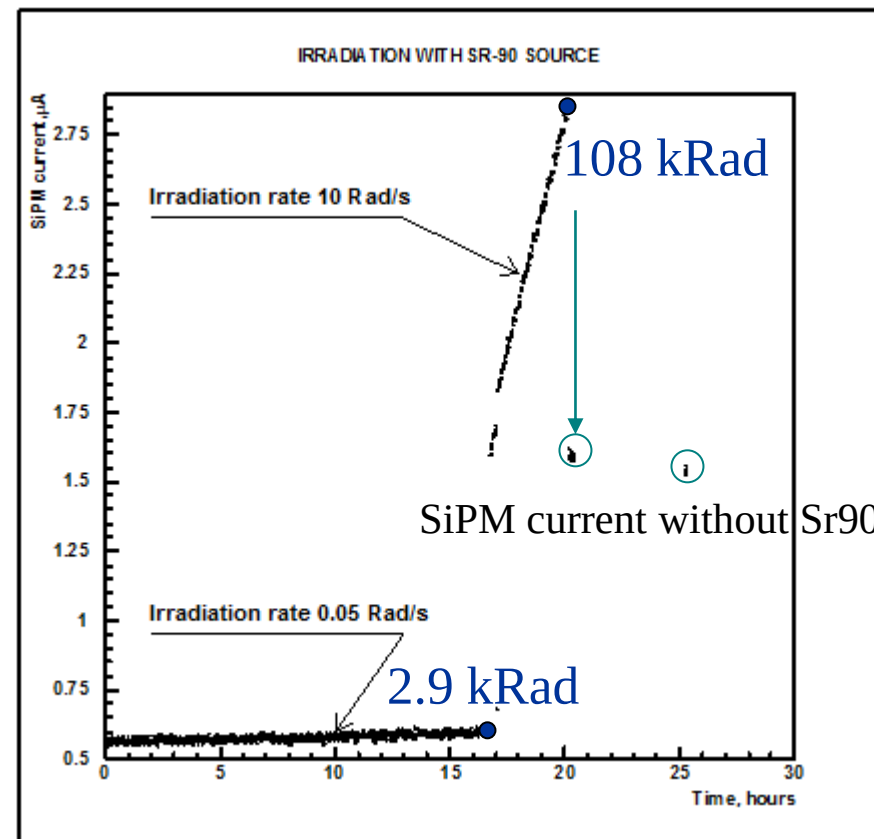
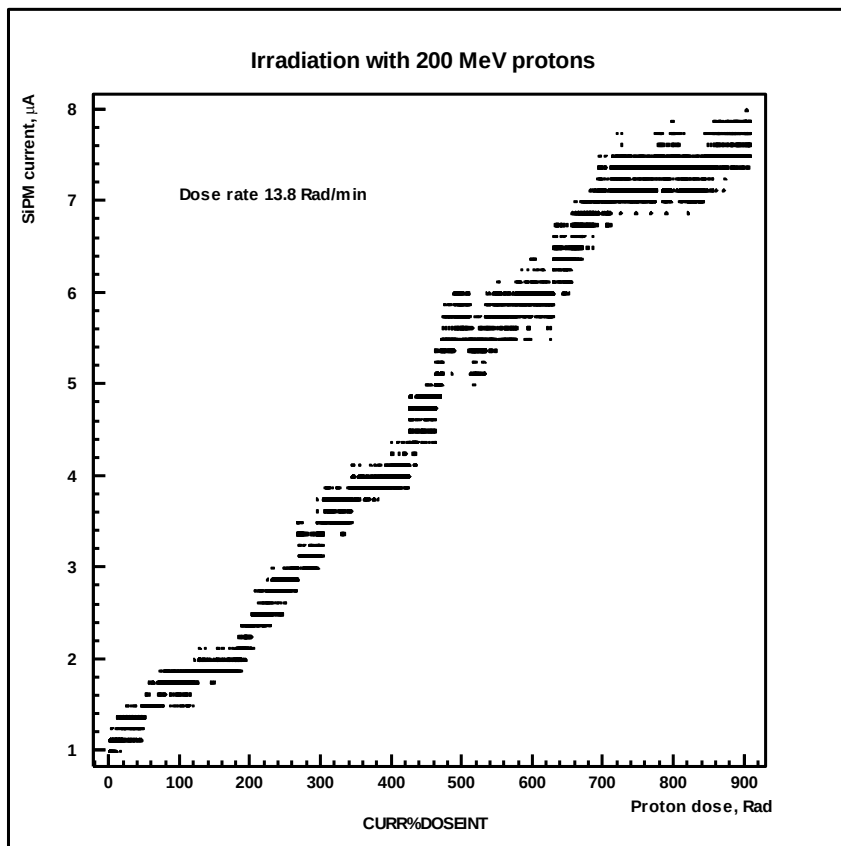
Зависимость характеристик от температуры



С ростом температуры частота шумовых импульсов для фиксированного перенапряжения увеличивается приблизительно в 2 раза на каждые 8 градусов.

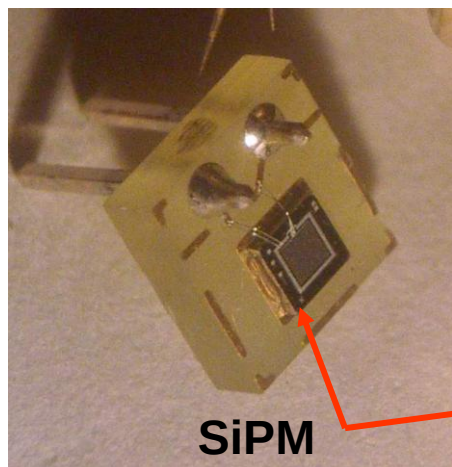


Радиационная стойкость SiPM

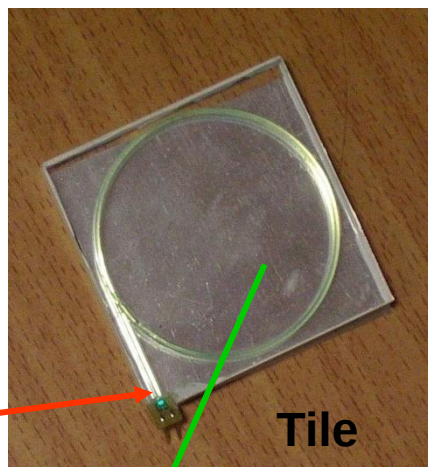




Применение. Радиометрия 2003



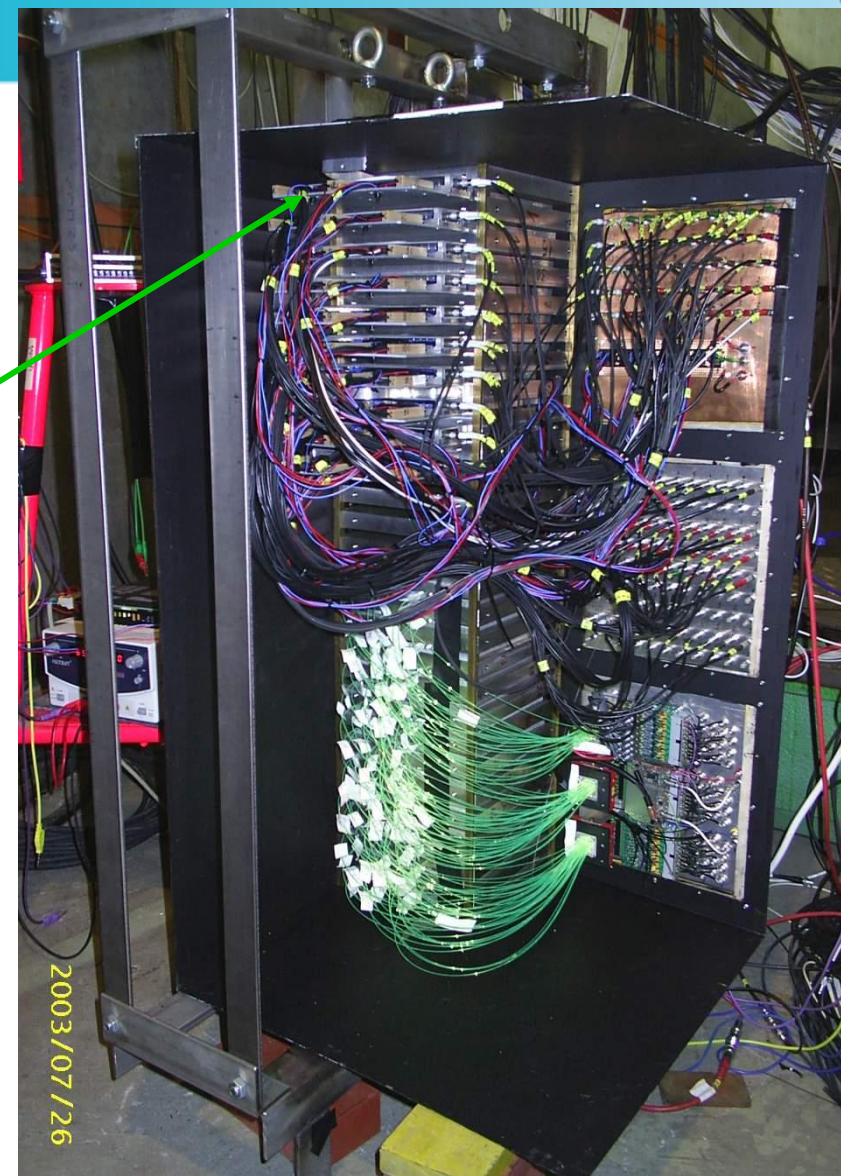
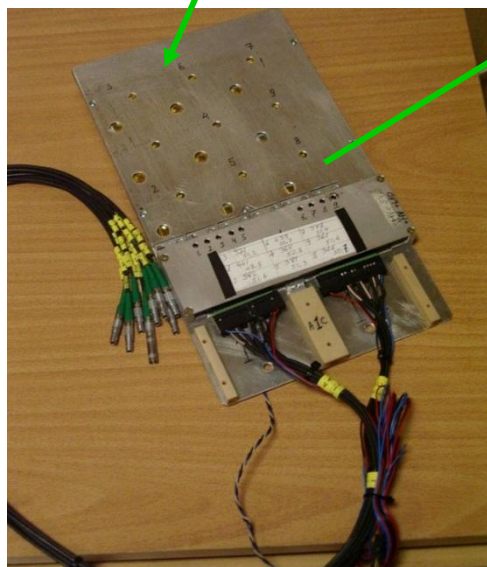
SiPM



Tile

CALICE collaboration

3x3
tiles



Каракаш А.И.
НПП «Доза»
ППСР-2023



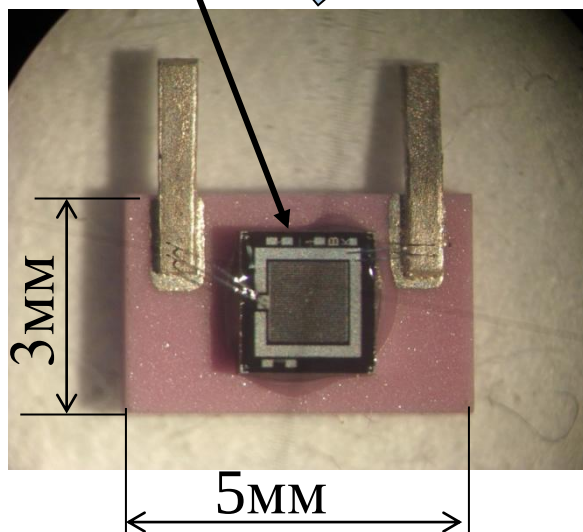
Применение. Радиометрия 2005

В рамках международного сотрудничества собран прототип большого Адронного калориметра, который содержит 8400 SiФЭУ

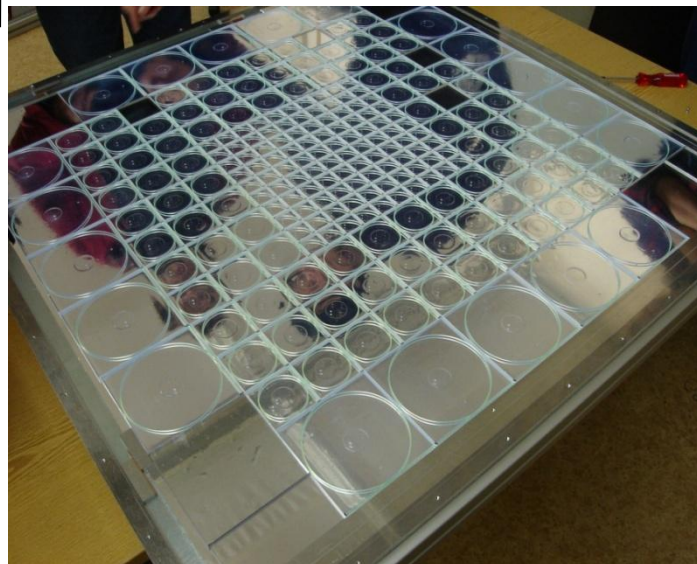
CALICE collaboration

тайл

SiФЭУ



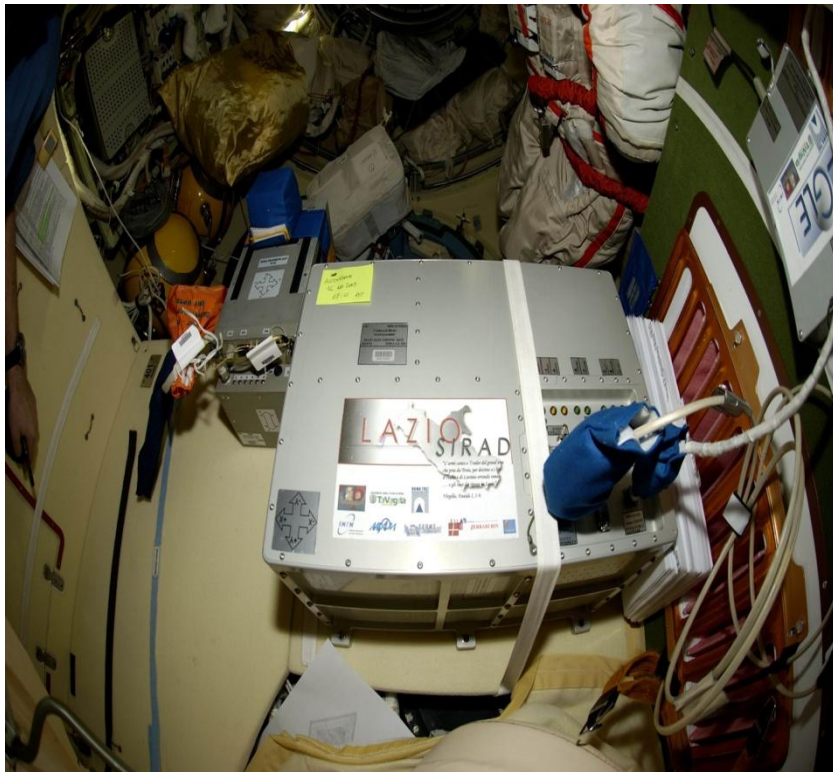
Кассета (220 тайлов)





Применение. Радиометрия 2005

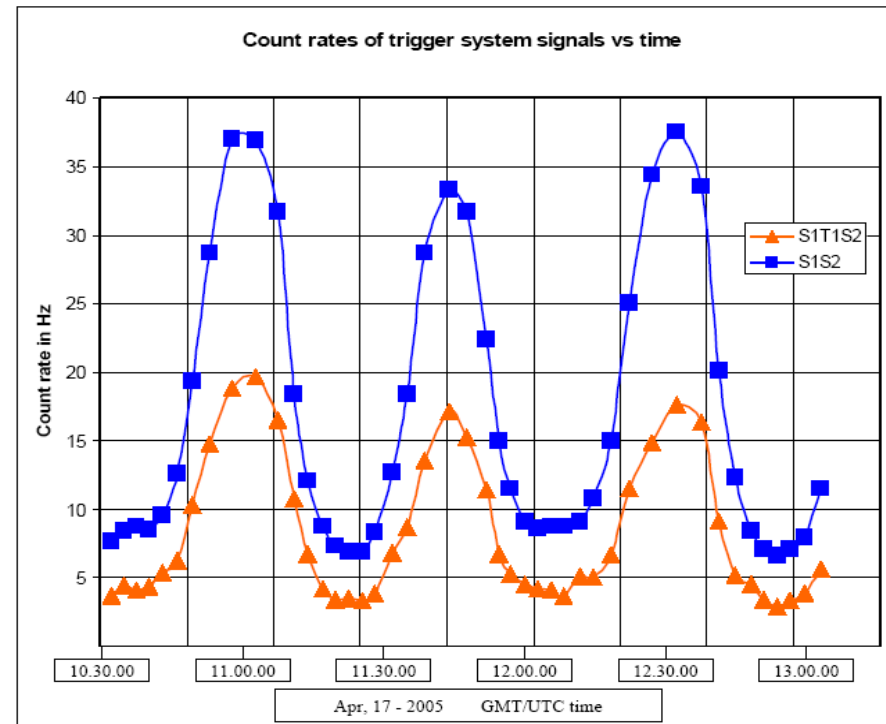
Международная космическая станция 15 апреля, 2005



Эксперимент "LAZIO" (МИФИ-INFN коллаборация)

Научная задача: Измерение потоков частиц низкой энергии и радиационный контроль

Техническая задача: проверка работы SiФЭУ в космосе



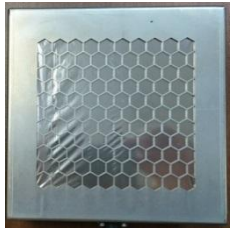
Зависимость интенсивности потока космических частиц от широты



Применение. Радиометрия β . Н/В

НПТ «Доза», 2018г.

Poly+WLS+SiPM



РЗБА-07Д

$$\text{mip}_{2005} = 25 \text{ pix}$$

$$\text{mip}_{2020} = 50 \text{ pix}$$

$$\text{eff}_{\text{Sr-}\gamma}(2\pi) = 70 \%$$

$$\text{eff}_{\text{C14}}(2\pi) = 10 \%$$

Цель к 2025

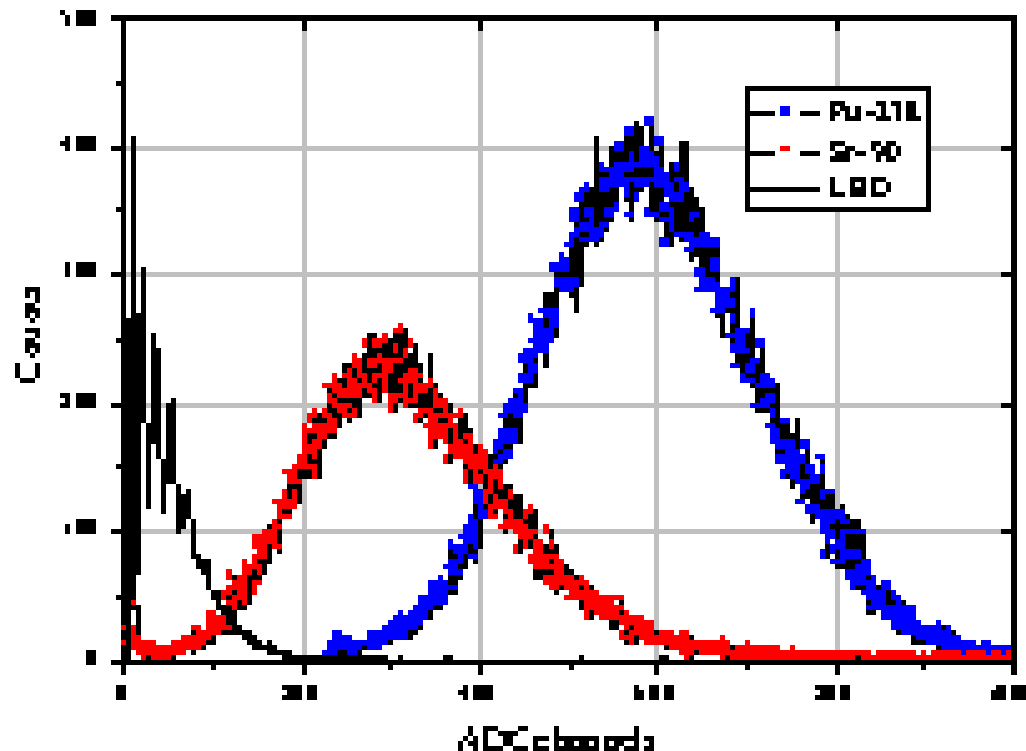
$$\text{eff}_{\text{Ni63}}(2\pi) = 10\%$$



Применение. Радиометрия α . 2005

B.Dolgoshein, 'Large area SiPM's...'

Использование альфа калибровки



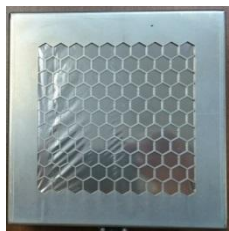
- Пример индивидуальной “физической” калибровки тайлов с использованием α -источника Pu^{238} (10 Бк)
- В центр тайла был приклеен кристалл YAP $5\text{mm} \times 5\text{mm} \times 70\mu\text{m}$. α -источник наносился непосредственно на кристалл YAP



Применение. Радиометрия α . Н/В

НПП «Доза», 2019г.

ZnS+Poly+WLS+SiPM



МКС-17Д «Зяблик»
с альфа блоком
БДЗА-Р5Д



$$A(\text{Pu238})_{2005} = 40 \text{ pix}$$

$$A(\text{Pu239})_{2020} = 150 \text{ pix}$$

$$\text{eff}_{\text{Pu239}}(2\pi) \geq 30\%$$

$$n_{\text{noise}} < 0,01 \text{ Гц}$$



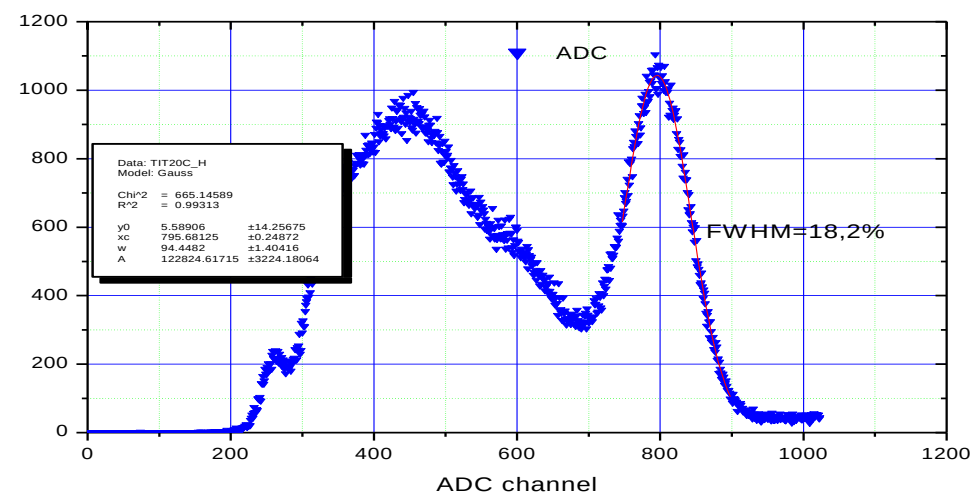
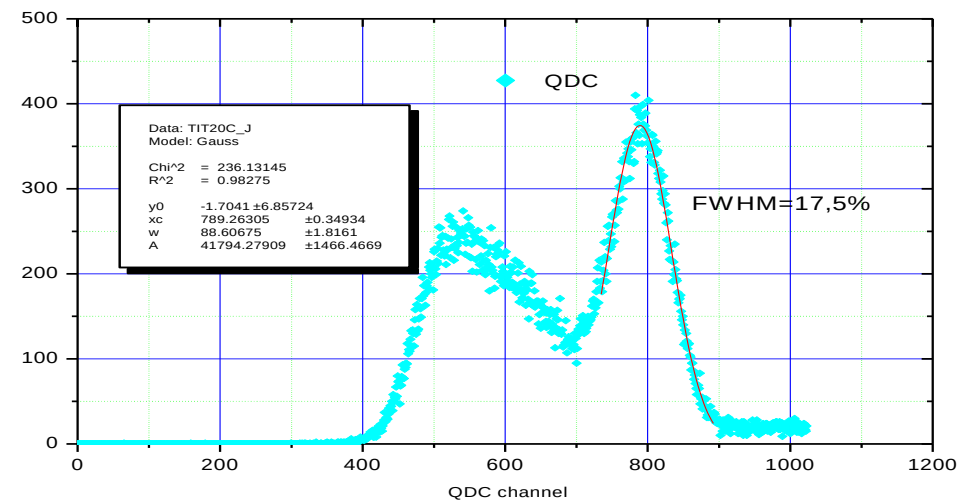
Применение. Спектрометрия. 2005

B.Dolgoshein, 'Large area SiPM's...'

LSO+SiPM для PET



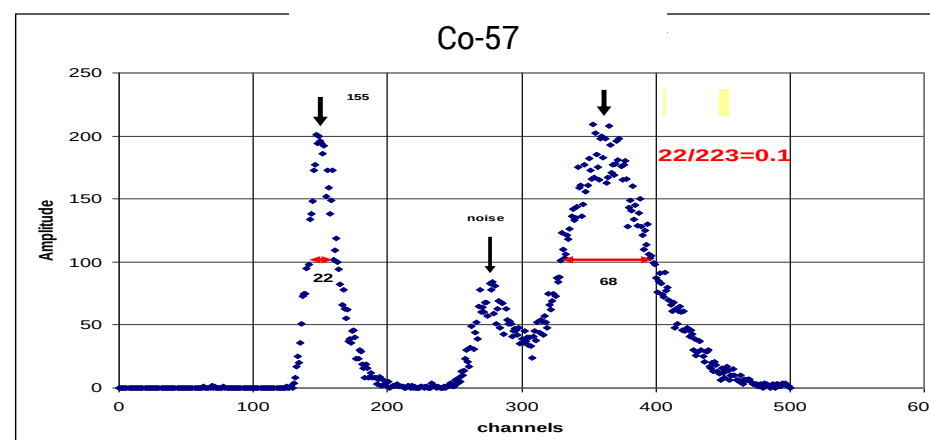
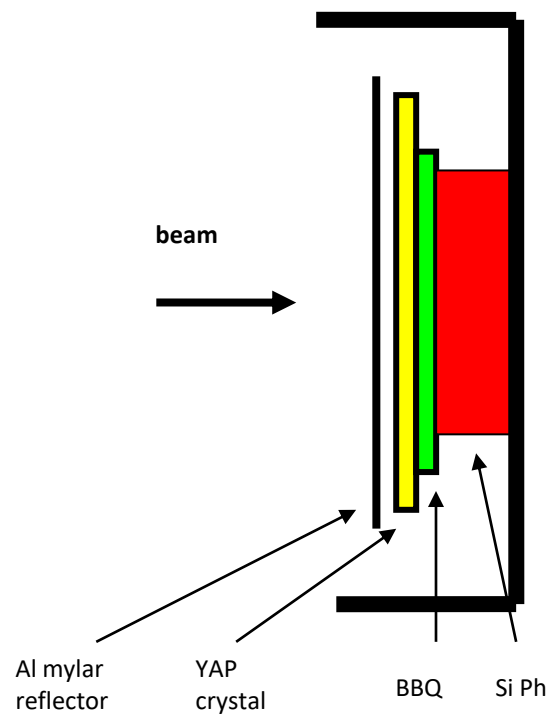
LSO 3x3 mm, SiPM 3x3 mm, 0,511 keV





Применение. Спектрометрия. 2005

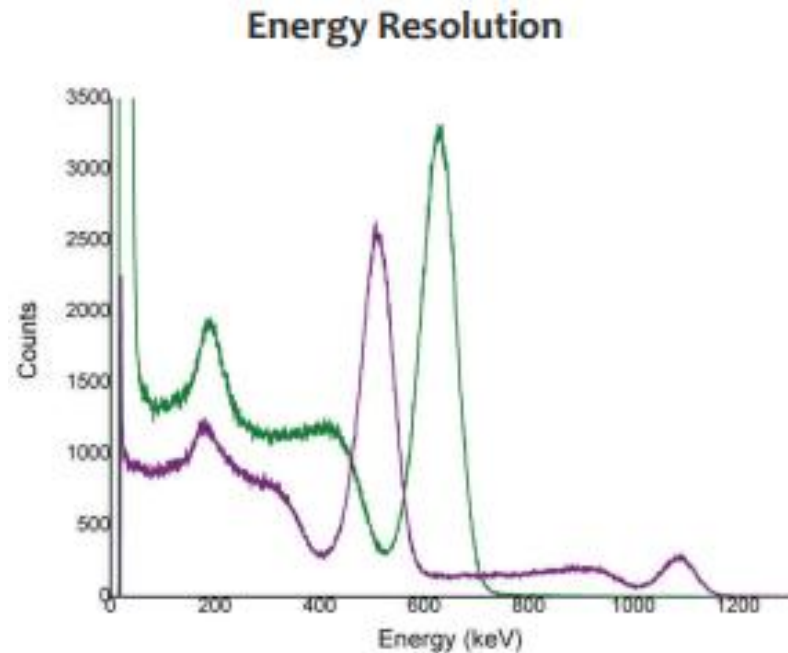
SiPM как ДПИ
(регистрация Рентгена)



B.Dolgoshein, 'Large area SiPM's...'



Применение. Спектрометрия. Н/В



Gamma-ray energy loss peaks from Na-22 and Cs-137.

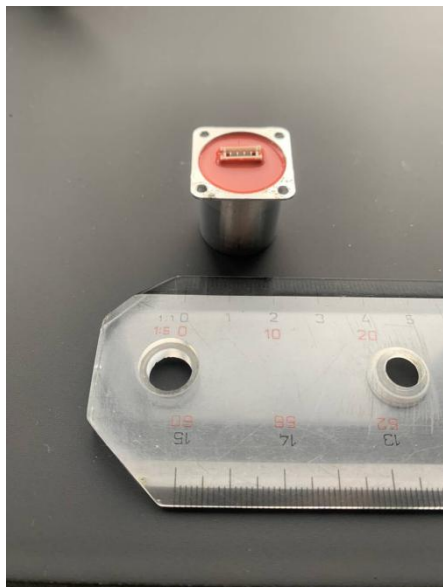
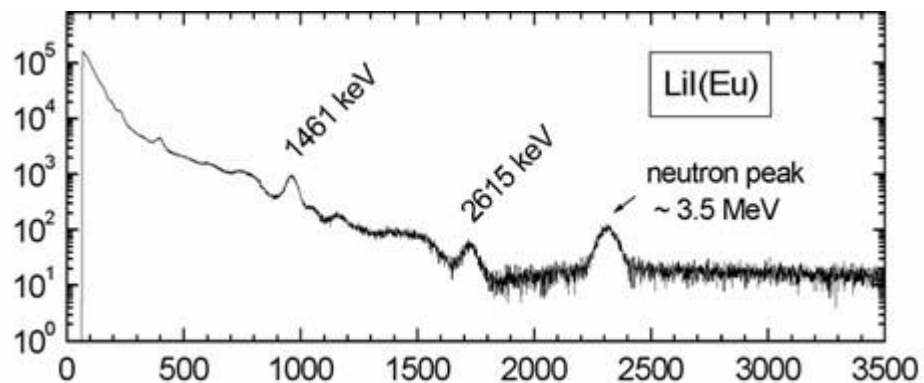
Data from SensL

Многие группы участвуют в гонке за разрешением, однако существует ряд ограничений:

- Малая площадь детектора
- Существенно ограничен динамический диапазон
- CrossTalk – принципиально ограничивает разрешение.



Применение. Спектрометрия. Н/В



НПП «Доза»

МКС-17Д «Зяблик»
с нейтронный блоком
БДКН-Р5Д





Применение. Спектрометрия. Н/В

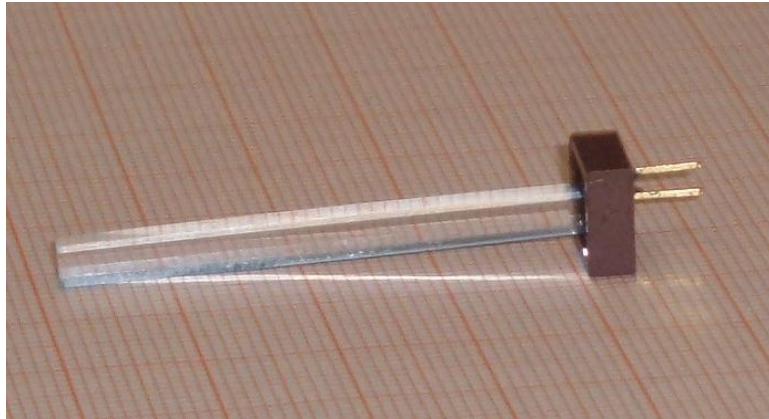


НПП «Доза»

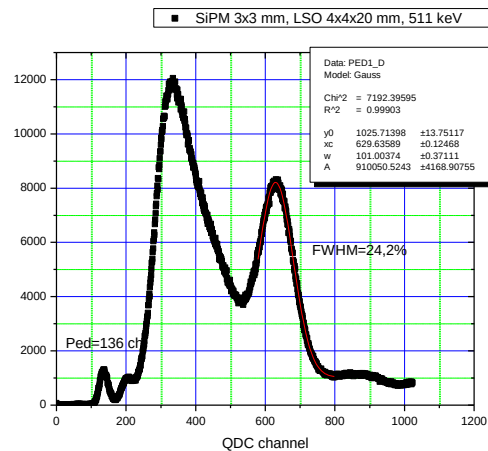




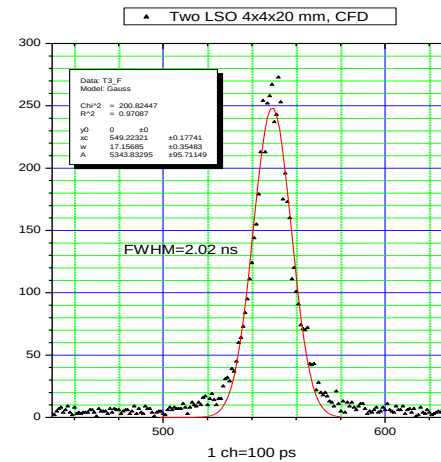
Применение. Временное разрешение.



В настоящее время одноэлектронное временное разрешение SiPM в зависимости от конструкции составляет $\sim 100 - 500$ ps



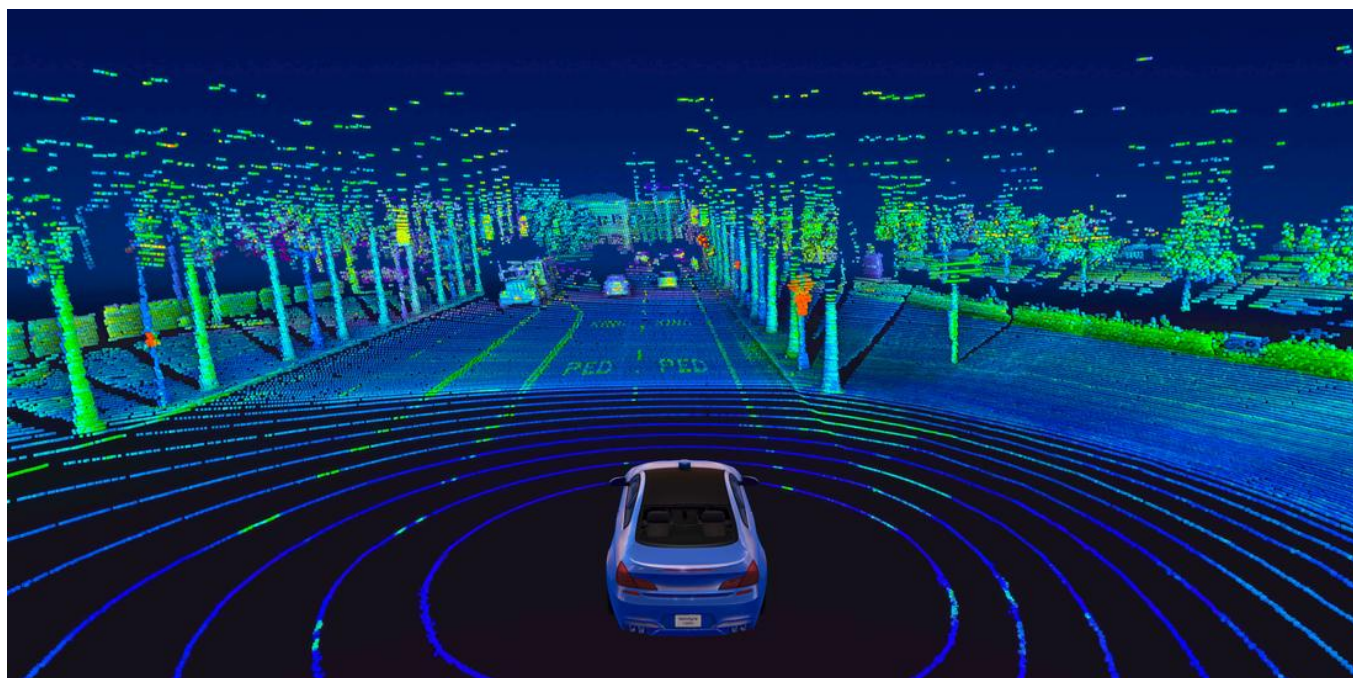
Energy Resolution
of 24.2%



Time resolution of
2.02 ns

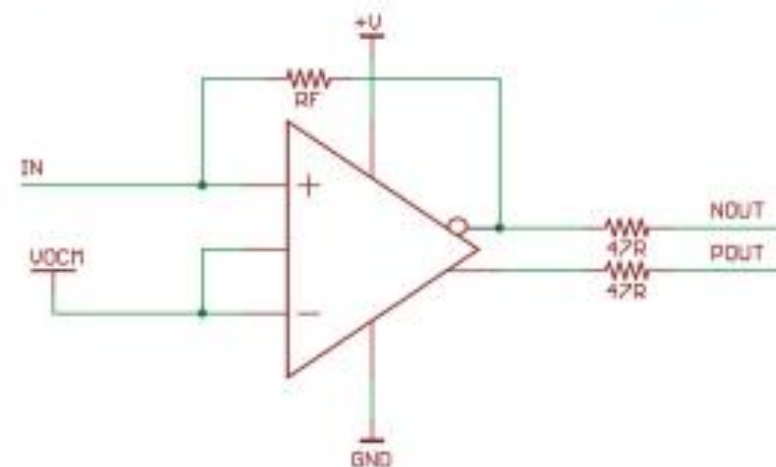
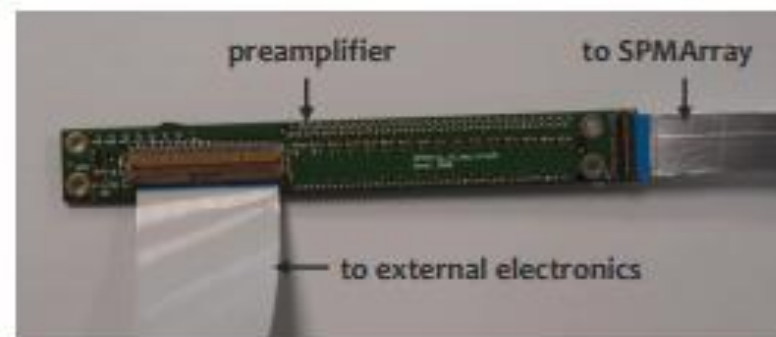


Применение. Временное разрешение.



Необходима высокая квантовая эффективность в области 905 нм.

Достаточно небольшого числа каналов FrontEnd электроники.





Применение. Временное разрешение.

Time PET + MRI

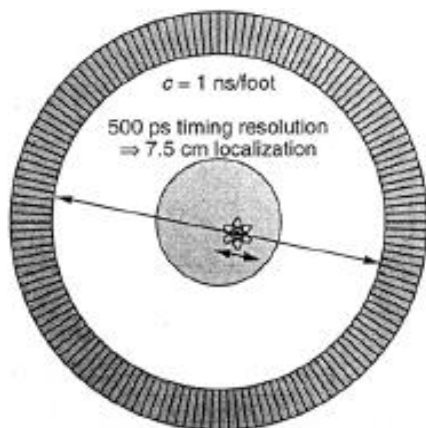
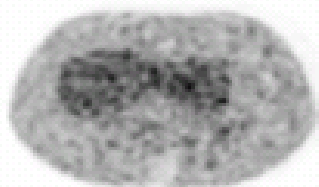


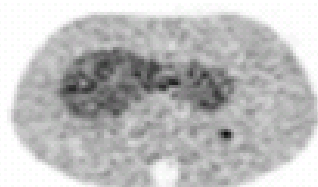
Figure 1. Time-of-Flight PET Camera. Annihilation photo detected by a ring of scintillation crystals. With a conv PET camera, this localizes the position of the positron to segment joining the two crystals. With a TOF PET cam arrival time difference is used to further restrict the position.

PET + time information

→ key for noise suppression



Conventional

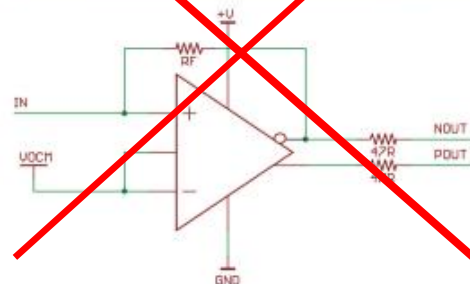
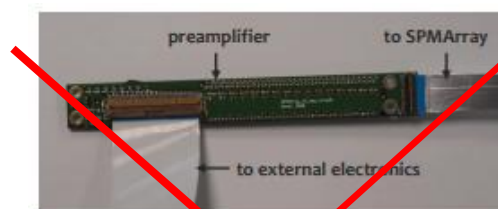


300 ps

- Нечувствительность к магнитному полю вплоть до 7 Тл
- Высокая цена сцинтилляторов

Scintillator	Price per 1 cm ³
BGO	\$35
LSO:Ce	\$60
LYSO:Ce	\$70

Необходима дешевая доступная многоканальная FrontEnd электроника





Заключение

SiФЭУ – за прошедшие 20 лет из R&D разработки превратился в «стандартный» прибор.

В настоящий момент в мире существует более 20 групп, разрабатывающих/выпускающих SiPM.

Основные из них

Hamamatsu

Broadcom

Phillips

В СНГ работы в области SiPM продолжают вести:

ОИЯИ , ФИАН/МНТЦ, Интеграл.

Исходя из достигнутых характеристик SiPM, определен ряд его возможных применений.

Новый виток применения возможен после появления доступной/дешевой FrontEnd электроники. К сожалению, фирмы, разрабатывавшие специализированные чипы для детекторов (Интеграл, Пульсар), в последнее время не проявляют интереса.