



Микропиксельные лавинные фотодиоды

Ю.В. Мусиенко

Институт ядерных исследований РАН, Москва



План доклада

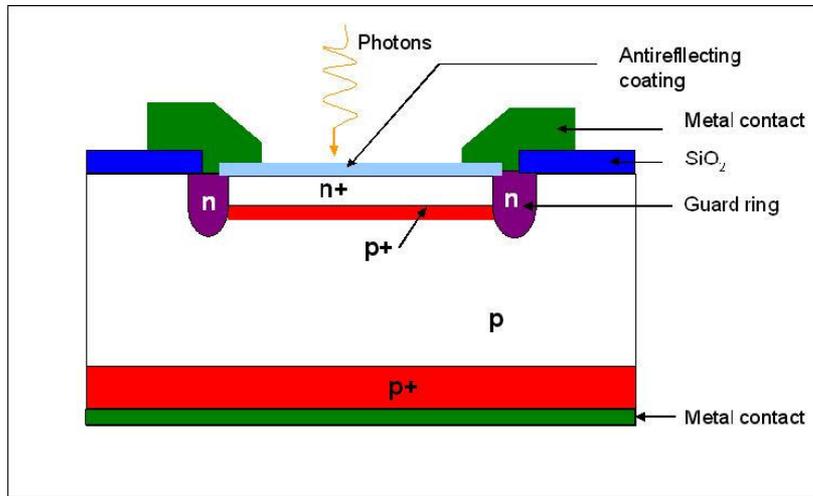
- **Микропиксельные гейгеровские лавинные фотодиоды (МГЛФД) (“кремниевые фотоэлектронные умножители”)**
 - **особенности структуры**
 - **достоинства и недостатки**
- **Обзор новых разработок МГЛФД**
- **Примеры применений МГЛФД в физике элементарных частиц и астрофизике**
- **Заключение**



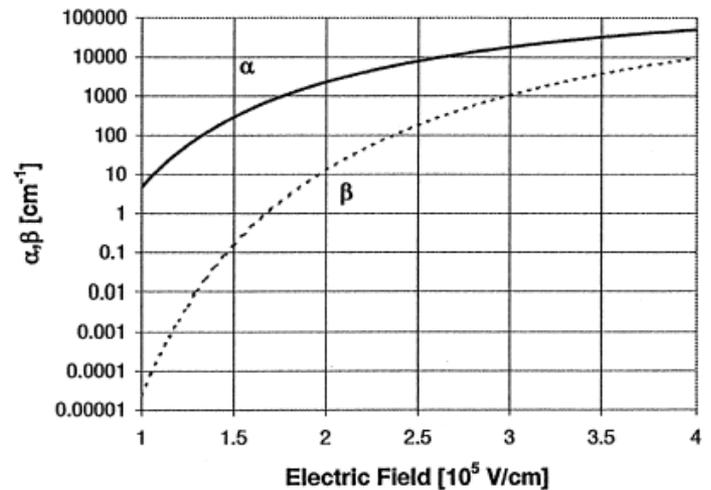
Принцип работы ЛФД (лавинное умножение носителей заряда)

Лавинные фотодиоды - фотодиоды со встроенной областью с высокого ($>10^5$ В/см) электрического поля. С увеличением напряжения смещения, электроны (или дырки) ускоряются и в результате процесса ударной ионизации могут создать вторичные электрон-дырочные пары.

Типичная структура ЛФД для телекоммуникации



Коэффициенты ионизации электронов и дырок в кремнии

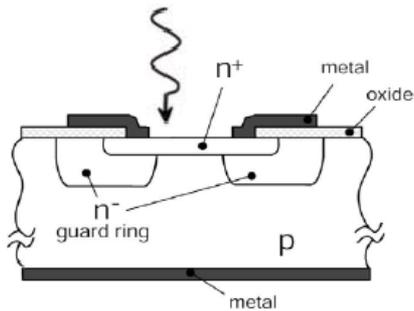




ЛФД, работающие при напряжениях выше напряжения пробоя - в режиме Гейгера (ГЛФД)

Один из недостатков "обычных" ЛФД - хорошо работают только при низких коэффициентах усиления ($M < 100$). Увеличение коэффициента усиления приводит к росту шум-фактора и температурной нестабильности ЛФД. ГЛФД, работающие при напряжениях выше напряжения пробоя, в режиме Гейгера, разработаны в начале 60-х (R. Haitz et al, J. Appl. Phys. (1963-1965)) Сейчас производятся несколькими компаниями, например, Perkin Elmer Optoelectronics (макс. Ø500 мкм)

Планарный ГЛФД



ГЛФД (Perkin Elmer)

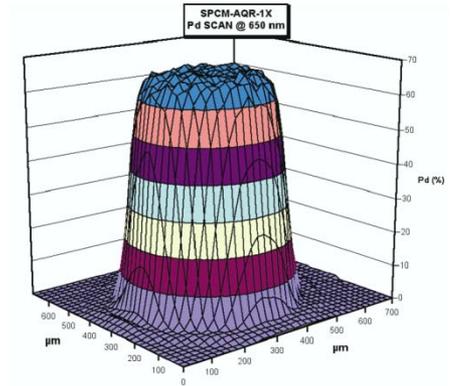
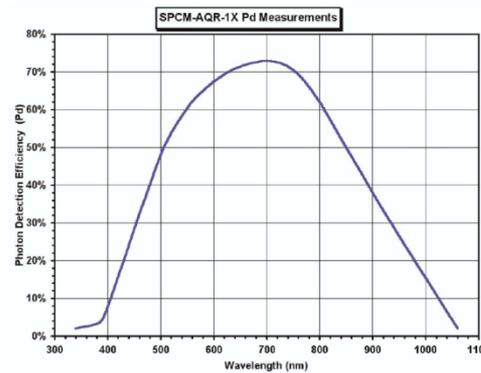
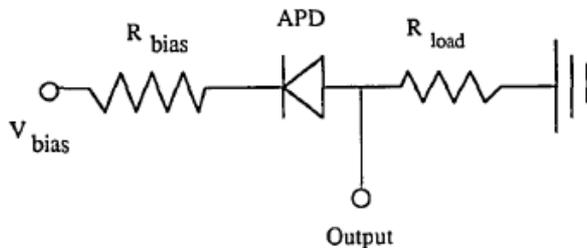


Схема включения, "пассивное гашение".



Features

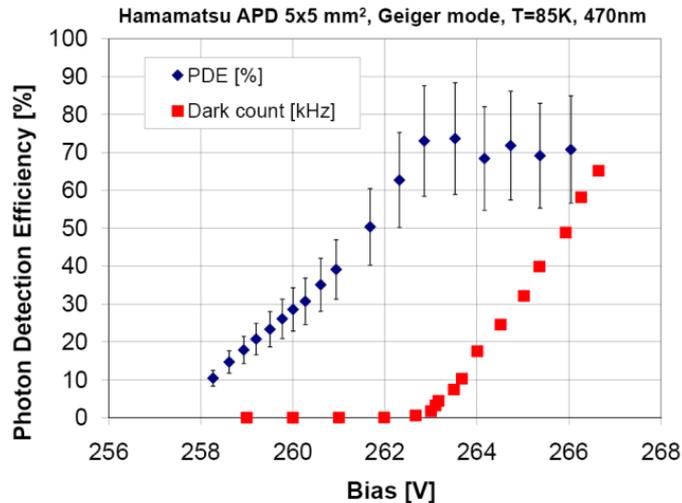
- Peak Photon Detection Efficiency @ 650 nm:
- 70% Typical
- Active Area: SPCM-AQR-1X: 175 μm
- Timing Resolution of 350 ps FWHM
- User Friendly
- Gated Input
- Single +5v Supply

Dark count rate – 500 Hz (25 Hz -selected)



Недостатки ГЛФД

- Неспособны регистрировать многофотонные сигналы, если они короче времени восстановления напряжения на ГЛФД
- Чувствительная площадь ГЛФД ограничена из-за высокого темнового счёта при комнатной температуре (ГЛФД "блокируется" темновыми импульсами, если темновой счёт $\sim 1/\text{время}$ восстановления). ГЛФД площадью $>1 \text{ мм}^2$ приходится охлаждать и/или использовать "активное гашение"



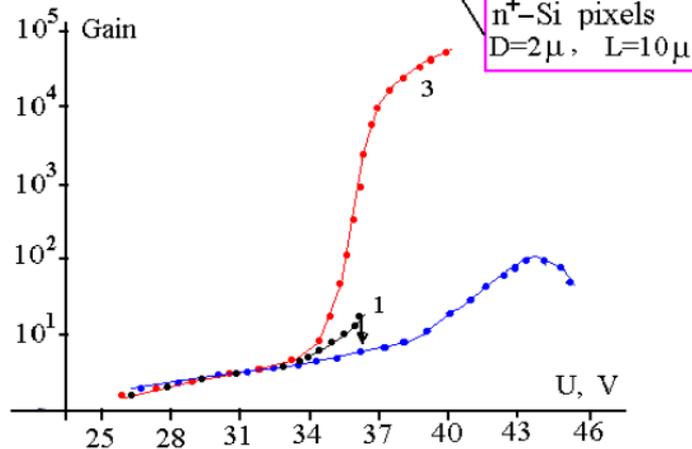
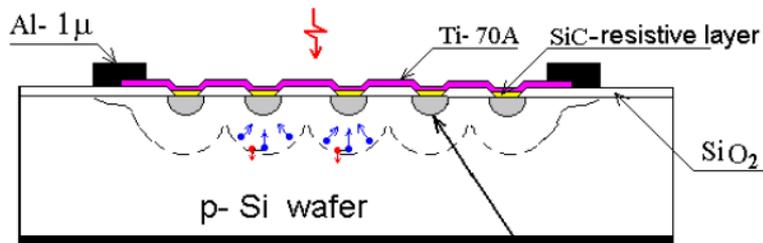
(A. Dorokhov, A. Glauser, Y. Musienko et.al., Journal Mod.Opt. v51 2004 p.1351)

Решение проблемы: ГЛФД состоящие из большого числа маленьких ячеек, соединённых параллельно и имеющих индивидуальные резисторы для гашения разряда - микропиксельные ГЛФД (МГЛФД).



ЛФД со структурой металл-резистор-полупроводник (МРП ЛФД)

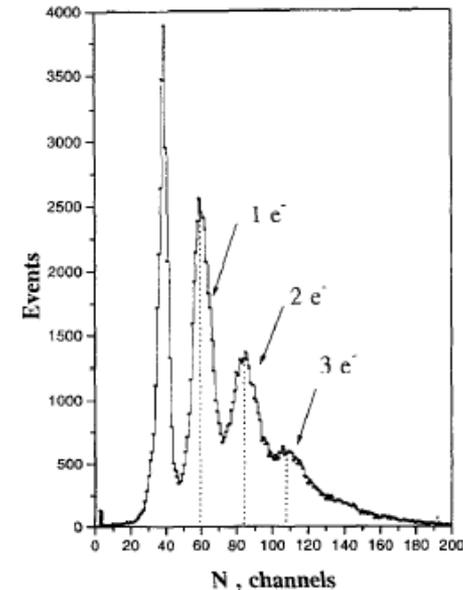
Самый первый микропиксельный ЛФД со структурой металл-резистор-полупроводник (МРП ЛФД) предложен в 1989 г. А. Гасановым, В. Головиным, З. Садыговым, Н. Юсиповым (патент #1702831, от 11.10.1989). ЛФД площадью $5 \times 5 \text{ mm}^2$ были произведены на МЭЛЗе (Москва).



1- Si p-n-junction; 2- Si-SiC-planar structure
3- Si-SiC-micro-pixel (micro-channel)

Первые МРП ЛФД: на ЛФД площадью $0.5 \times 0.5 \text{ mm}^2$ была достигнута эффективность регистрации несколько процентов для "красных" фотонов.

Удалось различить сигналы вызванные отдельными фотонами



(A. Akindinov et al., NIM387 (1997) 231)



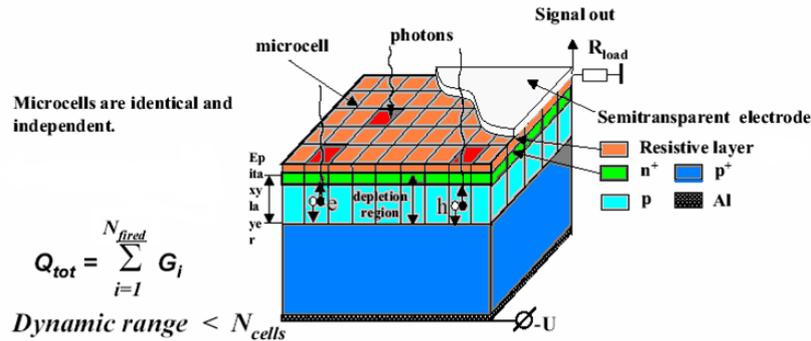
Разработчики и производители

- ЦПТА(Москва) - В. Головин
- ОИЯИ/ИЯИ (Дубна, Москва)/Zecotek (Singapur) - З. Садыгов
- Институт электроники (Минск), В. Залесский
- МИФИ/Пульсар (Москва) - Б. Долгошеин, Е. Попова, С. Клёмин
- Hamamatsu Photonics (Hamamatsu, Japan)
- SensL (Cork, Ireland)
- RMD (Boston)
- MPI Semiconductor Laboratory (Munich, Germany)
- FBK (Trento, Italy)
- ST-Micro (France/Italy)
- Amplification Technologies Inc. (New York)
- KETEK (Munich, Germany)
- Novel Device Laboratory (Beijing, China)
- Philips Digital Photon Counting (Aachen, Germany)
-

Каждый производитель предложил своё название для МГЛФД :
MRS APD, MAPD, SiPM, SSPM, SPM, G-APD, MPPC, PPD, DAPD ...

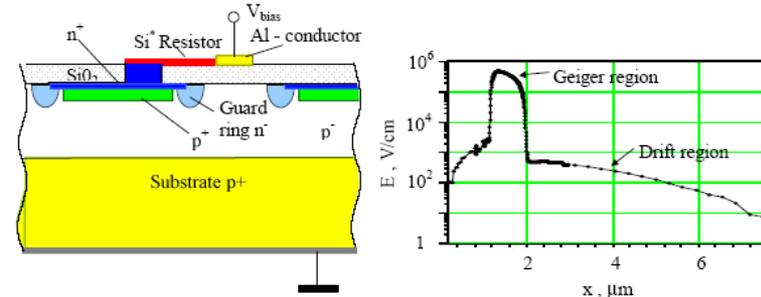


Структура и принцип действия



(E. Grigoriev, Como 2001)

Структура на кремнии р-типа



(B. Dolgoshein et al., "An advanced study of silicon photomultiplier", ICFA-2001)

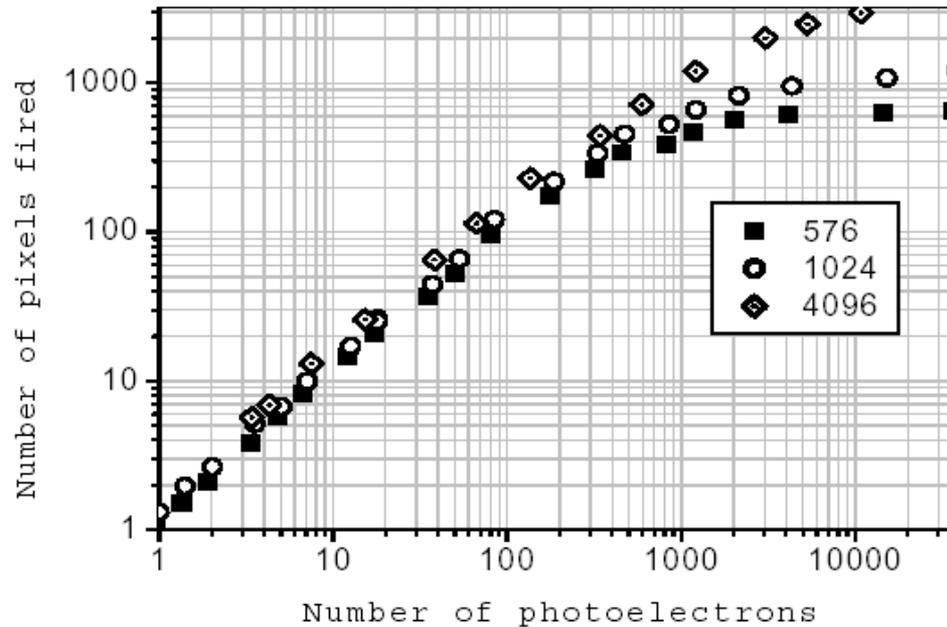
- Все ячейки срабатывают индивидуально при попадании в них фотонов (если не учитывать оптическую связь между ячейками)
- При срабатывании нескольких ячеек сигнал суммируется
- Попадание нескольких фотонов в одну ячейку вызывает только одно срабатывание ячейки
- Разряд ячейки "гасится" индивидуальным резистором ($R=100 \text{ кОм} - 100 \text{ МОм}$)
- Сигнал от одной ячейки $Q=C*(V-V_B)$, C - ёмкость ячейки, $V-V_B$ - "перенапряжение"
- После срабатывания напряжение на ячейке падает до напряжения пробоя V_B , после чего оно восстанавливается с постоянной времени $\sim R*C$
- Вероятность регистрации фотона пропорциональна активной площади ячейки и растёт с увеличением перенапряжения

$$PDE(\lambda, U, T) = QE(\lambda) * G_f * P_b(\lambda, U, T)$$



Линейность

Response functions for the SiPMs with different total pixel numbers measured for 40 ps laser pulses



(B. Dolgoshein, TRD05, Bari)

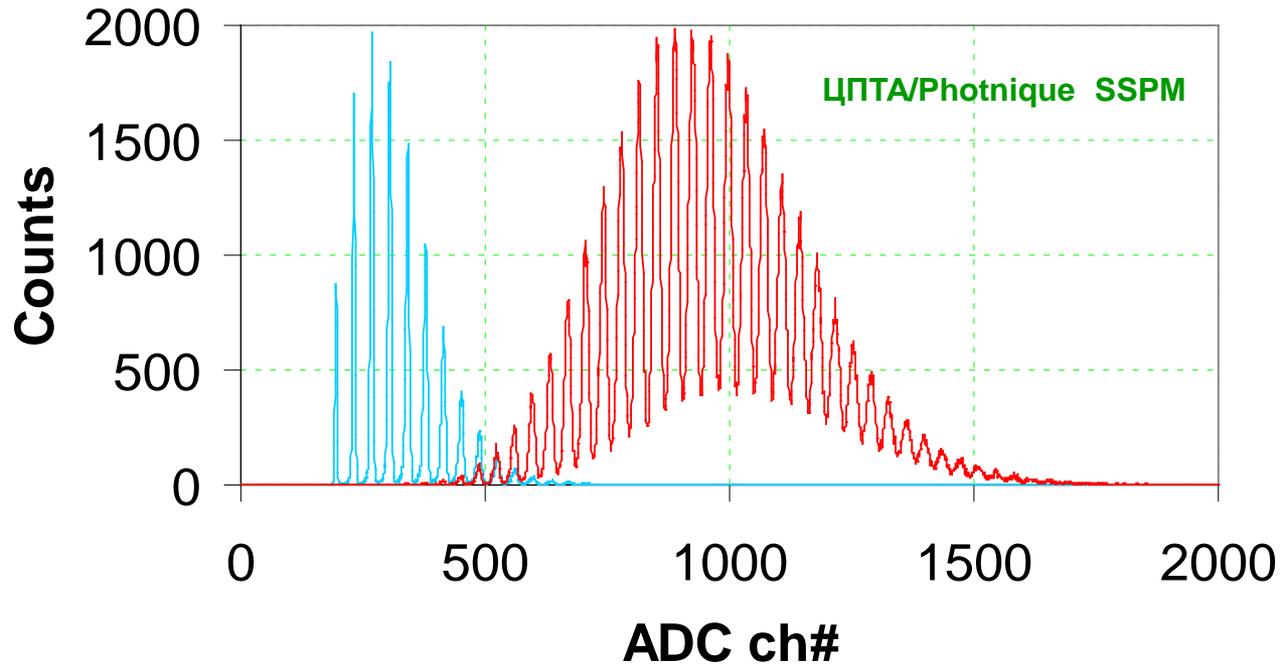
В случае однородного освещения (в отсутствие "оптической связи" и послепульсов) число сработавших ячеек можно выразить через полное число ячеек, число фотонов и PDE:

$$N_{firedcells} = N_{total} \cdot \left(1 - e^{-\frac{N_{photon} \cdot PDE}{N_{total}}}\right)$$



Однородность сигналов от различных пикселей

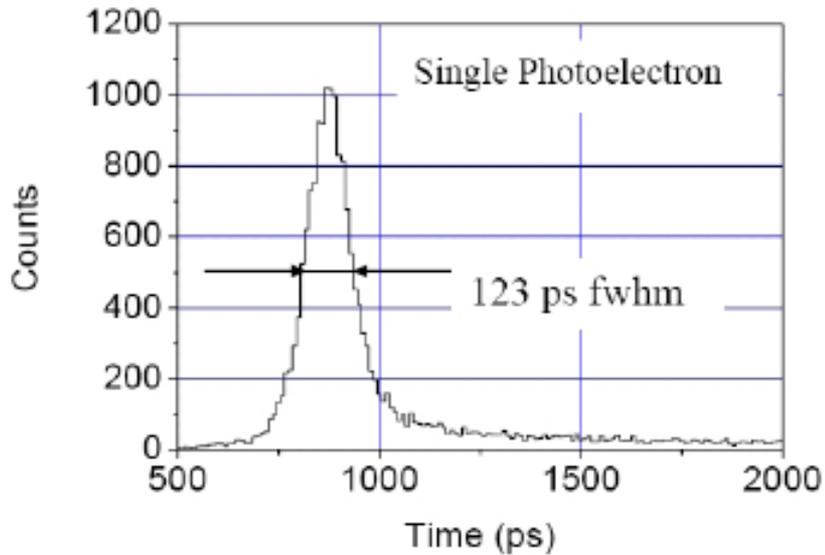
Green-red light sensitive APD, low amplitude light signals, $U=43V$, $T=-28\text{ C}$



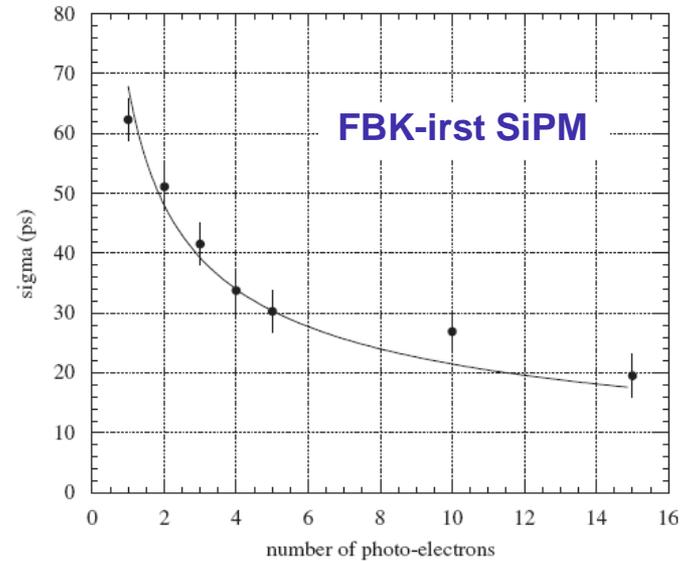
*Два амплитудных спектра (сработало в среднем ~2.5 и 21 ячейка).
Распределения хорошо описываются статистикой Пуассона*



Временное разрешение



Measured with MEPhI/Pulsar SiPM using single photons (B. Dolgoshein, Beaune-02)

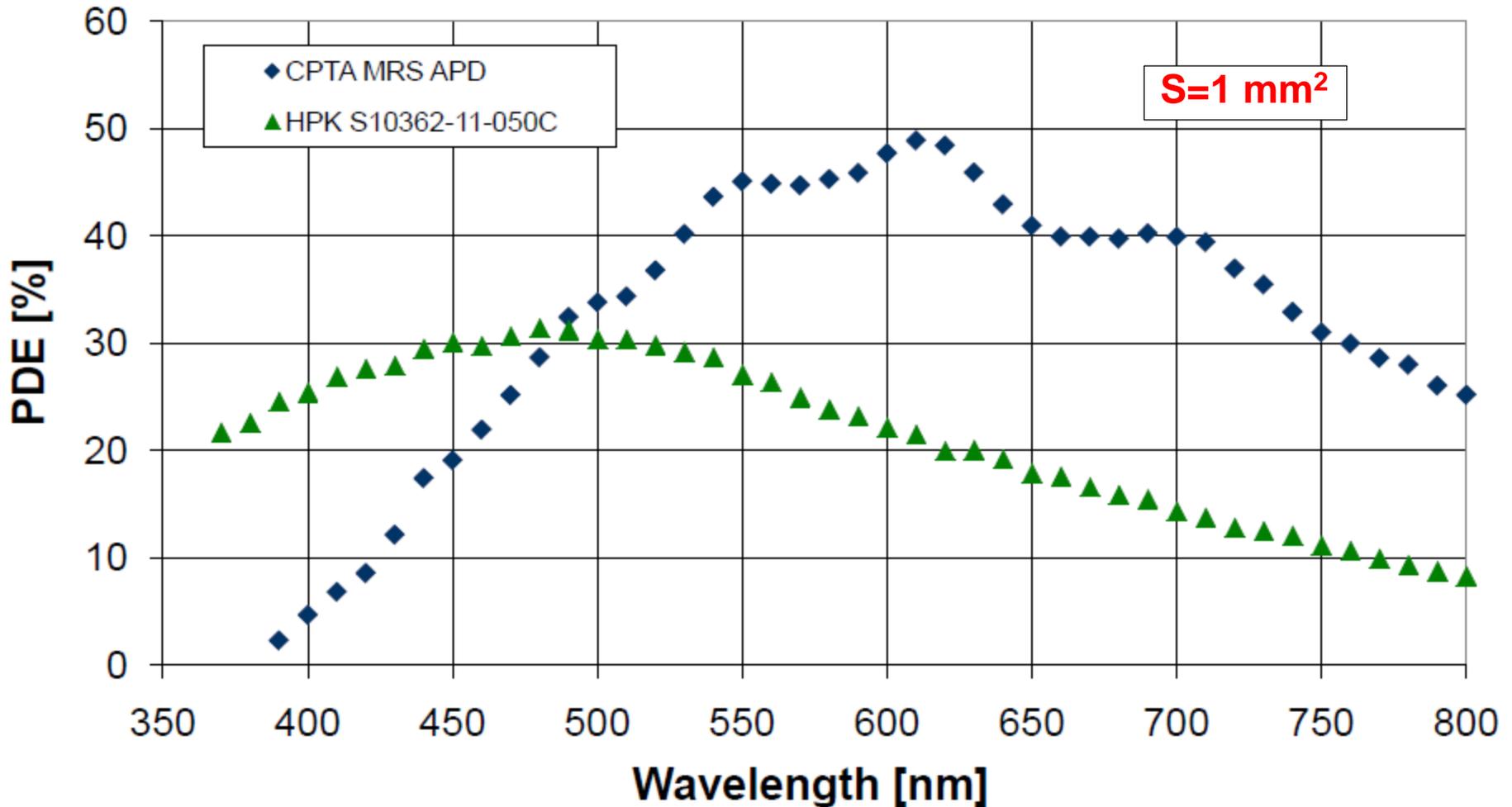


G. Collazuol et al. / Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 581 (2007) 461–464



Зависимость PDE от длины волны

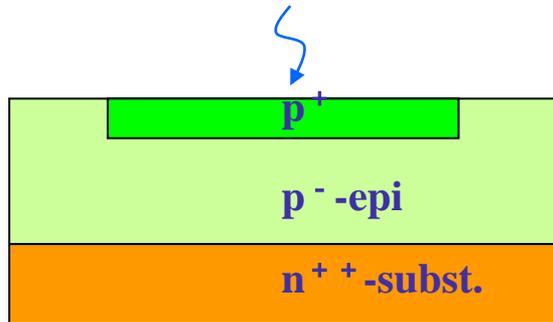
T=22 C



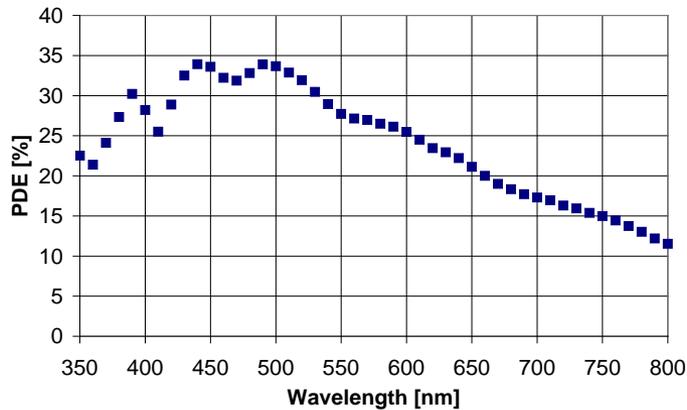


МГЛФД, изготовленные на кремнии n-типа

МГЛФД, изготовленные на кремнии n-типа, благодаря своей структуре, имеют лучшую PDE в коротковолновой области спектра

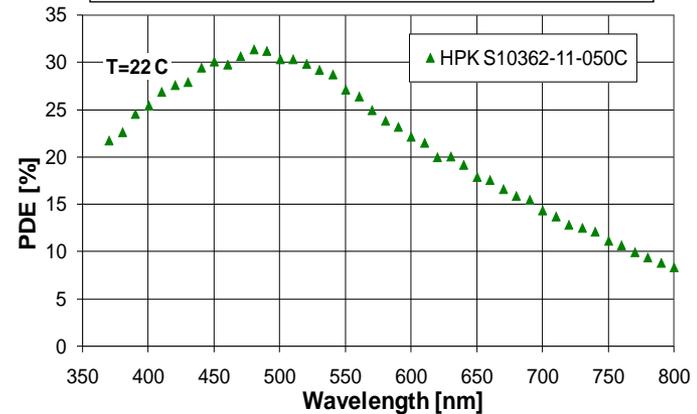


MRS APD, CPTA, 400 cells/mm²

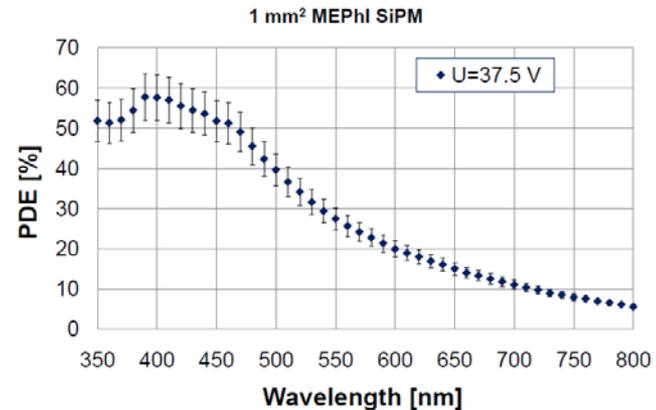


(Y. Musienko, PD-07, SCINT-07, DESY-10)

MPPC, Hamamatsu, 400 cells/mm²



SiPM, MEPhi/Pulsar, 100 cells/mm²

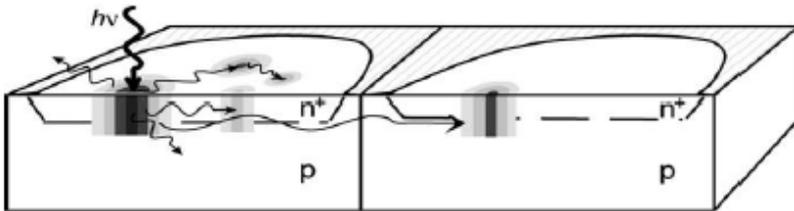


Отличный фотоприёмник-кандидат для модернизации
сцинтилляционного трекера эксперимента LHCb

“Hot-carrier luminescence”:

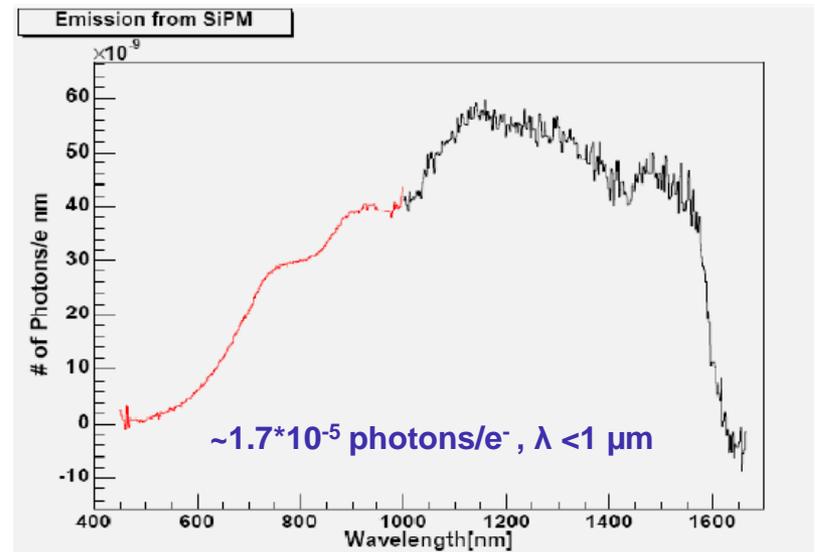
10^5 носителей заряда, прошедших через ячейку, приводят к высвечиванию ~ 3 фотонов с длиной волны < 1 мкм (A. Lacaita)

Эффект растёт с увеличением “перенапряжения” !!



A. Lacaita et al, IEEE TED (1993)

Из-за оптической связи между ячейками, образовавшийся в ячейке (в процессе фотоли тепловой генерации) носитель заряда, может вызвать срабатывание не только этой ячейки, но и соседних ячеек.

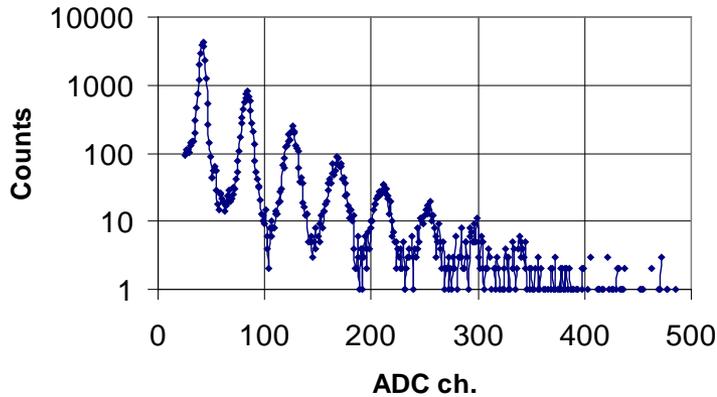


R. Mirzoyan, NDIP08, Aix-les-Bains



“Одноэлектронный” спектр и шум-фактор МГЛФД, в присутствии “оптической связи” между ячейками

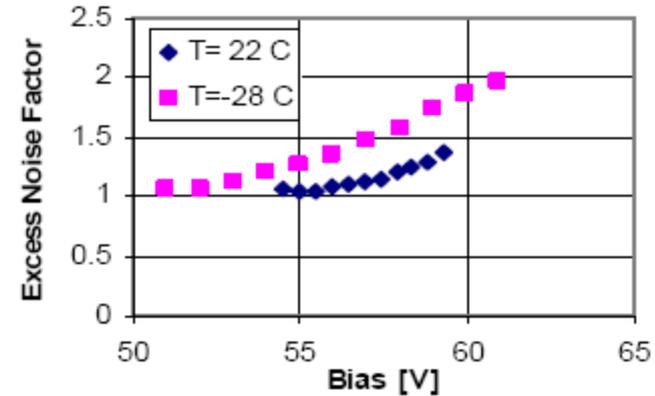
SES MEPhI/PULSAR APD, U=57.5V, T=-28 C



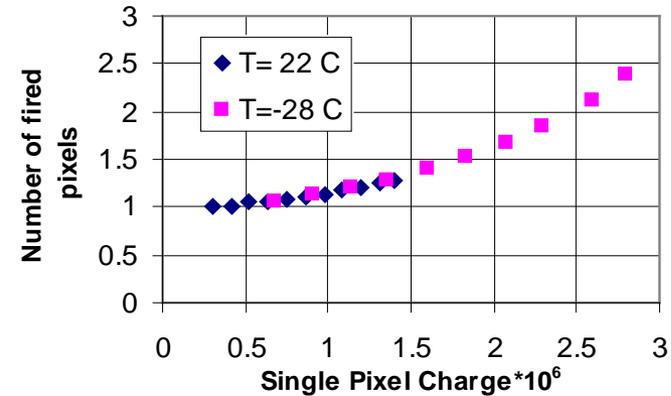
$$F = 1 + \frac{\sigma_M^2}{M^2}$$

$$\frac{\sigma_A}{A} = \sqrt{\frac{F}{N}}$$

MEPhI/PULSAR APD



MEPhI/PULSAR APD

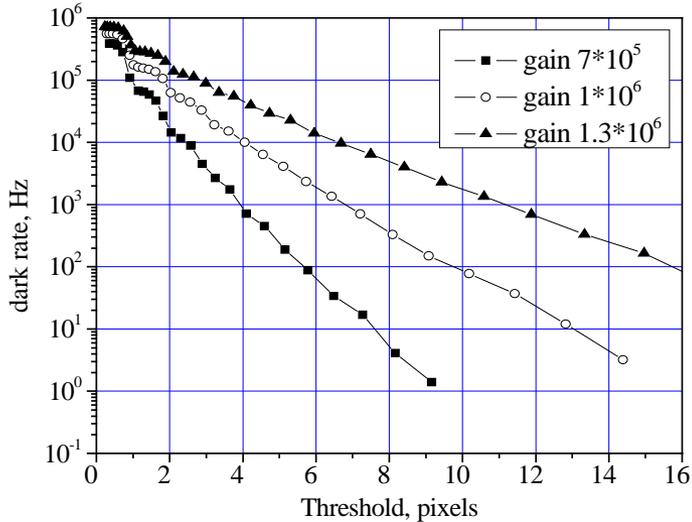


Y. Musienko, NDIP-05, Beaune, France



"Оптическая связь" и темновой счёт МГЛФД

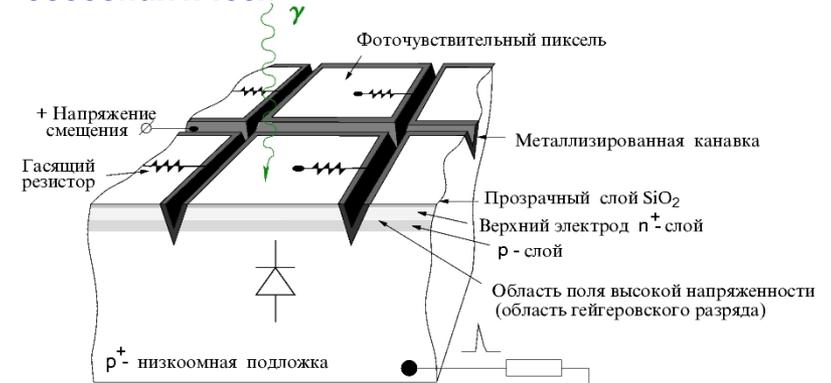
Типичный темновой счёт МГЛФД при комнатной температуре: $0.1 - 10$ МГц/мм²



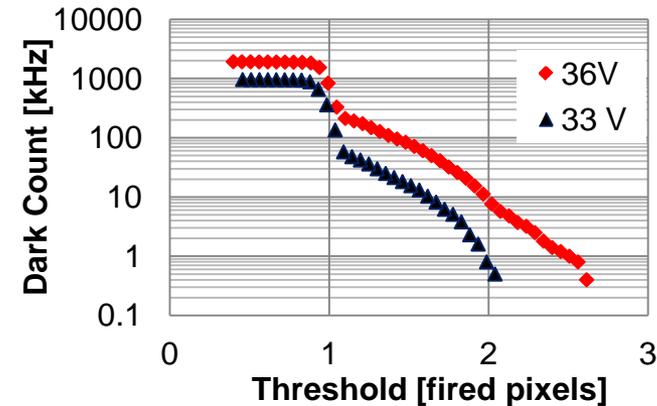
Из-за оптической связи между ячейками темновой счёт падает с увеличением порога электроники гораздо медленнее, чем ожидалось бы из-за случайных совпадений.

(E.Popova, CALICE meeting)

Для уменьшения оптической связи между ячейками, В. Головин (ЦПТА) в своих МГЛФД разделил ячейки канавками, заполненными непрозрачным веществом, значительно уменьшив, тем самым, вероятность "поджига" соседних ячеек



Вероятность "поджига" соседних ячеек 1-3%



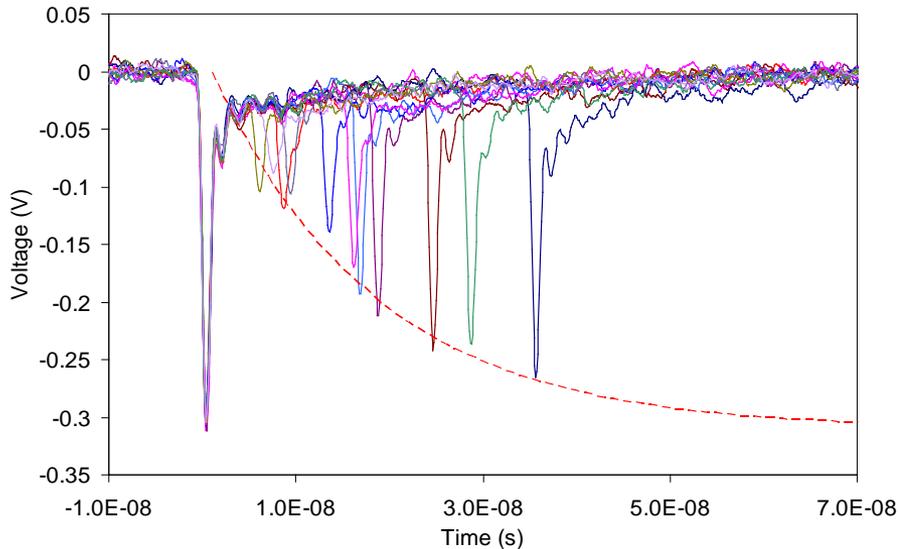
(Ю. Мусиенко, INSTR-08, Новосибирск)



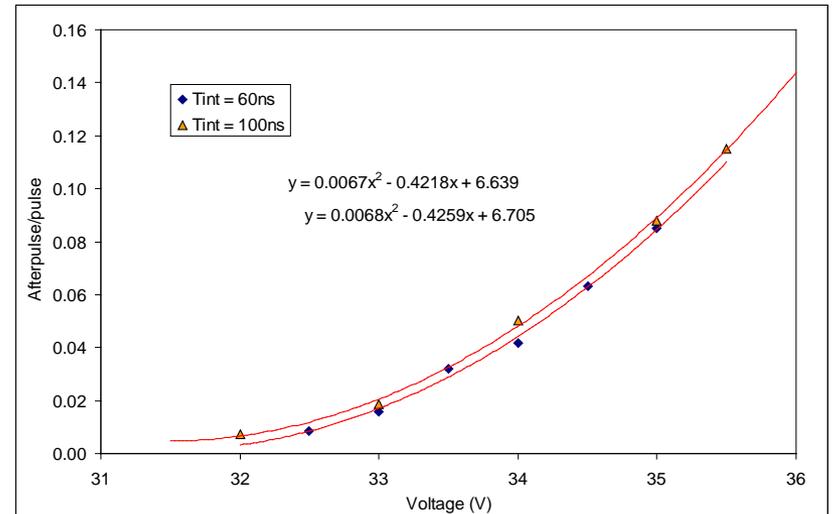
Послеимпульсы в МГЛФД

Послеимпульсы в МГЛФД возникают из-за слишком быстрого восстановления напряжения на ячейке, вследствие малого "гасящего" сопротивления ($R \sim 100\text{-}200$ кОм). Заряд, образовавшийся в предыдущем разряде, не успевает уйти из ОПЗ ячейки (либо "застревает" на короткоживущих ловушках) и вызывает повторное срабатывание ячейки

Послеимпульсы, измеренные на единичной ячейке



Вероятность появления послеимпульсов в зависимости от напряжения на ячейке

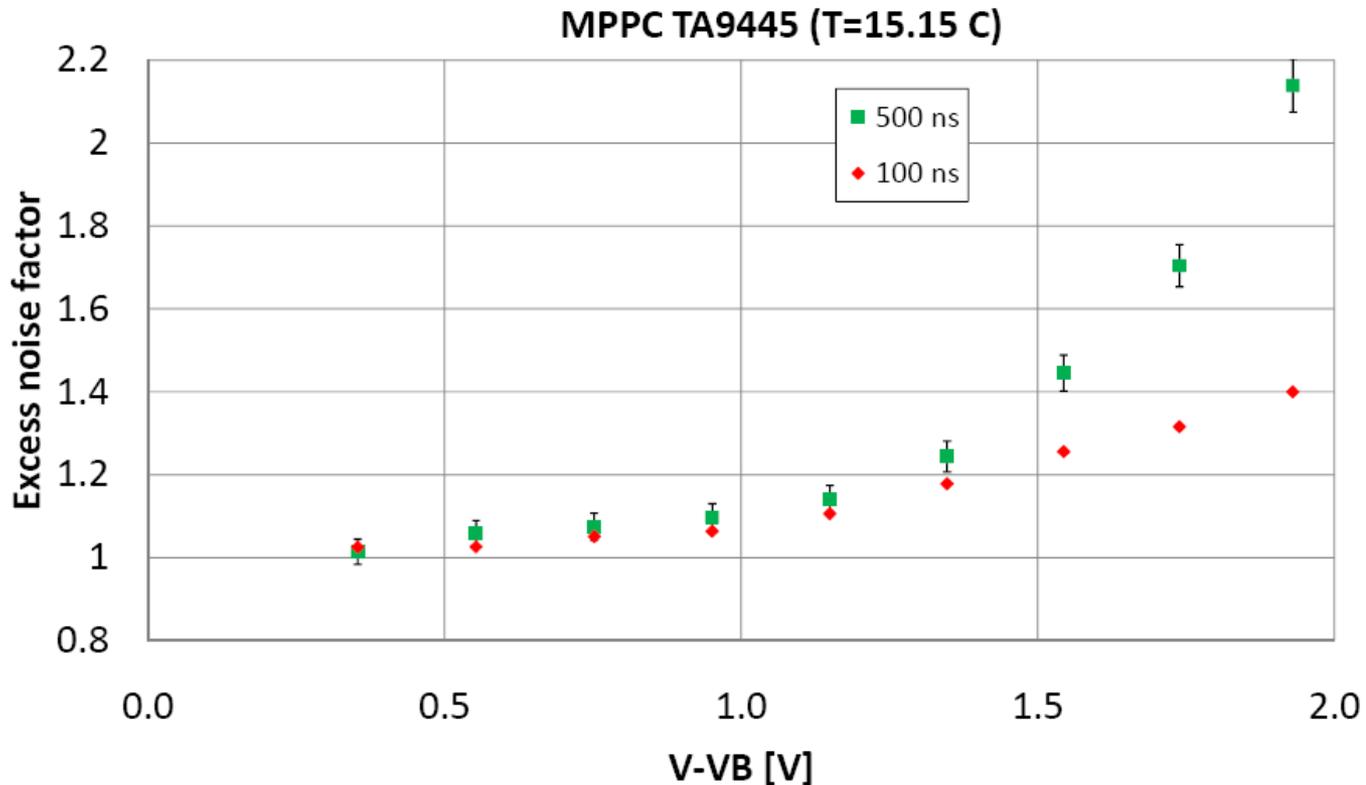


(FBK-irst SiPM, C. Piemonte, June 13th, 2007, Perugia)



Послеимпульсы и шум-фактор МГЛФД

Послеимпульсы увеличивают не только темновой счёт МГЛФД, но и его шум-фактор



Шум-фактор Hamamatsu MPPC измерен в зависимости от "перенапряжения" при двух длительностях ворот интегрирования сигнала (100 и 500 нс). Длительность сигнала от светодиода не превышала 50 нс по основанию

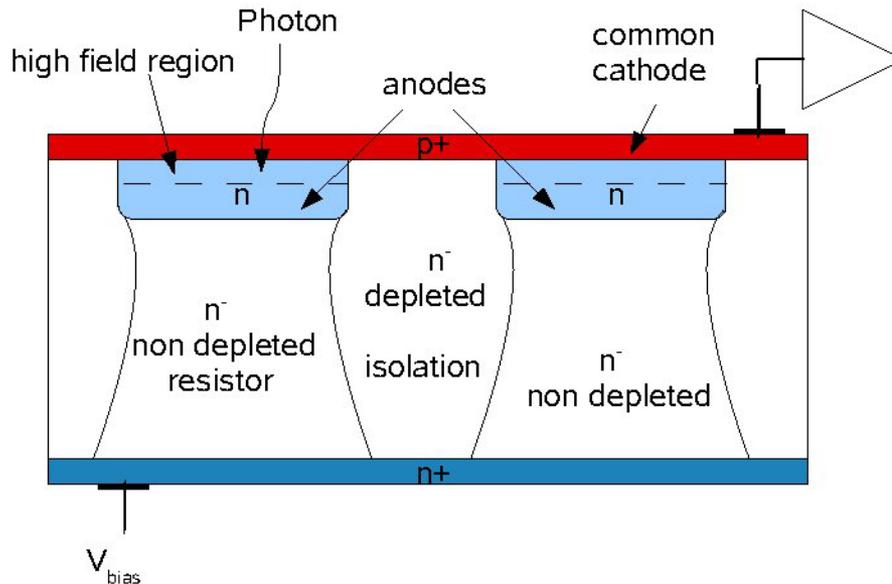


МГЛФД - новые разработки



МГЛФД с "объёмными" (вертикальными) резисторами

Концепция этих МГЛФД предложена в Институте Макса Планка (Германия)



Advantages:

- no need of polysilicon
- free entrance window for light, no metal necessary within the array
- coarse lithographic level
- simple technology
- inherent diffusion barrier against minorities in the bulk -> less optical cross talk
- hopefully better radiation hardness

Drawbacks:

- required depth for vertical resistors does not match wafer thickness
- wafer bonding is necessary for big pixel sizes
- significant changes of subpixel size requires change of material
- vertical 'resistor' is a JFET -> parabolic IV -> longer recovery times

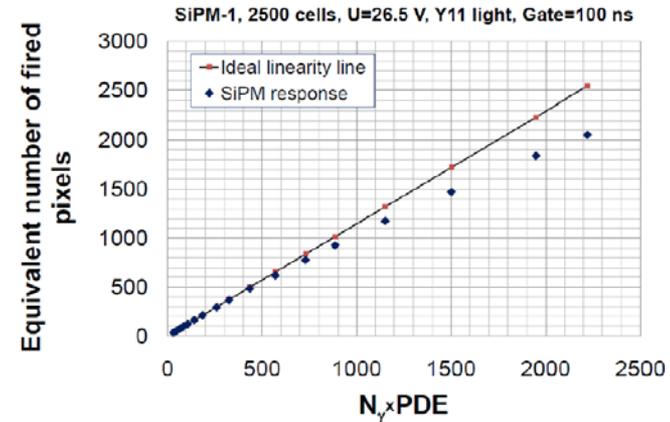
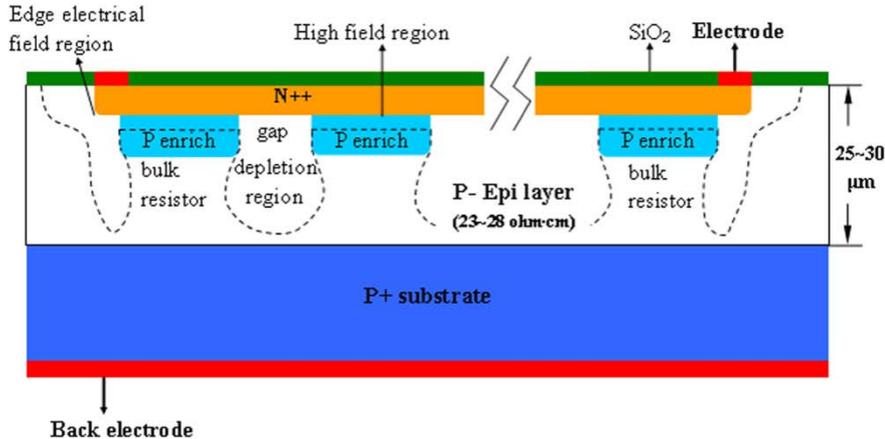
J. Ninkovic, et al., Nucl. Instr. and Meth. A 610 (2009) 142.



МГЛФД с "объёмными" резисторами (made in China)

Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 621 (2010) 116–120

Линейность отклика для света от WLS Y-11



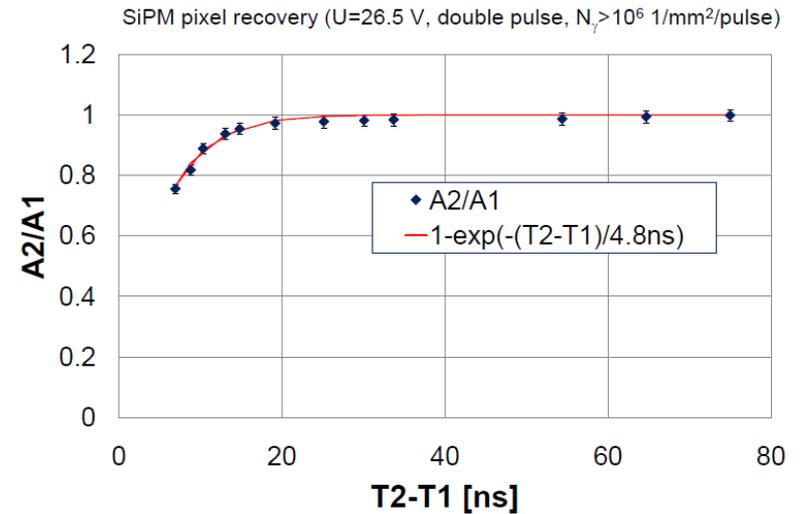
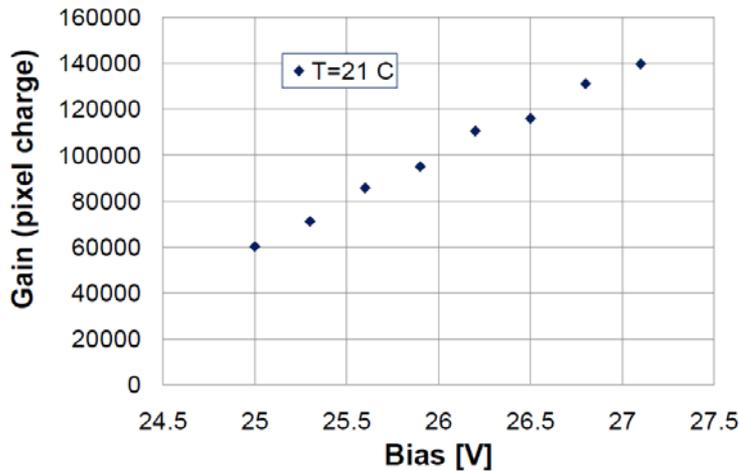
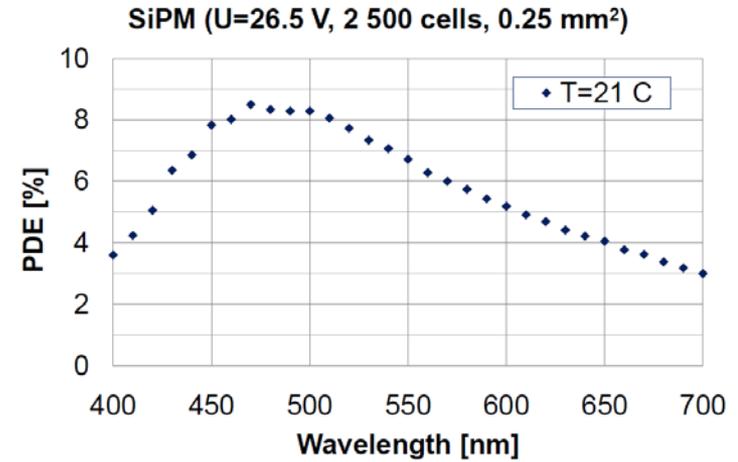
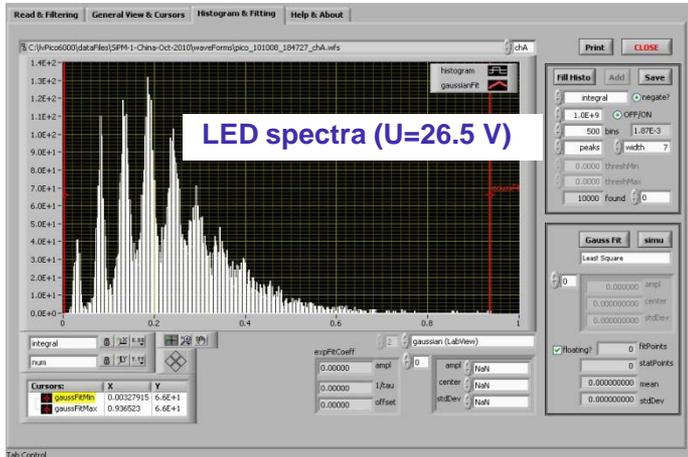
Novel Device Laboratory (Пекин, Китай) разработали и изготовили МГЛФД с "объёмными" резисторами:

- чувствительная площадь - 0.25 мм²
- число ячеек - 2 500
- рабочее напряжение - 26.5 В
- величина гасящего сопротивления - 200-300 кОм

В отличие от МГЛФД (МРП), китайский ЛФД изготовлен на кремнии р-типа.



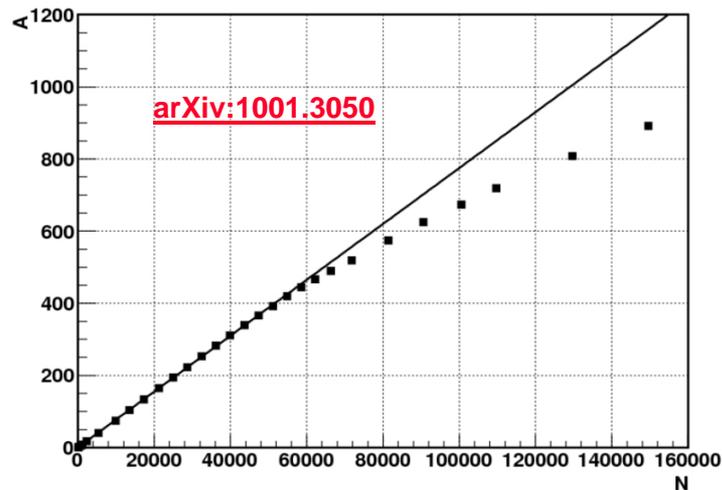
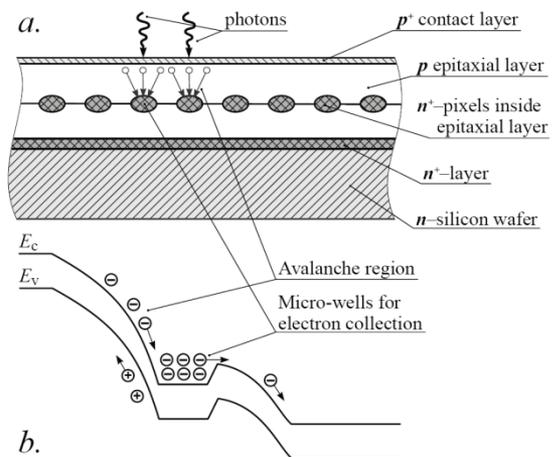
Параметры китайских МГЛФД





МГЛФД с большим динамическим диапазоном (число ячеек $\sim 15\ 000\ \text{мм}^{-2}$)

МК ЛФД разработан З. Садыговым (ОИЯИ(Дубна)/Zecotek)



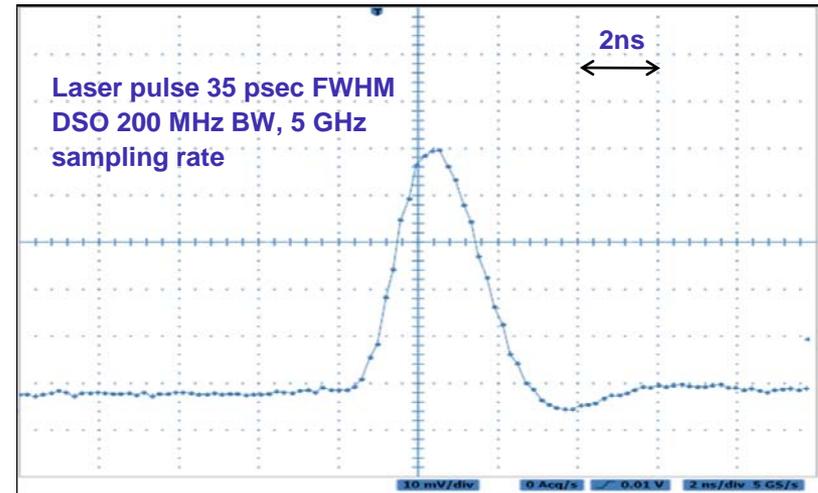
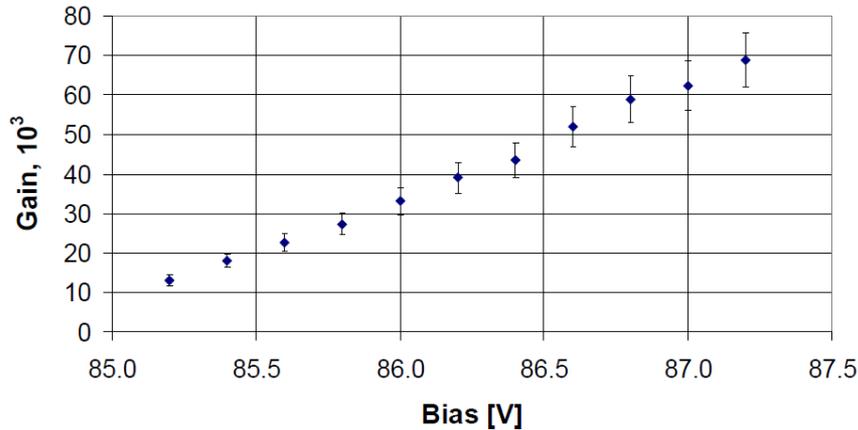
Структура с потенциальными ямами, находящимися на глубине 2-3 мкм. Область усиления находится перед потенциальной ямой. Резистора, как такового, нет. "Гашение" разряда происходит за счёт накопления заряда в потенциальной яме и уменьшения электрического поля в ОПЗ. Образовавшийся заряд уходит в подложку через прямо смещённый p-n переход.

Зависимость амплитуды фотоотклика A (в относительных единицах) МК ЛФД от числа падающих фотонов N для МК ЛФД площадью $3 \times 3\ \text{мм}^2$ содержит 135 000 ячеек

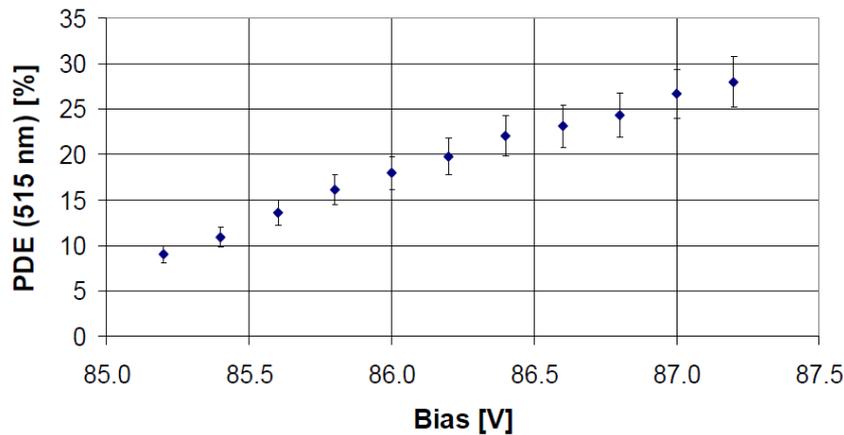


Параметры МЛФД фирмы Zecotek (15 000 ячеек, 1 mm²)

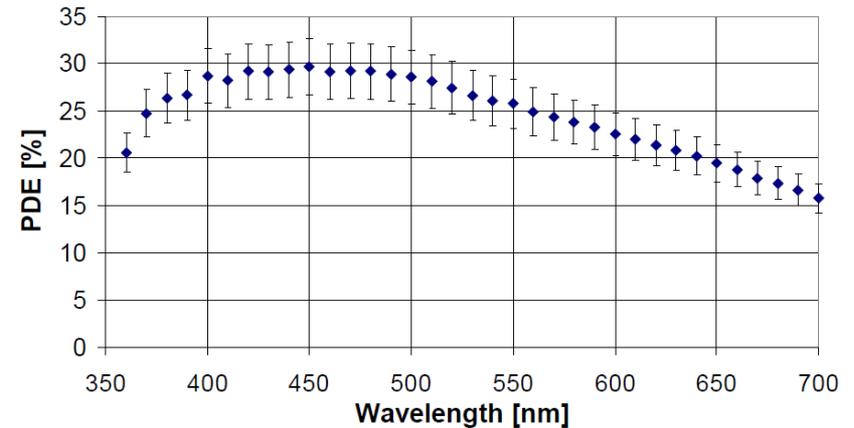
MAPD#15, T=21 C



MAPD#15, T=21 C



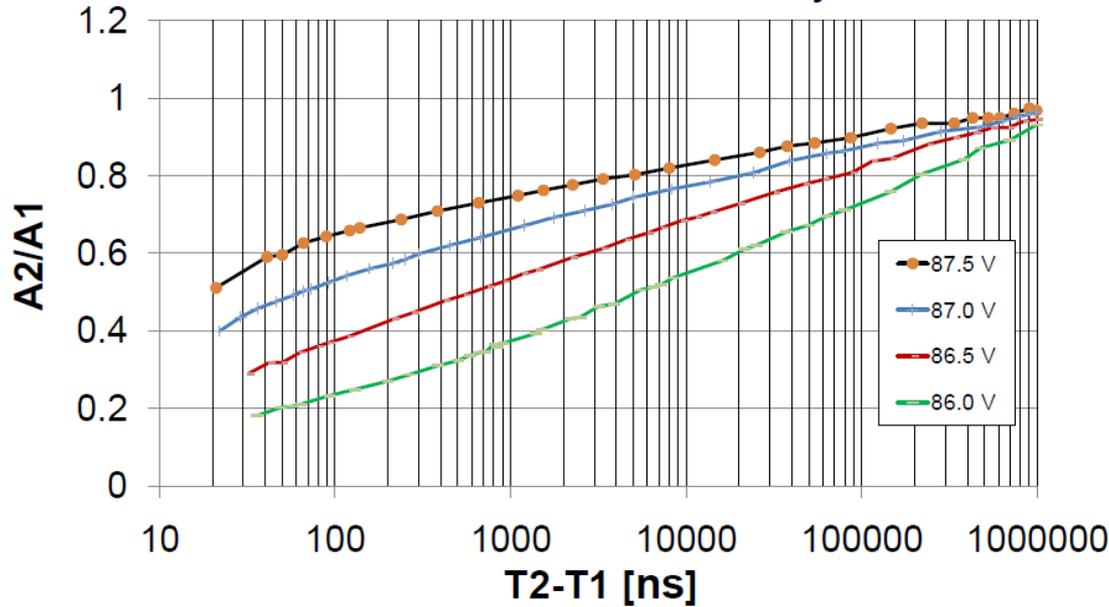
MAPD#15, U=87.2 V, T=21 C



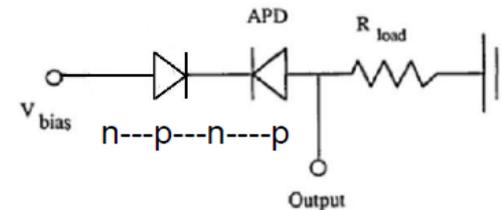
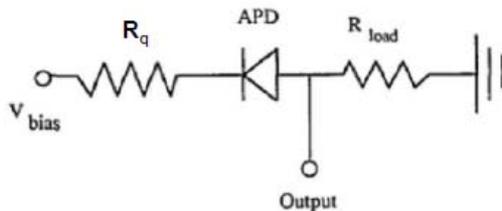
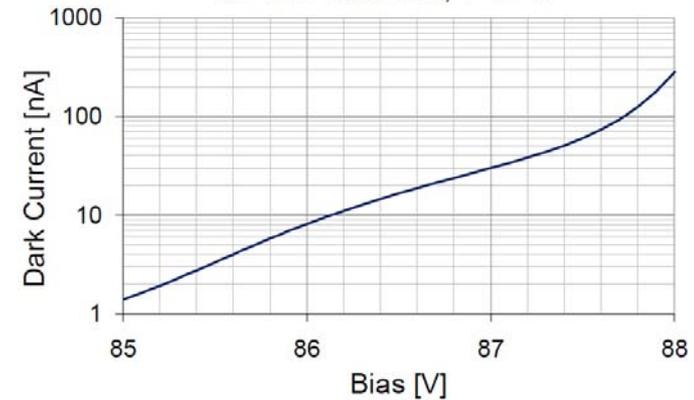


Восстановление амплитуды сигнала одной ячейки МЛФД Zecotek

1 mm² MAPD-N cell recovery



1x1 mm² MAPD-N, T=21 C

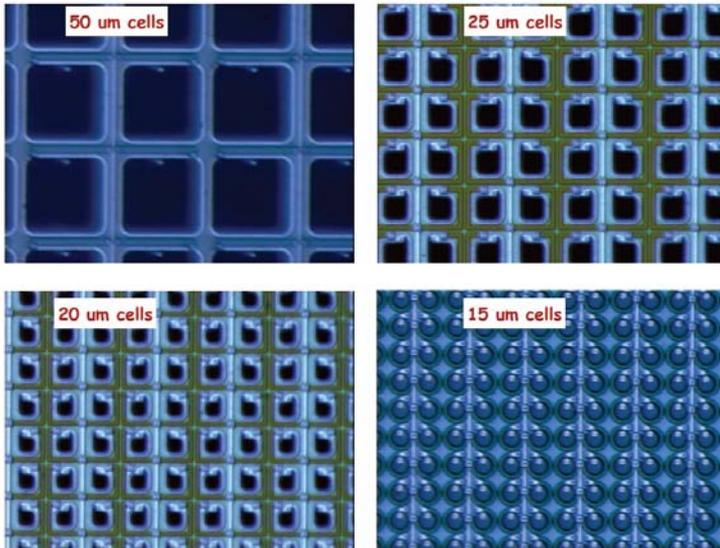


Измерения проводились с использованием импульсов света от двух быстрых светодиодов. Первый импульс имел амплитуду, "блокирующую" ячейку МЛФД. Амплитуда второго (задержанного) импульса нормирована на его же амплитуду, измеренную при задержке 10 мсек.



MPPC (Hamamatsu) с увеличенным динамическим диапазоном

Hamamatsu изготовила МГЛФД (MPPC) с увеличенным динамическим диапазоном (до ~4400 ячеек/мм²).



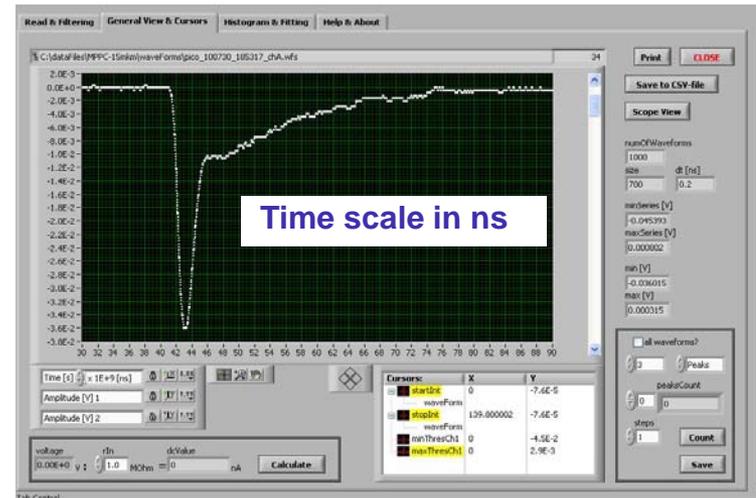
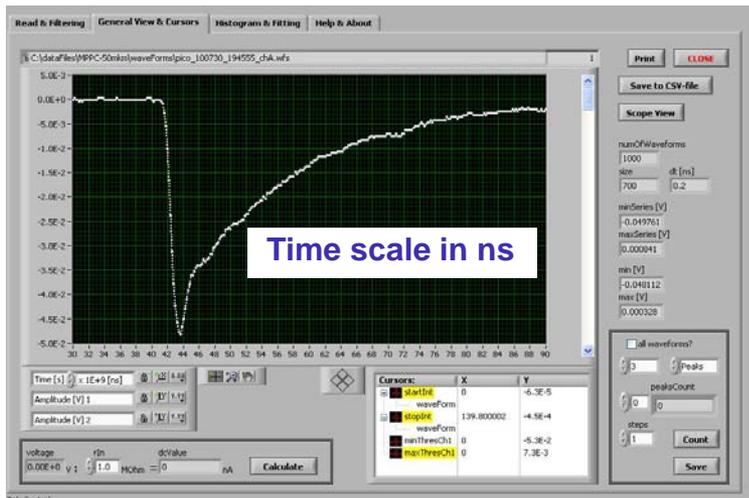
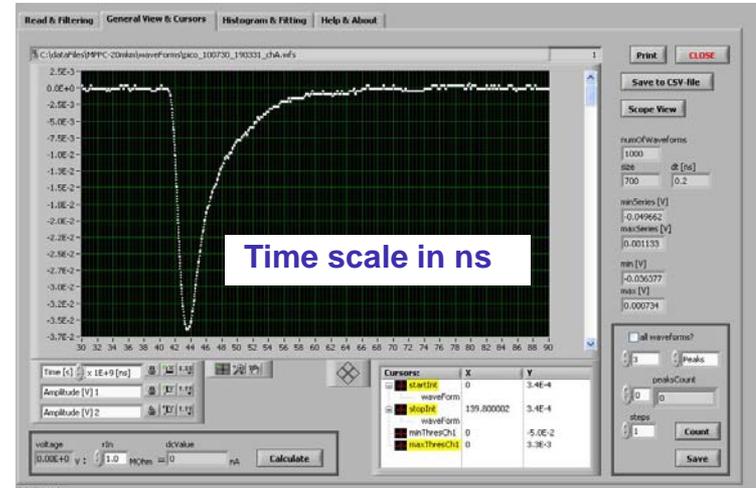
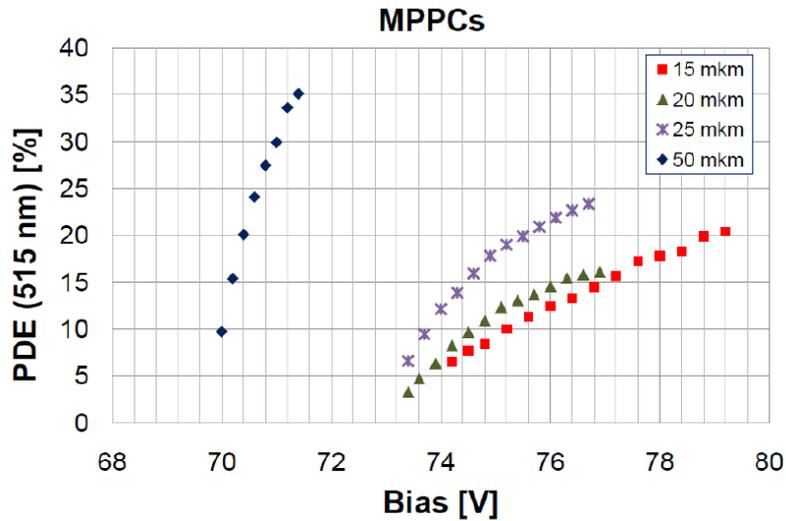
Основные параметры MPPC (Hamamatsu)

MPPC type	# cells 1/mm ²	C, pF	R _{cell} , kOhm	C _{cell} , fF	$\tau=R_c \times C_c$, ns	V _B , V T=23 C	V _{op} , V T=23 C	Gain(at V _{op}), X10 ⁵
15 μm pitch	4444	30	1690	6.75	11.4	72.75	76.4	2.0
20 μm pitch	2500	31	305	12.4	3.8	73.05	75.0	2.0
25 μm pitch	1600	32	301	20	6.0	72.95	74.75	2.75
50 μm pitch	400	36	141	90	12.7	69.6	70.75	7.5

Фотография ячеек MPPC, сделанная при помощи оптического микроскопа



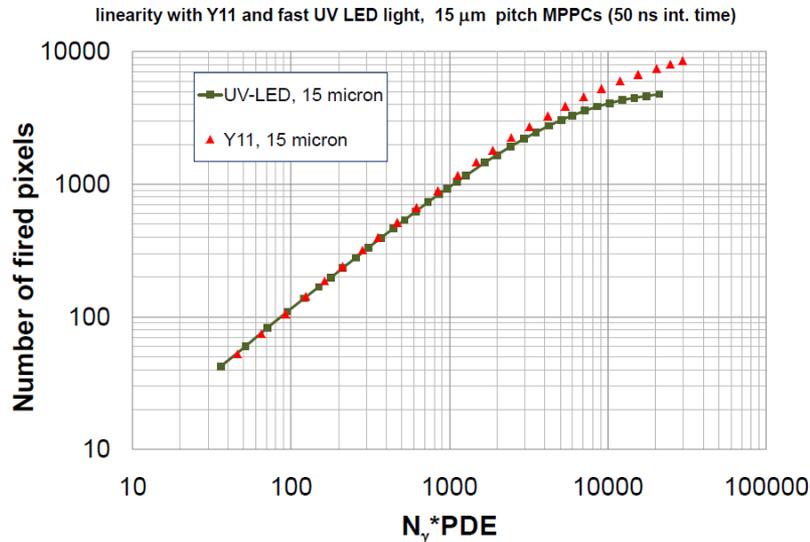
PDE и временной отклик



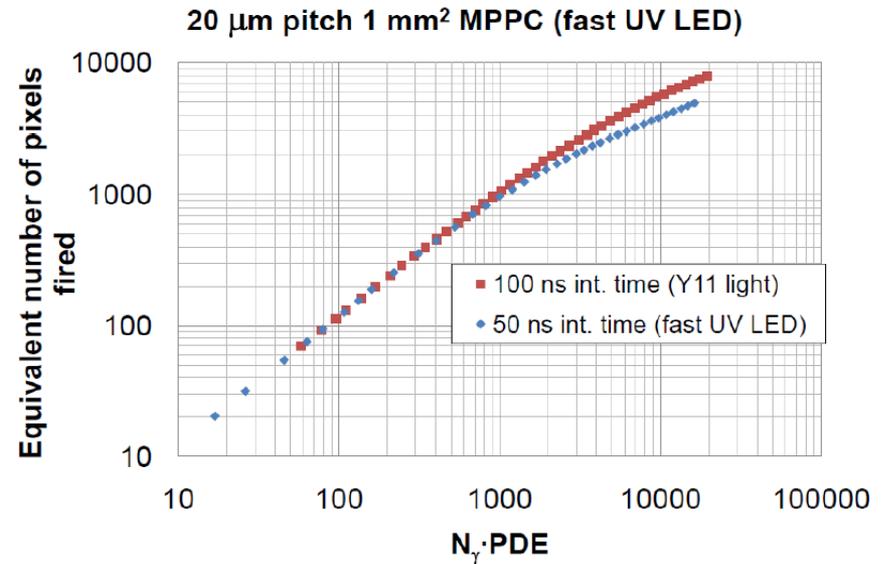


Линейность отклика для света от WLS Y-11 и быстрого ультрафиолетового светодиода

МГЛФД, 4444 ячеек



МГЛФД, 2500 ячеек

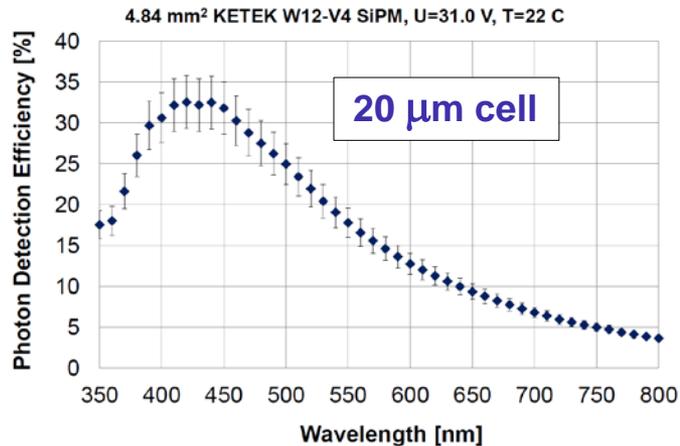


Диапазон линейности новых МРРС для света от Y-11 увеличился в несколько раз, по сравнению с теоретическим значением, определяемым количеством ячеек МГЛФД. Причина - время восстановления ячейки сравнимо (или даже короче) времени высвечивания WLS Y-11 (~10 нсек)



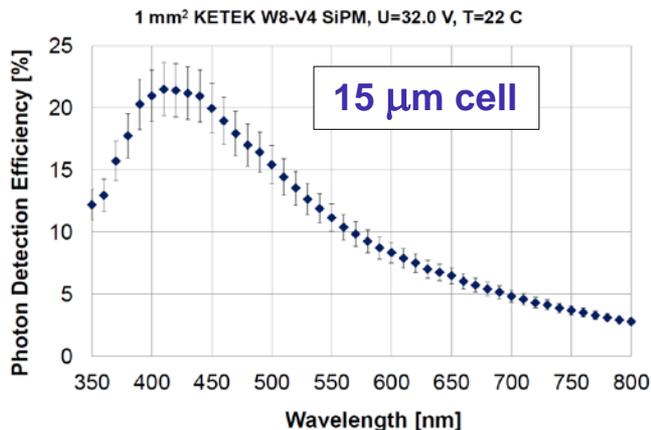
SiPM (КЕТЕК) с увеличенным динамическим диапазоном

КЕТЕК изготовила МГЛФД (SiPM) с увеличенным динамическим диапазоном (2500 и 4489 ячеек/мм²).



Основные параметры (S=4.84 mm²):

- Шаг между ячейками - 20 μm
- Коэффициент усиления – 1.1×10^6
- Квантовая эффективность (515 нм) - 22 %
- Ёмкость - 360 пФ
- Темновой счёт (T=22 C) – 1.4 МГц
- Шум-фактор - 1.2
- Время восстановления ячейки - 29 нс



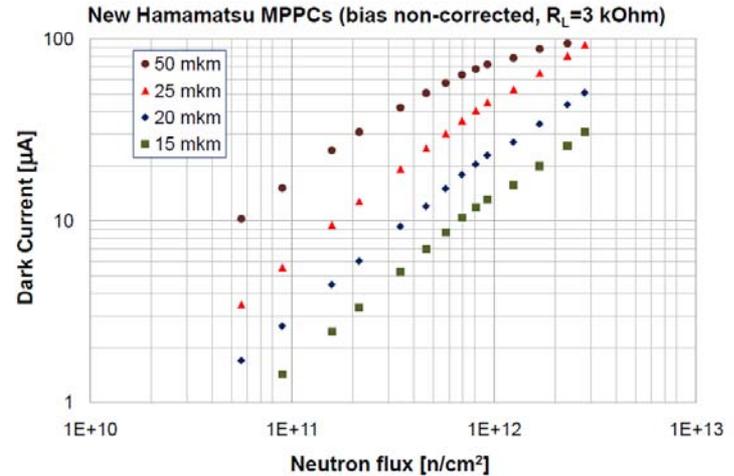
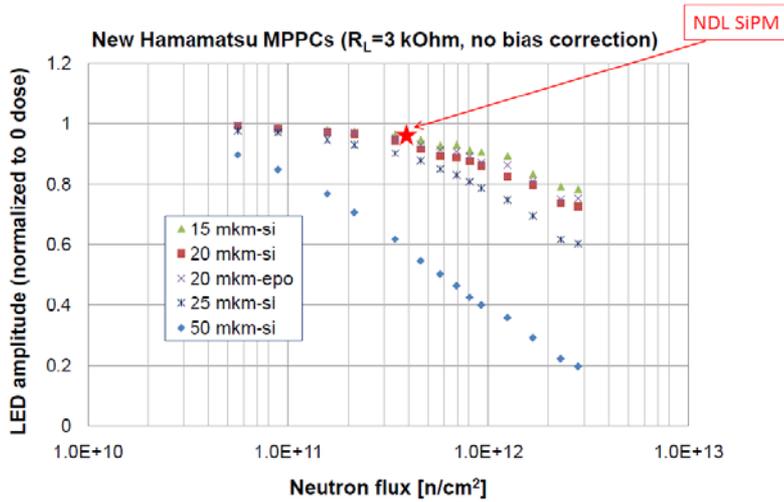
Основные параметры (S=1 mm²):

- Шаг между ячейками - 15 μm
- Коэффициент усиления – 0.7×10^6
- Квантовая эффективность (515 нм) - 14 %
- Ёмкость - 75 пФ
- Темновой счёт (T=22 C) – 100 кГц
- Шум-фактор - 1.15
- Время восстановления ячейки - 8 нс

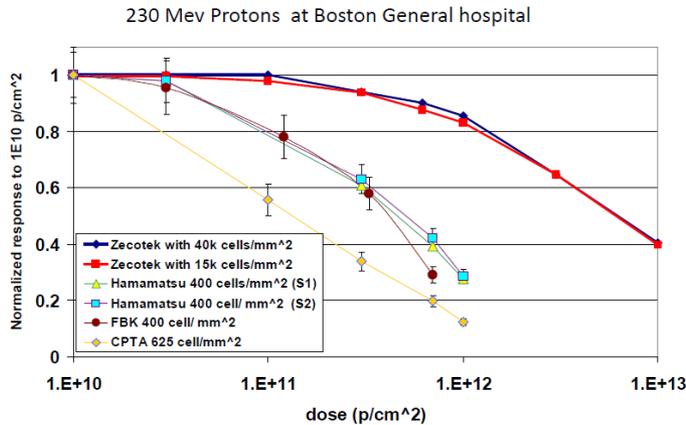


Исследования радиационной стойкости МГЛФД

Нейтроны, $E \sim 1$ MeV



36



(A. Heering, IEEE 2008)

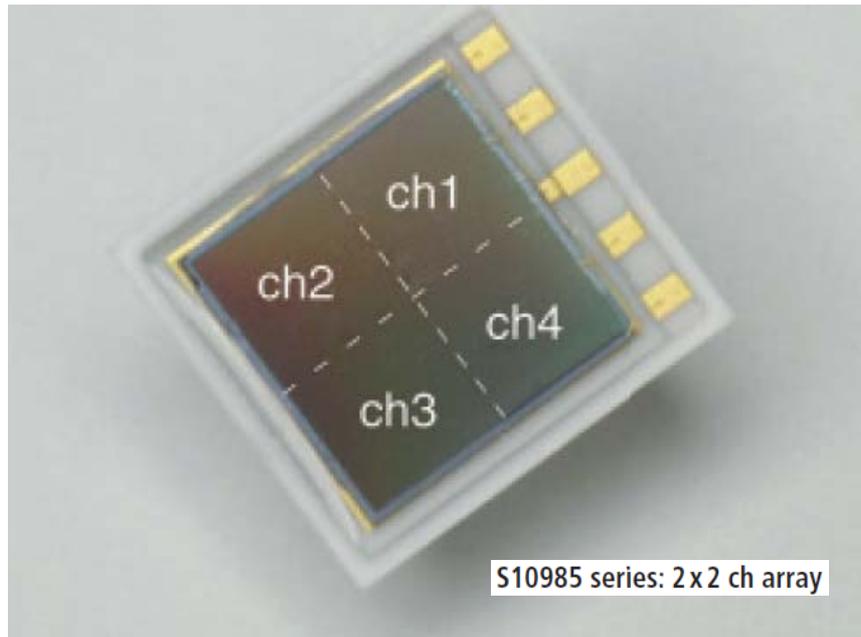
Два года назад только MAPD (Zecotek) могли работать при потоках нейтронов $>3 \cdot 10^{12}$ см⁻². Сейчас MAPDs (Zecotek), MPPCs (15 и 20 μ m) (Hamamatsu) и SiPM (NDL, China) способны работать в потоках нейтронов вплоть до $3 \cdot 10^{12}$ см⁻² (падение амплитуды сигнала менее 30%). Однако, темновые токи и шумы ГМЛФД сильно возрастают после облучения.



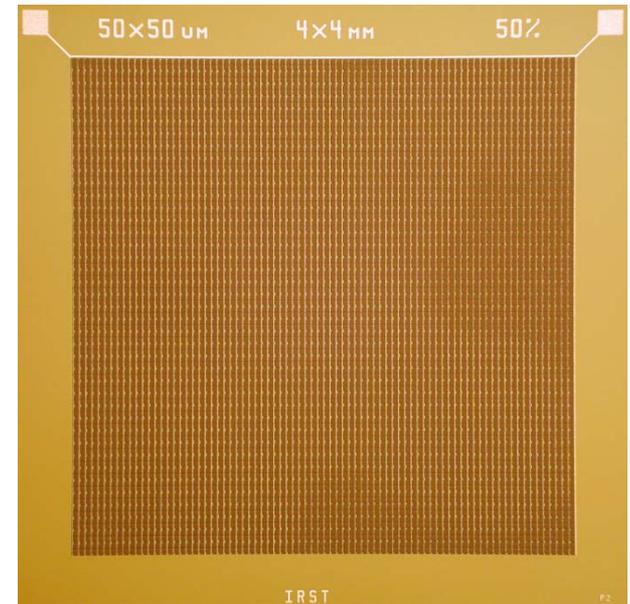
МГЛФД большой площади

МГЛФД большой площади ($3 \times 3 \text{ мм}^2$ и больше) производятся уже многими производителями :Hamamatsu, CPTA/Photonique, Pulsar, Zecotek, SensL, FBK-irst ...

Hamamatsu MPPC, матрица $4 \times 9 \text{ мм}^2$ (или 1 MPPC $6 \times 6 \text{ мм}^2$, 14 400 ячеек)



FBK SiPM, $4 \times 4 \text{ мм}^2$ (6400 ячеек)

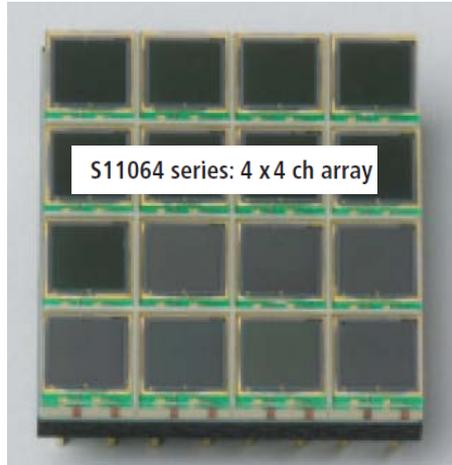


(C. Piemonte: June 13th, 2007, Perugia)

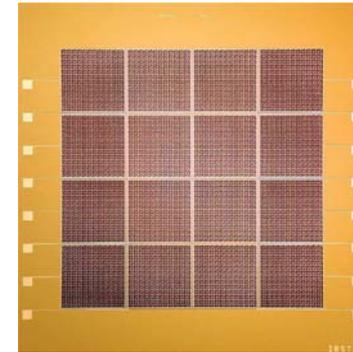


МГЛФД матрицы

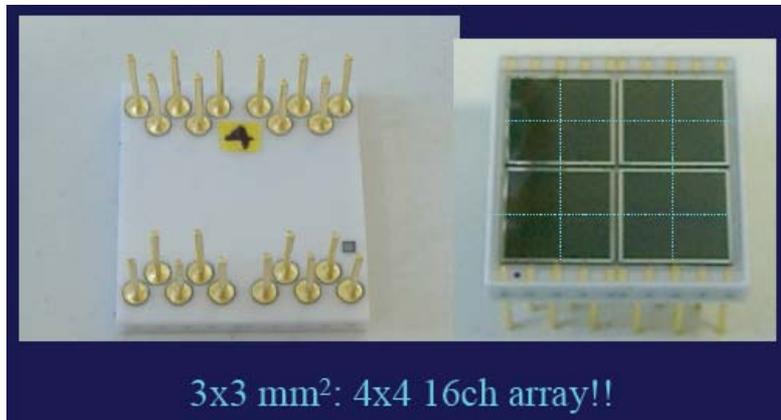
МРРС матрица для ПЭТ (16x9 мм²)



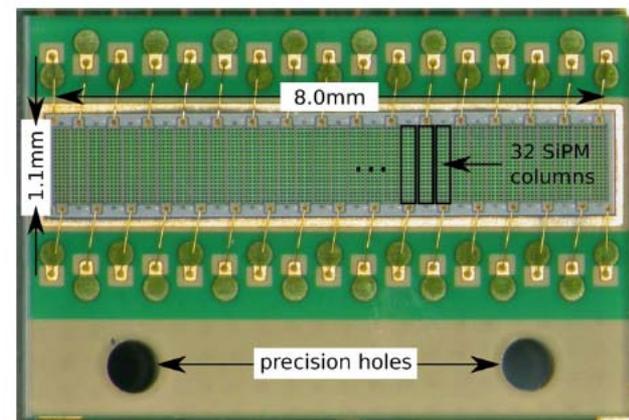
FBK SiPM матрица для ПЭТ (16x1 мм²)



МРРС матрица для эксперимента MAGIC



МРРС матрица для трекера на основе тонких (250 μm Ø) сцинт. волокон (NIM A 622 (2010) 542)



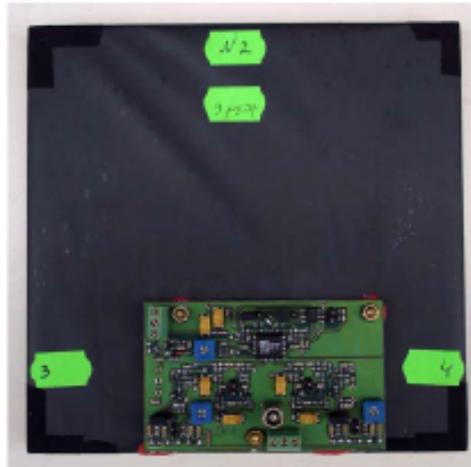


Примеры применений МГЛФД в физике элементарных частиц и астрофизике

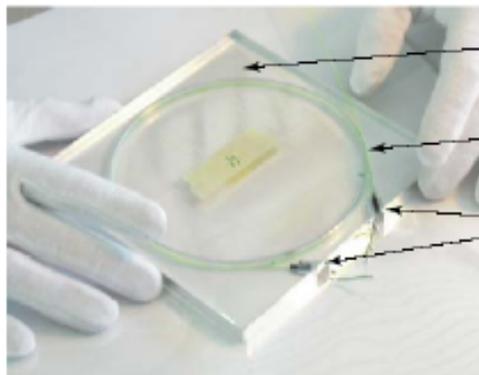
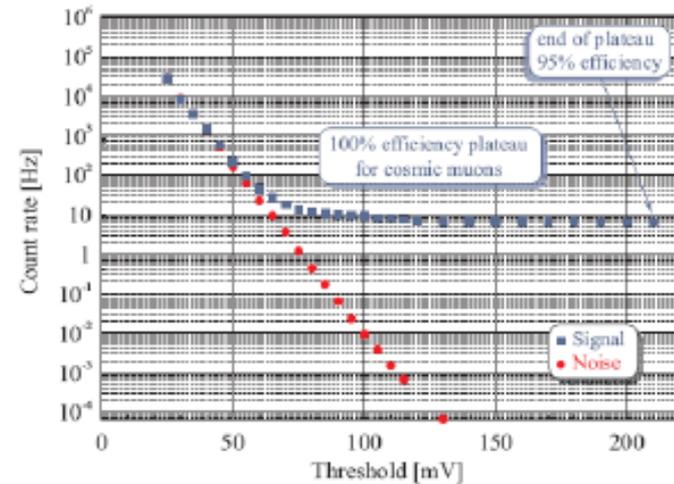


Тестовый стенд время-пролётной системы эксперимента ALICE

160 scintillation counters with 320 MRS APDs



Signal and dark noise rate vs. electronics threshold



scintillating plate

WLS fiber ring

MRS APDs

(A. Akindinov et. al, NDIP-08, Aix-les-Bains)



Микропиксельные ЛФД для подземного эксперимента EMMA (Experiment with Multi-Muon Array)

- изучение энергетического спектра и химического состава первичных космических лучей в области "колена" $E=3 \times 10^{15}$ eV
- измерение множественности космических мюонов и их поперечного распределения ...



Pihasalmi mine, central Finland
85 m depth, ~240 m.w.e.

EMMA counter

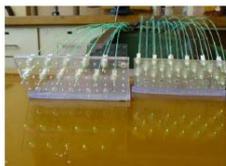
Groove for WLS fiber



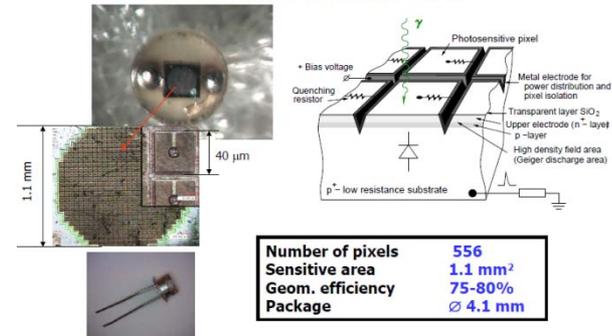
Technique developed for T2K detectors at INR

122×122×30 mm³ scintillator
chemical reflector
~90 cm Y11 WLS fiber with Al mylar at far end
photosensor: MRS APD

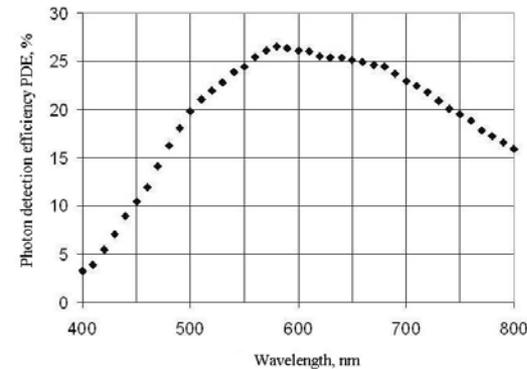
Fiber with optical connector



Structure of MRS APD



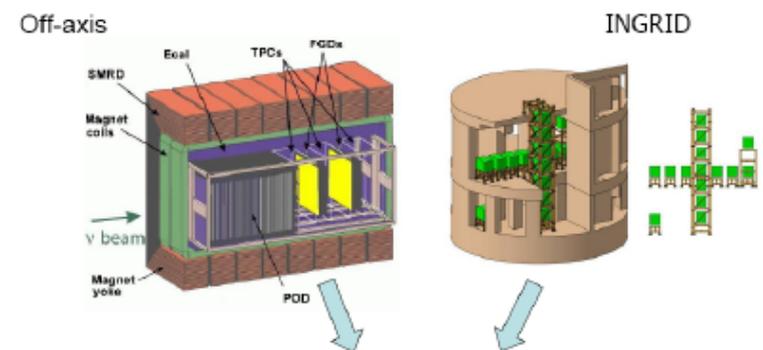
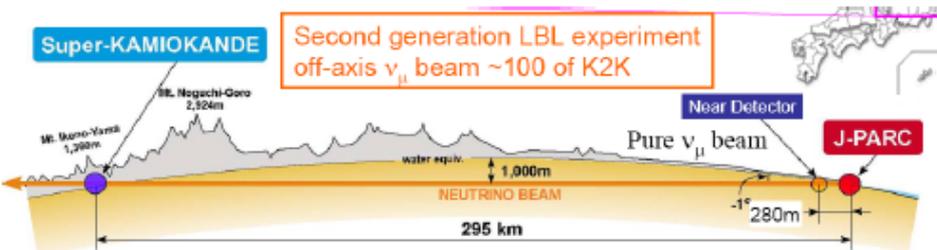
About 2200 MRS APD's were manufactured by CPTA for EMMA



(Yu. Kudenko, PD-09, Japan, 25 June 2009)



Исследование осцилляций нейтрино - эксперимент T2K



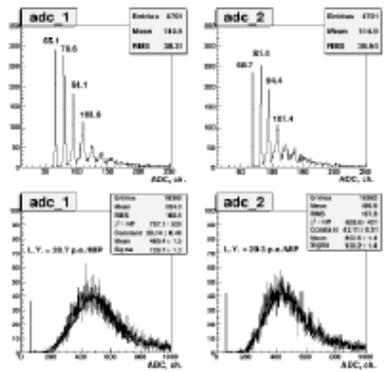
SMRD detectors

Extruded plastics ~7x170x870 mm³
Y11 fibers embedded in S-grooves



MIP detection efficiency > 99.9%
 σ_t (MIP) ~ 0.7 ns
Spatial resolution ~ 7 cm

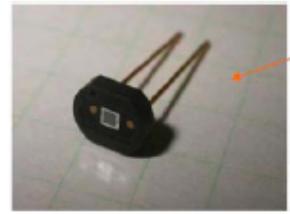
Light yield



L.y. (sum of 2 ends) = 58 p.e./MIP

Scintillator detectors with WLS fibers
- Individual fiber readout
FGD, POD, Ecal, SMRD, INGRID: ~ 60000 readout channels
- Limited space for photosensors
- Magnetic field

Hamamatsu MPPC: active area 1.3x1.3 mm²



Number of pixels	667
Pixel size	50x50 μm
Gain	~0.7x10 ⁶
PDE at 525 nm	25-30%
Dark rate, th = 0.5 p.e., 22C	≤1000 kHz
Pulse width	<100 ns
Cross-talk	10-15%
After pulses	10-15%

(Yu. Kudenko, G-APD workshop, GSI, Feb. 2009)



Адронный калориметр с MAPD для эксперимента NA61/SHINE

Structure of the PSD:

44 individual modules with segmentation into 10 longitudinal sections.

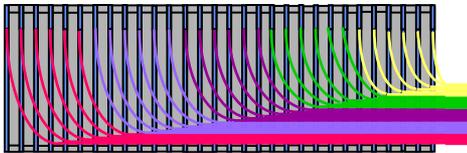
16 central modules – $10 \times 10 \times 125 \text{ cm}^3$

28 outer modules – $20 \times 20 \times 125 \text{ cm}^3$

Total weight – 17 tons

Structure of the module:

60 lead/scintillator sandwiches with WLS-fibers glued in round grooves inside the scintillator.



WLS-fibers of 6 consecutive scintillator plates of each longitudinal section are bundled and readout by $3 \times 3 \text{ mm}^2$ MAPD-3A. 10 longitudinal sections in one module are readout by 10 individual MAPDs.

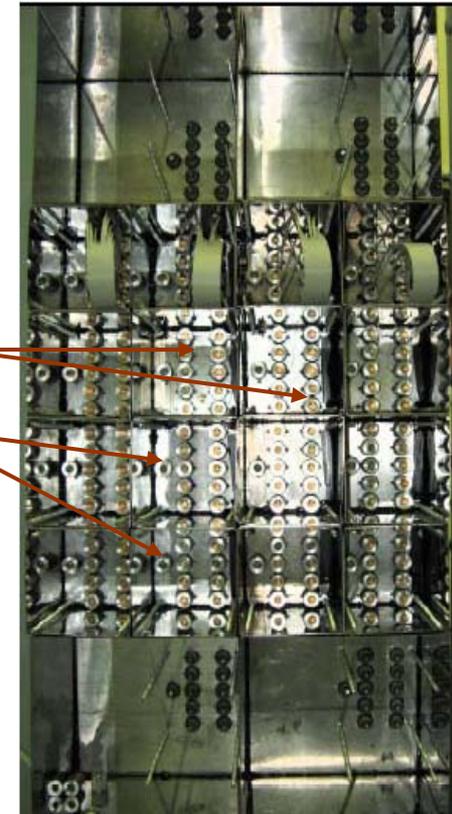
The advantages of micropixel avalanche photodiodes (type MAPD-3A) produced by Zecotek Photonics Inc. satisfy the above requirements. They have a pixel density of $10^4/\text{mm}^2$ due to the specific micro-well structure.



Front view of hadron calorimeter.



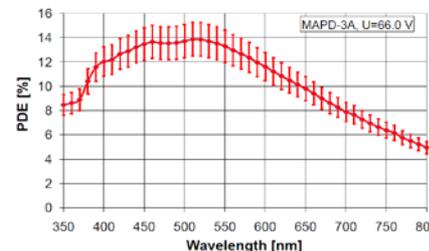
Photo of rear side of hadron calorimeter during the MAPD installation



10 MAPDs in each module

Light emitting diode for the monitoring system

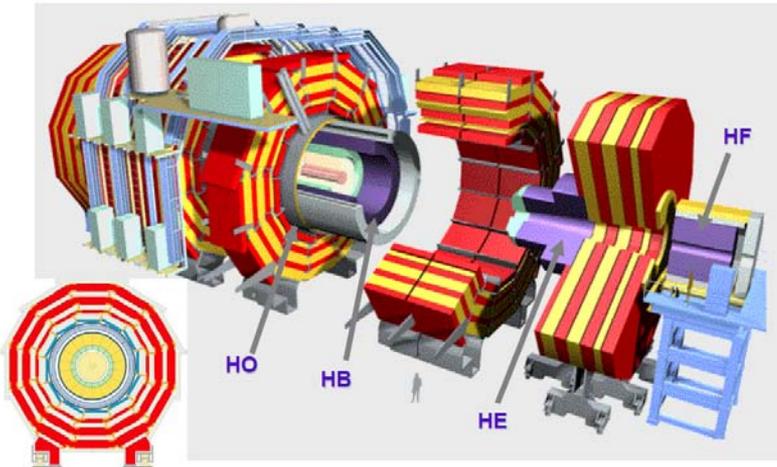
Spectral response of MAPD-3A: dependence of PDE on the wavelength of the light.



(A. Ivashkin, NDIP-2011)



Адронный калориметр эксперимента Компактный Мюонный Соленоид (CMS) на БАК (ЦЕРН)

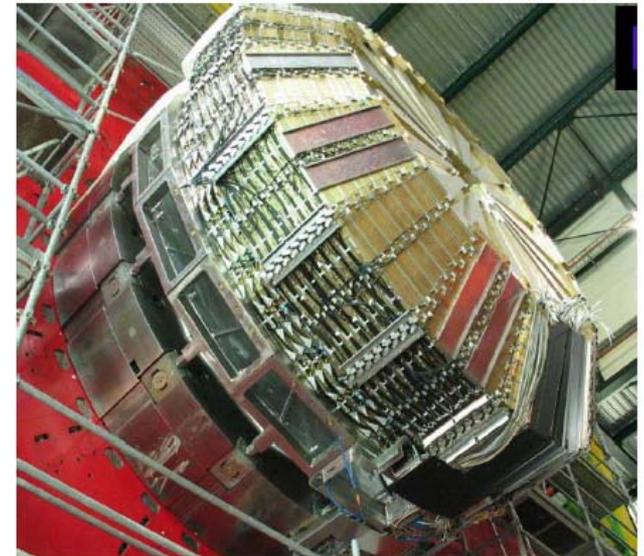
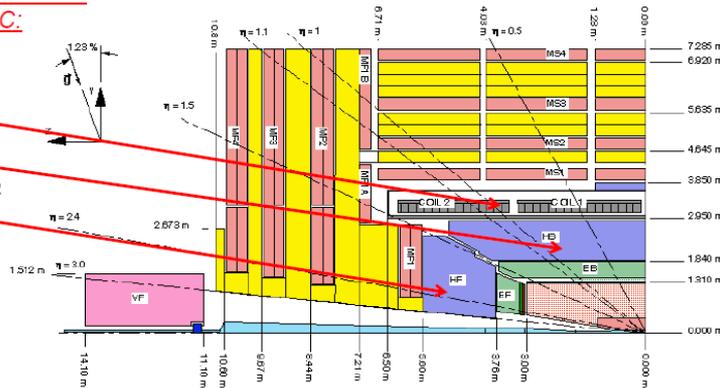


Потоки нейтронов
(в области фотоприёмников
HCAL) за 10 лет SLHC:

HO: 10^{11} cm^{-2}

HB: 10^{12} cm^{-2}

HE: $3 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$



Адронный калориметр CMS - неоднородный (сэмплинг) калориметр, состоящий из сцинтилляционных счётчиков со съёмом света при помощи спектросмещающих волокон и пластин поглотителя (латунь и нержавеющая сталь). Калориметр состоит из 3-х частей: HB, HO и HE.



Апгрейд адронного калориметра эксперимента CMS

В 2008, начале 2009 года в ЦЕРНе и в Fermilab прошли несколько совещаний посвящённых модернизации (апгрейду) установки CMS для работы в условиях высокой светимости ускорителя SLHC ($\sim 3 \times 10^{34}$ см⁻²сек⁻¹). Одним из важных результатов этих совещаний стало предложение заменить фотоприёмники адронного калориметра HPD на микропиксельные лавинные фотодиоды.

Большая часть апгрейда будет финансироваться DOE и NSF.

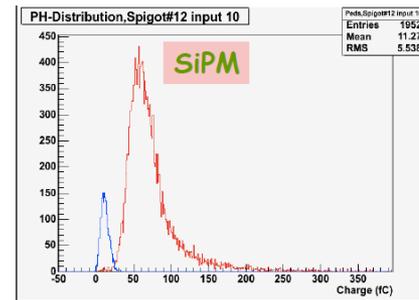
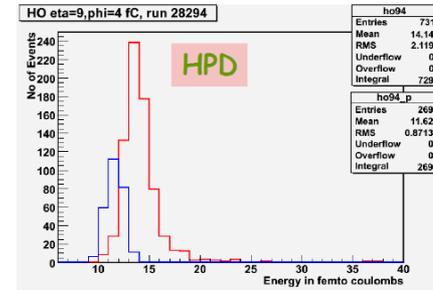
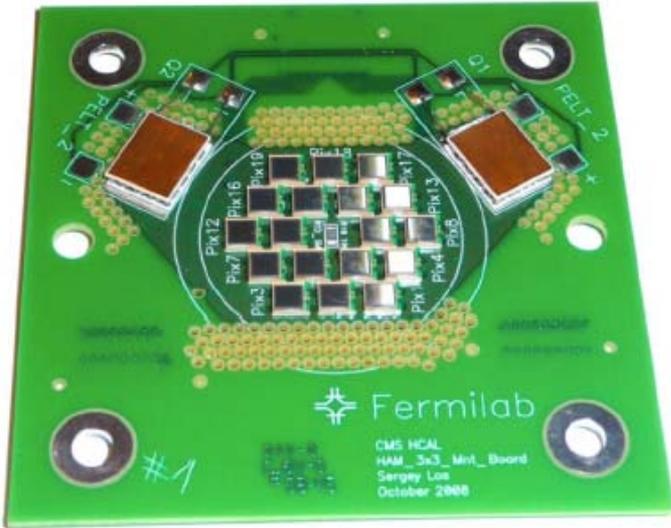
Причины апгрейда:

- при напряжённости магнитного поля $\sim 1-2$ Тл (поле в НО) в HPD возникает электрические разряды, приводящие к увеличению шума HPD и к выходу их из строя;
- радиационные повреждения передних слоёв сцинтиллятора в HE и HB
- необходимость увеличения продольной гранулярности калориметра для улучшения его параметров в условиях высокой светимости SLHC.

Микропиксельные лавинные фотодиоды (MAPD) были выбраны из-за их высокой квантовой эффективности, нечувствительности к магнитному полю, компактности и сравнительно низкой стоимости. В качестве кандидатов рассматриваются MAPD двух производителей: Zecotek и Hamamatsu.



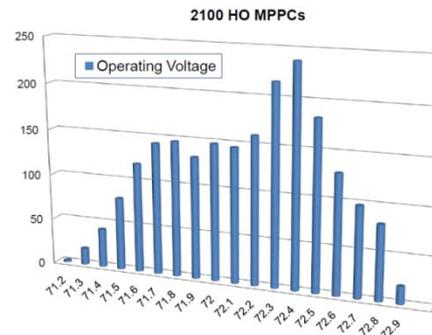
Сигналы от мюонов в НО (фотоприёмники: HPD и микроксельные ЛФД)



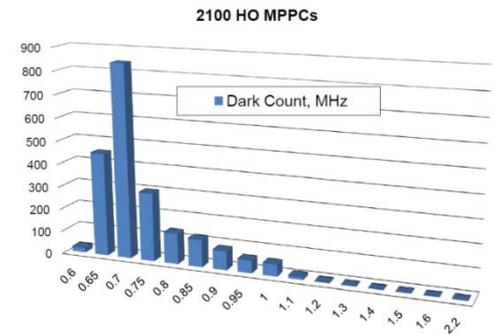
Планы апгрейда CMS НО HCAL :

- выбор 3x3 мм² MAPD для CMS НО HCAL (Hamamatsu MPPCs, 3 600 cells, Апрель 2010);
- производство 2500 - 3000 MAPD (первая половина 2011);
- изготовление RM (Readout Module) для CMS НО HCAL (вторая половина 2011)
- замена RM с HPD на RM с MAPD (2013)

MPPC Operating Voltage (2100 devices)

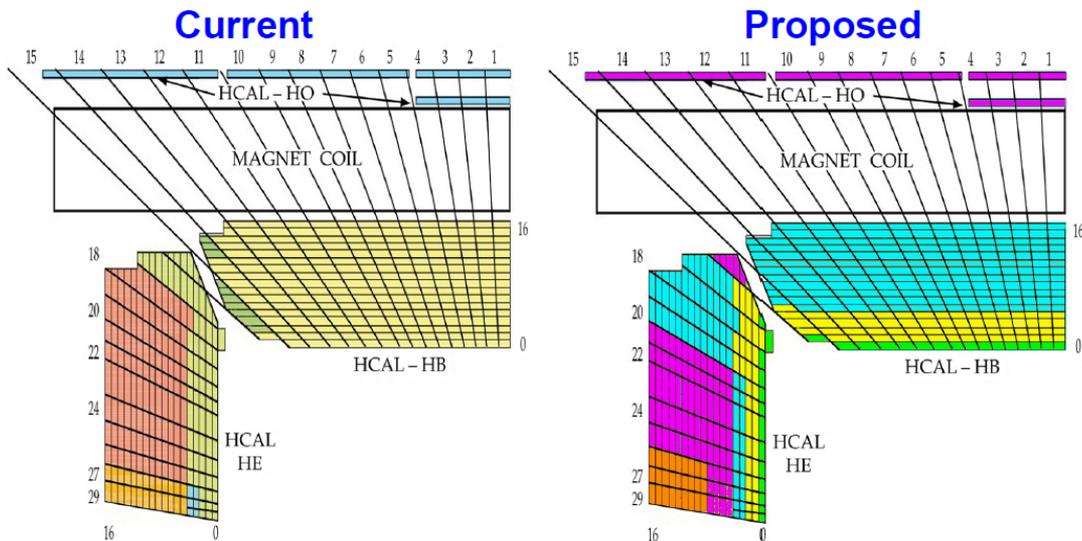


MPPC Dark Count (2100 devices)

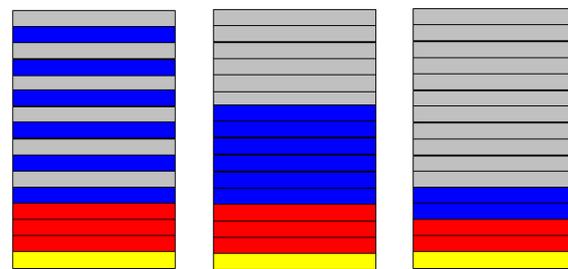




Планы апгрейда CMS HB/HE HCAL



Examples of longitudinal segmentation into 4 channels



- Differential aging of scintillators layers reduces energy resolution
- Front layers occupancy very high due to pileup

→ Longitudinal Segmentation

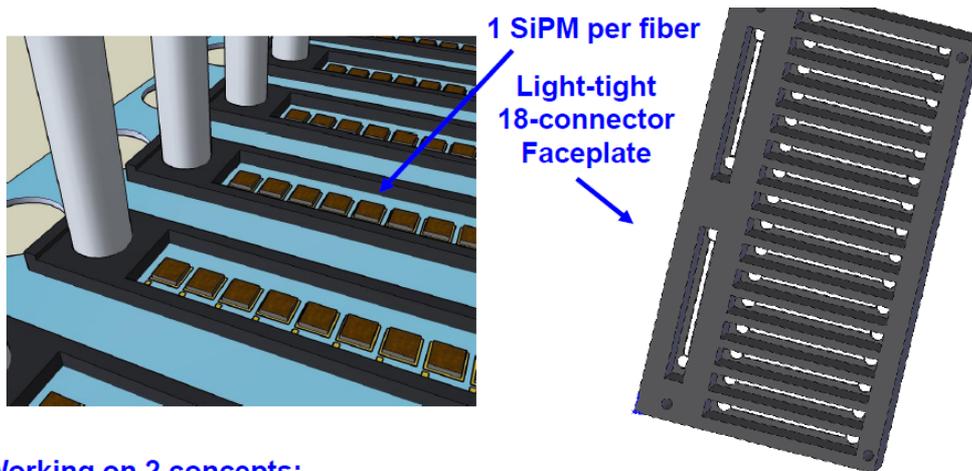
21

Переход к продольной сегментации CMS HCAL необходим для улучшения параметров калориметра, а также для его работы в условиях высоких доз радиации на SLHC



МГЛФД для CMS HCAL SLHC upgrade

В качестве фотоприёмников для CMS HCAL SLHC upgrade предложены МГЛФД с большим динамическим диапазоном: PDE выше, чем у HPD, очень быстрый отклик (важно в условиях высокой светимости на SLHC), более компактны, лучше работают в сильных магнитных полях и, что немаловажно, дешевле.



Working on 2 concepts:

- ODU (Optical Decoder Unit (as we have now))
- EDU (Electrical Decoder Unit (On this page))
 - Do Optical/Electrical Conversion at the Megatile Connector
 - 1 SiPMs (1mm^2) per fiber
 - Perform Analog Addition to form (segmented) towers

Конструкция линейки MAPD, предложенная компанией Zecotek для CMS HCAL ($18 \times 1\text{mm}^2$)



Заключение

Что же нового и наиболее интересного было сделано в области разработки МГЛФД?

Новые МГЛФД:

- MAPD, разработанный и изготовленный З. Садыговым (ОИЯИ, Дубна) совместно с компанией Zecotek (Сингапур): 3×3 мм², 135 000 ячеек, PDE(370-550 нм)=25-30%, способны работать при потоках нейтронов ($E=1$ МэВ) до 3×10^{12} см⁻²
- МГЛФД с "объёмными резисторами" предложенные в MPI (Германия) и изготовленные NDЛ (Китай): 10 000 ячеек на мм², PDE(515нм)~8%, время восстановления ячейки <5 нсек, способны работать при потоках нейтронов ($E=1$ МэВ) до 3×10^{12} см⁻²
- MPPCs/SiPMs с увеличенным динамическим диапазоном, разработанные и изготовленные Hamamatsu (Япония) и KETEK (Германия) : 4489 ячеек/мм², PDE(515нм)~15-20%, время восстановления ~4-8 нс, способны работать при потоках нейтронов ($E=1$ МэВ) до 3×10^{12} см⁻²
- SiPMs чувствительные в области ультрафиолета, изготовленные сотрудниками Пульсара и МИФИ (Россия): PDE(350-450нм)~50-58%, оптическая связь между ячейками ~3%
- МРП ЛФД с высокой чувствительностью в красно-зелёной области спектра и низкой температурной зависимостью, изготовленные фирмой ЦПТА (Москва, Россия): PDE(490-700нм)~30-45%, температурный коэффициент 0.3-0.5 %/С, оптическая связь между ячейками ~1-3%

В настоящее время наиболее широко МГЛФД применяются в физике элементарных частиц и астрофизике: эксперименты T2K, EMMA, CMS, MAGIC. Изготовлены прототипы детекторов для ПЭТ и ПЭТ/МРТ с МГЛФД в качестве фотоприёмников.