



Обзор новых разработок лавинных фотодетекторов

Ю. Мусиенко

*Институт ядерных исследований РАН, Москва
и
Fermilab, Batavia*



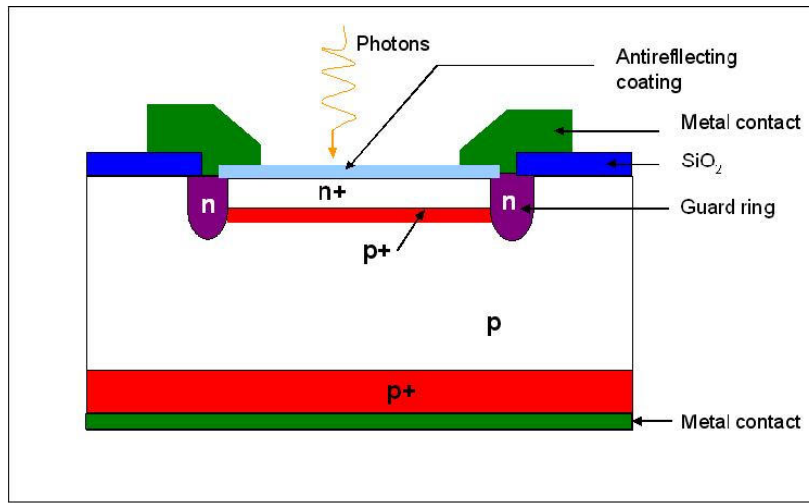
План доклада

- **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**

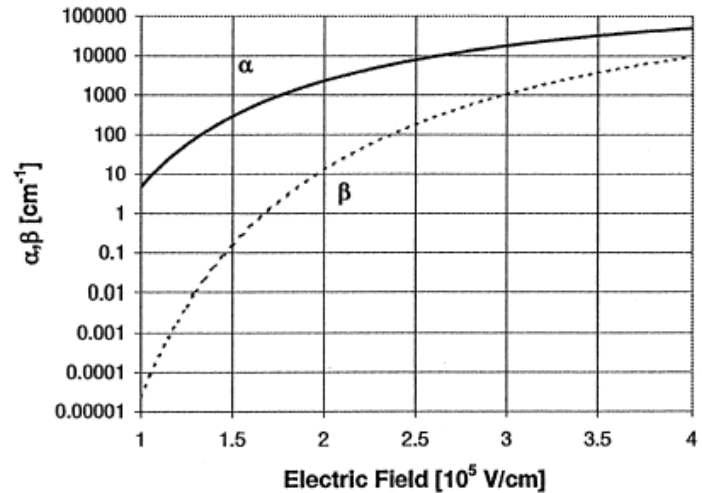
Принцип работы ЛФД (лавинное умножение носителей заряда)

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



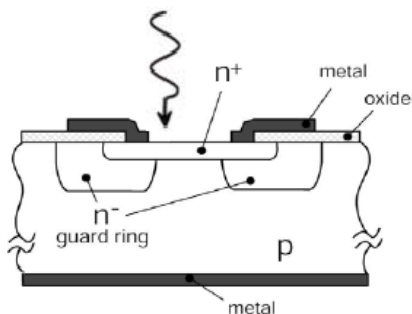
Коэффициенты ионизации электронов и дырок в кремнии



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)

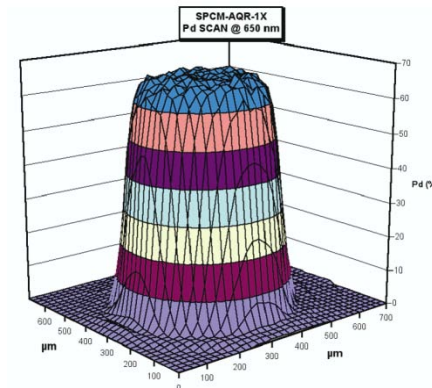
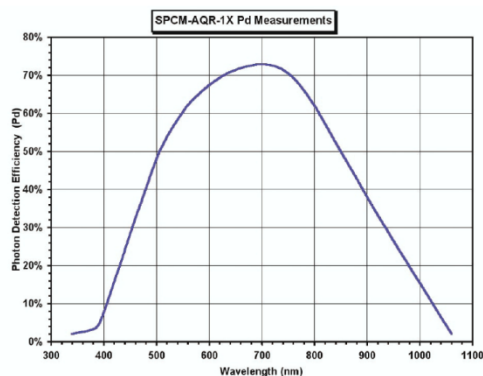
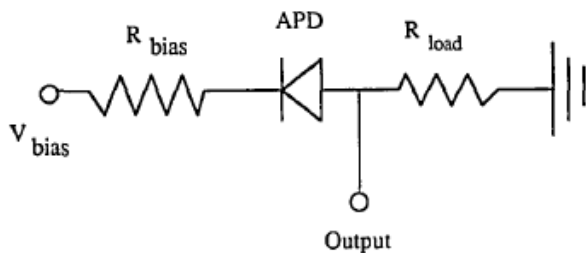


Схема включения, "пассивное гашение".



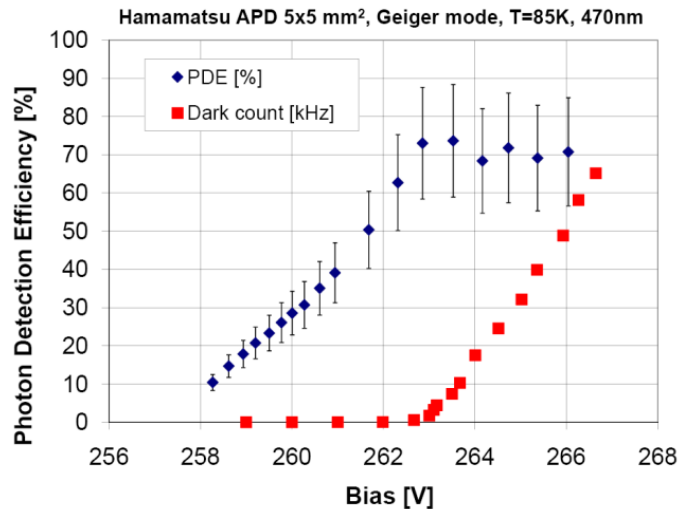
Features

- 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"

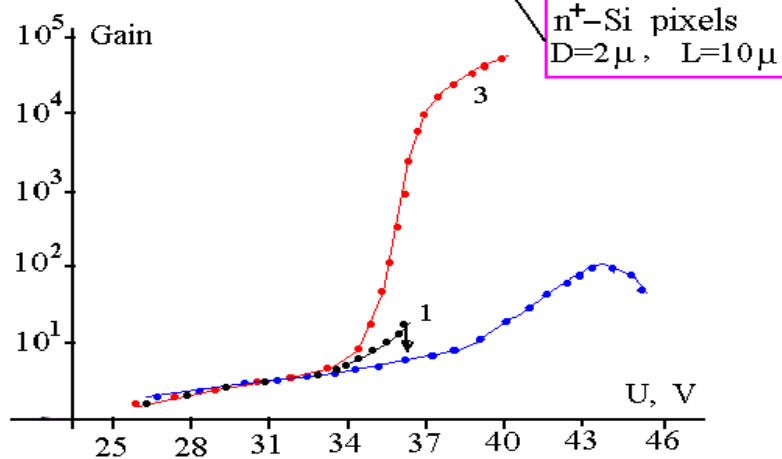
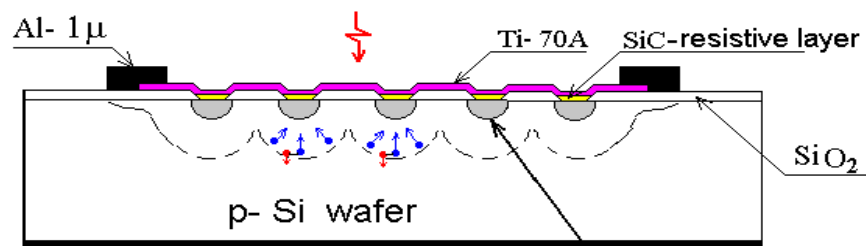


(A. Dorokhov, A. Glauser, Y. Musienko et.al., Journal Mod.Opt. v51 2004 p.1351)

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)

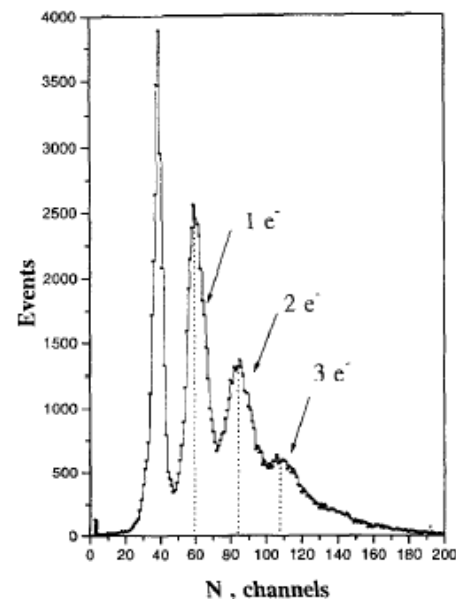
The first micro-pixel APD (MRS APD) proposed by V. Golovin and S. Sadygov (Russian patent #1702881, from 10/11/1989.)



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

Первые МРП ЛФД: на ЛФД площадью 0.5×0.5 мм² была достигнута эффективность регистрации несколько процентов для "красных" фотонов.

Удалось различить сигналы вызванные отдельными фотонами



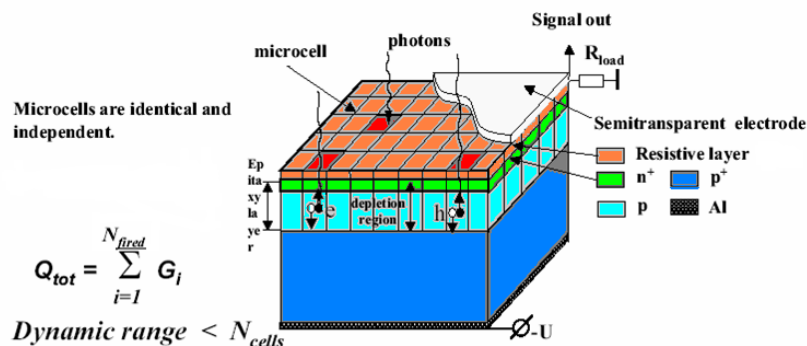
(A. Akindinov et al., NIM387 (1997) 231)



Разработчики и производители

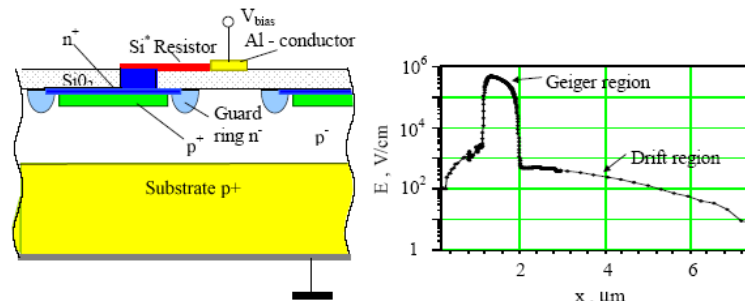
- ЦПТА(Москва) - В. Головин
 - ОИЯИ/ИЯИ (Дубна, Москва)/Zecotek (Singapur) - З. Садыгов
 - Институт электроники (Минск), В. Залесский
 - МИФИ/Пульсар (Москва) - Б. Долгошеин
 - Hamamatsu Photonics (Hamamatsu, Japan)
 - SensL (Cork, Ireland)
 - RMD (Boston)
 - MPI Semiconductor Laboratory (Munich, Germany)
 - 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

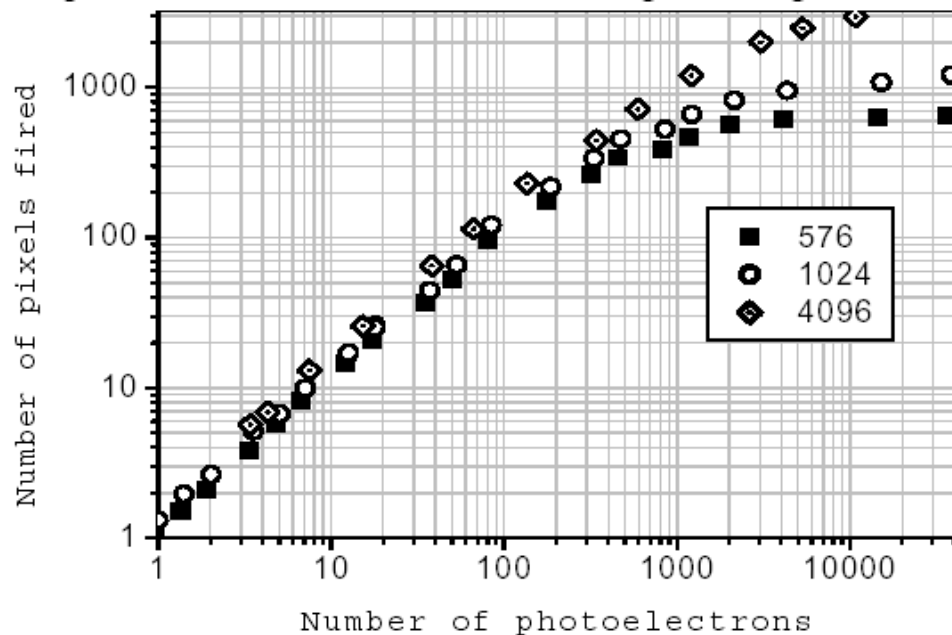


(B. Dolgoshein et al., "An advanced study of silicon photomultiplier", ICFA-2001)

- 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

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

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



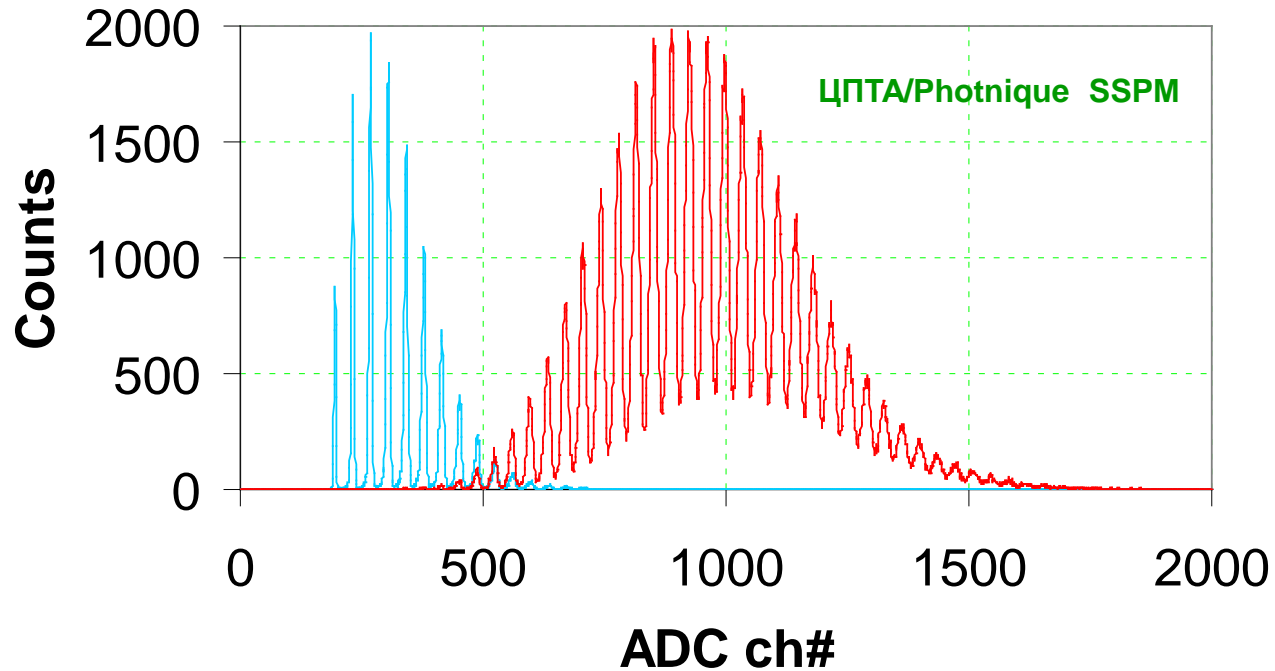
(B. Dolgoshein, TRD05, Bari)

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

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

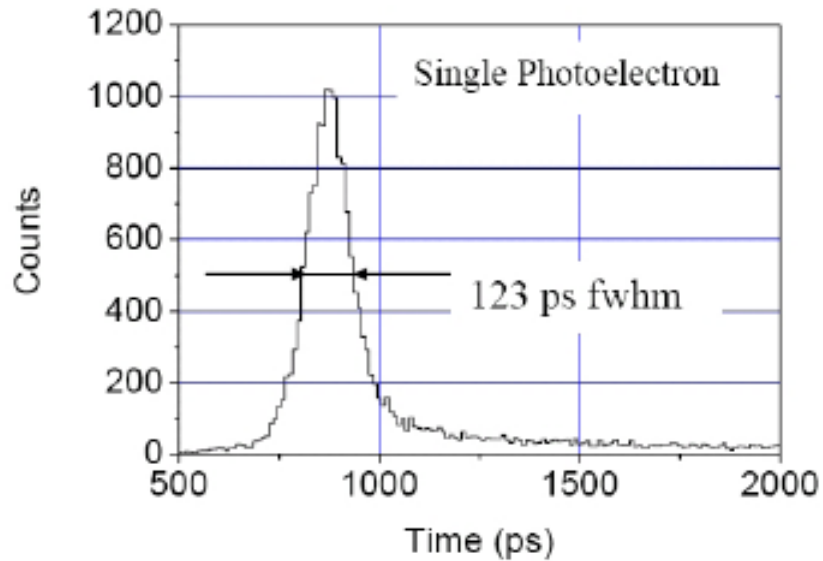
Однородность сигналов от различных пикселей

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

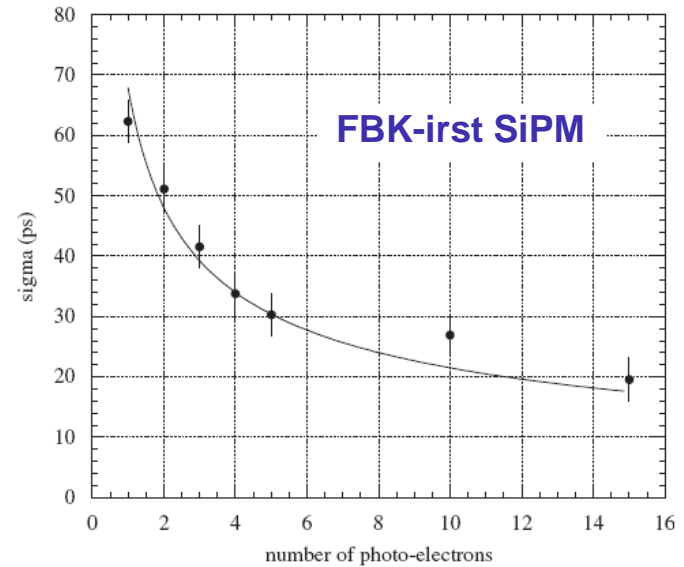


*Два амплитудных спектра (сработало в среднем ~2.5 и 21 ячейка).
Распределения хорошо описываются статистикой Пуассона*

Временное разрешение



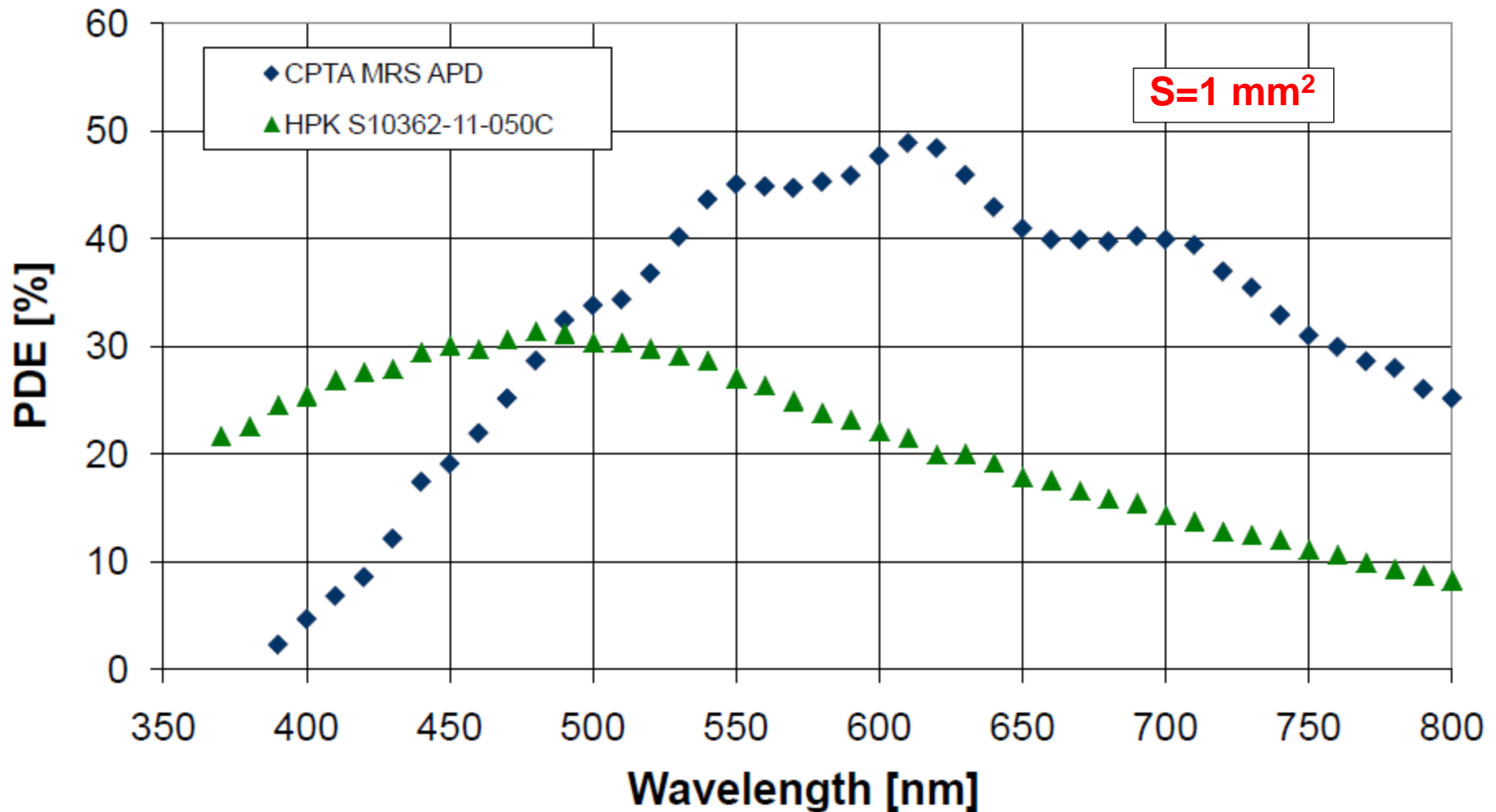
Measured with MEPhI/Pulsar SiPM using single photons (B. Dolgoshein, Beaune-02)



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

Зависимость PDE от длины волны

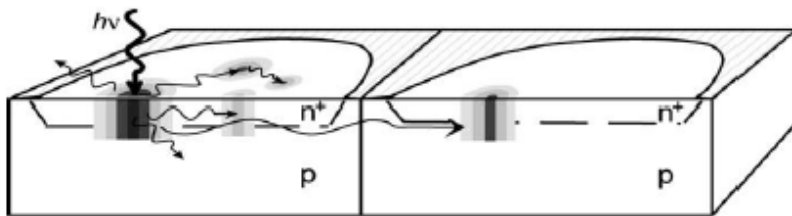
T=22 C



“Hot-carrier luminescence”:

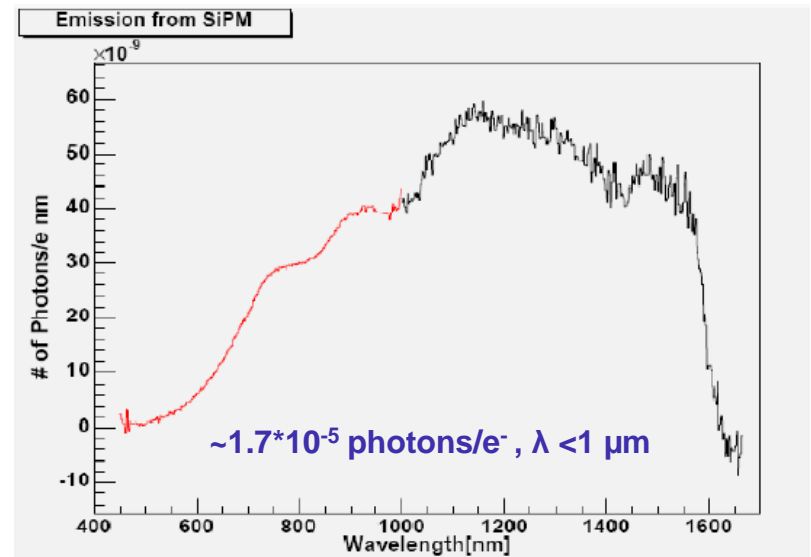
10^5 носителей заряда, прошедших через ячейку, приводят к высвечиванию ~3 фотонов с длиной волны < 1 мкм (A. Lacaite)

Эффект растёт с увеличением “перенапряжения” !!



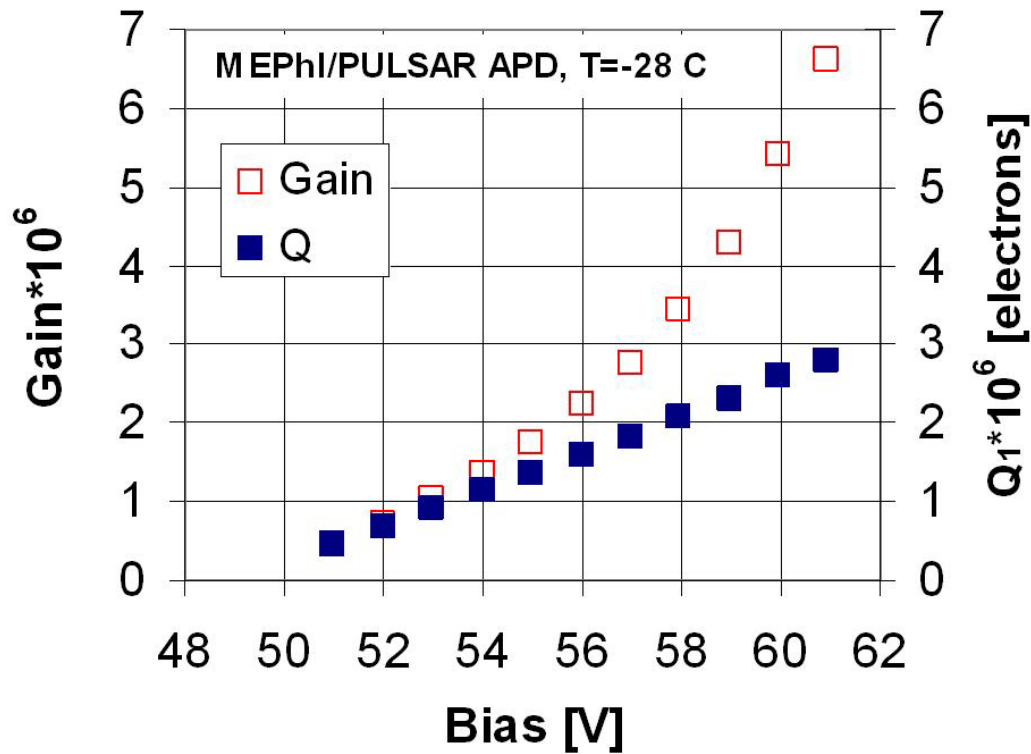
A. Lacaite et al, IEEE TED (1993)

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



R. Mirzoyan, NDIP08, Aix-les-Bains

Коэффициент усиления МГЛФД в присутствии "оптической связи" между ячейками



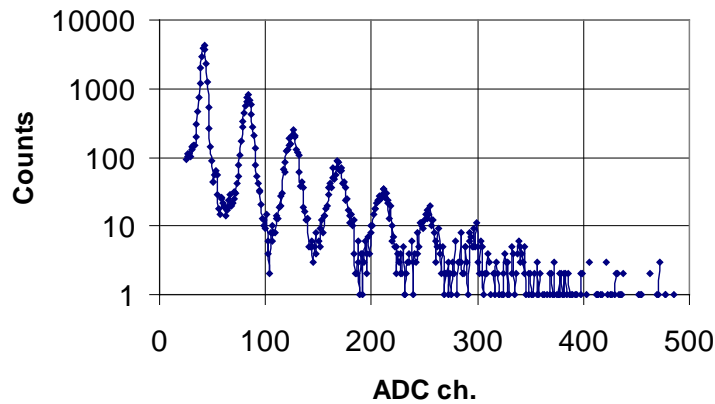
$$Q_1 = C_{pix} \cdot (V - V_B)$$

$$M = Q_1 \cdot \overline{N}_{pixels}^{fired}$$

Y. Musienko, NDIP-05, Beaune, France

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

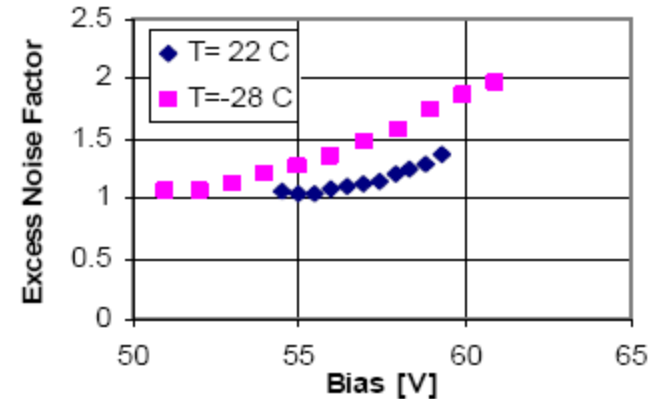
SES MEPhI/PULSAR APD, U=57.5V, T=-28 C



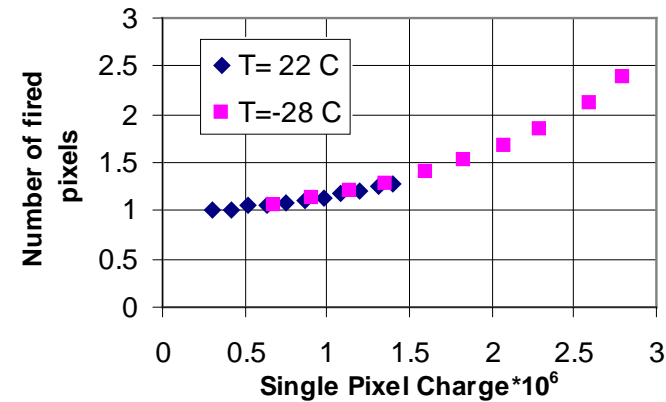
$$F = 1 + \frac{\sigma_M^2}{M^2}$$

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

MEPhI/PULSAR APD



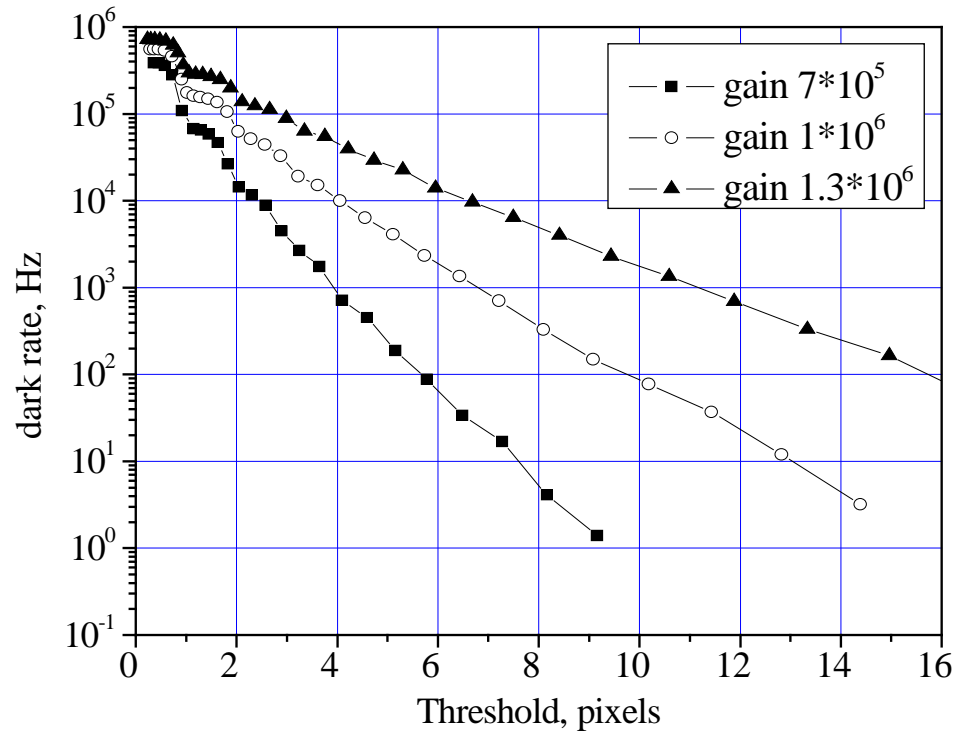
MEPhI/PULSAR APD



Y. Musienko, NDIP-05, Beaune, France

"Оптическая связь" и темновой счёт МГЛФД

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

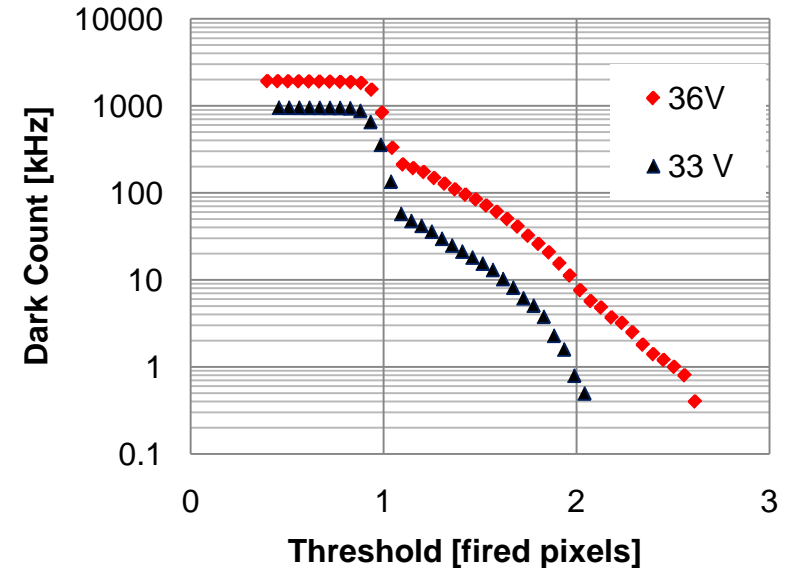
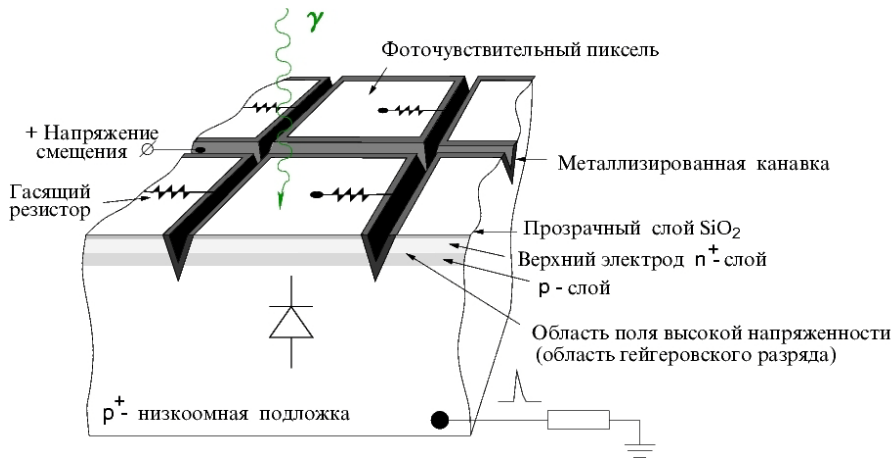


Из-за оптической связи между ячейками темновой счёт падает с увеличением порога электроники гораздо медленнее, чем ожидалось бы из-за случайных совпадений.

(E.Popova, CALICE meeting)

Уменьшение оптической связи между ячейками

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



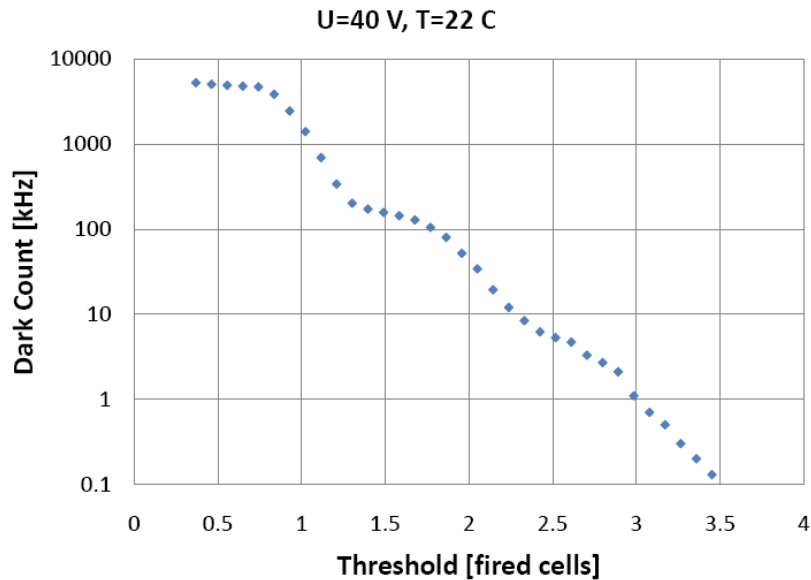
(Ю. Мусиенко и др., ПТЭ, т.1, 2008, стр. 101)

(Ю. Мусиенко, INSTR-08, Новосибирск)

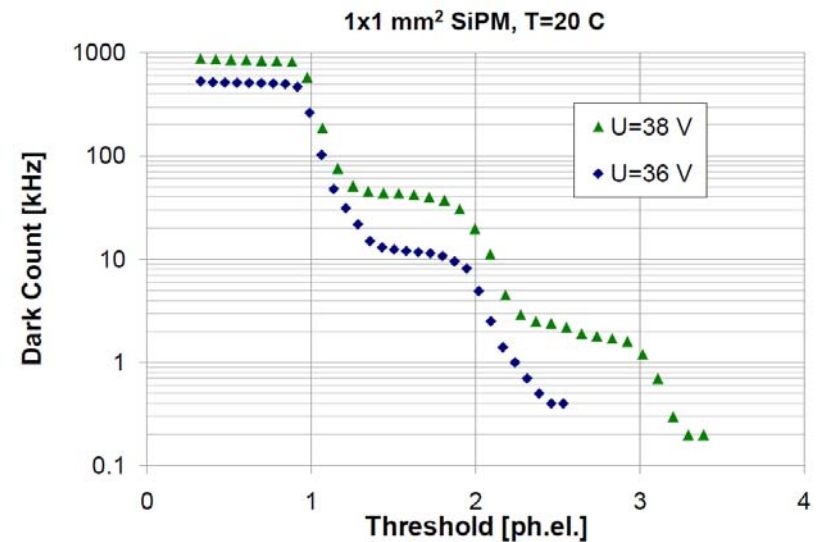


МГЛФД с канавками (ST-Micro и КЕТЕК)

ST-Micro SiPM, 1 mm², 400 cells/mm²

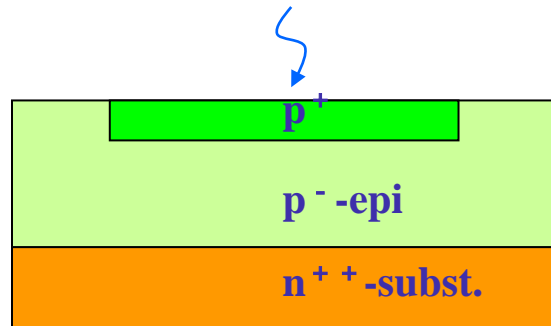


КЕТЕК SiPM, 1 mm², 64 cells/mm²

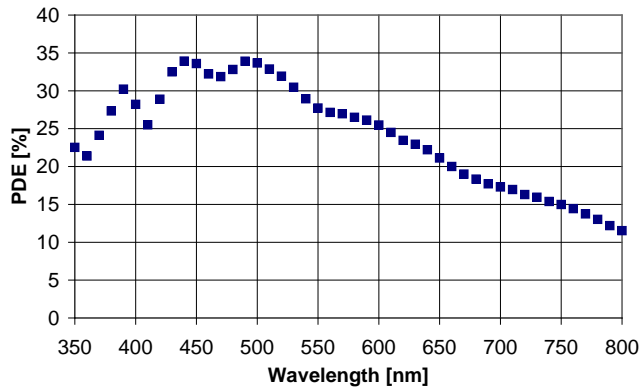


МГЛФД, изготовленные на кремнии p-типа

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

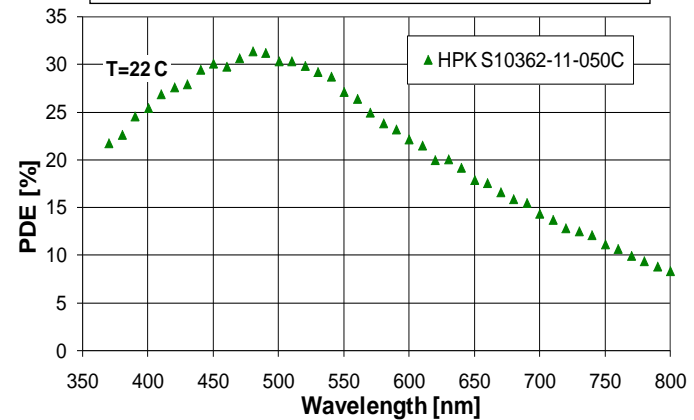


MRS APD, CPTA, 400 cells/mm²

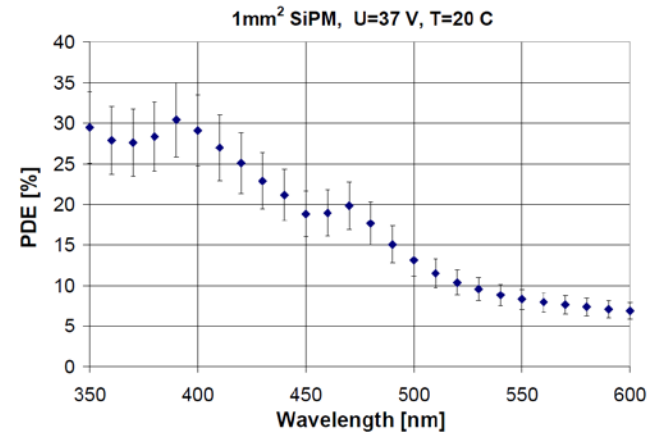


(Y. Musienko, PD-07, SCINT-07, DESY-10)

MPPC, Hamamatsu, 400 cells/mm²



SiPM, KETEK, 64 cells/mm²

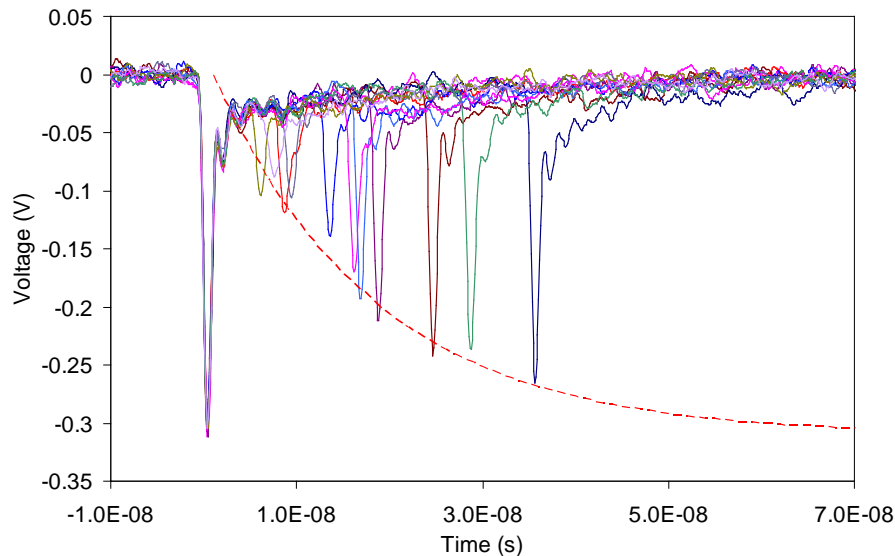




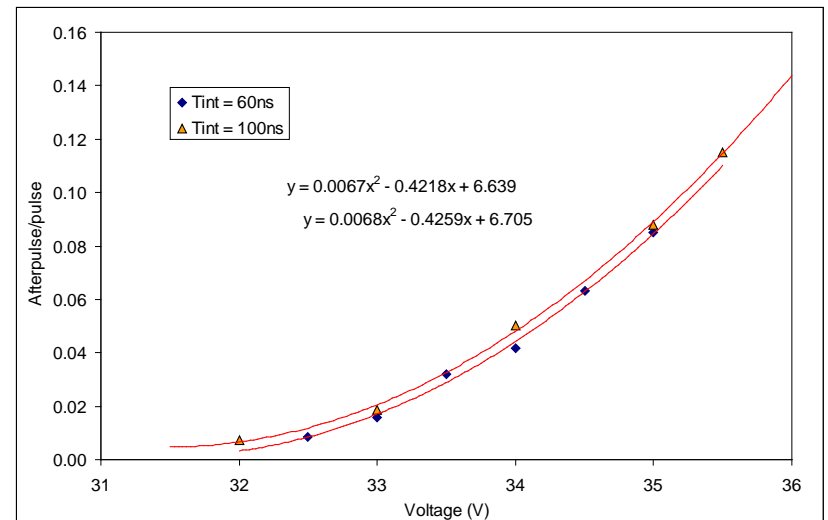
Послеимпульсы в МГЛФД

Послеимпульсы в МГЛФД возникают из-за слишком быстрого восстановления напряжения на ячейке, вследствие малого "гасящего" сопротивления ($R \sim 100-200$ 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



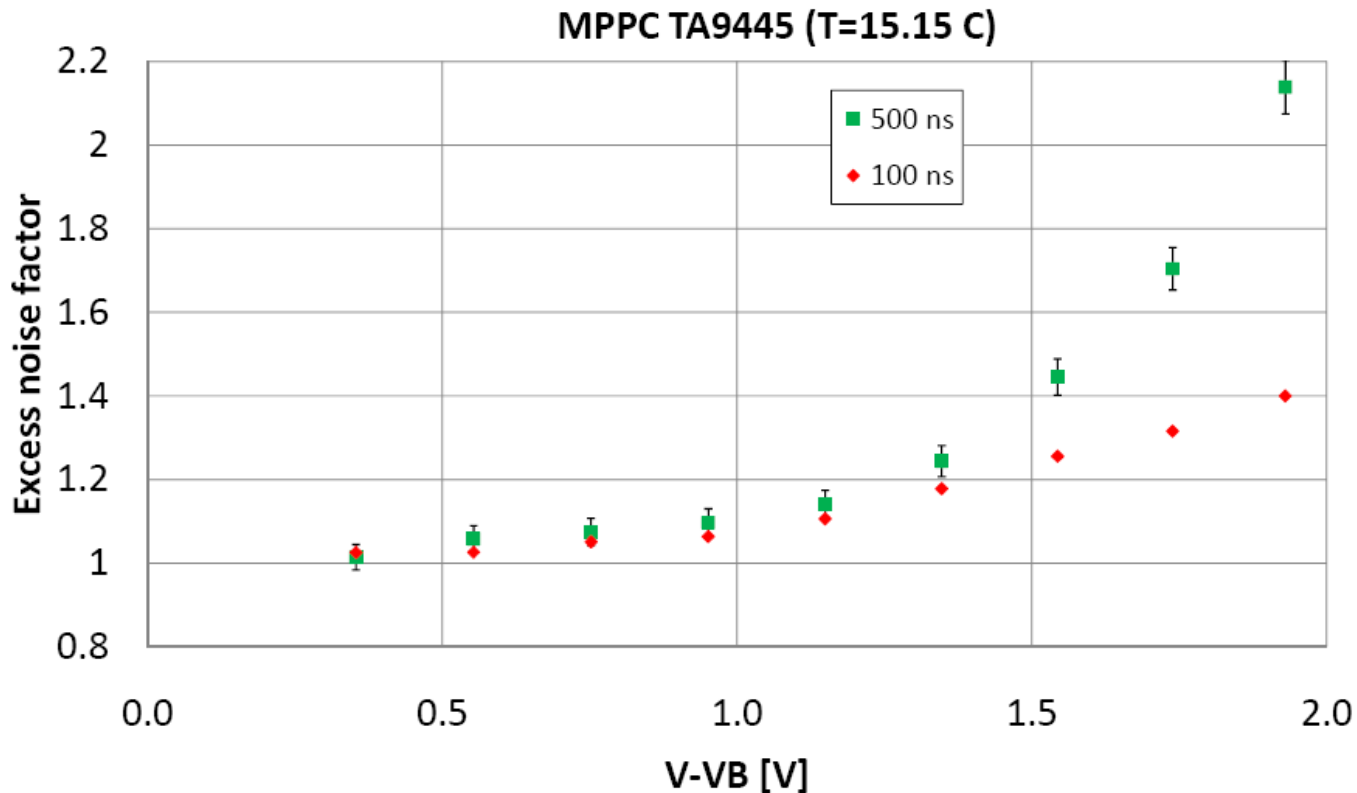
Вероятность появления послеимпульсов в зависимости от напряжения на ячейке



(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

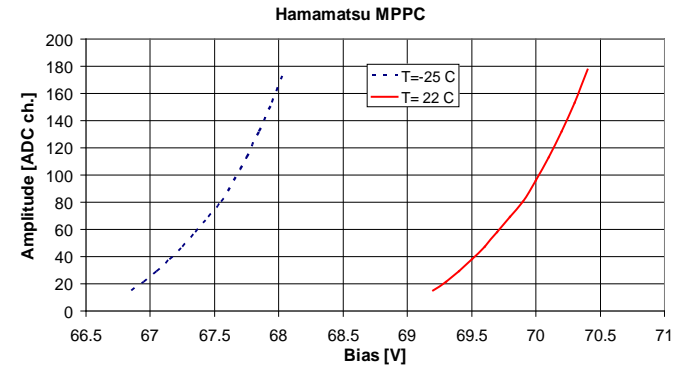
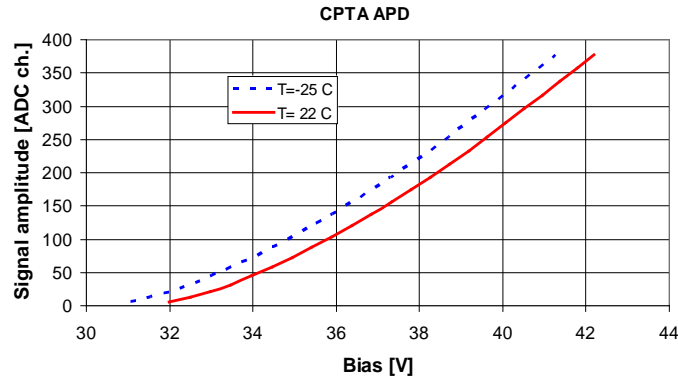


Шум-фактор Hamamatsu MPPC измерен в зависимости от "перенапряжения" при двух длительностях ворот интегрирования сигнала (100 и 500 нс). Длительность сигнала от светодиода не превышала 50 нс по основанию



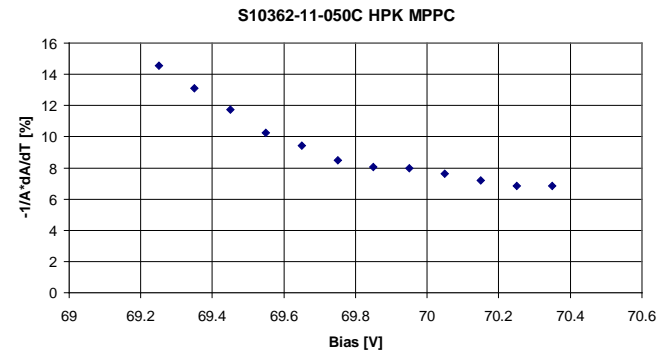
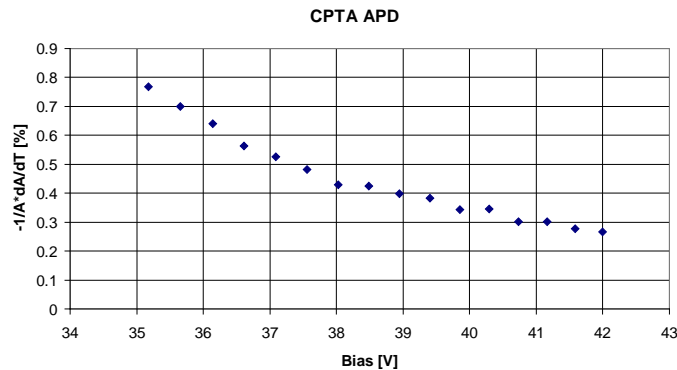
Температурная чувствительность МГЛФД

LED signal was measured in dependence on bias at 2 temperatures. During low temperature measurements ($T=-25\text{ C}$) G-APDs were placed inside commercial freezer (LED was kept at room temperature)



CPTA/Photnique:
 $dVB/dT = -20\text{ mV/C}$
Hamamatsu:
 $dVB/dT = -50\text{ mV/C}$

$$k_T = dA/dT * 1/A, [\% / ^\circ\text{C}]$$

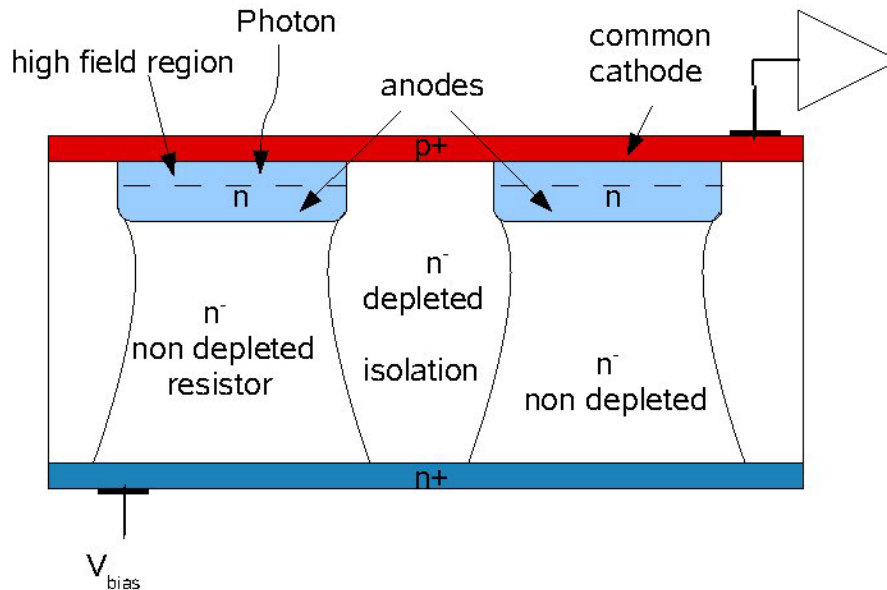




МГЛФД - новые разработки

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.

Свойства МГЛФД с "объёмными" резисторами

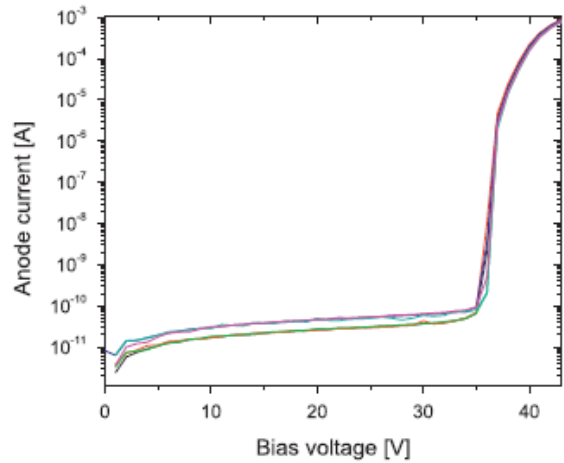


Fig. 3. High homogeneity of the breakdown voltages and leakage currents measured on six identical arrays placed over more than a 5 mm distance. Current voltage characteristic was recorded with a 1 MΩ resistor connected in series.

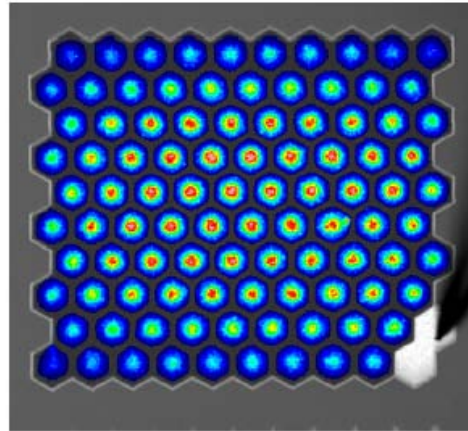


Fig. 4. Photoemission micrograph overlaid onto the pattern image for the 100 cell array (135 μm pitch and a 17 μm gap size) operated at 5V overbias.

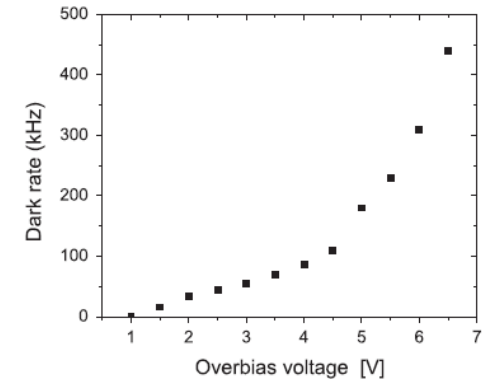


Fig. 8. Dark rate behavior as a function of applied overbias measured at -45 °C for the array of 100 cells of a 135 μm pitch and a 13 μm gap size.

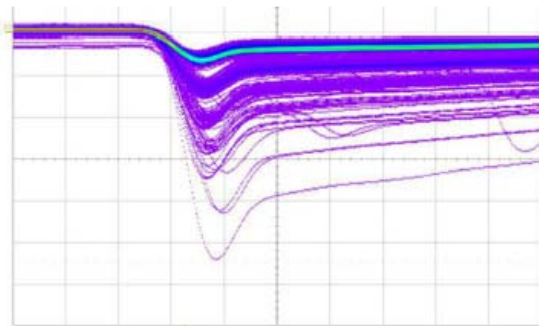


Fig. 5. Pulses as recorded with the oscilloscope with 20 mV/div in y axis and 10 ns/div in x-axis.

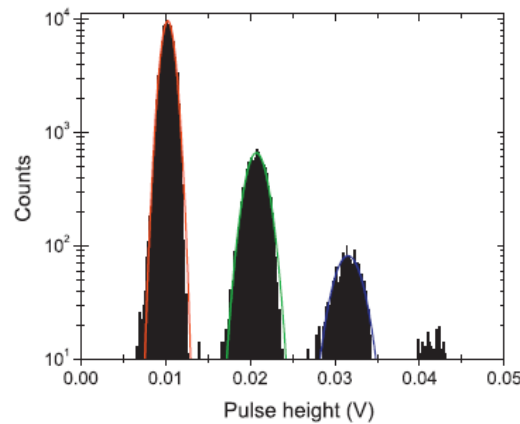


Fig. 6. Spectrum of a 100 cells array with 135 μm pitch and 16 μm gap recorded at -20 °C biased at ~ 2V overbias voltage (triggered at 1/2 first photoelectron pulse height).

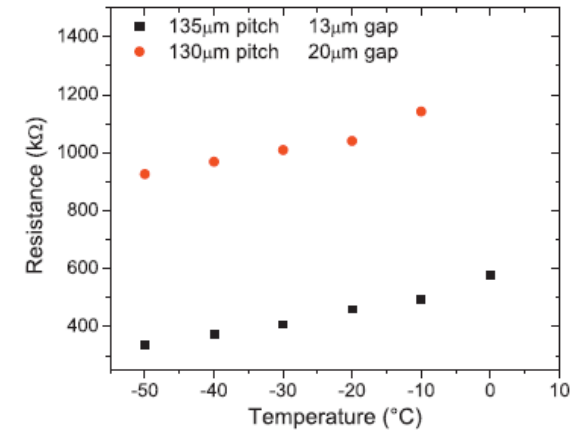
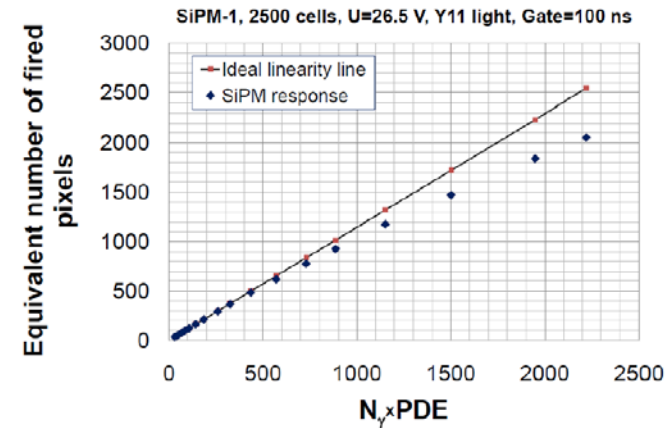
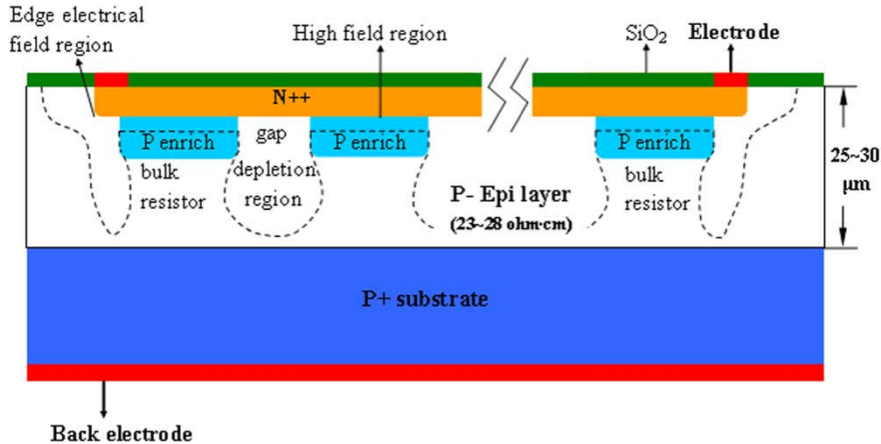


Fig. 9. Change of the resistance with temperature. The resistance of vertical bulk resistors was calculated, as explained in the text, for two devices shown with different symbols.

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



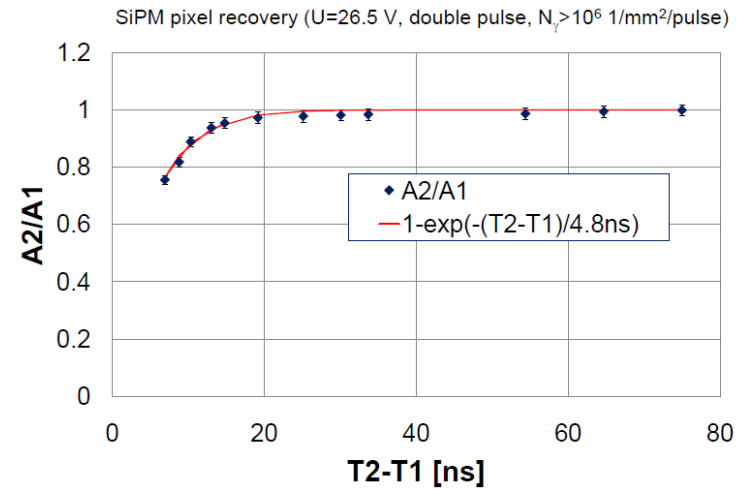
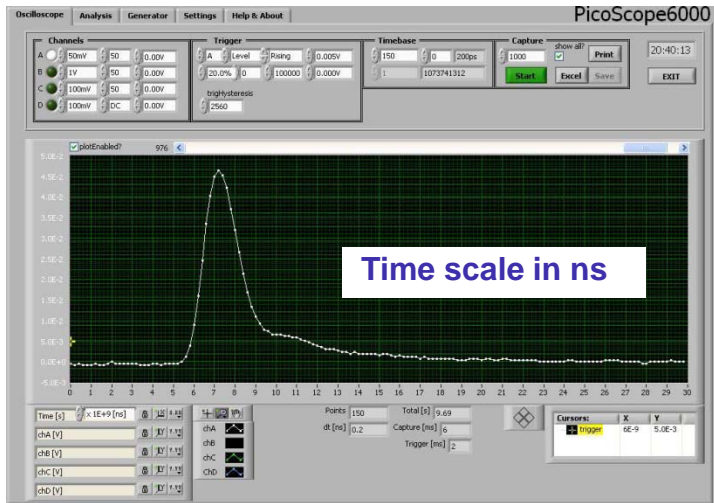
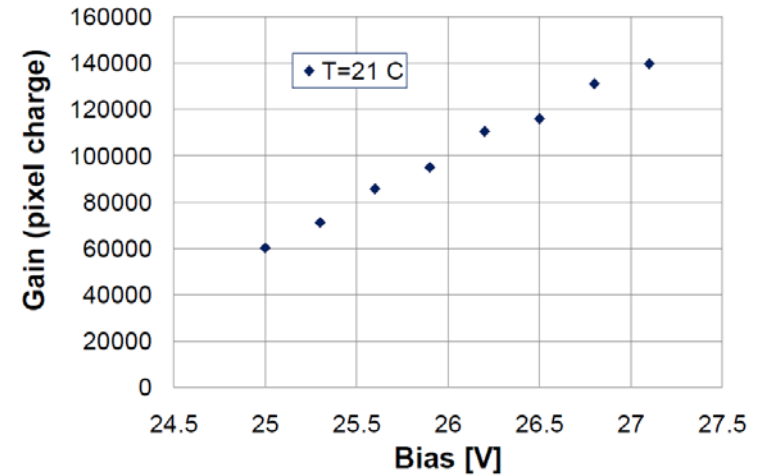
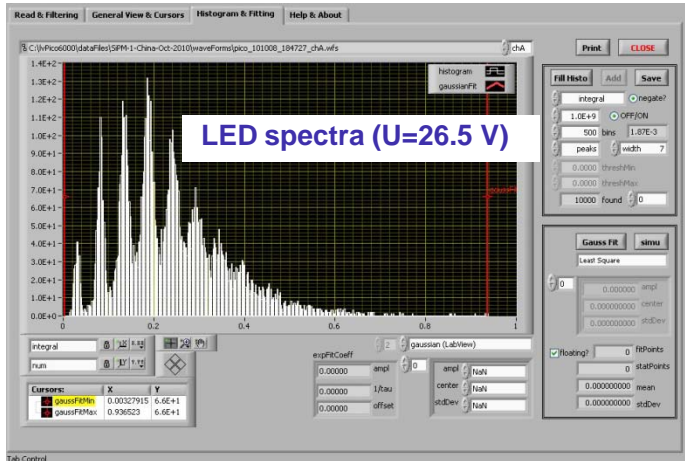
Novel Device Laboratory (Пекин, Китай) разработали и изготовили МГЛФД с "объёмными" резисторами:

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

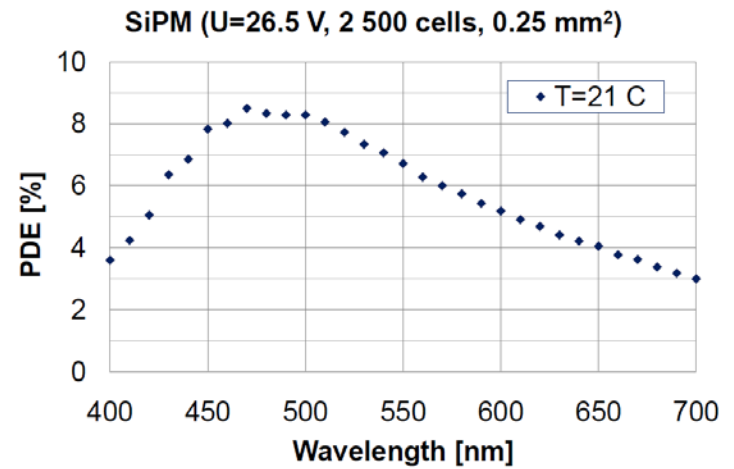
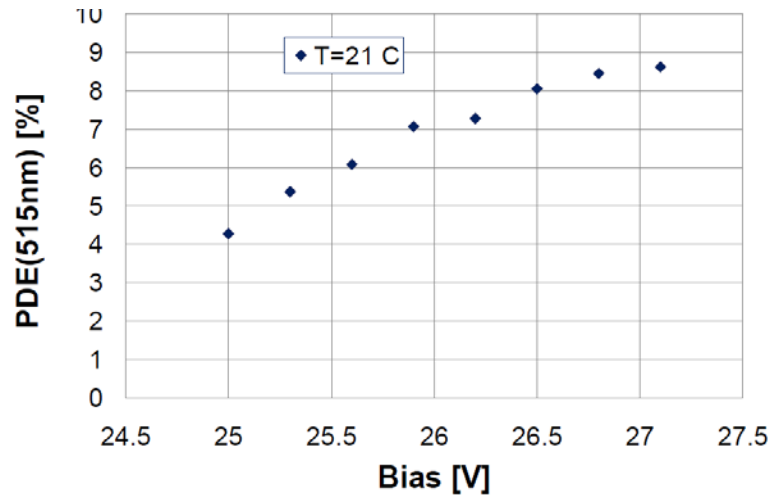
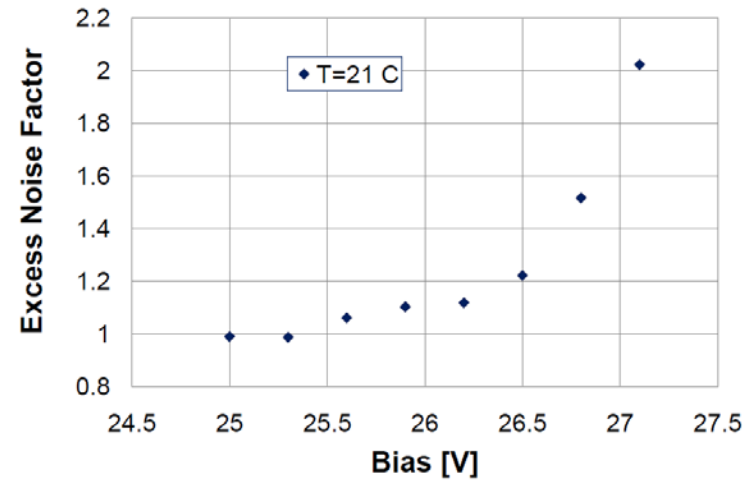
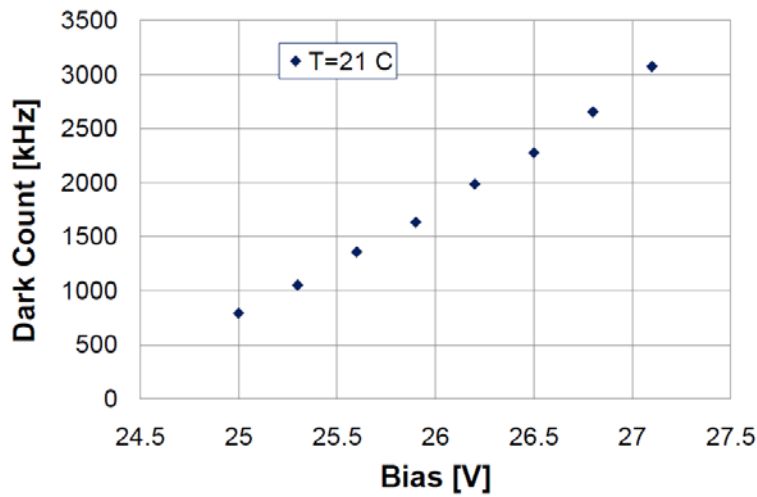
В отличие от МГЛФД (МРП), китайский ЛФД изготовлен на кремнии р-типа.



Параметры китайских МГЛФД - I

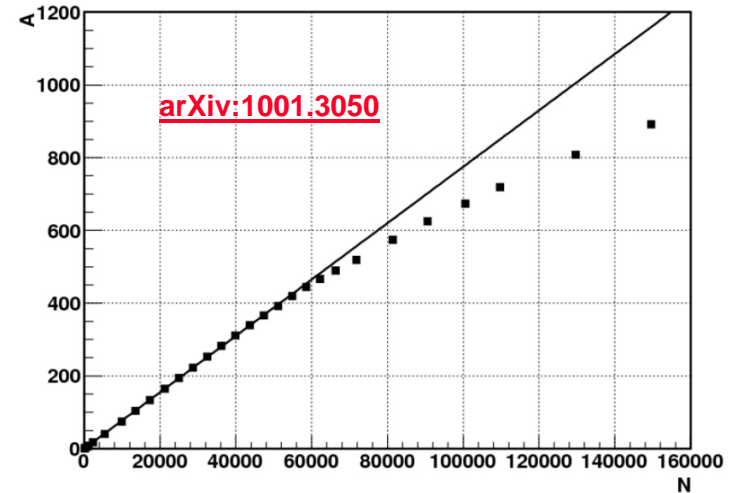
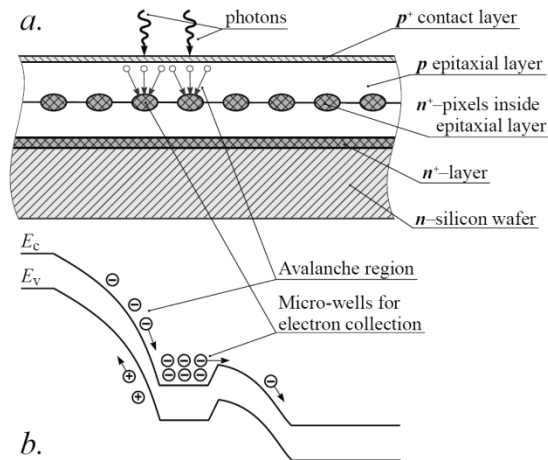


Параметры китайских МГЛФД - II



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

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



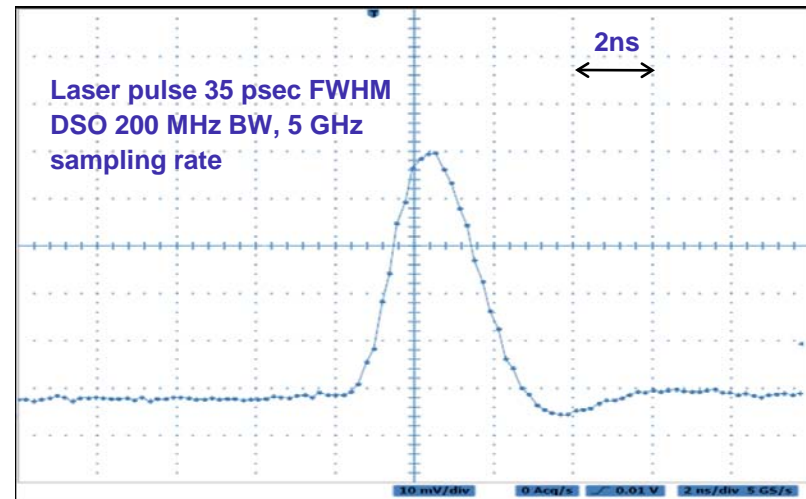
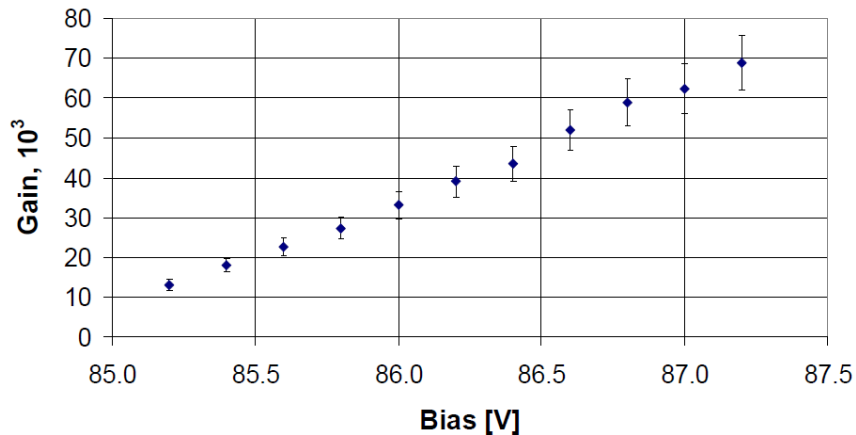
Структура с потенциальными ямами, находящимися на глубине 2-3 мкм. Область усиления находится перед потенциальной ямой. Резистора, как такового, нет. "Гашение" разряда происходит за счёт накопления заряда в потенциальной яме и уменьшения электрического поля в ОПЗ. Образовавшийся заряд уходит в подложку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

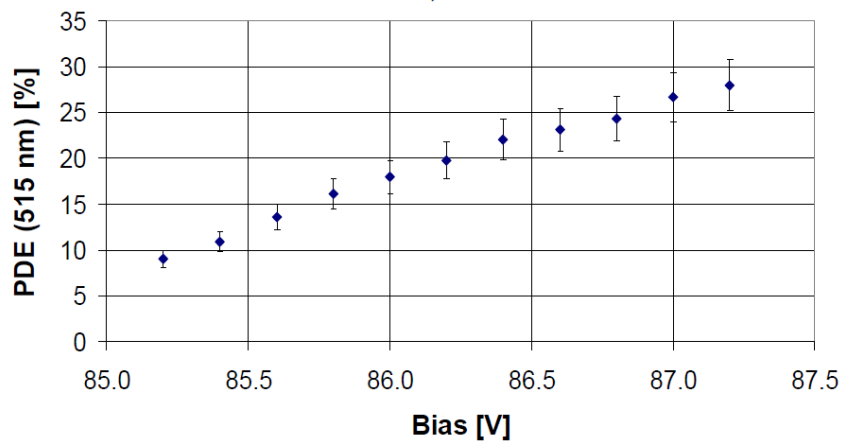


Параметры МЛФД фирмы Zecotek (15 000 ячеек, 1 mm²)

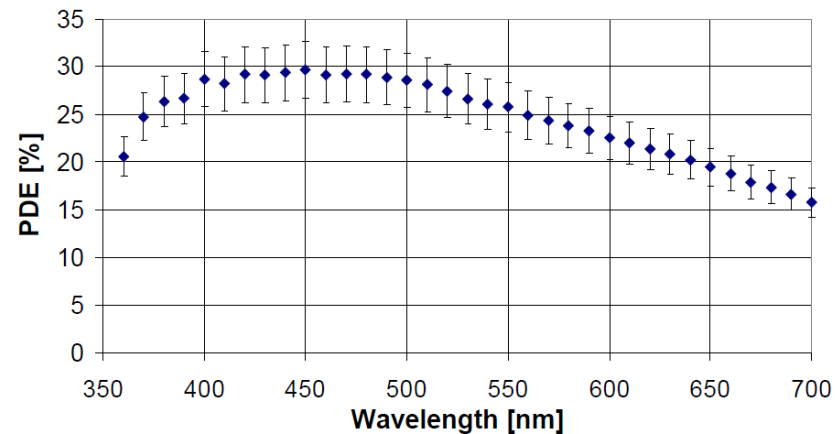
MAPD#15, T=21 C



MAPD#15, T=21 C

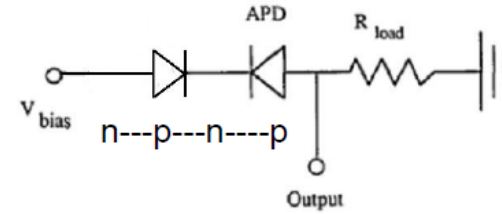
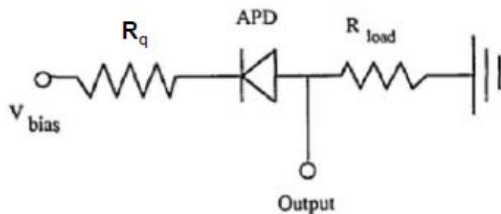
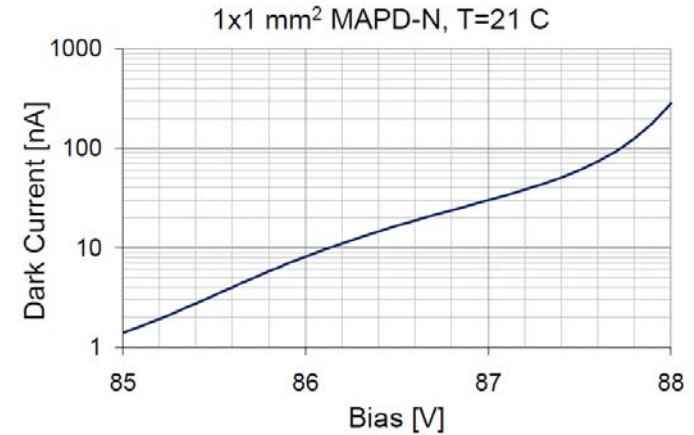
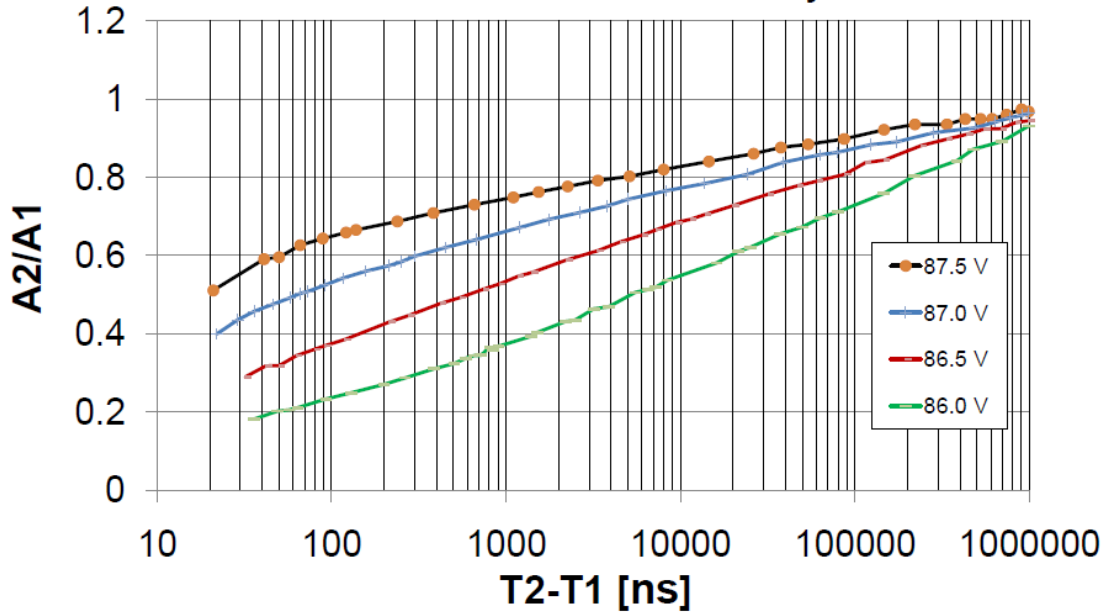


MAPD#15, U=87.2 V, T=21 C



Восстановление амплитуды сигнала одной ячейки МЛФД Zecotek

1 mm² MAPD-N cell recovery

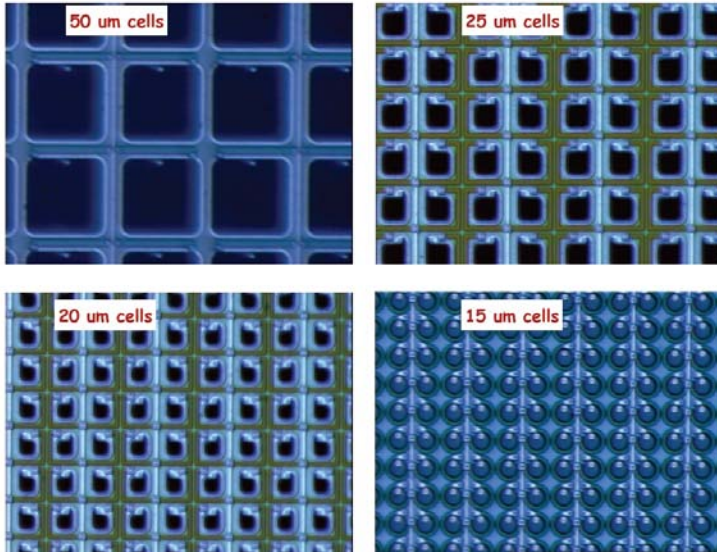


Измерения проводились с использованием импульсов света от двух быстрых светодиодов. Первый импульс имел амплитуду, "блокирующую" ячейку МЛФД. Амплитуда второго (задержанного) импульса нормирована на его же амплитуду, измеренную при задержке 10 мсек.



МГЛФД (Hamamatsu) с увеличенным динамическим диапазоном

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

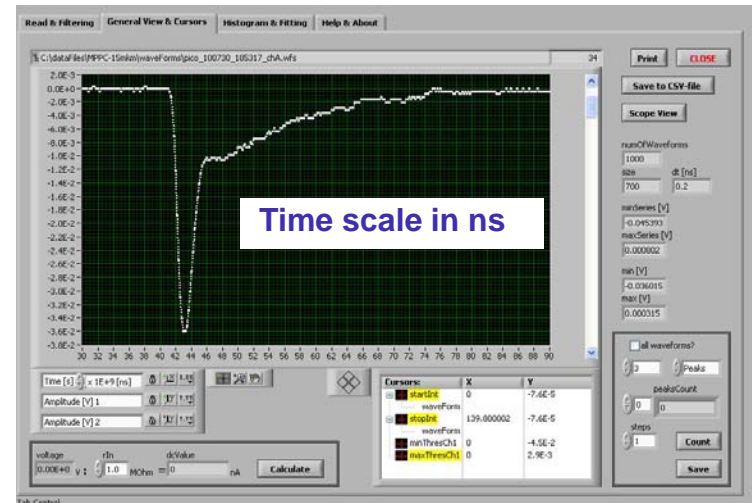
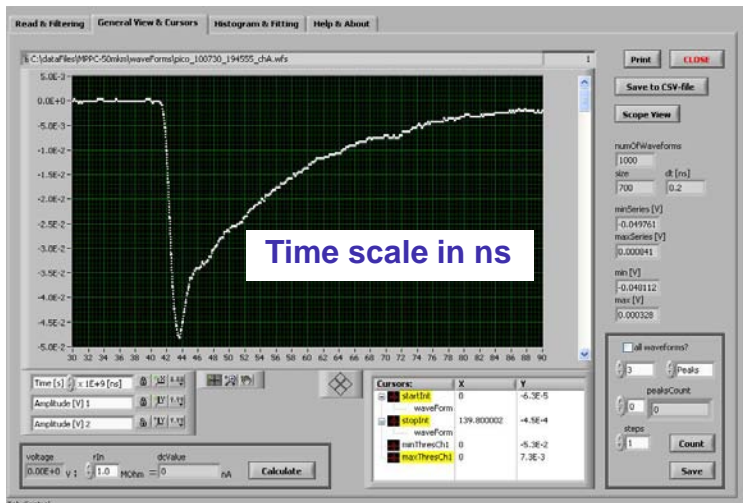
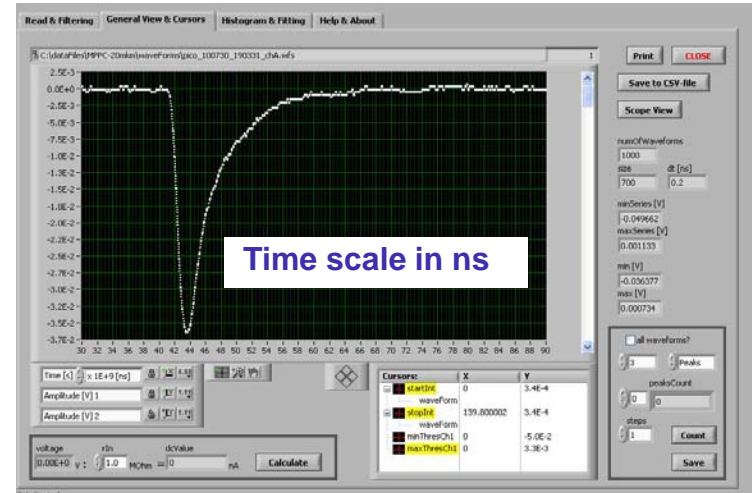
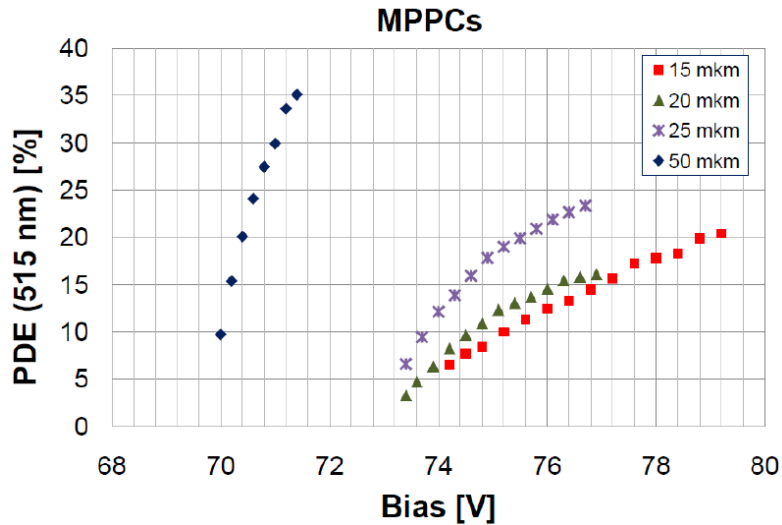


MPPC type	# cells 1/mm ²	C, pF	R _{cell} , kOhm	C _{cell} , fF	$\tau=R_c \times C_c$, ns	V _B , V T=23 C	V _{op} , V T=23 C	Gain(at V _{op}), X10 ⁵
15 μm pitch	4444	30	1690	6.75	11.4	72.75	76.4	2.0
20 μm pitch	2500	31	305	12.4	3.8	73.05	75.0	2.0
25 μm pitch	1600	32	301	20	6.0	72.95	74.75	2.75
50 μm pitch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

Основные параметры МГЛФД (Hamamatsu)

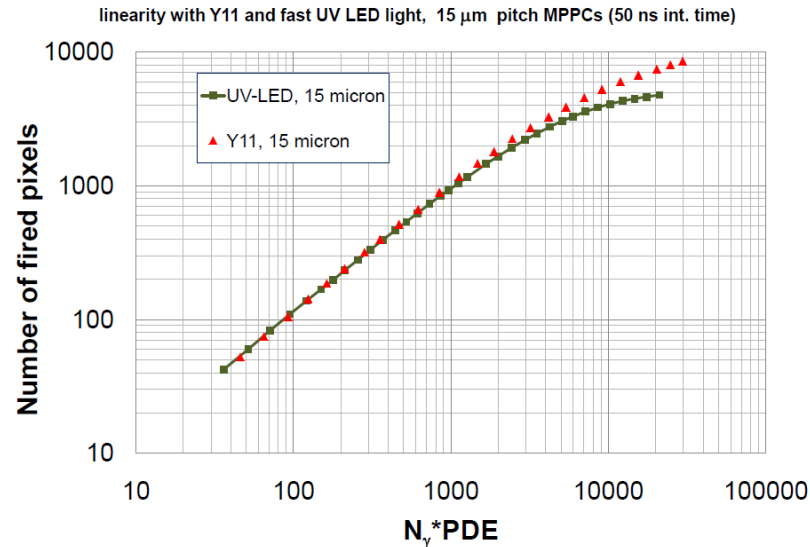
Фотография ячеек МГЛФД, сделанная при помощи оптического микроскопа

PDE и временной отклик

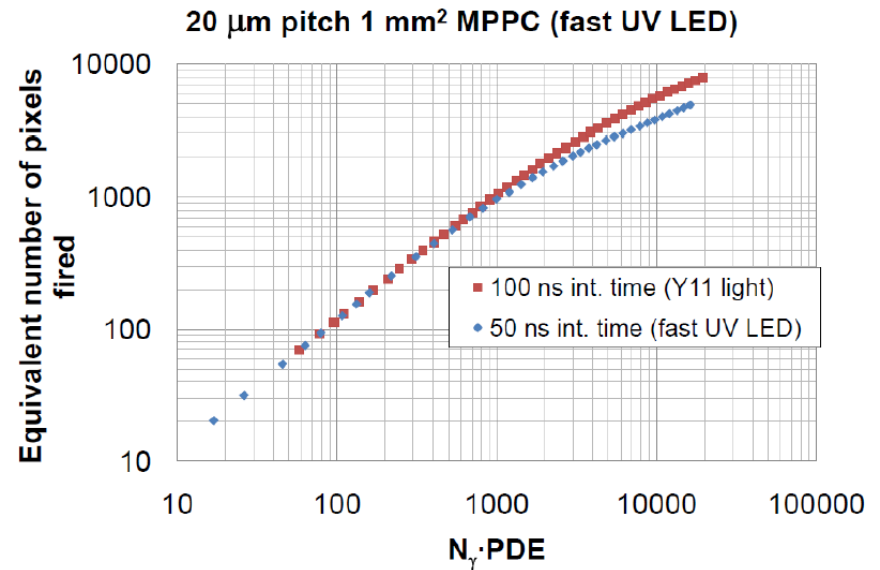


Линейность отклика для света от WLS Y-11 и быстрого ультрафиолетового светодиода

МГЛФД, 4444 ячеек



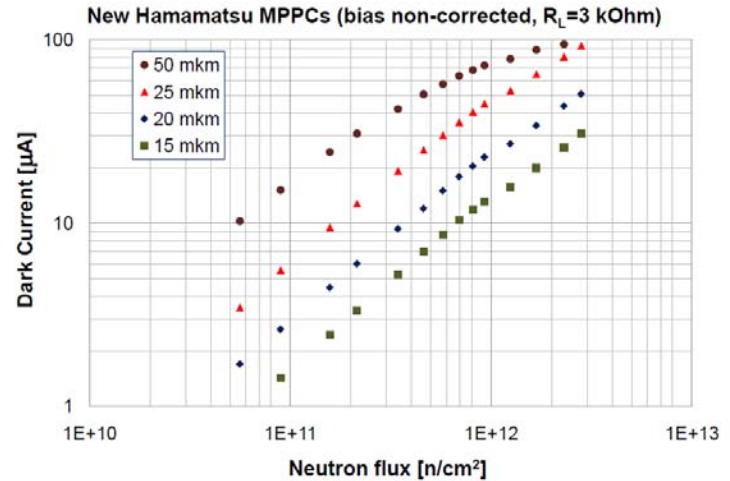
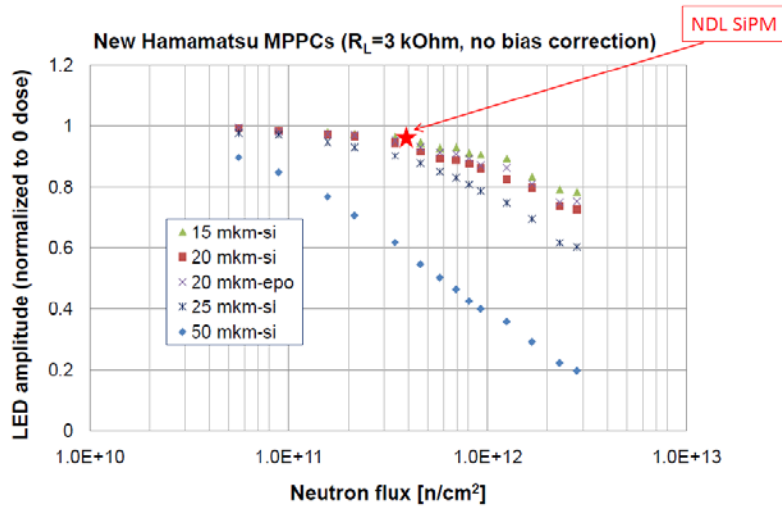
МГЛФД, 2500 ячеек



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)

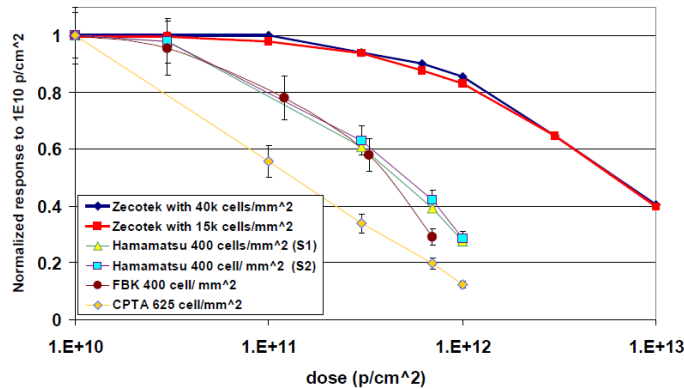
Исследования радиационной стойкости МГЛФД

Нейтроны, E~1 MeV



36

230 Mev Protons at Boston General hospital



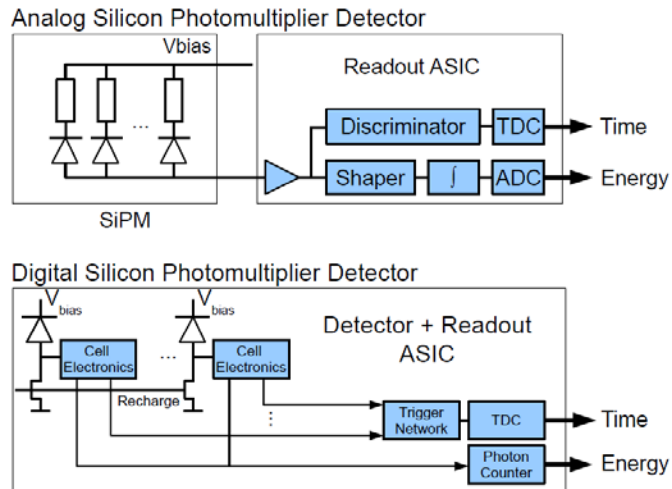
(A. Heering, IEEE 2008)

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

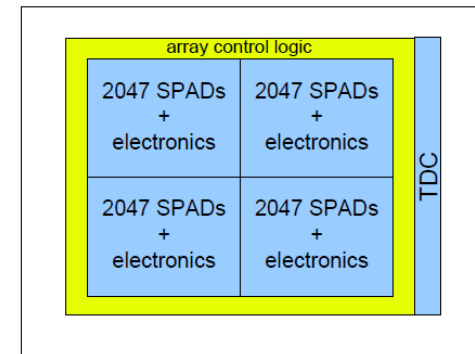
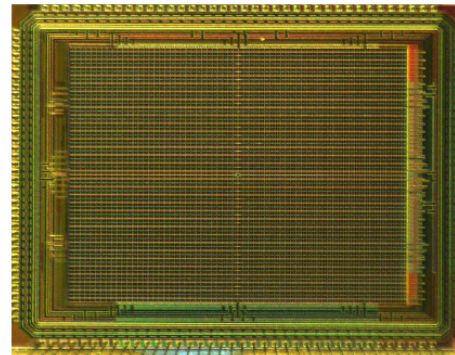
“Цифровой” SiPM (dSiPM – Philips)

Главная цель - улучшить временное разрешение ЛФД для применений в TOF PET

Digital SiPM – The Concept



Digital SiPM – Test Chip Architecture



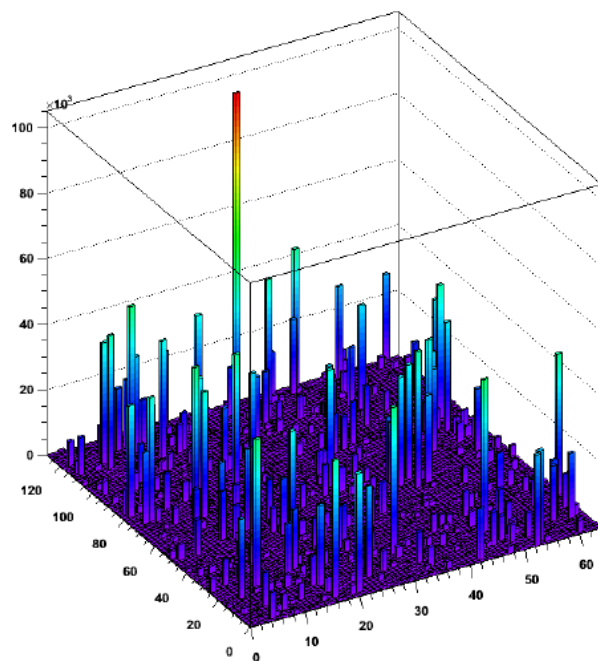
- Pixel composed of 4 identical sub-pixels with 2047 microcells each
- Microcell size $30\mu\text{m} \times 52\mu\text{m}$, 50% fill factor including electronics
- A 1 bit inhibit memory in each microcell to enable/disable faulty diodes
- Active quench & recharge, on-chip memory and array controllers
- Integrated time-to-digital converter with $\sigma = 8\text{ps}$ time resolution
- Variable trigger (1-4 photons) and energy (1-64 photons) thresholds
- Acquisition controller implemented in FPGA for flexibility and testing

(T. Frach (Philips), IEEE-NSS/MIC, Orlando, Oct. 2009)

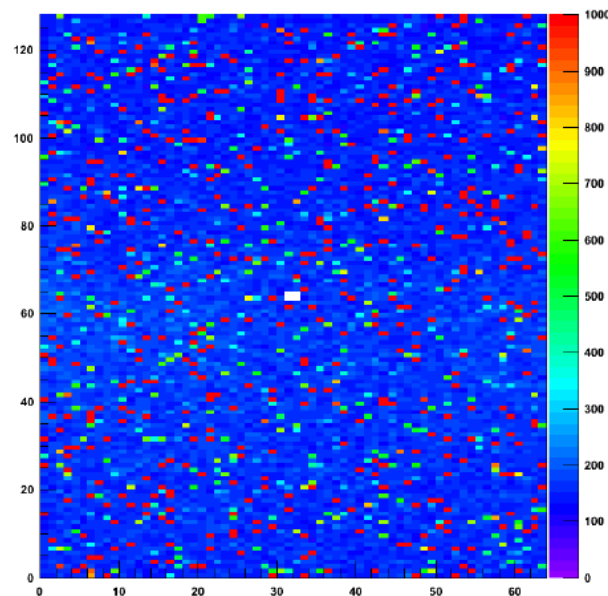


dSiPM - карта частоты генерации темновых импульсов

- Selecting one SPAD at a time allows accurate device characterization
- Here: dark counts per second at 20°C and 3.3V excess voltage



Dark Count Rate Map



Блокировка 5% ячеек позволила уменьшить частоту шумов в 2 раза: до 150 Hz на ячейку при T=20 C (или ~200 kHz/мм²)

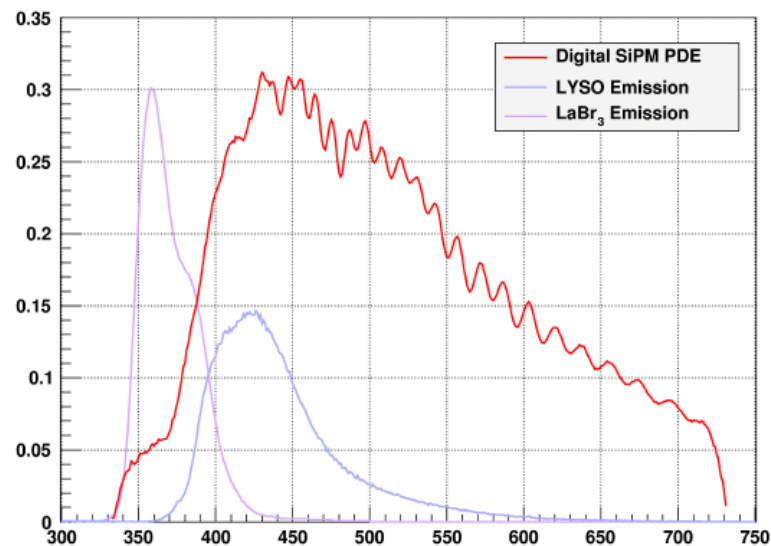
(T. Frach (Philips), IEEE-NSS/MIC, Orlando, Oct. 2009)



dSiPM - эффективность регистрации фотонов

Спектральная характеристика dSiPM хорошо согласована со спектром высвечивания кристалла LYSO(Ce)

Photon Detection Efficiency



Effective PDE:

LYSO(Ce)	25.9%
CsI(Na)	23.7%
CsI(Tl)	20.5%
NaI(Tl)	24.2%
BGO	24.2%
LaBr ₃ (Ce)	9.6%

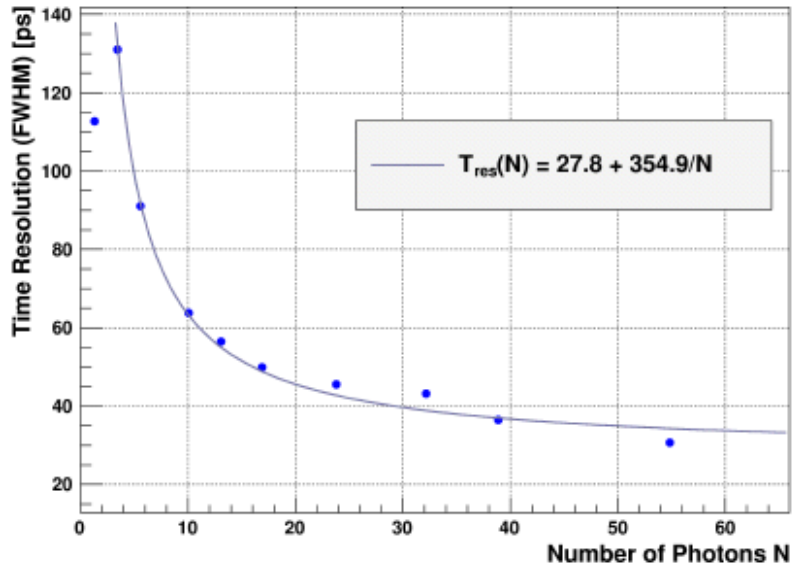
- Peak PDE >30% at 430nm and 3.3V excess voltage
- LYSO: ~2000 detected photons per 511keV gamma at 50% extraction
- No anti-reflective coating used, optical coupling not optimized

(T. Frach (Philips), IEEE-NSS/MIC, Orlando, Oct. 2009)



dSiPM - временное разрешение, температурная чувствительность

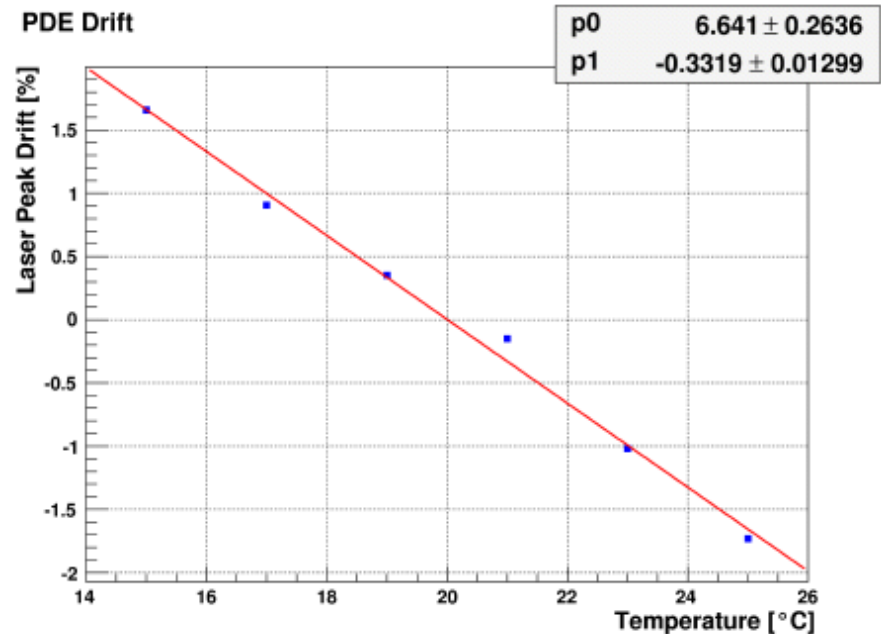
Time Resolution



- Sensor triggered by attenuated laser pulses at first photon level
- Laser pulse width: 36ps FWHM, $\lambda = 410\text{nm}$
- Contribution to time resolution (FWHM):
SPAD: 54ps, trigger network: 110ps, TDC: 20ps

- Trigger network skew currently limits the timing resolution
- Manual fine-tuning of the trigger network will reduce the skew

PDE Drift

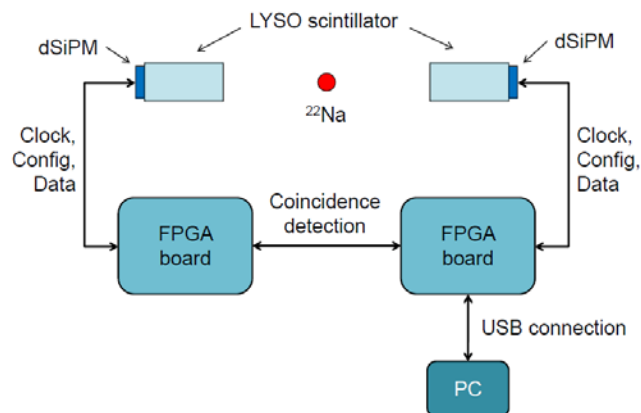


Picosecond Laser:

- 2100 photons detected on average
- **24ps** full-width at half-maximum timing resolution
- Photon peak changes **0.33%** per degree C due to changing PDE

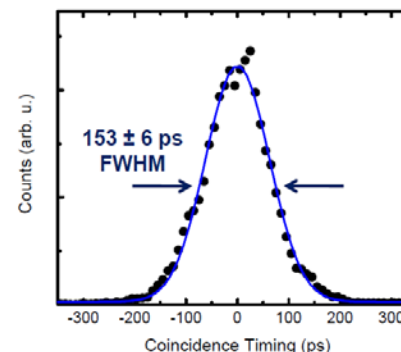
dSiPM - измерения с кристаллами LYSO

Measurement setup



Coincidence Timing Resolution

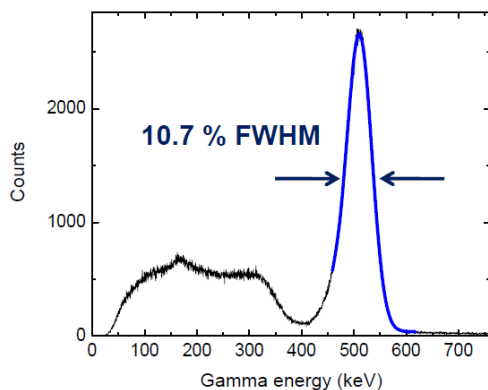
3 x 3 x 5 mm³ LYSO crystals on 3.8 x 3.3 mm² active area
Energy window: FWTM of 511 keV peak



- Experiment taken at room temperature
- No temperature stabilization

Energy Resolution

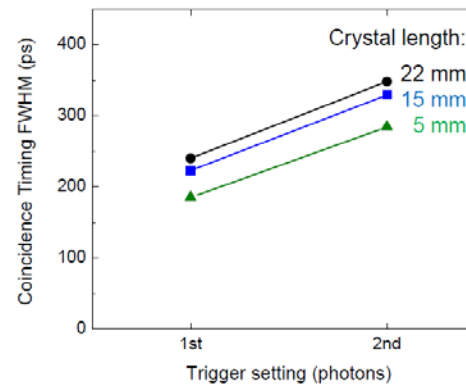
4 x 4 x 22 mm³ LYSO crystal on 3.8 x 3.3 mm² active area



- Saturation was corrected
- Experiment taken at room temperature
- No temperature stabilization

Coincidence Timing Resolution

4 x 4 mm² LYSO crystals on 3.8 x 3.3 mm² active area
(\Rightarrow ~22% of scintillation photons lost)



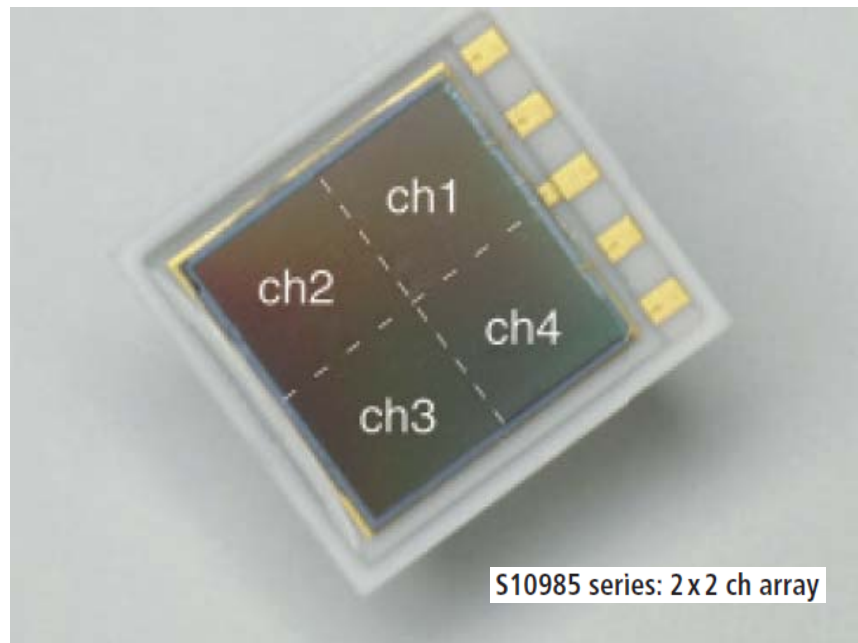
- Experiment taken at room temperature
- No temperature stabilization

(C. Degenhardt (Philips), IEEE-NSS/MIC, Orlando, Oct. 2009)

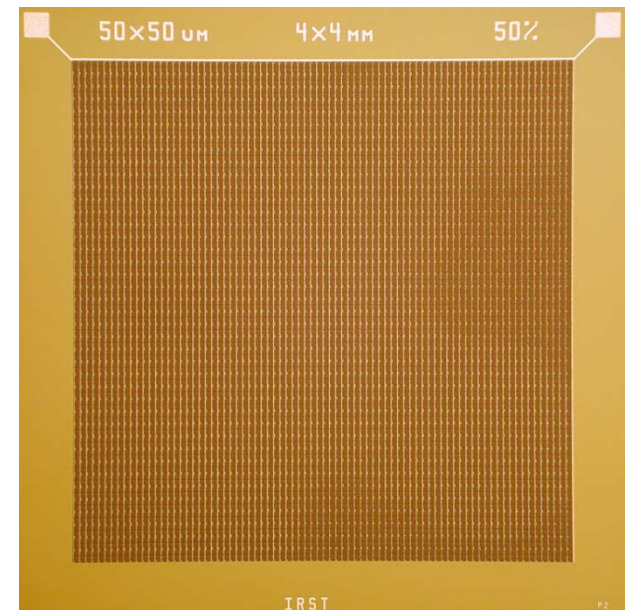
МГЛФД большой площади

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)

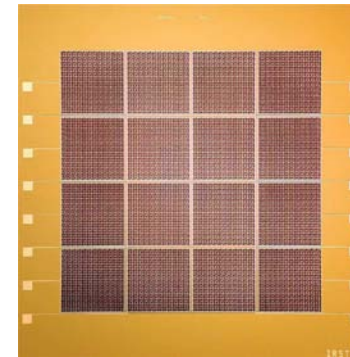


(C. Piemonte: June 13th, 2007, Perugia)

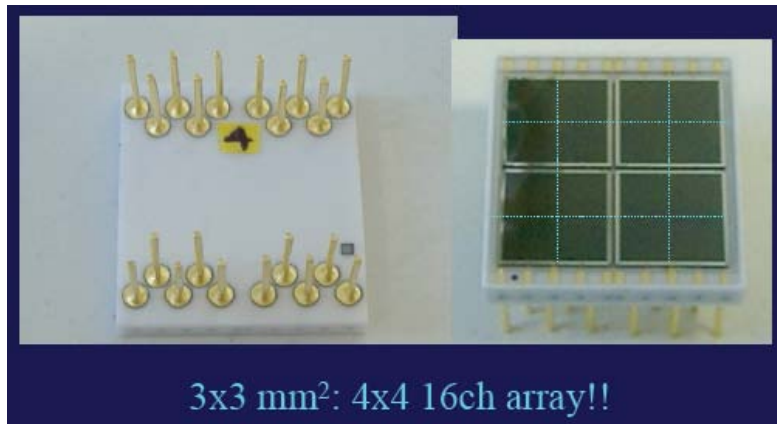
МРРС матрица для ПЭТ (16x9 мм²)



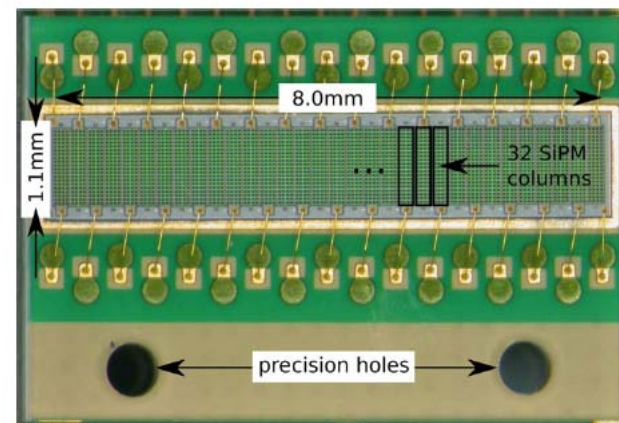
FBK SiPM матрица для ПЭТ (16x1 мм²)



МРРС матрица для эксперимента MAGIC



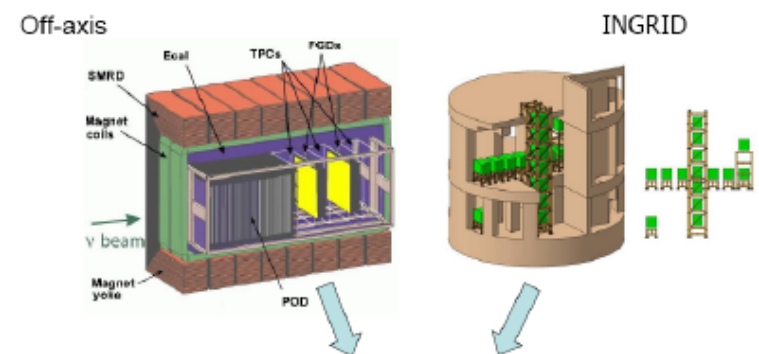
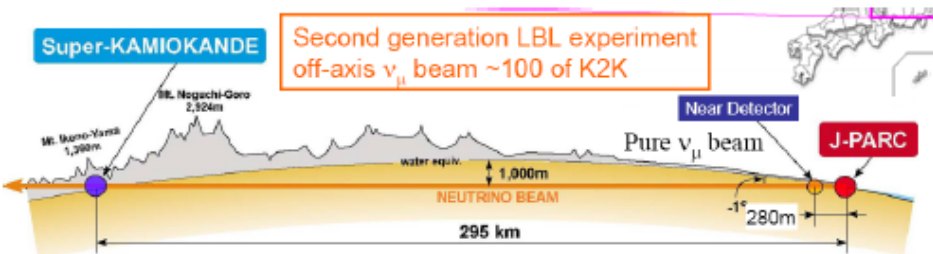
МРРС матрица для трекера на основе тонких (250 μm Ø) сцинт. волокон (NIM A 622 (2010) 542)





Примеры применений МГЛФД в физике элементарных частиц и астрофизике

Исследование осцилляций нейтрино - эксперимент T2K



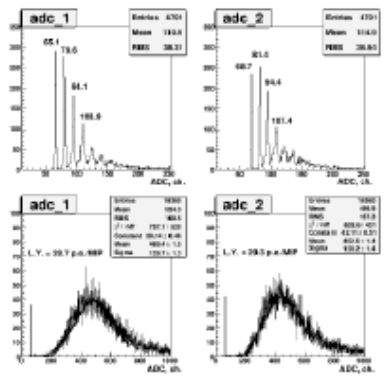
SMRD detectors

Extruded plastics $\sim 7 \times 170 \times 870 \text{ mm}^3$
Y11 fibers embedded in S-grooves



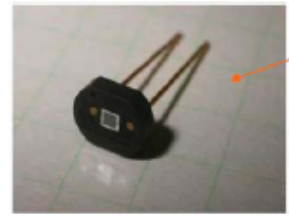
MIP detection efficiency > 99.9%
 σ_t (MIP) $\sim 0.7 \text{ ns}$
Spatial resolution $\sim 7 \text{ cm}$

Light yield



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 $1.3 \times 1.3 \text{ mm}^2$



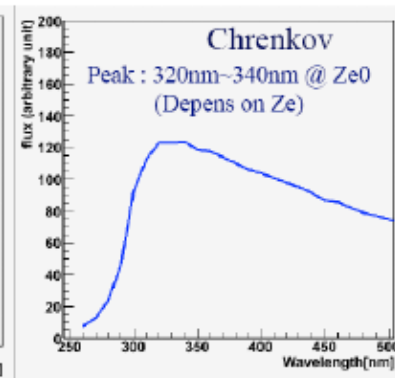
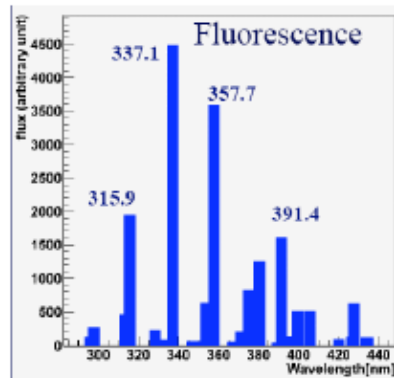
Number of pixels	667
Pixel size	$50 \times 50 \mu\text{m}$
Gain	$\sim 0.7 \times 10^6$
PDE at 525 nm	25-30%
Dark rate, $\text{th} = 0.5 \text{ p.e.}, 22\text{C}$	$\leq 1000 \text{ kHz}$
Pulse width	$< 100 \text{ ns}$
Cross-talk	10-15%
After pulses	10-15%

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

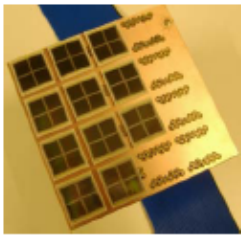
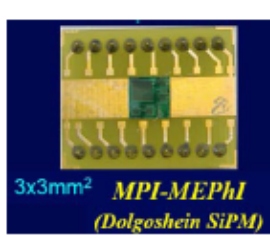
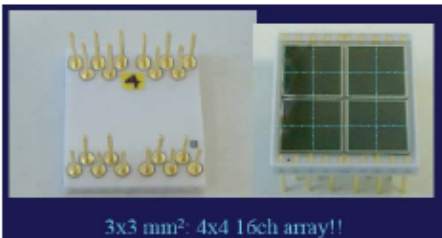
Микропиксельные ЛФД для астрофизики высоких энергий



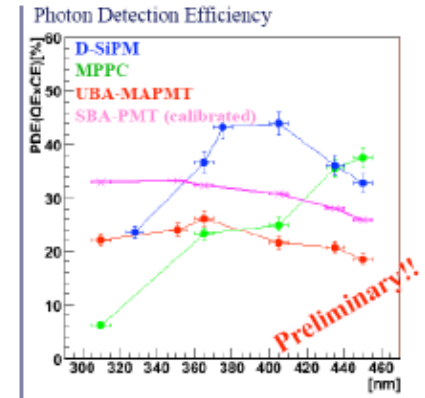
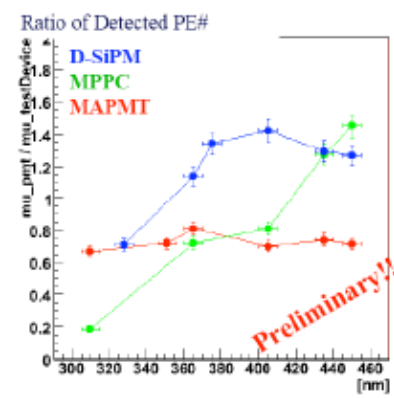
PDE for UV region (Cherenkov, Fluorescence) is essential



Hamamatsu MPPC array, SiPM and prototype camera (256 ch.) for Cherenkov telescope

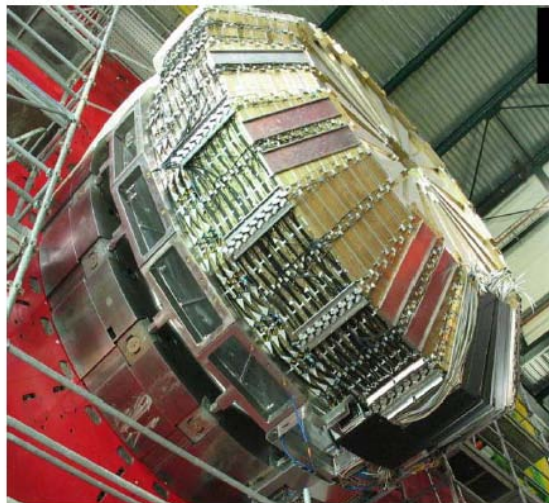
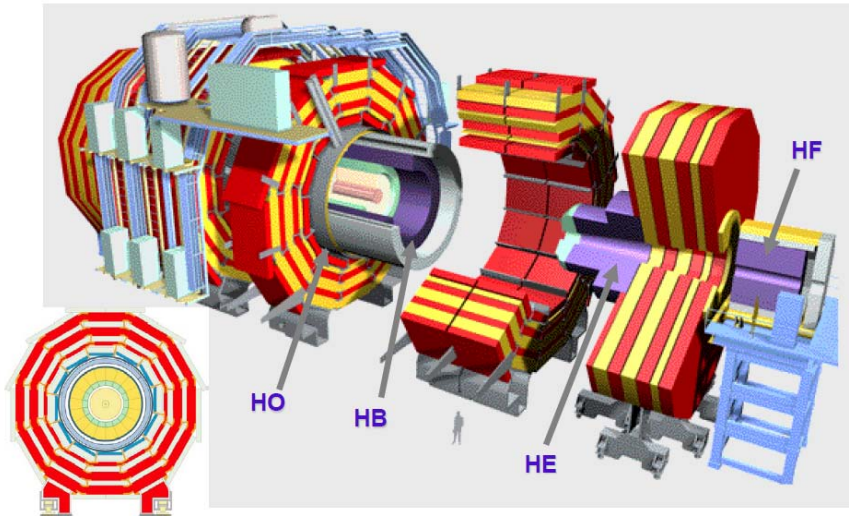


PDE measurement (@-5C)



(H. Miyamoto, TIPP-09, Tsukuba)

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



HE



HB

HB

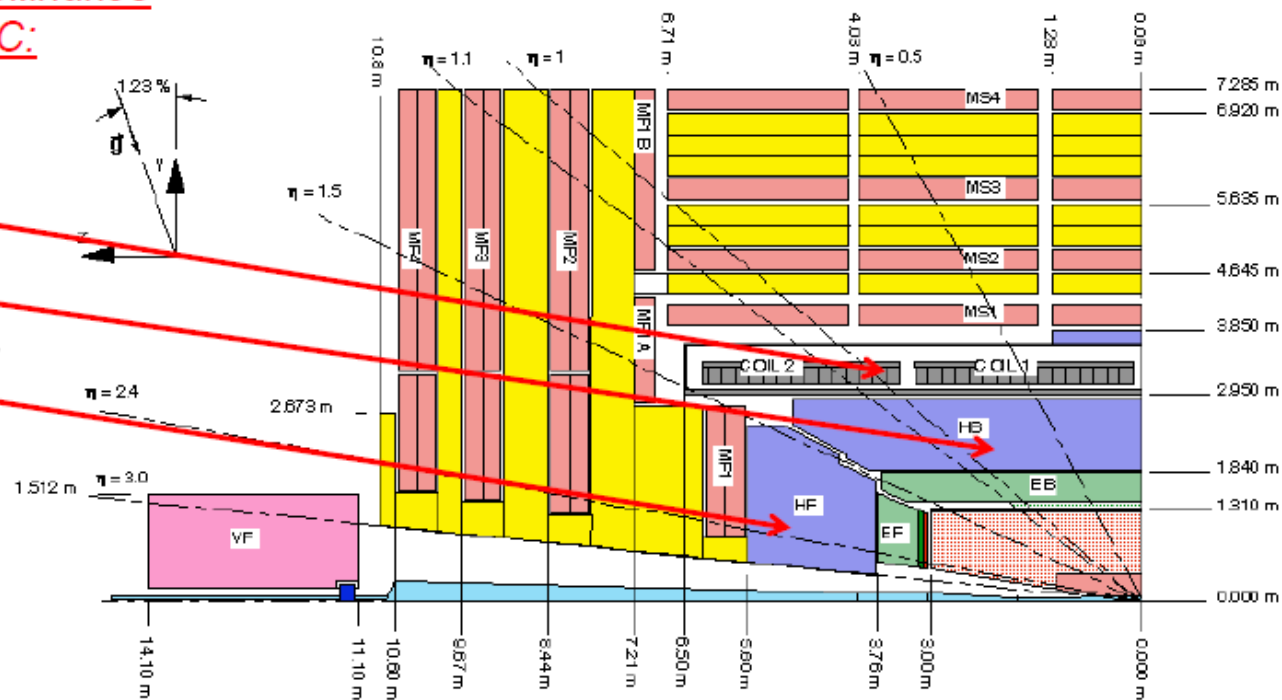
Адронный калориметр эксперимента CMS

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

НО: 10^{11} cm^{-2}

НВ: 10^{12} cm^{-2}

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



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: НВ, НО и НЕ.



Апгрейд адронного калориметра эксперимента CMS

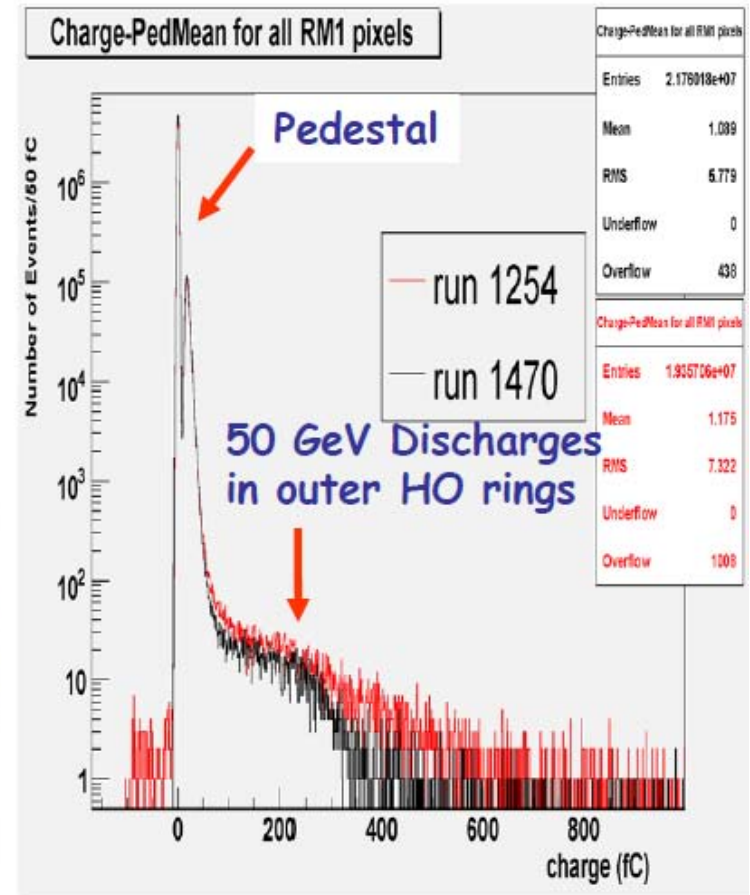
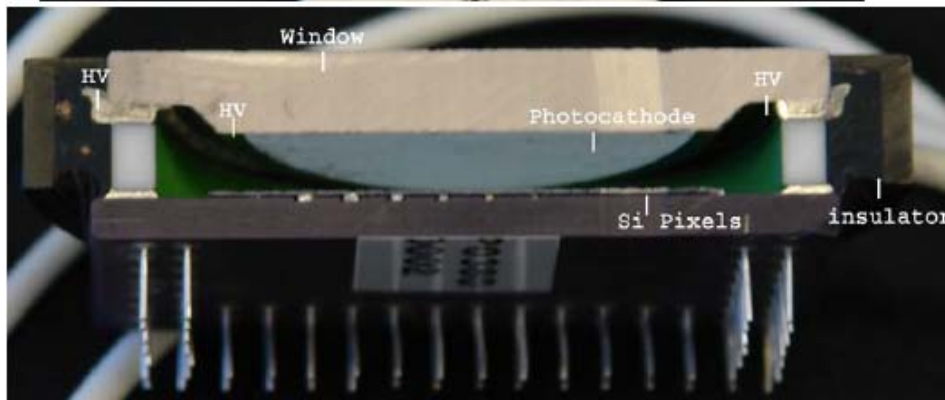
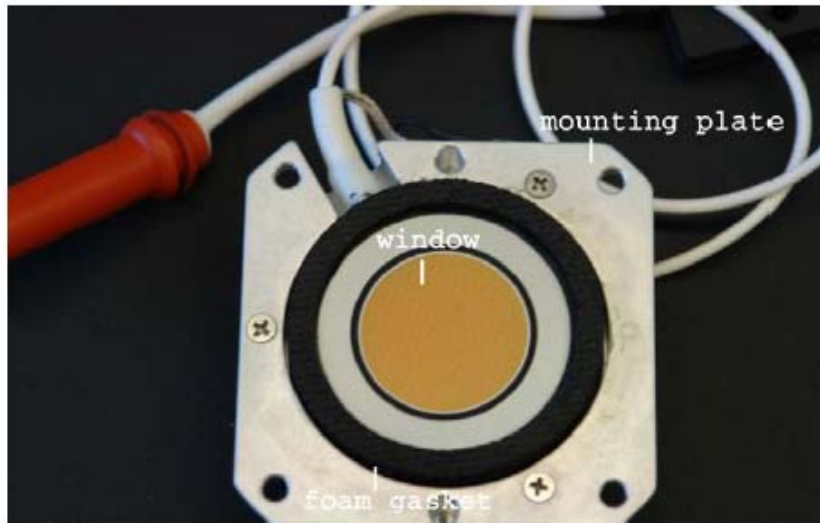
В 2008, начале 2009 года в ЦЕРНе и в Fermilab прошли несколько совещаний посвящённых модернизации (апгрейду) установки CMS для работы в условиях высокой светимости ускорителя SLHC ($\sim 3 \times 10^{34}$ см⁻²сек⁻¹). Одним из важных результатов этих совещаний стало предложение заменить фотоприёмники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

Большая часть апгрейда будет финансироваться DOE и NSF.

Причины апгрейда:

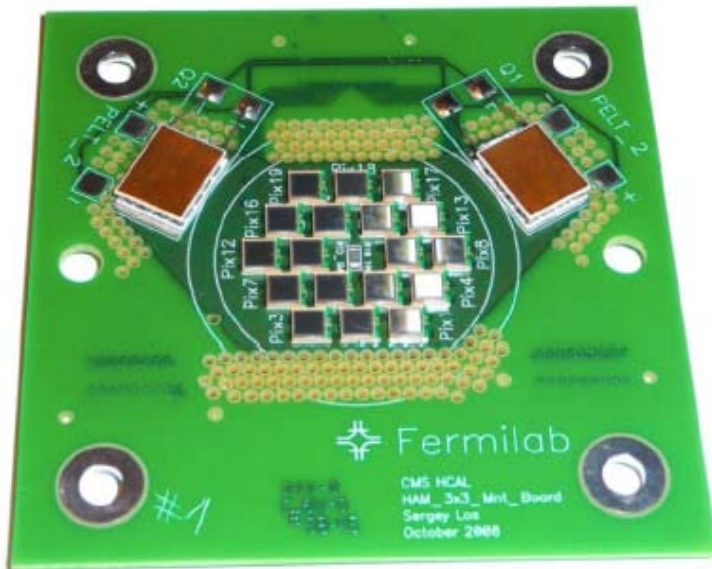
- при напряжённости магнитного поля $\sim 1-2$ Тл (поле в НО) в HPD возникает электрические разряды, приводящие к увеличению шума HPD и к выходу их из строя;
- радиационные повреждения передних слоёв сцинтиллятора в HE и HB
- необходимость увеличения продольной гранулярности калориметра для улучшения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



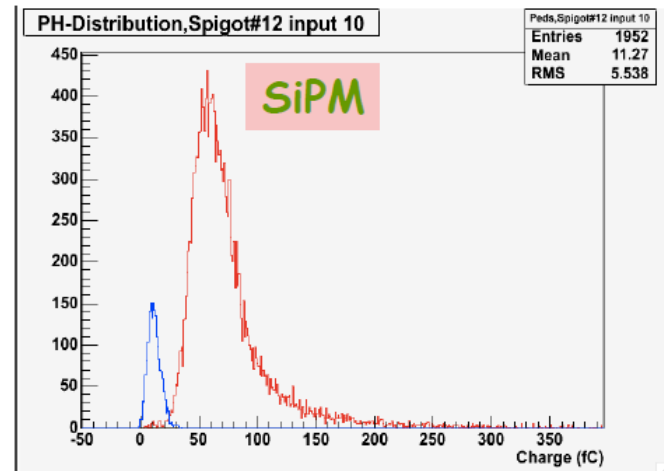
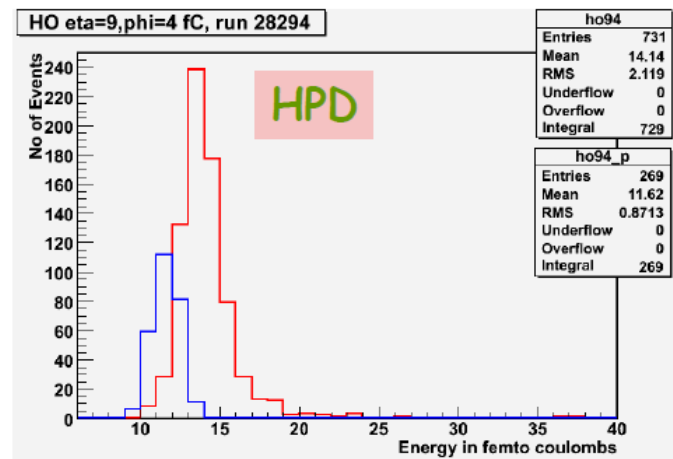
Если направления электрического и магнитного поля внутри HPD не совпадают, то некоторые из "отскочивших" от поверхности полупроводника электронов могут попадать на поверхность изолирующего диэлектрика и вызывать накопление заряда в изоляторе. В результате, могут возникнуть электрические разряды, приводящие к увеличению шума HPD и, даже, к повреждению полупроводниковой части HPD.

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

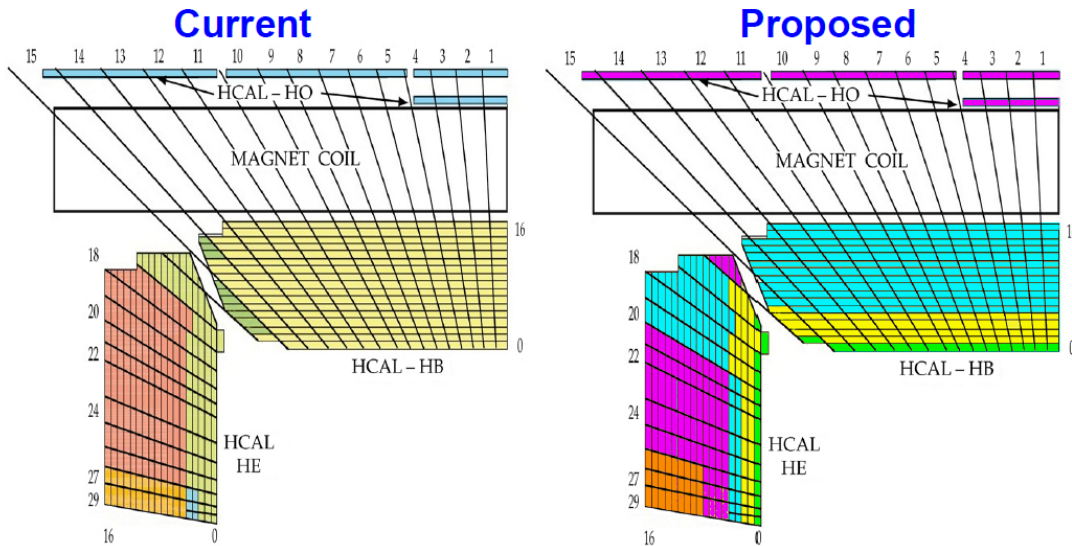


Планы апгрейда CMS НО HCAL :

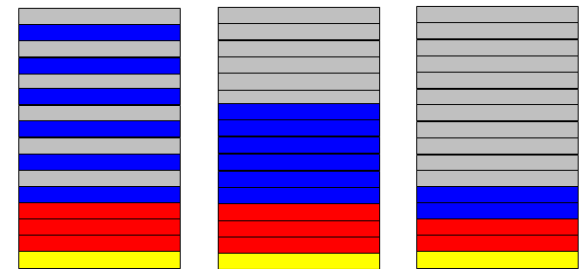
- выбор 3×3 мм² MAPD для CMS НО HCAL (Hamamatsu MPPCs, 3 600 cells, Апрель 2010);
- производство 2500 - 3000 MAPD (первая половина 2011);
- изготовление RM (Readout Module) для CMS НО HCAL (вторая половина 2011)
- замена RM с HPD на RM с MAPD (2012)



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

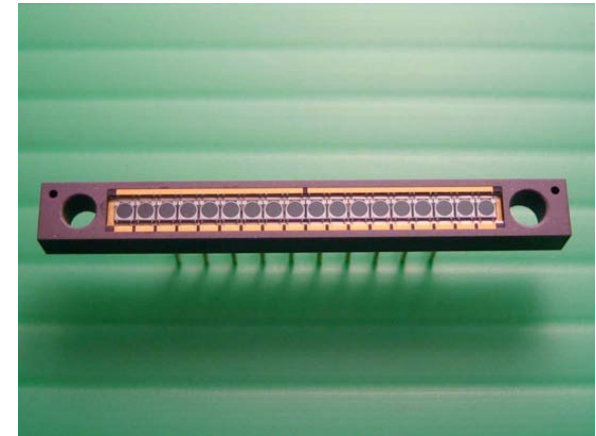
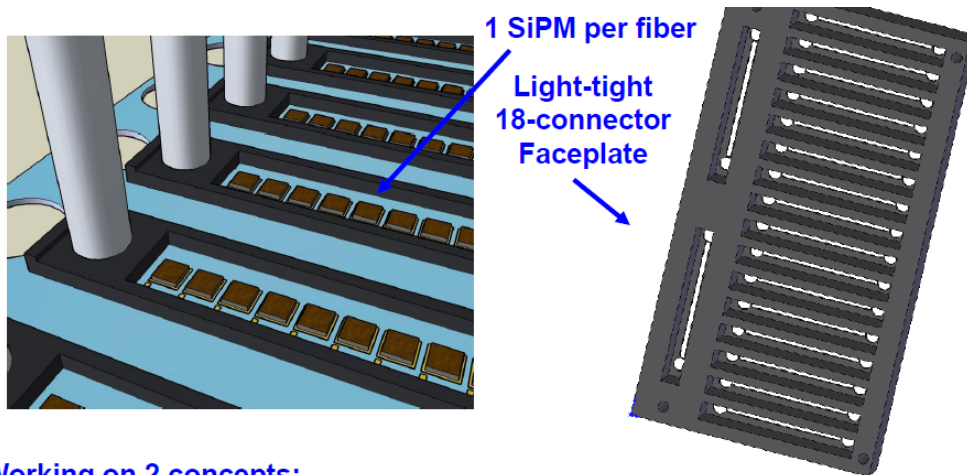
➔ Longitudinal Segmentation

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 (1mm²) per fiber
 - Perform Analog Addition to form (segmented) towers

Конструкция линейки MAPD, предложенная компанией Zecotek для CMS HCAL (18x1 mm²)



Заключение

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

Новые МГЛФД:

- МЛФД, разработанный и изготовленный З. Садыговым (ОИЯИ, Дубна) совместно с компанией Zecotek (Сингапур): МЛФД 3×3 мм², 135 000 ячеек, PDE(370-550 нм)=25-30%, способны работать при потоках нейтронов ($E=1$ МэВ) до $3 \cdot 10^{12}$ 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 $3 \cdot 10^{12}$ см⁻²
- МГЛФД с увеличенным динамическим диапазоном, разработанные и изготовленные Hamamatsu (Япония): 4444 ячеек/мм², PDE(515нм)~15-20%, время восстановления ~11 нс, способны работать при потоках нейтронов ($E=1$ МэВ) до $3 \cdot 10^{12}$ см⁻²
- МГЛФД чувствительные в области ультрафиолета, изготовленные фирмой KETEK (Германия): PDE(350-400нм)~25-30%, оптическая связь между ячейками ~1-3%
- МГЛФД 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%
- прототип "цифрового" МГЛФД, разработанный фирмой Philips: PDE(430нм)~30%, температурный коэффициент 0.3 %/С, временное разрешение для сигналов от гамма-квантов с $E=511$ кэВ, производимых в кристалла LYSO $4 \times 4 \times 5$ мм³ - 153 псек (ПВПШ)

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