

# Разработка новых лавинных фотоприёмников для модернизации адронного калориметра эксперимента CMS (состояние работ и перспективы)

*Ю. Мусиенко*

*(Институт ядерных исследований РАН)*

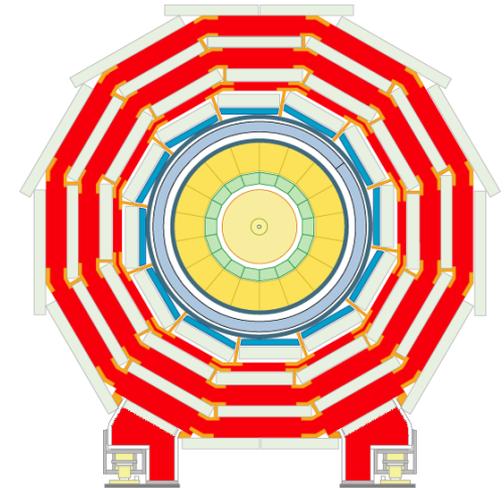
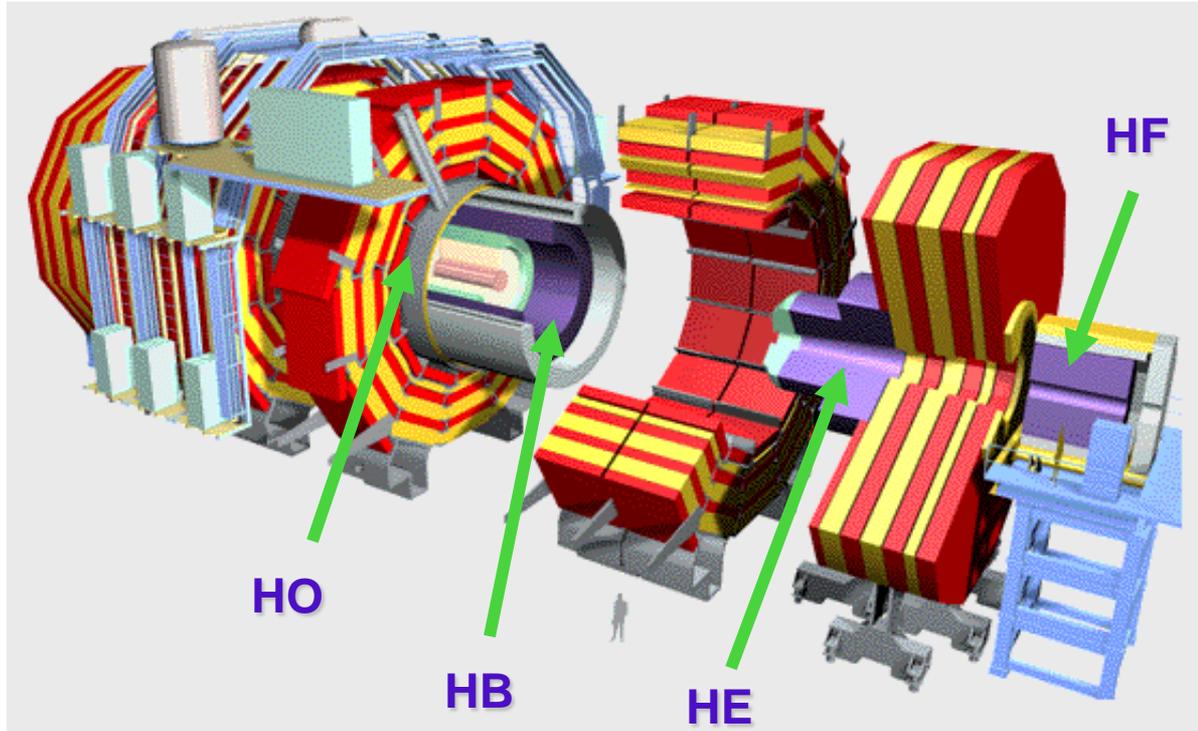


# План доклада

- Адронный калориметр CMS
- Планы модернизации внешнего калориметра (НО)
- Выбор МЛФД для НО
- Планы модернизации центрального и торцевого калориметров (НВ и НЕ)
- Разработка и исследование новых МЛФД для НВ и НЕ (цели, состояние работ и перспективы)
- Заключение - ближайшие планы



# Адронный калориметр эксперимента CMS



Адронный калориметр состоит из 4-х частей: HB (центральный калориметр), HO (внешний калориметр), HE (торцевой калориметр) и HF(передний калориметр). Первые 3 части – неоднородный (сэмплинг) калориметр, состоящий из сцинтилляционных счётчиков со съёмом света при помощи спектросмещающих волокон и пластин поглотителя (латунь (HB, HE) и нержавеющая сталь (HO)). HF – сэмплинг калориметр, состоящий из кварцевых волокон и стальных пластин.

# НВ и HE во время сборки

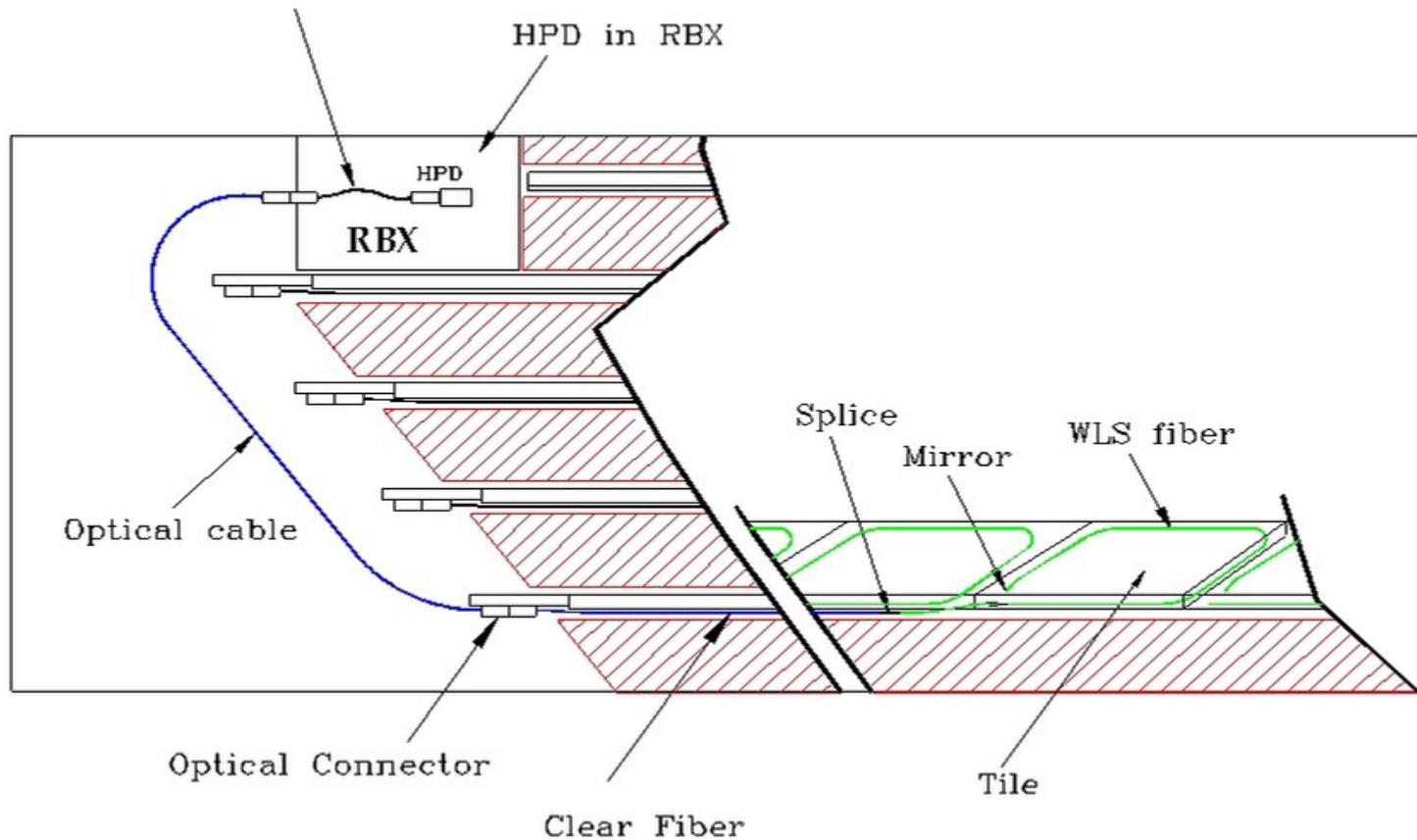


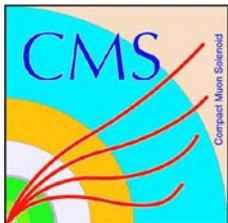
Решающий вклад в создание торцевого адронного калориметра CMS (HE) внесла коллаборация RDMS

# Оптический съём сигнала

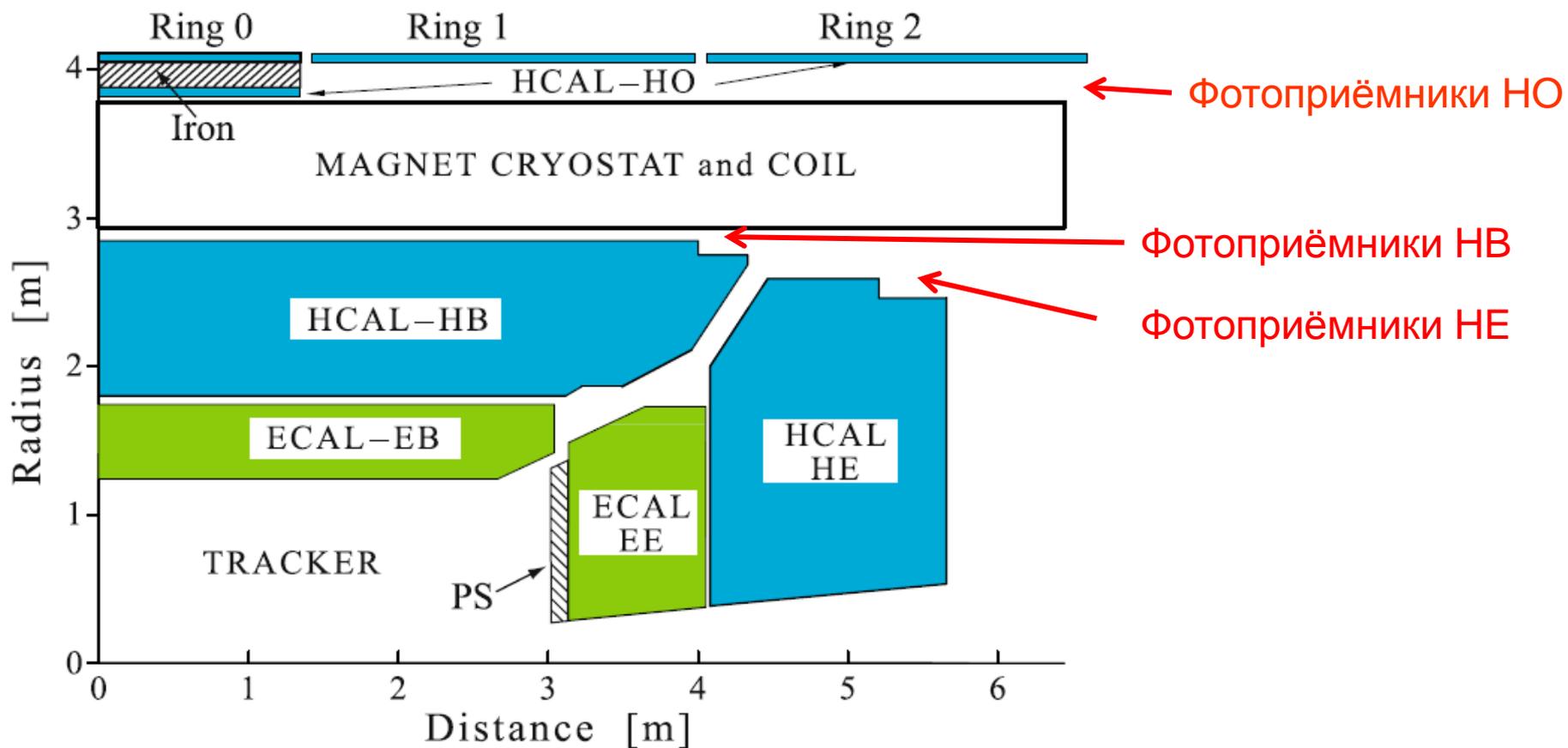
## Common Technology for HB, HE, HO

Layer to Tower Decoding Fiber





# Схема расположения фотоприёмников HCAL

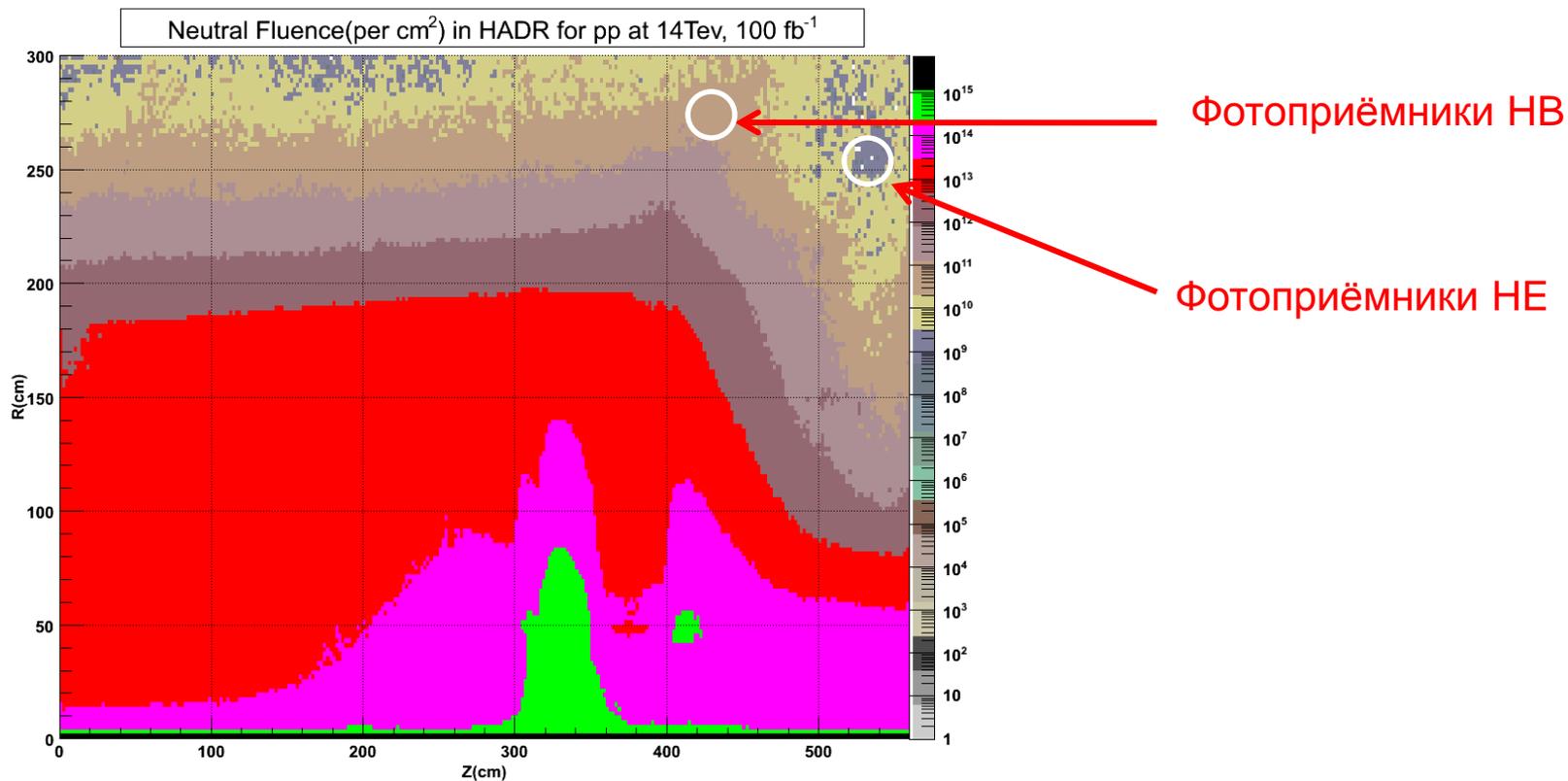




# Потоки нейтронов В CMS

Потоки нейтронов (в области фотоприёмников HCAL) за 10 лет SLHC (2000 fb<sup>-1</sup>):

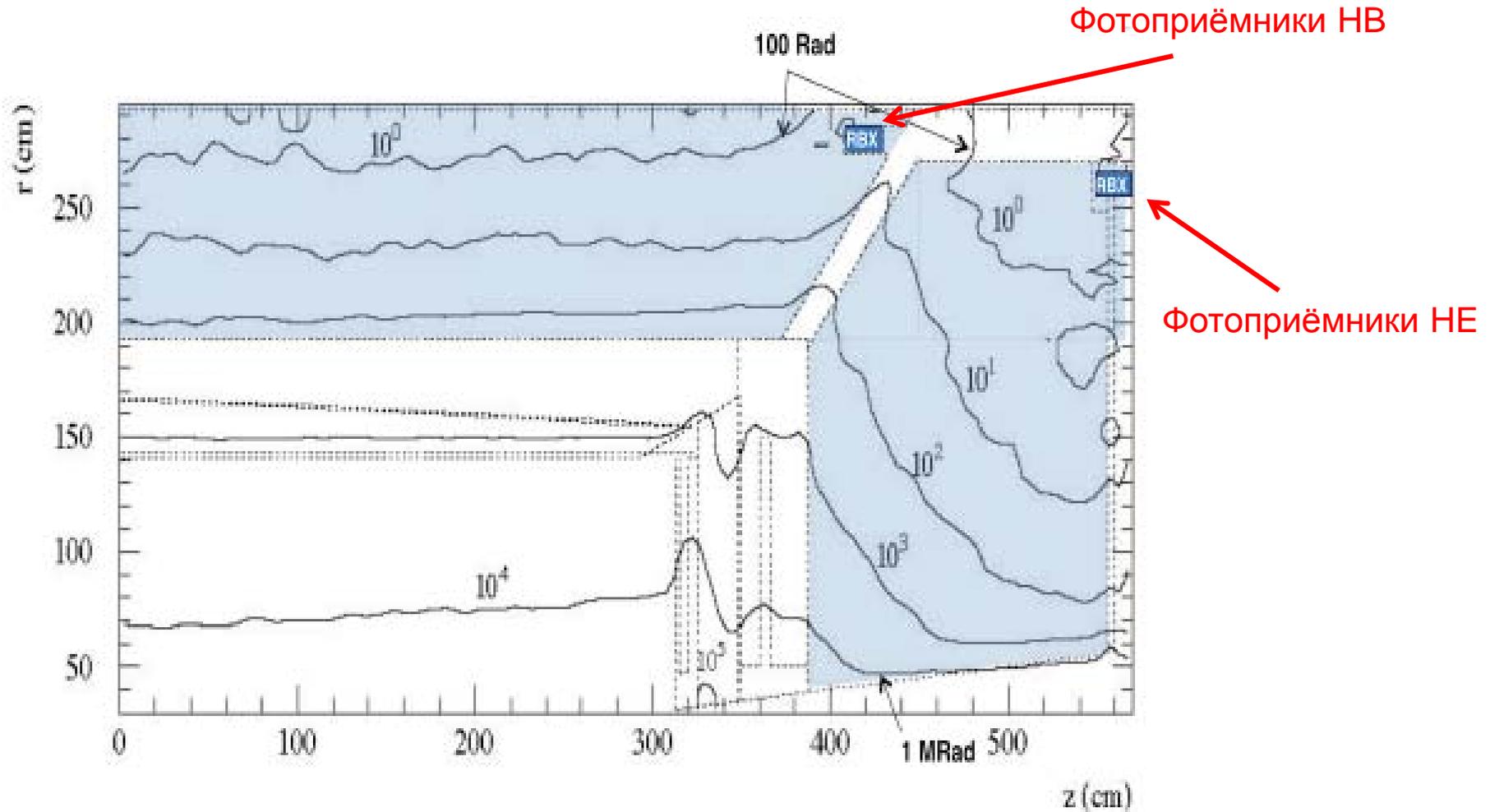
Фотоприёмники HB:  $\sim 1-2 \cdot 10^{11}$  1 MeV n/cm<sup>2</sup>, Фотоприёмники HB&HE:  $\sim 1-2 \cdot 10^{12}$  1 MeV n/cm<sup>2</sup>



Потоки нейтронов вычислены при помощи программы MARS:  
<http://cmstrk.fnal.gov/radsim/NFluenceG.php>



# Карта поглощённой дозы в CMS (интегральная светимость 500 фмбарн<sup>-1</sup>)



Поглощённая доза (в Гр) вычислена при помощи программы FLUKA.



# Модернизация 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 ( $\sim 3 \times 10^{34} \text{ см}^{-2} \text{ сек}^{-1}$ ). Одним из важных результатов этих совещаний стало предложение заменить фотоприёмники адронного калориметра HPD на микропиксельные лавинные фотодиоды.

## Причины апгрейда:

- оказалось, что 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;
- в условиях высокой светимости калориметр будет "перегружен" сигналами от частиц с низкими энергиями (т.н. эффект наложений или "pileup"). Для лучшего выделения частиц с высокими энергиями в НВ и НЕ было предложено увеличить продольную гранулярность калориметра. Считывание сигналов с разных слоёв калориметра должно также помочь компенсировать эффект радиационных повреждений в сцинтилляторах и спектросмещающих волокнах

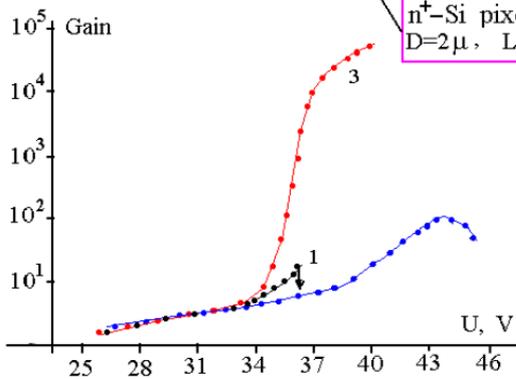
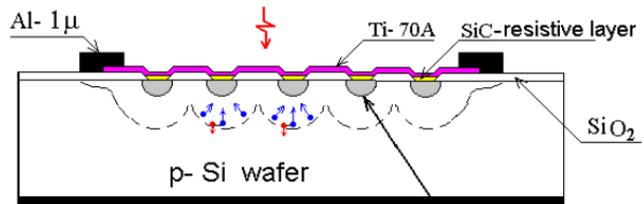
*Микропиксельные лавинные фотодиоды (МЛФД) были выбраны из-за их высокой квантовой эффективности, нечувствительности к магнитному полю, компактности и сравнительно низкой стоимости.*



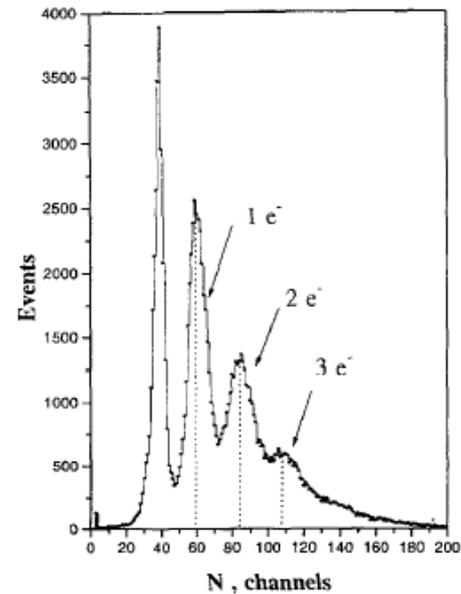
# ЛФД со структурой металл-резистор-полупроводник (MRS APD)

The very first metall-resistor-semiconductor APD (MRS APD) proposed in 1989 by A. Gasanov, V. Golovin, Z. Sadygov, N. Yusipov (Russian patent #1702831, from 10/11/1989). APDs up to  $5 \times 5 \text{ mm}^2$  were produced by MELZ factory (Moscow).

Первые МРП ЛФД: на ЛФД площадью  $0.5 \times 0.5 \text{ мм}^2$  была достигнута эффективность регистрации несколько процентов для "красных" фотонов. Удалось различить сигналы вызванные отдельными фотонами

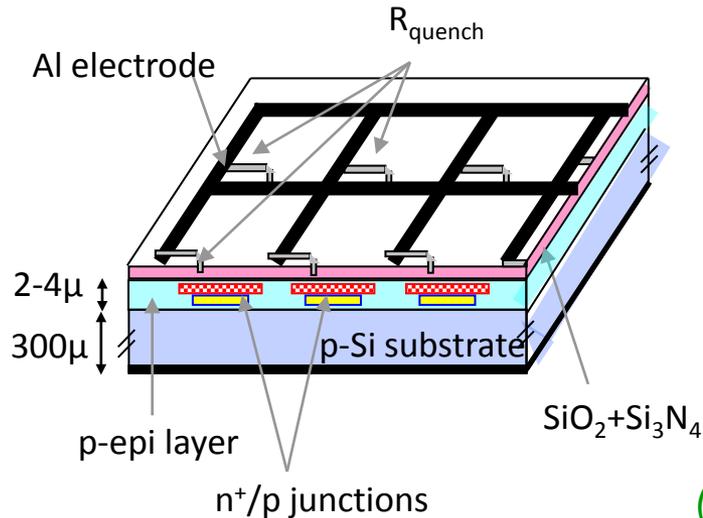


1- Si p-n-junction; 2- Si-SiC-planar structure  
3- Si-SiC-micro-pixel (micro-channel)

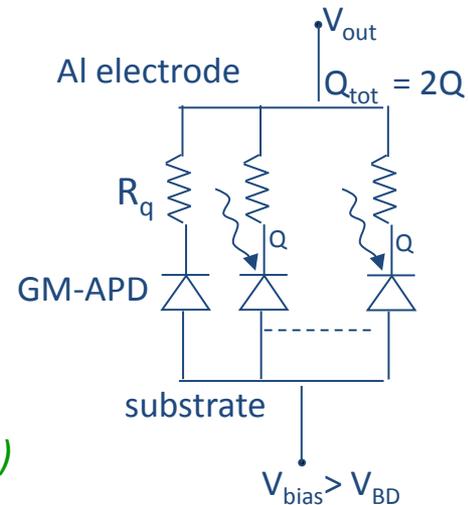


(A. Akindinov et al., NIM387 (1997) 231)

# Структура и принцип действия



(EDIT-2011, CERN)



- 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

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

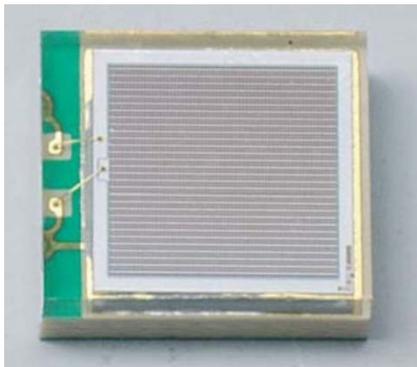


# Требования к МЛФД CMS НО HCAL

## МЛФД для НО:

- чувствительная площадь: 9 мм<sup>2</sup>;
- PDE(515нм) > 25 %;
- динамический диапазон: > 3 000;
- время восстановления ячейки < 10 микросек;
- радиационная стойкость:
  - изменение амплитуды сигнала < 20% после 1\*10<sup>11</sup> нейтронов/см<sup>2</sup>
  - темновой ток < 100 μА после 1\*10<sup>11</sup> нейтронов/см<sup>2</sup>

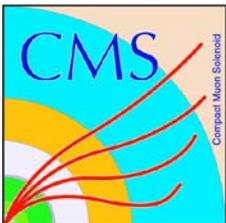
## Два МЛФД-кандидата:



МРРС (Hamamatsu)

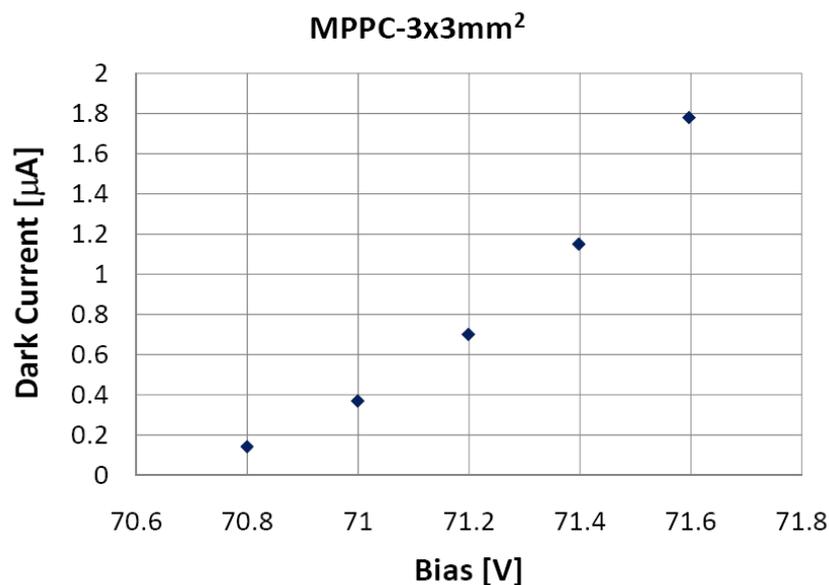
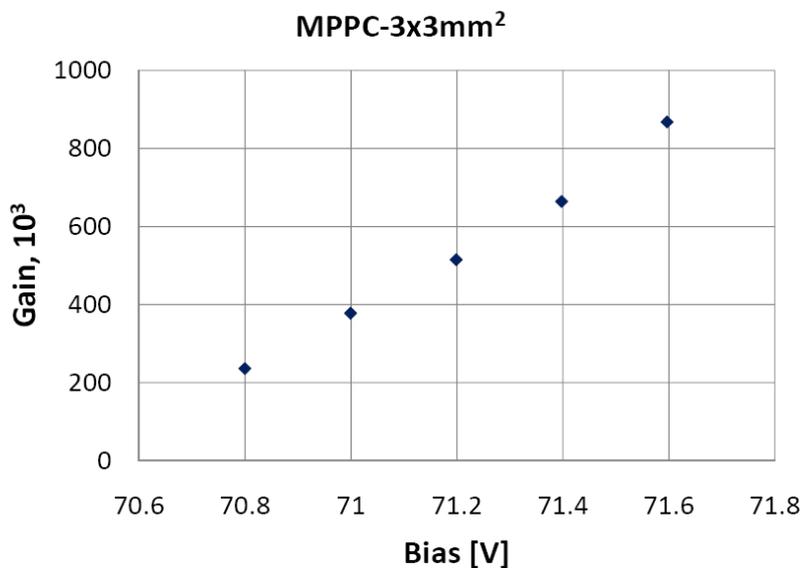
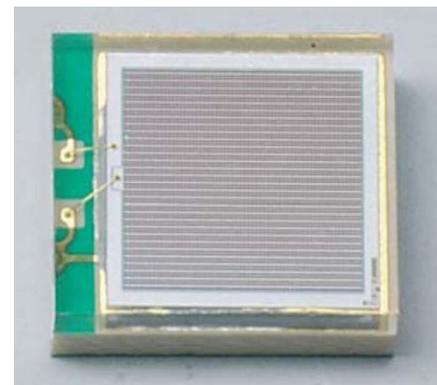


МЛФД (Zecotek)

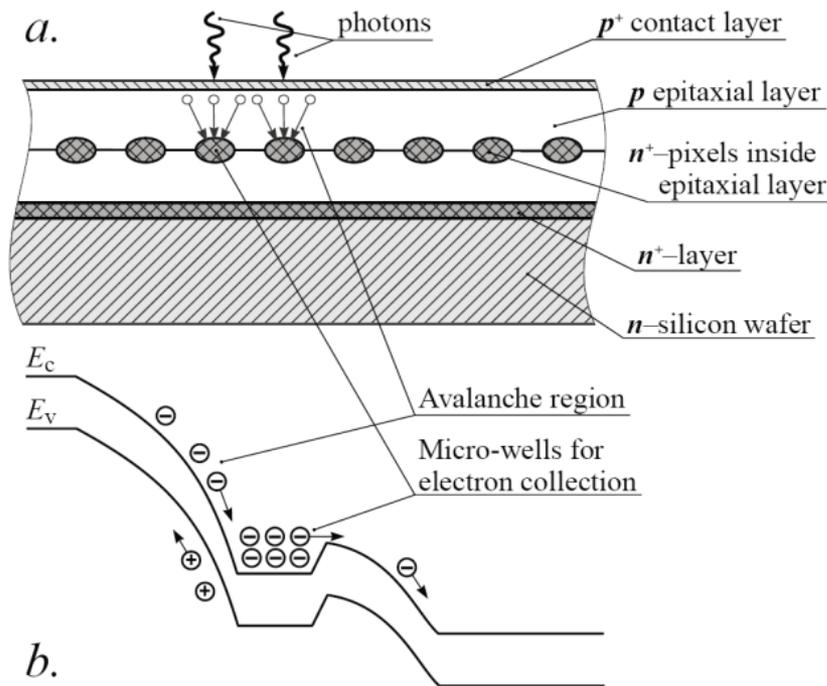


# Микропиксельные ЛФД Hamamatsu (MPPC S10931-050P)

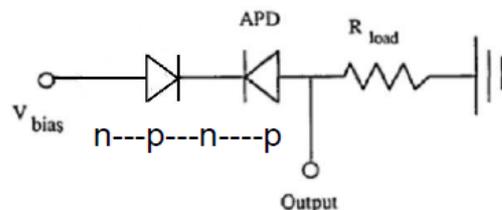
- Чувствительная площадь:  $3 \times 3 \text{ мм}^2$
- Число пикселей: 3 600 ( $400 \text{ мм}^{-2}$ )
- Рабочее напряжение:  $70 \div 72 \text{ В}$
- Темновой ток:  $0.5 \div 1.5 \text{ }\mu\text{А}$
- Коэффициент усиления:  $400 \div 900 \times 10^3$



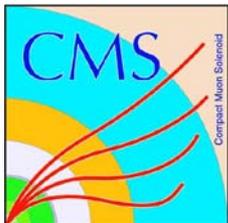
# Микропиксельные ЛФД разработанные З. Садыговым



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.

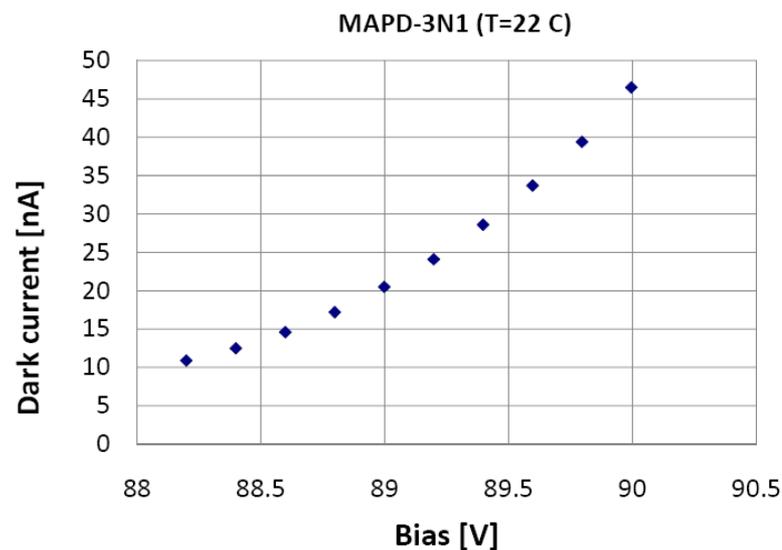
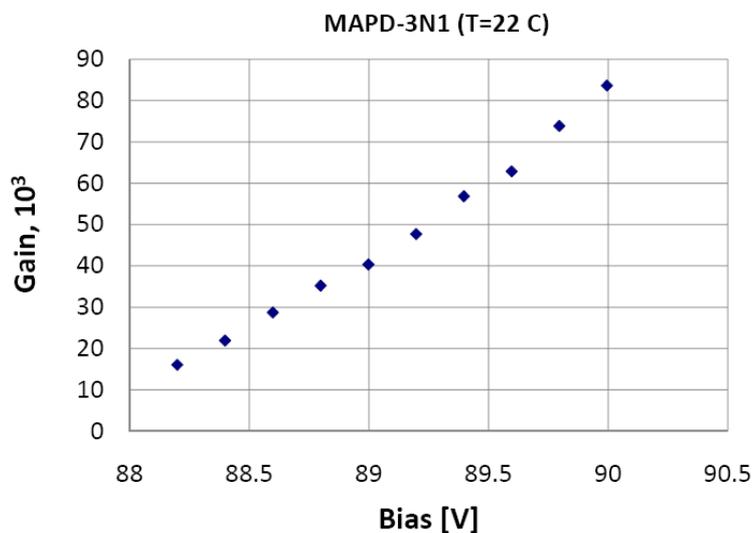


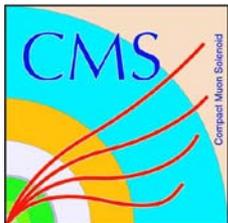
Производятся на предприятии "Микрон" (Зеленоград) и компанией Zecotek (Сингапур)



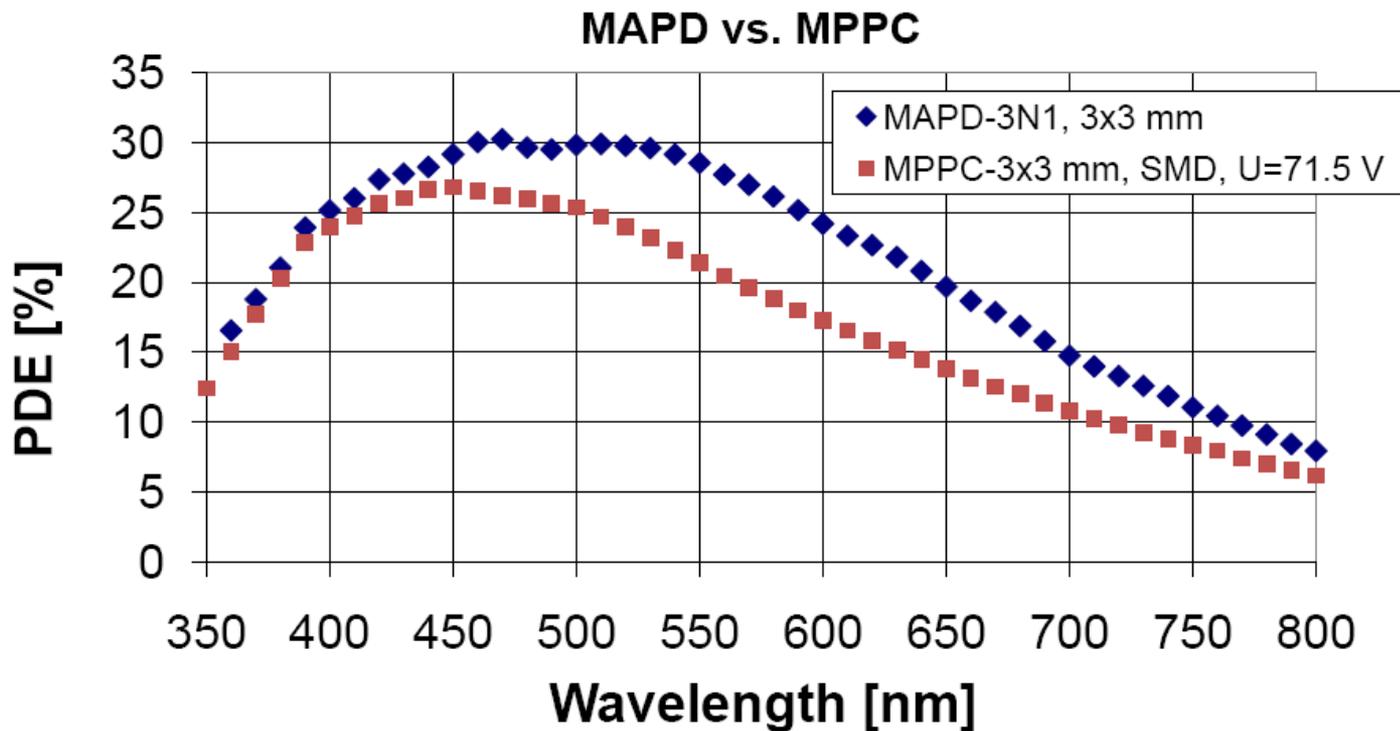
# Новые микропиксельные ЛФД Zecotek (MAPD-3N)

- Чувствительная площадь:  $3 \times 3 \text{ мм}^2$
- Число пикселей: 135 000 ( $15\,000 \text{ мм}^{-2}$ )
- Рабочее напряжение:  $89 \div 90 \text{ В}$
- Темновой ток:  $30 \div 50 \text{ нА}$
- Коэффициент усиления:  $50 \div 70 \times 10^3$

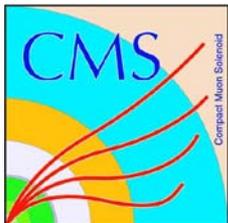




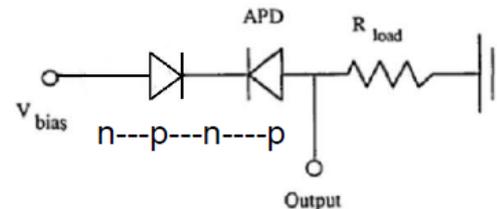
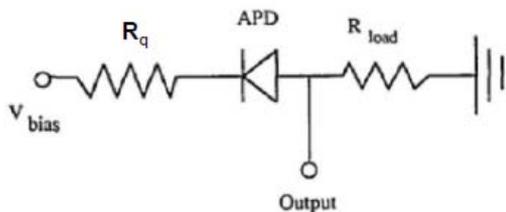
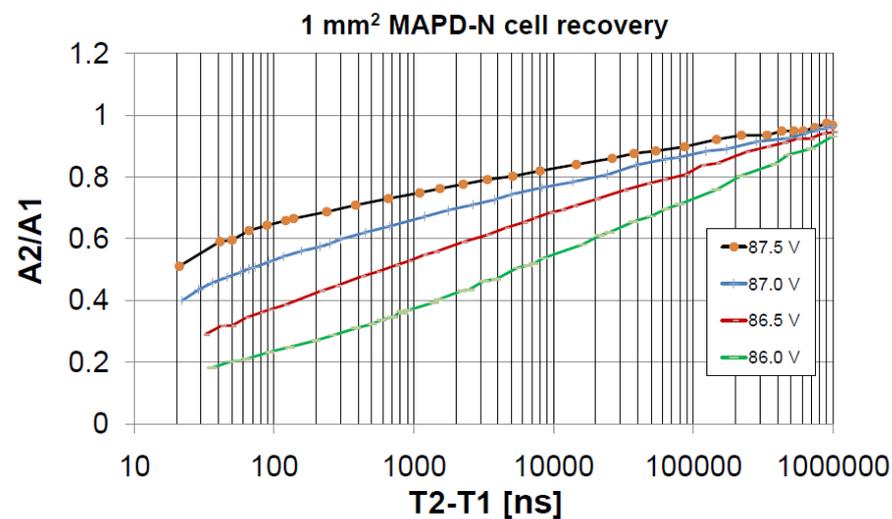
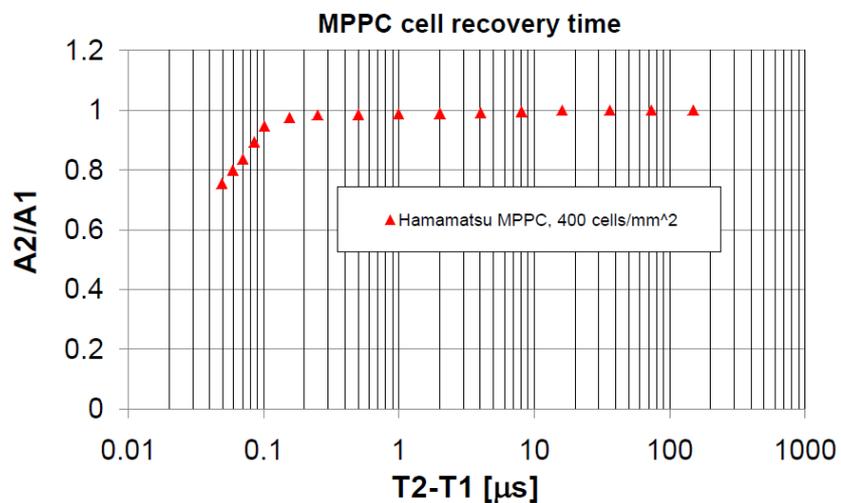
# Спектральная чувствительность МЛФД

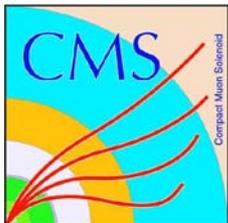


*Эффективность регистрации фотонов зелёной области спектра  $PDE(515\text{ nm}) \sim 30\%$  у MAPD-3N, что сравнимо с  $PDE(515\text{ nm})$  MPPC Hamamatsu и в 2.5 - 3 раза лучше, чем у CMS HPD.*



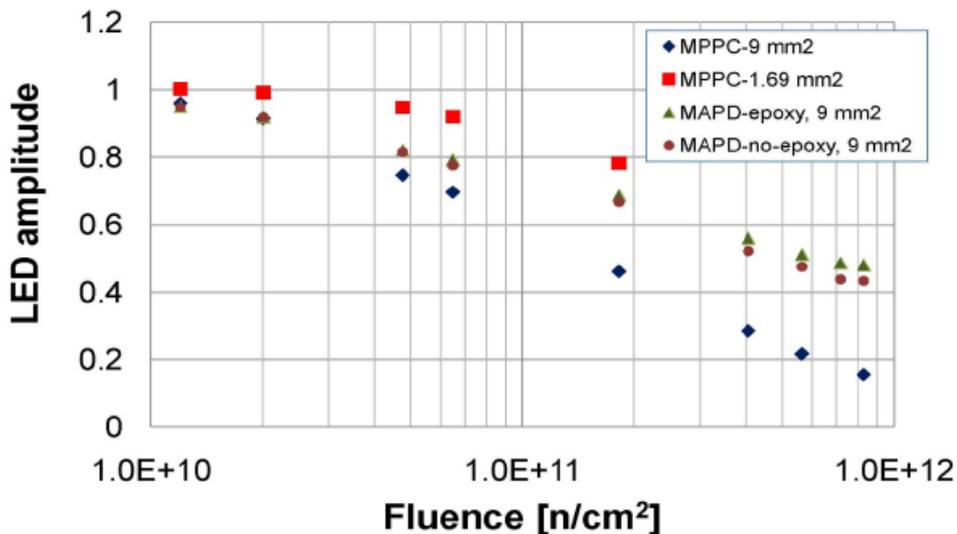
# Восстановление ячеек в ЛФД Hamamatsu и Zecotek





# Исследования радиационной стойкости на пучке нейтронов ( $E \sim 1$ МэВ)

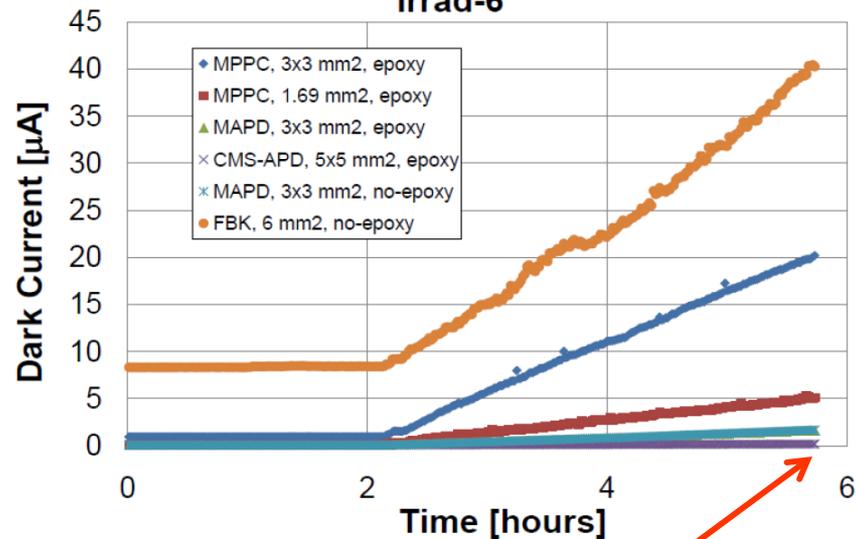
SiPM neutron irradiation at Irrad6 ( $R_{load} = 3$  kOhm)



Большая часть падения амплитуды MPPC из-за  $R_{load} = 3$  кОм

$\rightarrow R_{load}$  должен быть меньше 3 кОм ( $\sim 1$  кОм)

Irrad-6

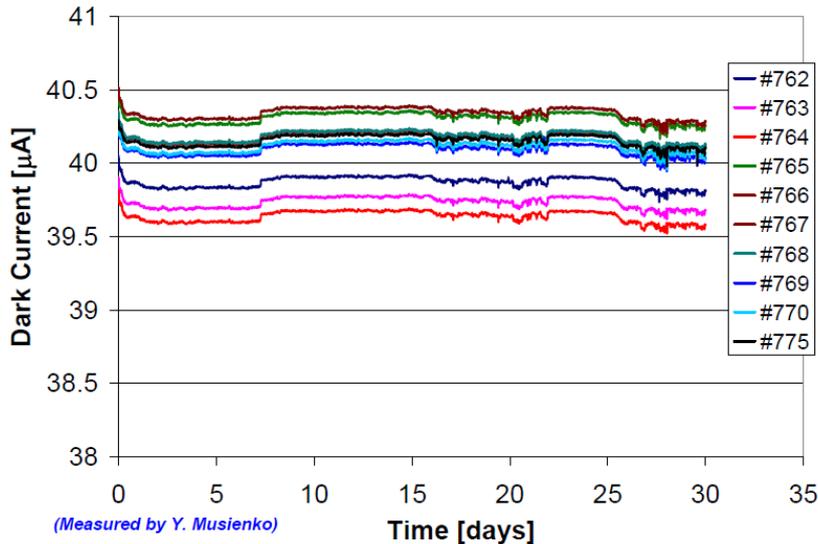


$0.4 \cdot 10^{11}$  нейтронов/ $cm^2$

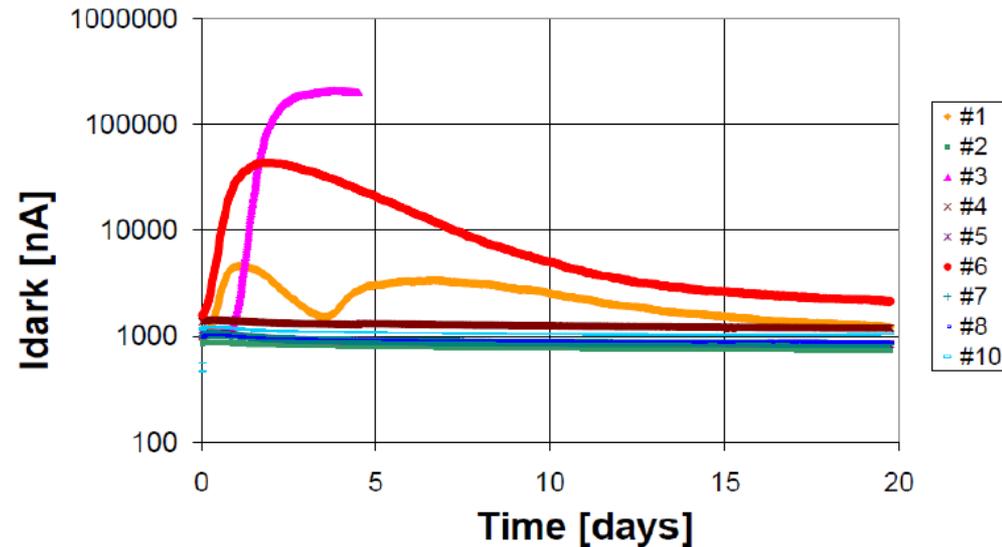


# Ускоренное старение МЛФД

3x3 mm<sup>2</sup> MPPCs from Hamamatsu, U=81.5 V, T=70 C



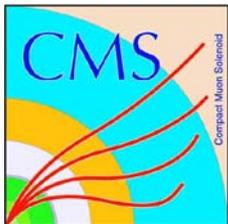
MAPDs no-epoxy, aging at T=70C



Стабильность темнового тока МЛФД изучалась температуре 70°C (фактор ускорения старения ~21). Напряжение на ЛФД соответствовало рабочему при T=70 °C. Темновой ток ни одного из 10 MPPC (Hamamatsu) не изменился после тестов. Темновой то 3-х из 9-ти МЛФД (Zecotek) значительно вырос после процедуры ускоренного старения.

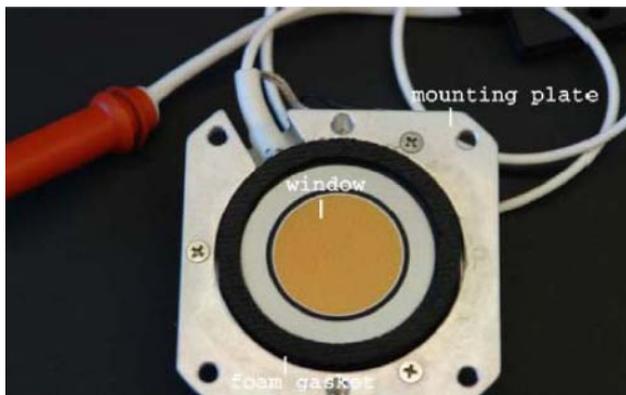
$$MTTF_{T1} = MTTF_{T2} \times e^{\frac{E \cdot (T2 - T1)}{k_B \times T2 \times T1}}$$

with  $E = 0.53$  eV and  $k_B$  the Boltzmann constant.

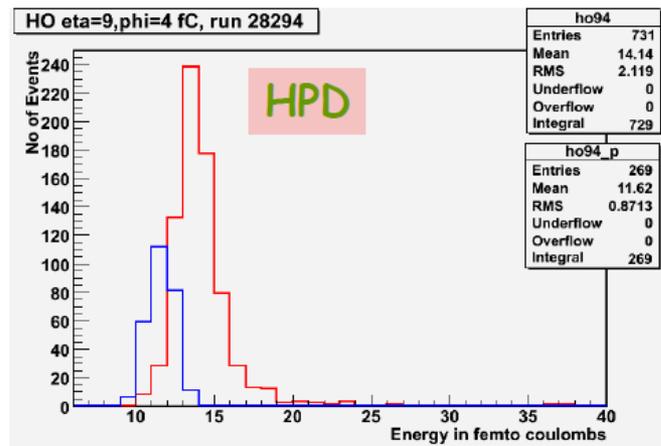


# Пучковые тесты модуля с МЛФД

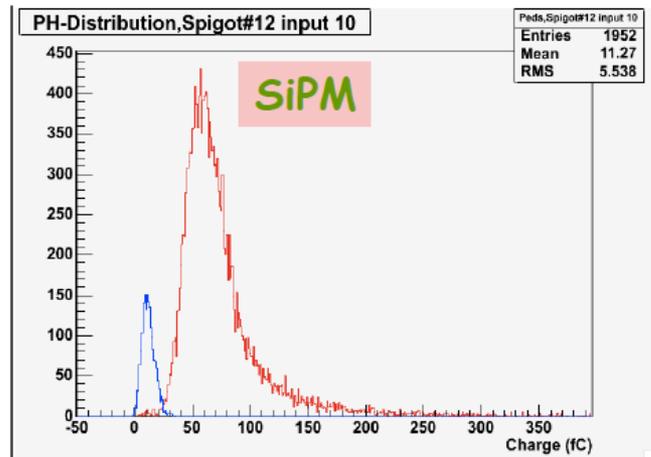
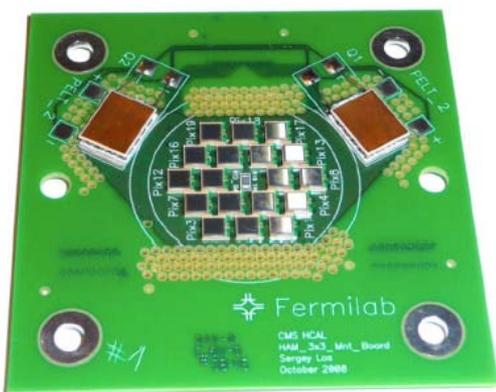
HPD



Сигналы от мюонов в НО  
(фотоприёмники: HPD и МЛФД)



Модуль с МЛФД





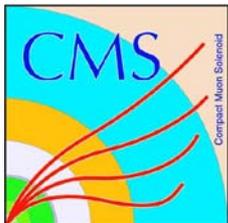
# Планы модернизации CMS НО HСAL.

В апреле 2010 года MPPC (Hamamatsu) выбран в качестве фотоприёмника для модернизации CMS НО HСAL

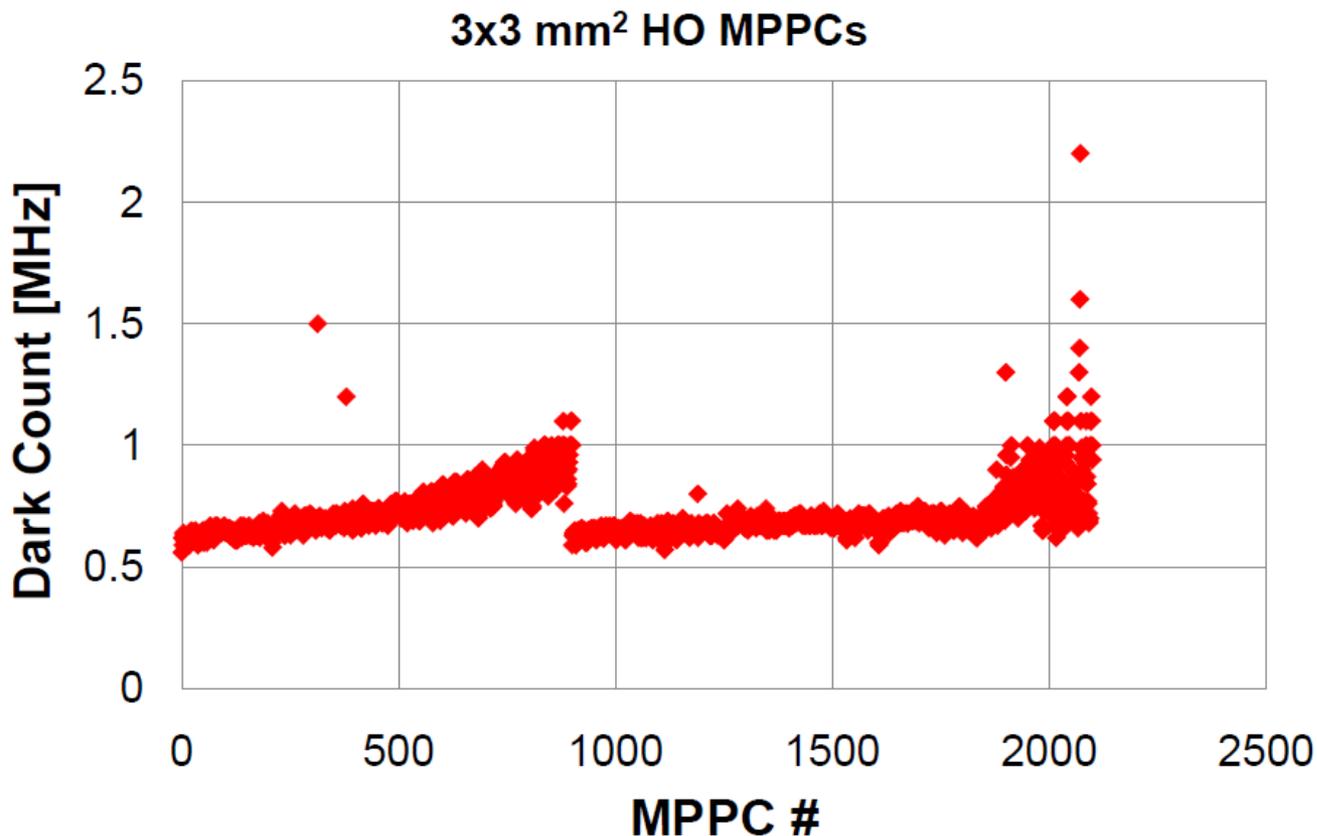
- **намного быстрее время восстановления ячейки;**
- **положительный тест на ускоренное старение МЛФД**

## Планы замены HPD на MPPC:

- производство ~3000 MPPC (первая половина 2011 года);
- измерение и отбраковка MPPC для CMS НО HСAL (2011 год)
- изготовление RM (Readout Module) для CMS НО HСAL (вторая половина 2011 года)
- замена RM с HPD на RM с MPPC (2013 год)



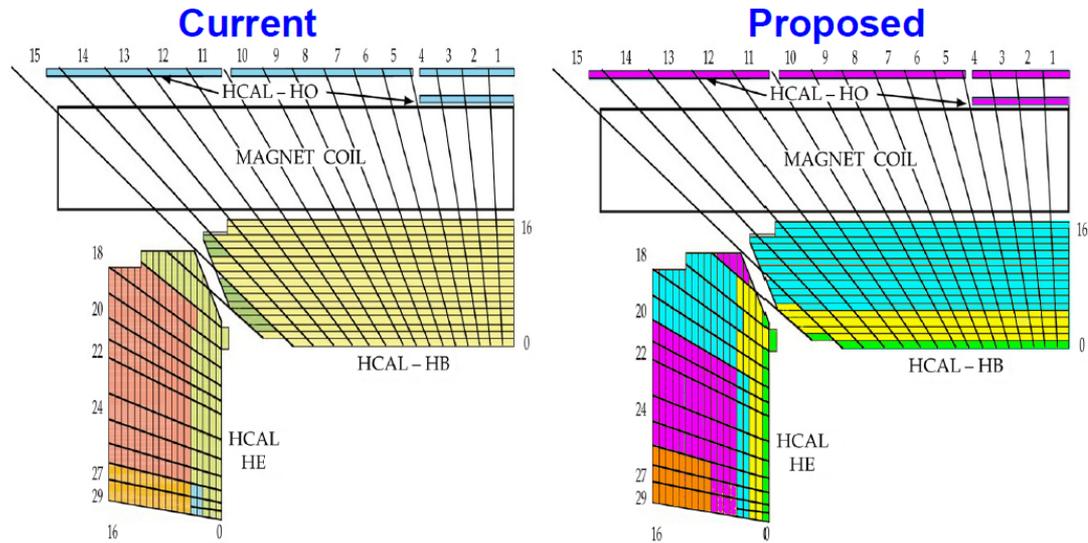
# Темновой счёт (порог 0.5 электрона) 2100 MPPC для CMS NO HCAL.



На 9-ое марта 2011 года Hamamatsu поставила в CMS 2100 MPPC.

Темновой счёт 99.5% MPPC (при  $T=25$  C и пороге 0.5 электрона):  $\leq 1.1$  МГц

# Модернизация HB/HE



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

➔ Longitudinal Segmentation

21

## Продольная сегментация калориметра:

- позволит улучшить выделение частиц высоких энергий из фоновых событий в условиях высокой светимости SLHC
- позволит корректировать изменение сигналов разных частей калориметра, произошедших в результате радиационных повреждений сцинтиллятора и волокон
- улучшит временное разрешение адронного калориметра



# Требования к МЛФД CMS НВ/НЕ HSCAL

***Требуются совершенно новые МЛФД для модернизации НВ/НЕ***

Требования к МЛФД для НВ/НЕ:

- чувствительная площадь:  $1 \text{ мм}^2$  ( $4.84 \text{ мм}^2$ )
- PDE(515нм) > 15-20 %;
- динамический диапазон: > 25 000;
- время восстановления ячейки (95%) < 1 мсек;
- радиационная стойкость:
  - изменение амплитуды сигнала < 10% после  $1 \cdot 10^{12}$  нейтронов/см<sup>2</sup>
  - темновой ток < 20  $\mu\text{A}/\text{мм}^2$  после  $1 \cdot 10^{12}$  нейтронов/см<sup>2</sup>



# МЛФД/кандидаты для CMS HB/HE HCAL

## MPPC S10931-025P Hamamatsu:

- PDE(515нм)=25 %;
- динамический диапазон: > 1600 ячеек/мм<sup>2</sup> (7744 ячеек (для 4.84 мм<sup>2</sup>) << 25 000)
- время восстановления ячейки:  $\tau \sim 6$  нсек

## МЛФД Zecotek:

- PDE(515нм)=25-30 %;
- динамический диапазон: 15 000 ячеек/мм<sup>2</sup> (72 600 ячеек (для 4.84 мм<sup>2</sup>))
- время восстановления ячейки (95%):  $\sim 1$  мсек  $\gg 1$   $\mu$ сек

*Линейка МЛФД, предложенная и изготовленная Zecotek для CMS HCAL*



*Ни один из существующих МЛФД не удовлетворил требованиям CMS HCAL → принято решение разработать новый МЛФД для CMS HCAL*



# Цели R&D (Hamamatsu)

Технология Hamamatsu не позволяет изготавливать МЛФД с высокой плотностью ячеек ( $>5\ 000$  ячеек/мм<sup>2</sup>) и с высоким PDE ( $>15\%$ ). Однако технология Hamamatsu позволяет получать очень быстрые времена восстановления ячейки ( $<6$  нсек). Быстровосстанавливающиеся ячейки способны срабатывать несколько раз за время световой вспышки волокна Y11 ( $\sim 10$  нсек), что должно привести к эффективному увеличению динамического диапазона ЛФД. Hamamatsu было предложено разработать МЛФД обладающие следующими параметрами:

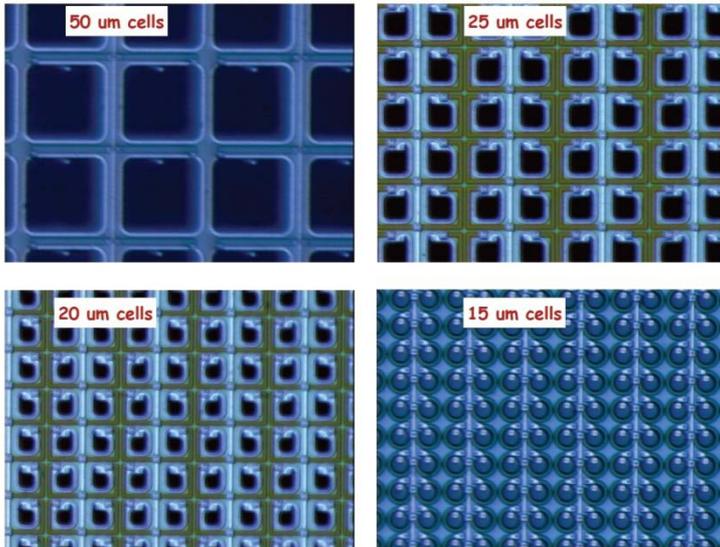
- PDE(515нм) $>15\%$ ;
- динамический диапазон: 25 000 ячеек для  $S=4.84$  мм<sup>2</sup> (4 000-5000 ячеек/ мм<sup>2</sup>)
- время восстановления ячейки:  $\tau \sim 5$  нсек
- коэффициент усиления (PDE(515нм)=15 %)  $<200\ 000$



# MPPC (Hamamatsu) с увеличенным динамическим диапазоном

В июне 2010-го года Hamamatsu изготовила для CMS МЛФД с увеличенным динамическим диапазоном (до ~4489 ячеек/мм<sup>2</sup>).

Фотография ячеек МЛФД, сделанная при помощи оптического микроскопа

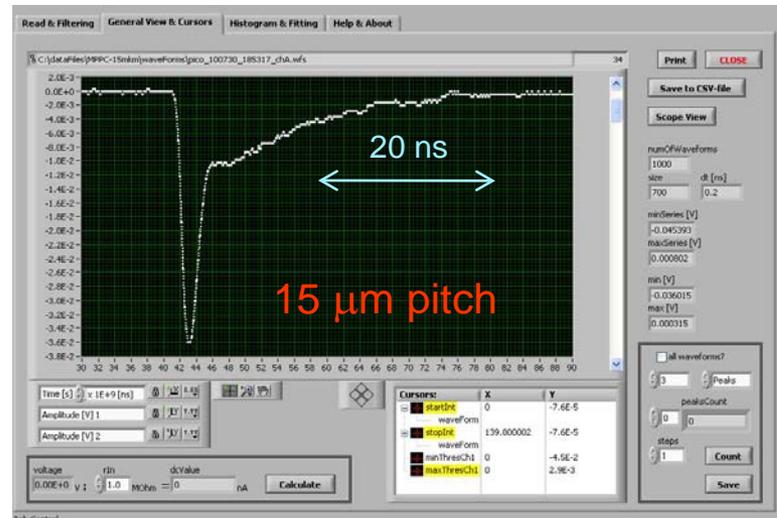
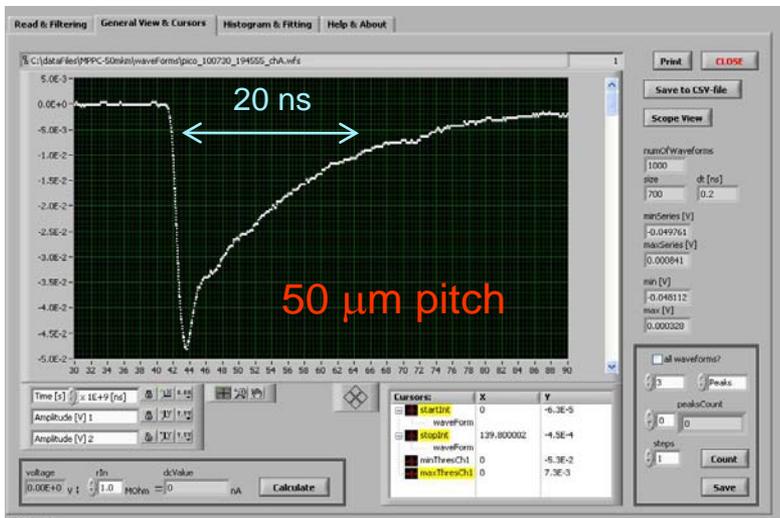
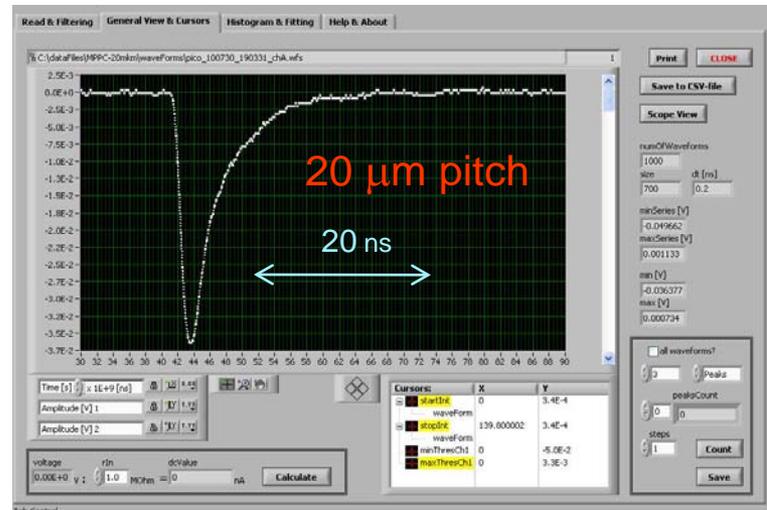
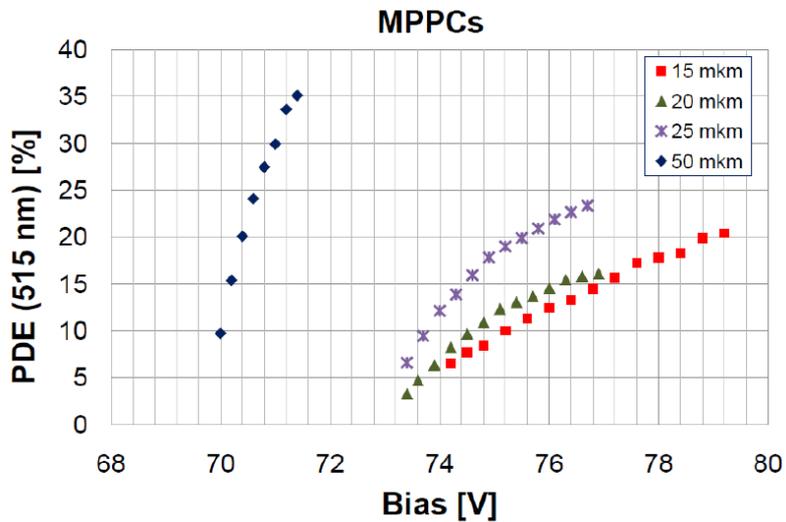


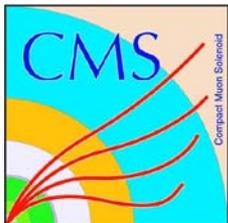
Основные параметры МЛФД (Hamamatsu)

MPPC type	# cells 1/mm <sup>2</sup>	C, pF	R <sub>cell</sub> , kOhm	C <sub>cell</sub> , fF	$\tau=R_c \times C_c$ , ns	V <sub>B</sub> , V T=23 C	V <sub>op</sub> , V T=23 C	Gain(at V <sub>op</sub> ), X10 <sup>5</sup>
15 $\mu$ m pitch	4489	30	1690	6.75	11.4	72.75	76.4	2.0
20 $\mu$ m pitch	2500	31	305	12.4	3.8	73.05	75.0	2.0
25 $\mu$ m pitch	1600	32	301	20	6.0	72.95	74.75	2.75
50 $\mu$ m pitch	400	36	141	90	12.7	69.6	70.75	7.5



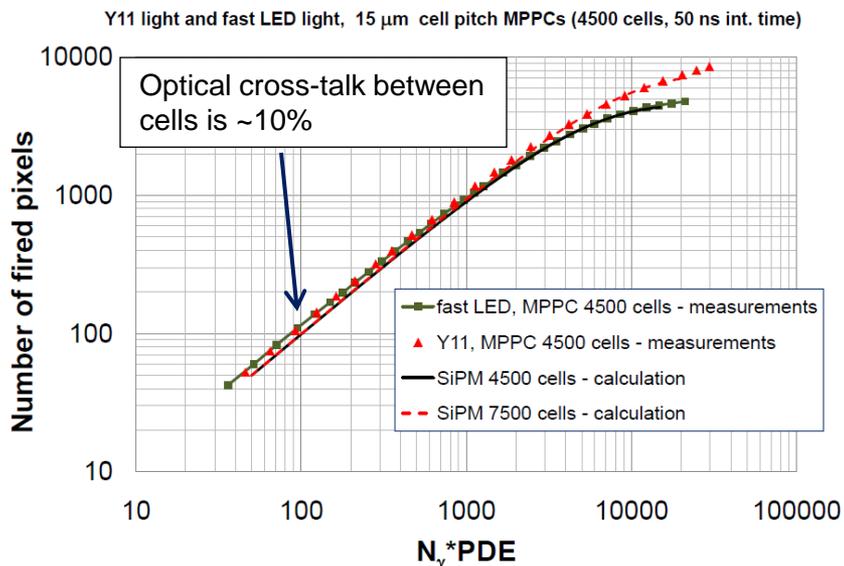
# PDE и временной отклик



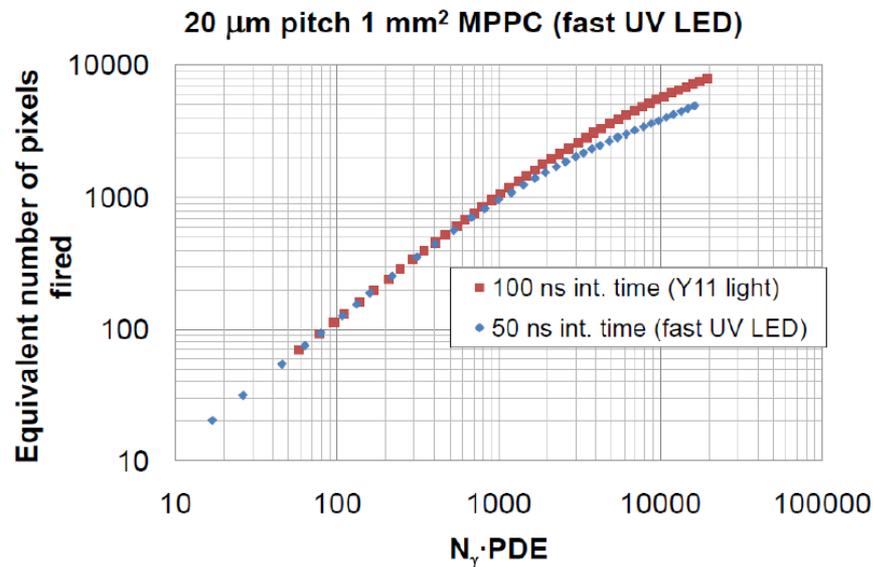


# Линейность отклика для света от WLS Y-11 и быстрого ультрафиолетового светодиода

МЛФД, 4489 ячеек



МЛФД, 2500 ячеек

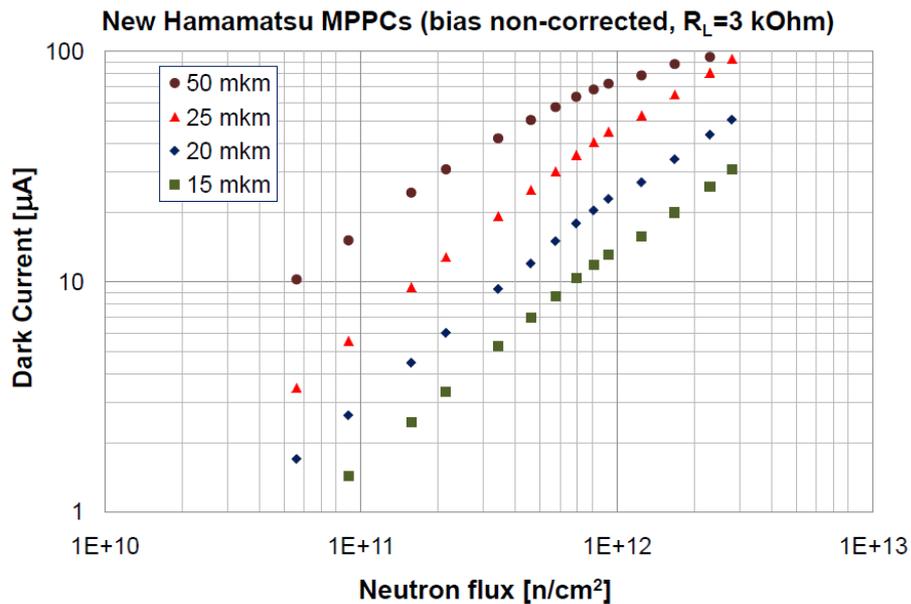
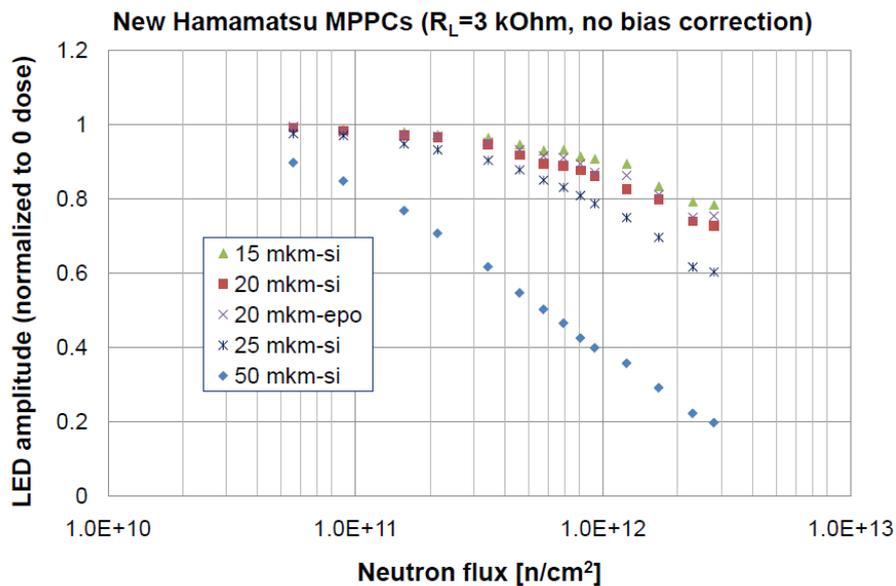


**Диапазон линейности новых МРРС для света от Y-11 значительно увеличился по сравнению с теоретическим значением, определяемым количеством ячеек МЛФД. Причина - время восстановления ячейки сравнимо (или даже короче) времени высвечивания WLS Y-11 ( $\sim 10$  нсек)  
(Спасибо Б. Лубсандоржиеву за предоставленный СД-драйвер)**



# Исследования радиационной стойкости МРРС

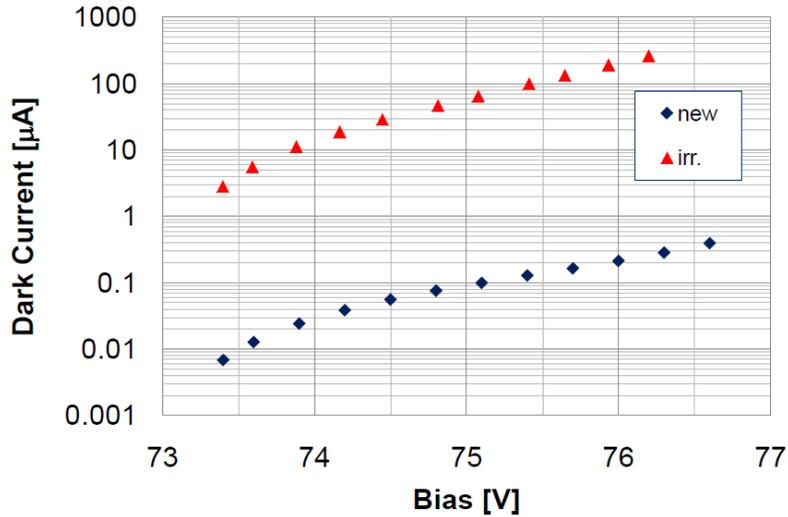
## Нейтроны, $E \sim 1$ MeV



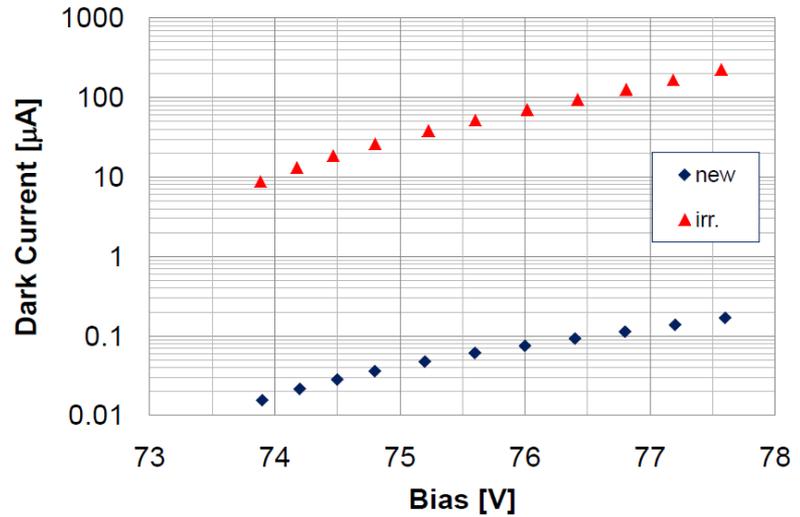


# Параметры новых МРРС (Hamamatsu) после $3 \cdot 10^{12}$ нейтронов/см<sup>2</sup>-(II)

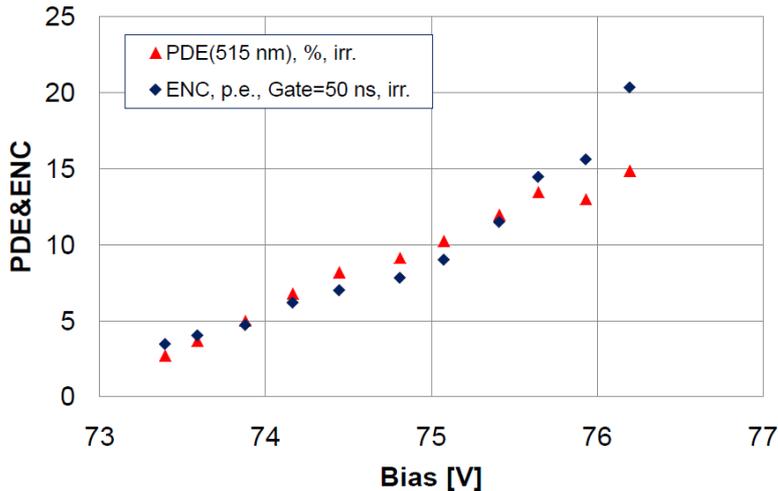
MPPC, 1 mm<sup>2</sup>, 20 micron cell pitch, after 3E12 n/cm<sup>2</sup>, T=21 C



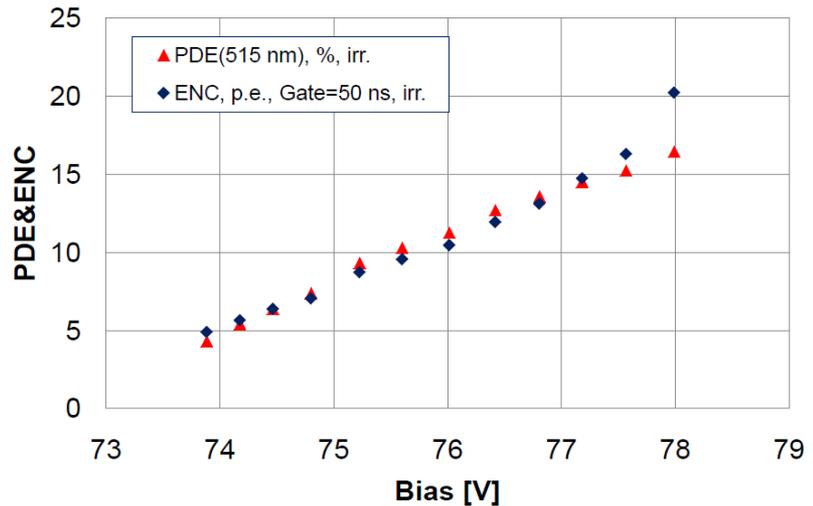
MPPC, 1 mm<sup>2</sup>, 15 micron cell pitch, after 3E12 n/cm<sup>2</sup>, T=21 C

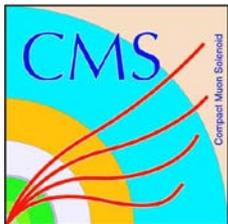


MPPC, 1 mm<sup>2</sup>, 20 micron cell pitch, after 3E12 n/cm<sup>2</sup>



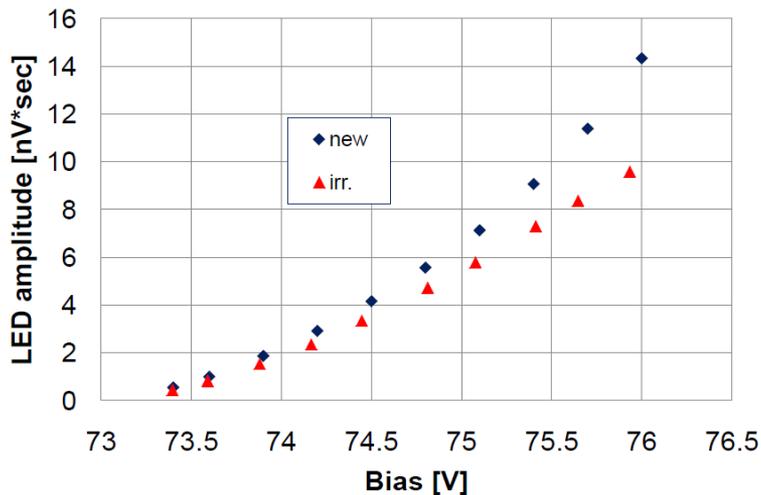
MPPC, 1 mm<sup>2</sup>, 15 micron cell pitch, after 3E12 n/cm<sup>2</sup>



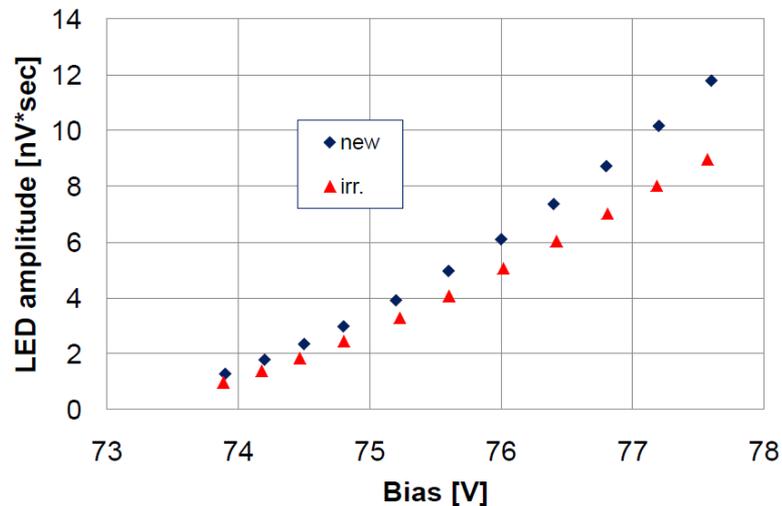


# Параметры новых МРРС (Hamamatsu) после $3 \cdot 10^{12}$ нейтронов/см<sup>2</sup>-(I)

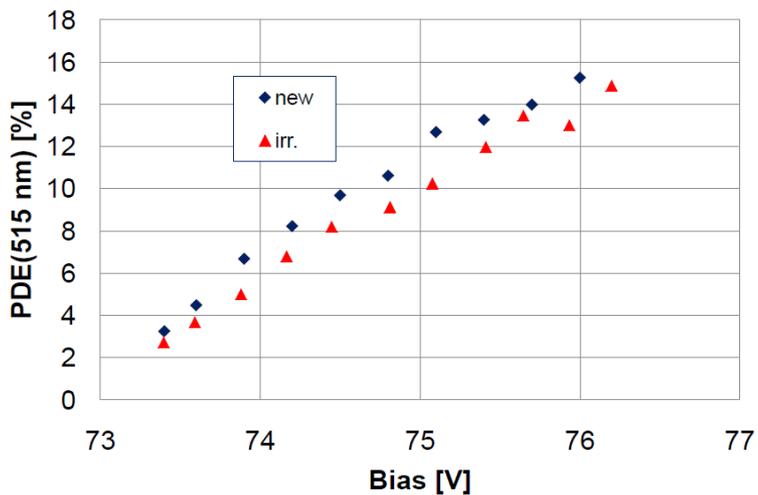
MPPC, 1 mm<sup>2</sup>, 20 micron cell pitch, after 3E12 n/cm<sup>2</sup>



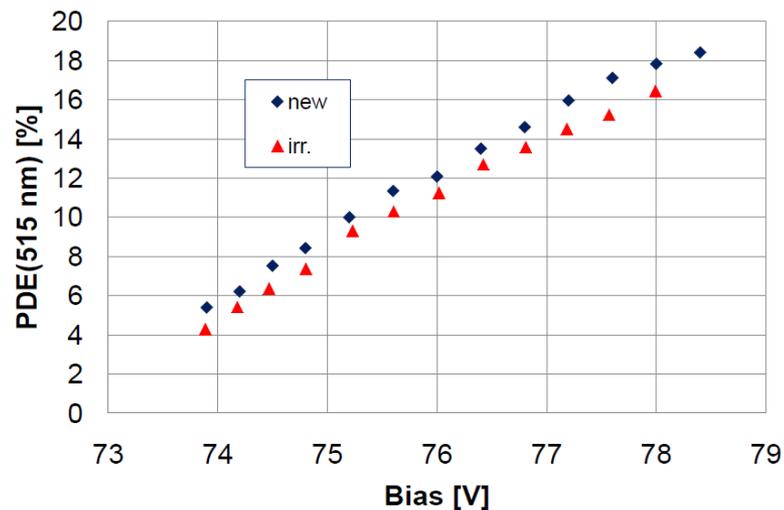
MPPC, 1 mm<sup>2</sup>, 15 micron cell pitch, after 3E12 n/cm<sup>2</sup>



MPPC, 1 mm<sup>2</sup>, 20 micron cell pitch, after 3E12 n/cm<sup>2</sup>



MPPC, 1 mm<sup>2</sup>, 15 micron cell pitch, after 3E12 n/cm<sup>2</sup>





# Планы Hamamatsu

*После ряда встреч и обсуждений результатов между Hamamatsu и группой CMS было согласовано, что к середине марта 2011 года Hamamatsu изготовит МЛФД со следующими параметрами:*

- чувствительная площадь:  $1 \text{ мм}^2$ ;
- шаг между ячейками:  $15 \text{ }\mu\text{м}$ ;
- PDE(515 нм):  $>15 \%$ ;
- время восстановления ячейки:  $<5 \text{ нс}$ ;
- коэффициент усиления:  $<200\ 000$ .



# Цели и планы R&D (Zecotek)

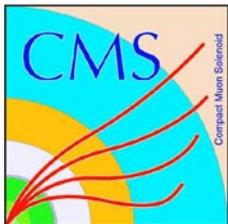
Технология Zecotek позволяет изготавливать МЛФД с высокой плотностью ячеек (>15 000 ячеек/мм<sup>2</sup>) и с высоким PDE (>25%). Однако МЛФД Zecotek имеют медленные времена восстановления ячейки (95% восстанавливается за ~1 мсек). В июне 2010 года между CMS и Zecotek было подписано соглашение о разработке ЛФД со следующими параметрами :

- PDE(515нм)>15 %;
- динамический диапазон: 27 000 ячеек для 1 мм<sup>2</sup> (130 680 ячеек для S=4.84 мм<sup>2</sup>)
- время восстановления ячейки: (95% амплитуды сигнала за ~1 микросек).
- коэффициент усиления (PDE(515нм)=15 %) <100 000

*МЛФД с такими параметрами был бы идеальным фотоприёмником для апгрейда CMS HCAL!*

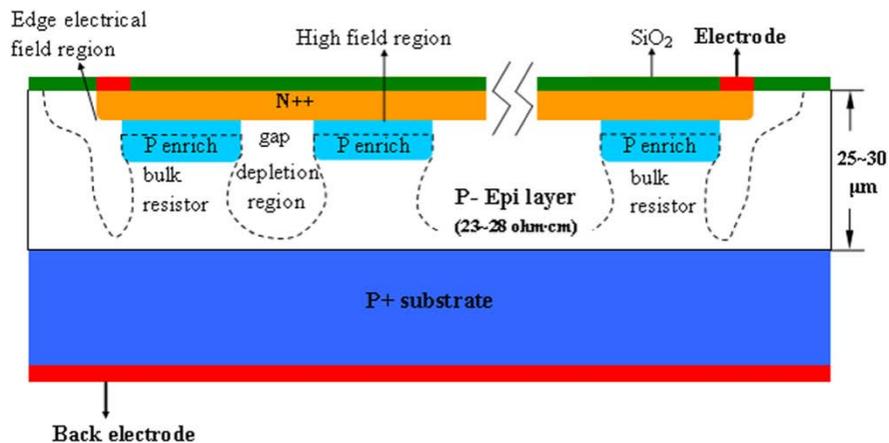
*Планы Zecotek: изготовление МЛФД площадью 1 мм<sup>2</sup> и малым временем восстановления ячейки (< 1 микросек) к началу июня 2011 года.*

# “Third party” vendors in the Game



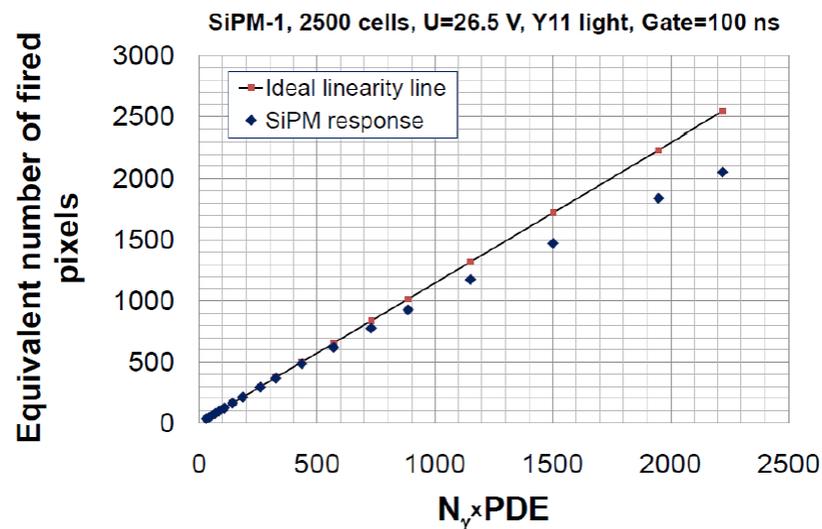
# МЛФД с "объёмными" резисторами (made in China)

МЛФД с "объёмными" (вертикальными) резисторами предложен в Институте Макса Планка (Германия)



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

Линейность отклика для света от WLS Y-11



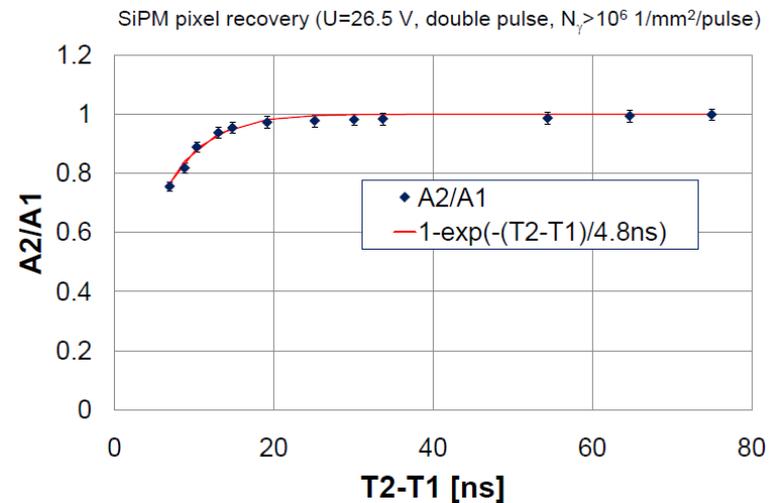
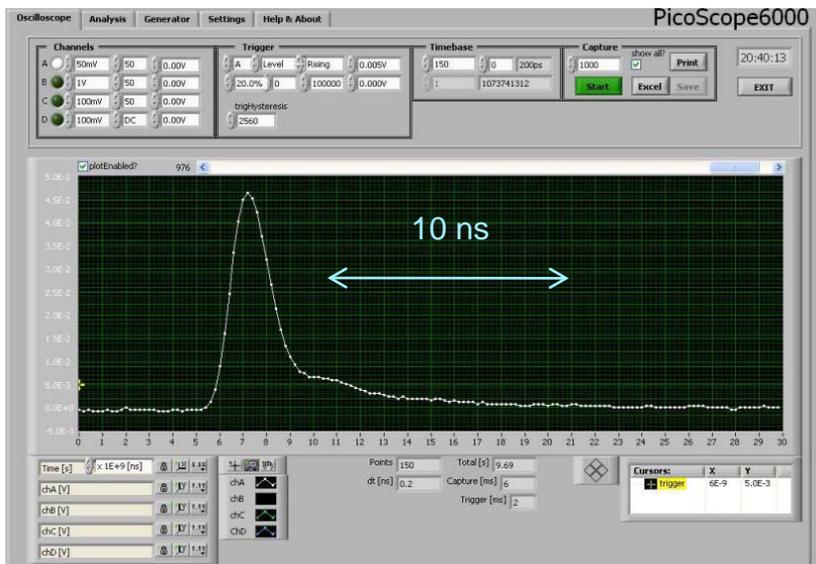
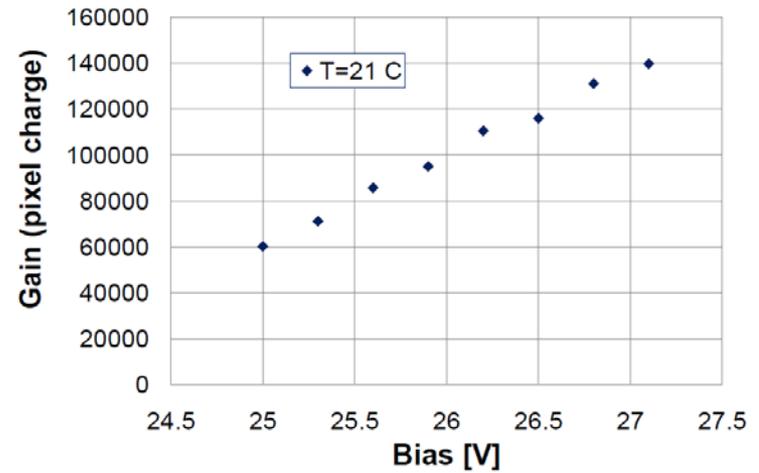
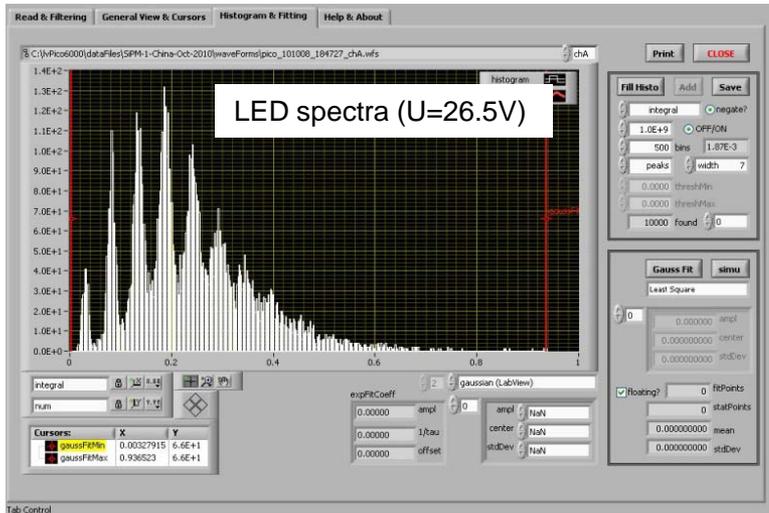
Novel Device Laboratory (Пекин, Китай) разработали и изготовили МЛФД с "объёмными" резисторами:

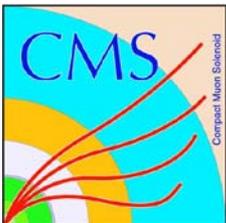
- чувствительная площадь - 0.25 мм<sup>2</sup>
- число ячеек - 2 500
- рабочее напряжение - 26.5 В
- величина гасящего сопротивления - 200-300 кОм

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

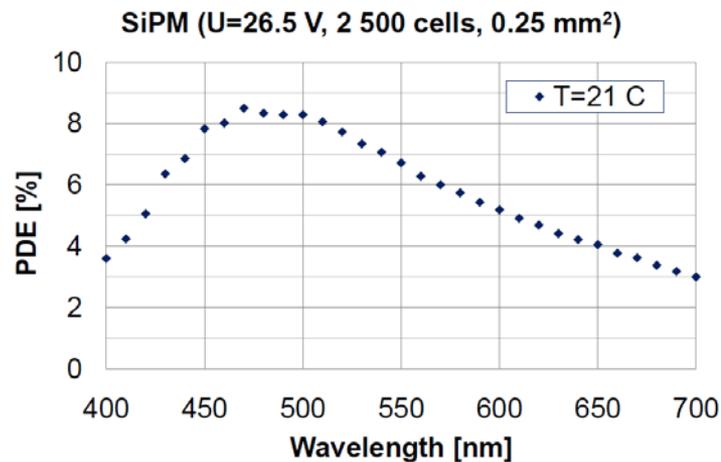
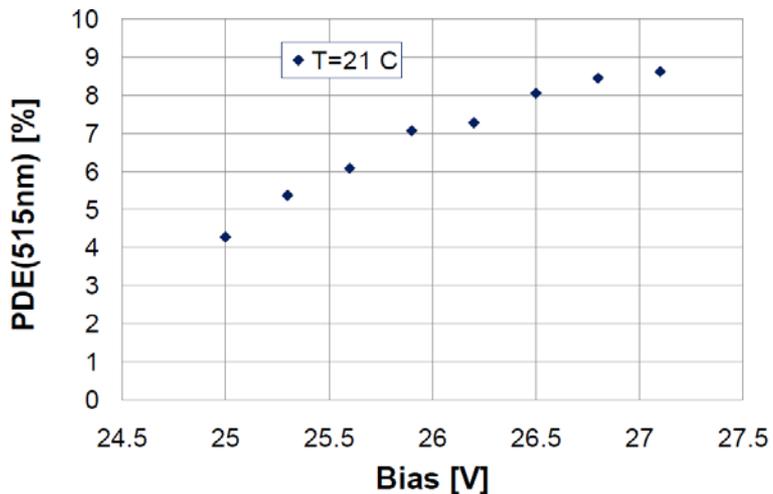
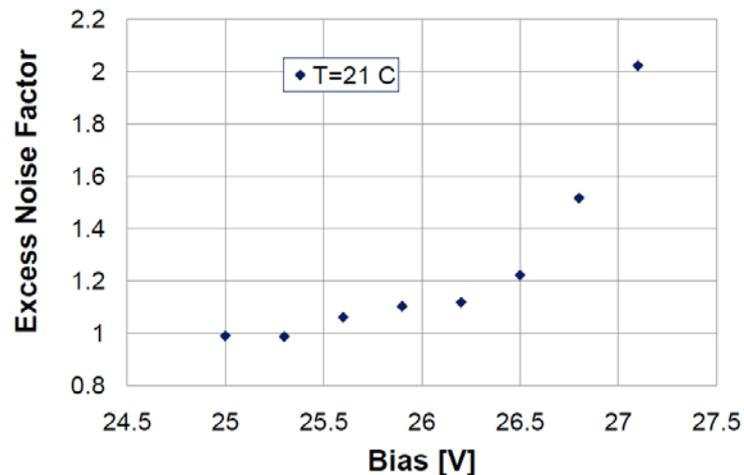
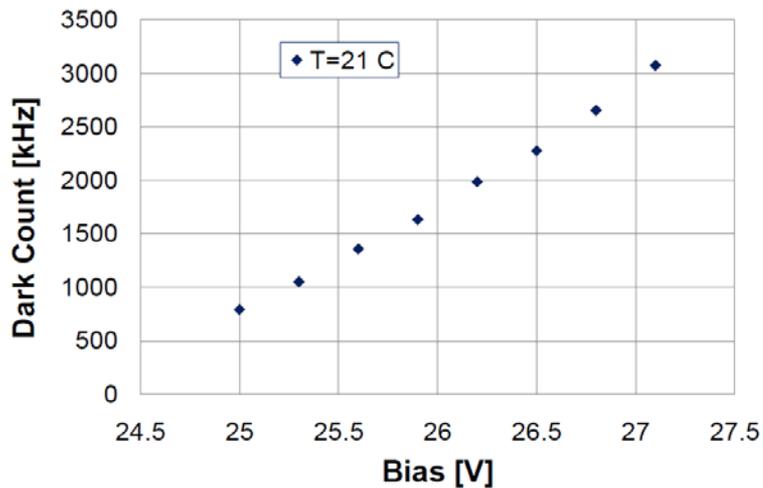


# Параметры МЛФД (NDL) - I





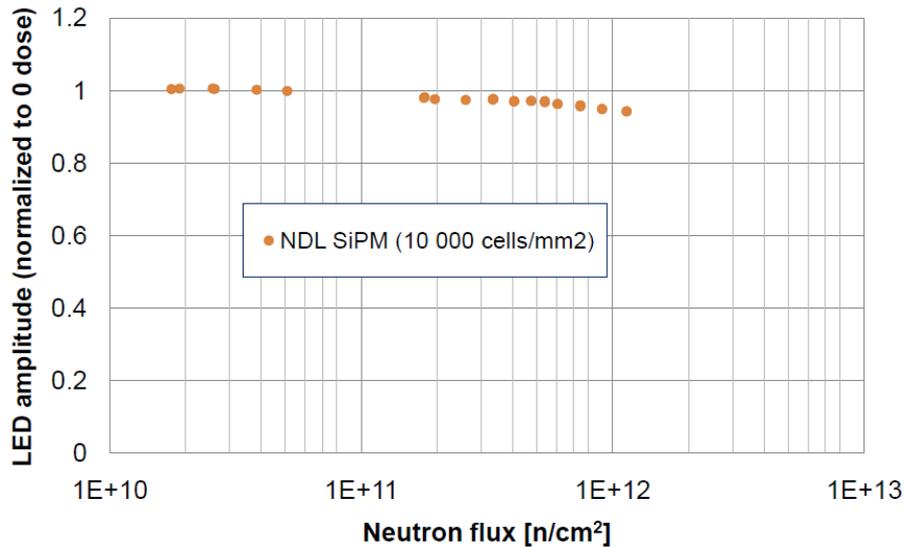
# Параметры МЛФД (NDL) - II



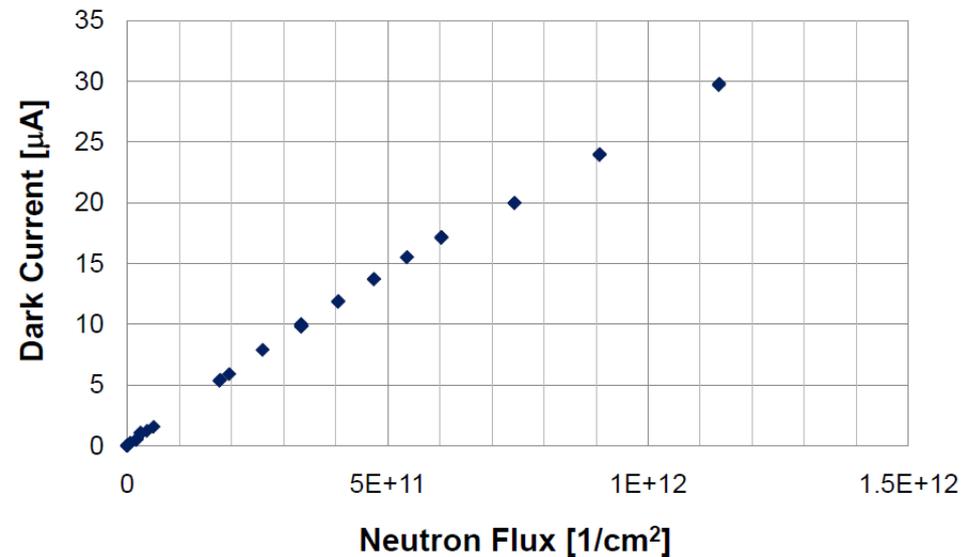


# МЛФД (NDL) во время облучения нейтронами

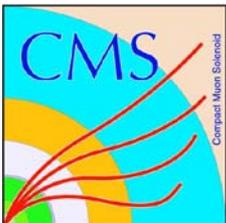
NDL SiPM ( $R_L=3\text{ k}\Omega$ , no bias correction)



NDL SiPM#6 under neutron irradiation,  $U=26.0\text{ V}$   $T=22\text{ C}$

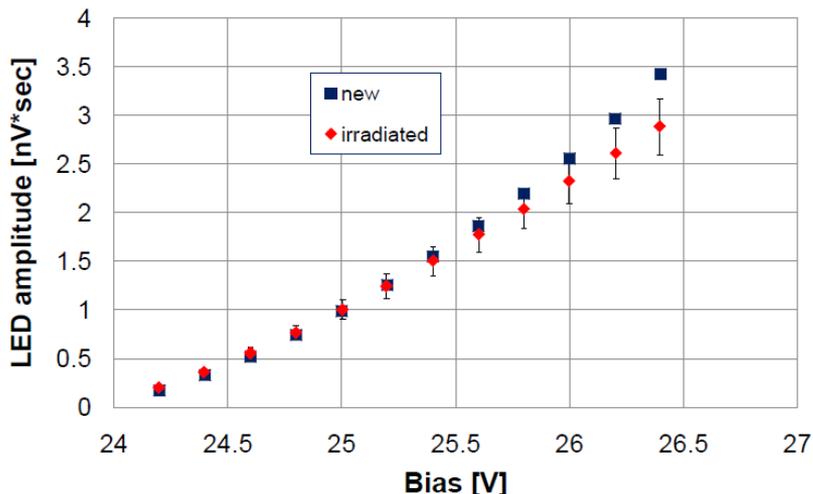


Два года назад только MAPD (Zecotek, тип A и B) могли работать при потоках нейтронов  $>3 \cdot 10^{12}\text{ см}^{-2}$ . Сейчас MAPDs (Zecotek, тип A и B), MPPCs (15 и 20  $\mu\text{m}$ ) (Hamamatsu) и SiPM (NDL, China) способны работать в потоках нейтронов вплоть до  $3 \cdot 10^{12}\text{ см}^{-2}$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

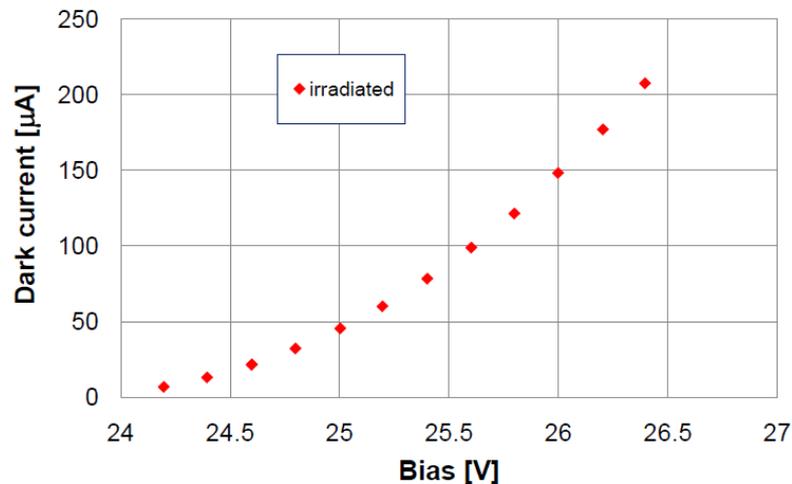


# Параметры МЛФД (NDL) после $1 \cdot 10^{13}$ нейтронов/см<sup>2</sup>

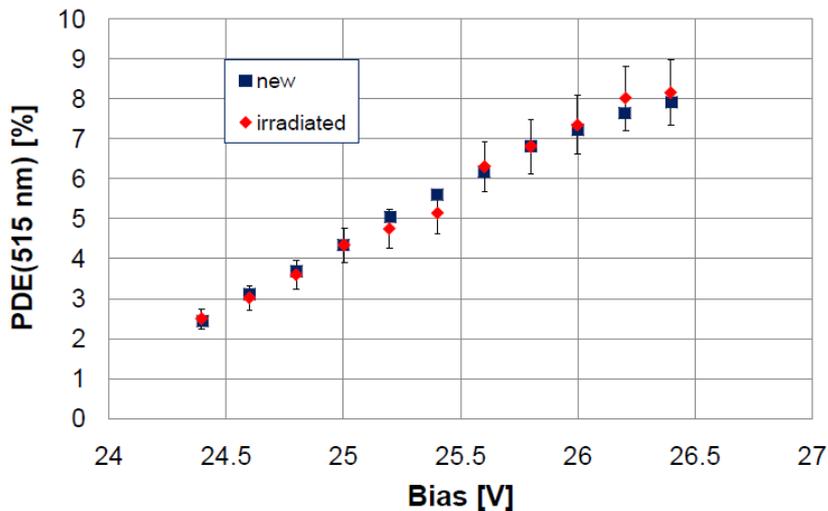
NDL SiPM after  $1E13$  neutrons/cm<sup>2</sup>, T=22 C



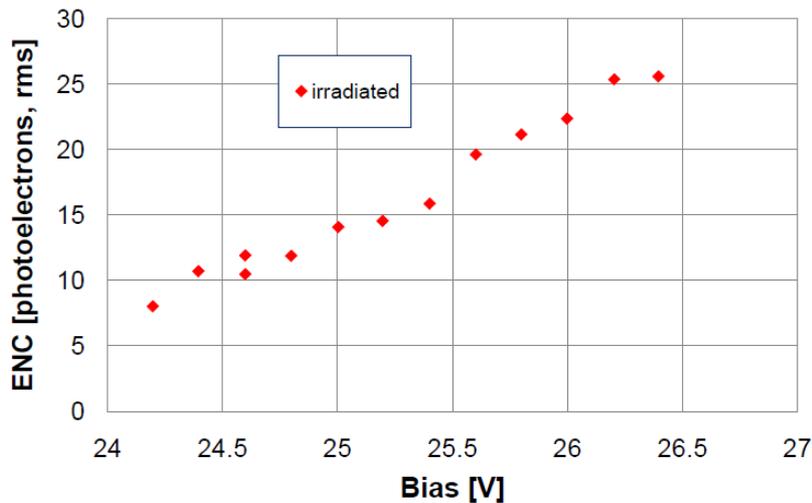
NDL SiPM after  $1E13$  neutrons/cm<sup>2</sup>, T=22 C

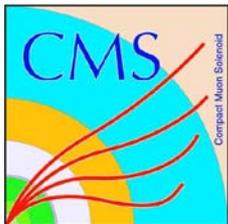


NDL SiPM after  $1E13$  neutrons/cm<sup>2</sup>, T=22 C



NDL SiPM after  $1E13$  neutrons/cm<sup>2</sup>, T=22 C, 50 ns gate





# Планы ЦПТА(Москва, Россия), FBK(Тренто, Италия)

## ЦПТА (Москва):

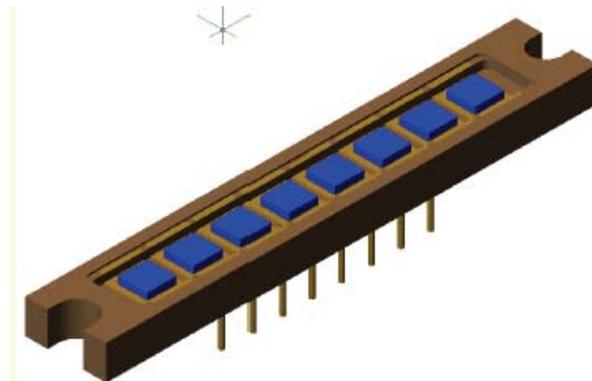
По просьбе CMS начали изготовление МЛФД с предполагаемыми параметрами:

- чувствительная площадь:  $2.2 \times 2.2$  мм<sup>2</sup>;
- динамический диапазон:  $\sim 7\,000$  ячеек/мм<sup>2</sup>;
- PDE(515нм):  $>15\%$ ;
- время восстановления ячейки:  $<100$  нсек
- коэффициент усиления:  $<200\,000$

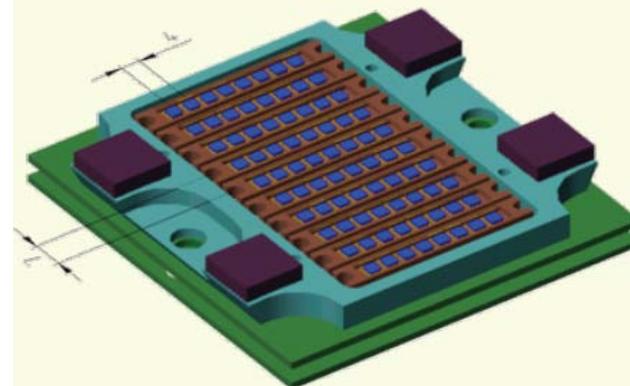
## FBK(Тренто):

- чувствительная площадь:  $2.2 \times 2.2$  мм<sup>2</sup>;
- динамический диапазон:  $\sim 2\,000$  ячеек/мм<sup>2</sup>;
- PDE(515нм):  $>12\%$ ;
- время восстановления ячейки:  $<5$  нсек
- коэффициент усиления:  $<200\,000$

## 8-ми элементная линейка



## Модуль оптического считывания на основе линеек ЛФД





# Ближайшие планы

## НО:

- производство ~3000 MPPC (декабрь 2010 - май 2011 года) (Статус на 9 марта 2011 года: получено от Hamamatsu 2 100 MPPC);
- тестирование MPPC (декабрь 2010 - июнь 2011 года)
- изготовление оптических модулей (июнь 2011- декабрь 2011 года)
- установка оптических модулей в CMS NO HCAL (январь 2013 - декабрь 2013 года)

## HB&HE:

- разработка новых МЛФД и линеек МЛФД для CMS HB&HE HCAL, удовлетворяющих условиям работы ускорителя SLHC (начало 2011-середина 2011);
- исследование радиационной стойкости (протоны, нейтроны и гамма-кванты), отклика на нейтроны и надёжности линеек МЛФД (весь 2011 год);
- пучковые тесты линеек МЛФД в модуле CMS HB&HE HCAL (июль-ноябрь 2011 год);
- утверждение электро-оптических параметров МЛФД для CMS HCAL, выбор корпуса и конструкции оптического модуля (конец 2011 года);
- совместная работа с фирмами-разработчиками ЛФД по улучшению параметров ЛФД (PDE, динамический диапазон, радиационная стойкость, надёжность...) (середина 2012 года)
- выбор производителя (середина 2012 года)
- изготовление линеек МЛФД для CMS HB&HE HCAL, ~3000-4 000 линеек (середина 2012-середина 2014 года)
- измерение/отбраковка линеек МЛФД для CMS HCAL (2012-2014 годы)
- изготовление оптических модулей (конец 2012 - начало 2016 года)
- установка оптических модулей и электроники в CMS HCAL (2016 - 2017 год)