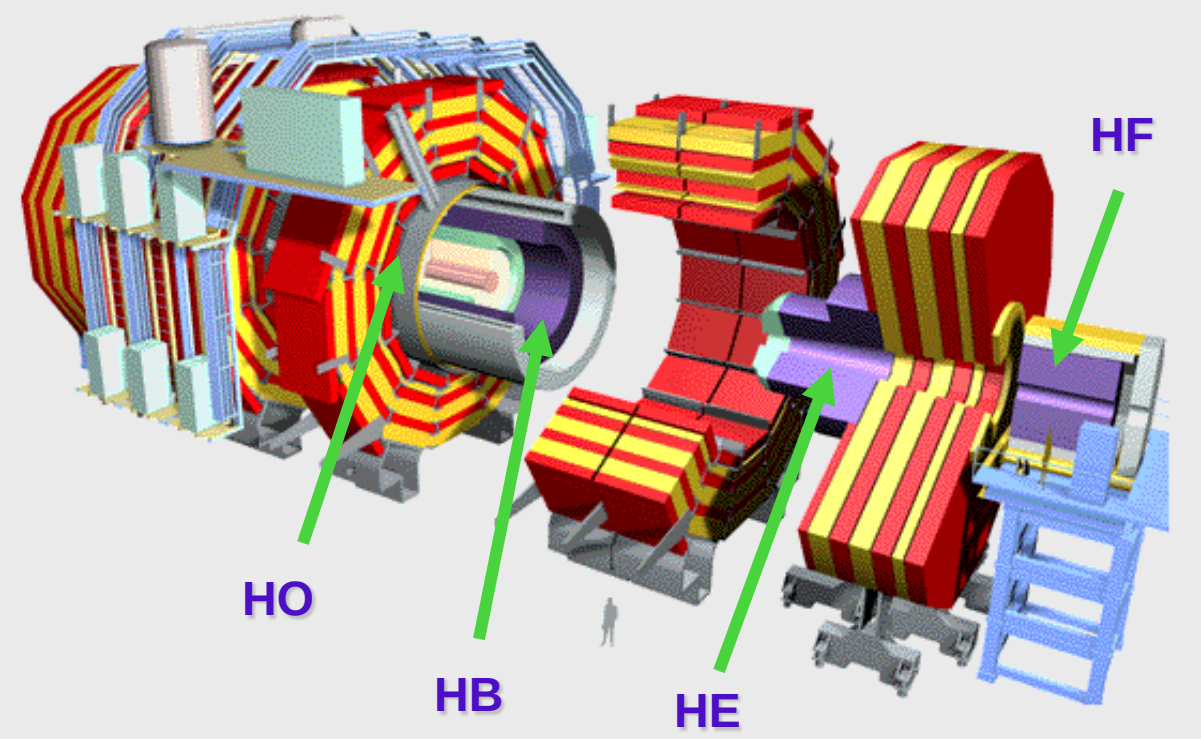
Статус разработки микропиксельных лавинных фотодиодов для адронного калориметра эксперимента CMS

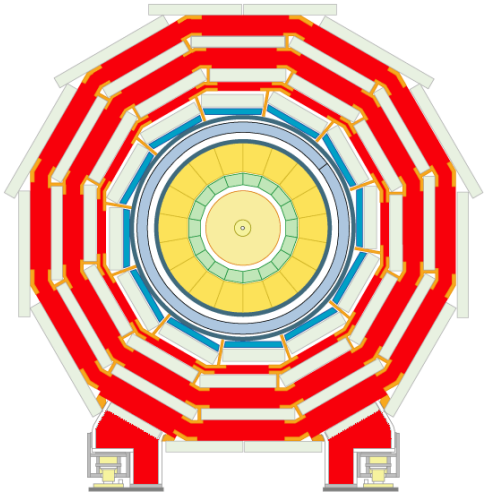
Ю.В. Мусиенко
(ИЯИ РАН, Москва)

План доклада

- Адронный калориметр эксперимента CMS (CMS HCAL)
- Причины модернизации CMS HCAL
- Разработка и исследование новых МЛФД для CMS HCAL (цели, состояние работ и перспективы)
- Заключение и ближайшие планы

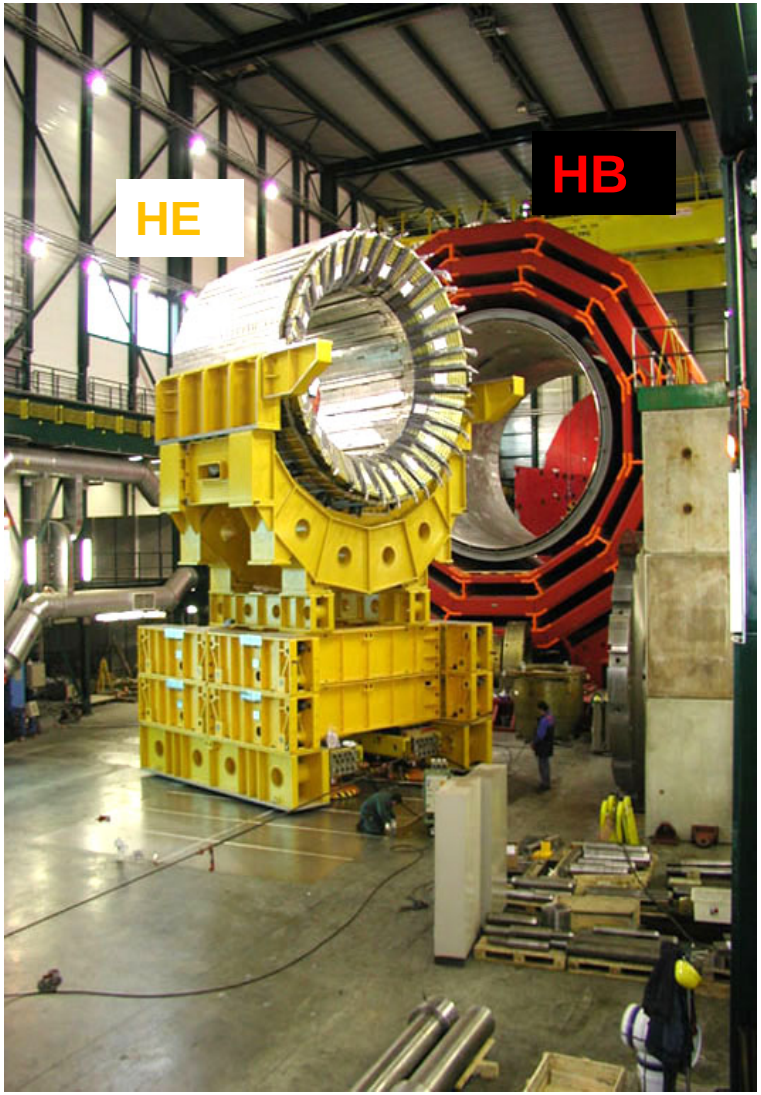
Адронный калориметр (HCAL) эксперимента CMS

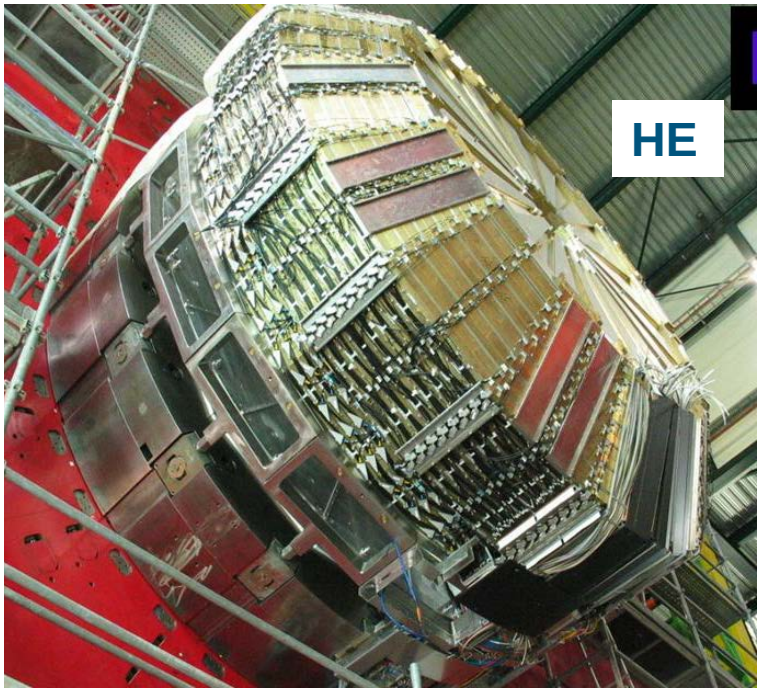




Адронный калориметр (HCAL) состоит из 4-х частей: HB (центральный калориметр), HO (внешний калориметр), HE (торцевой калориметр) и HF(передний калориметр). Первые 3 части – неоднородный (сэмплинг) калориметр, состоящий из сцинтилляционных счётчиков со съёмом света при помощи спектросмещающих волокон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

HB и HE во время сборки

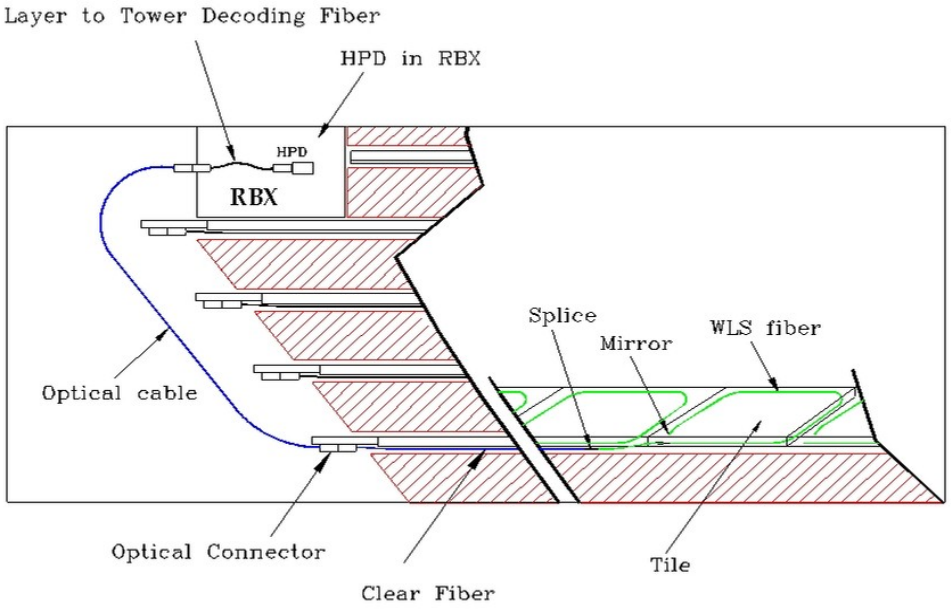




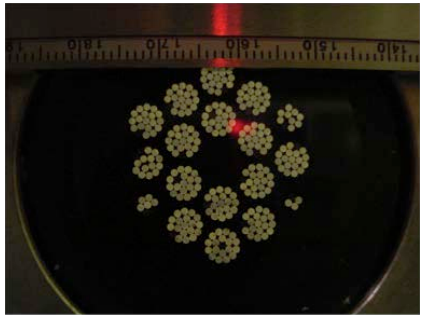
Решающий вклад в создание торцевого адронного калориметра CMS (HE) внесла коллаборация RDMS

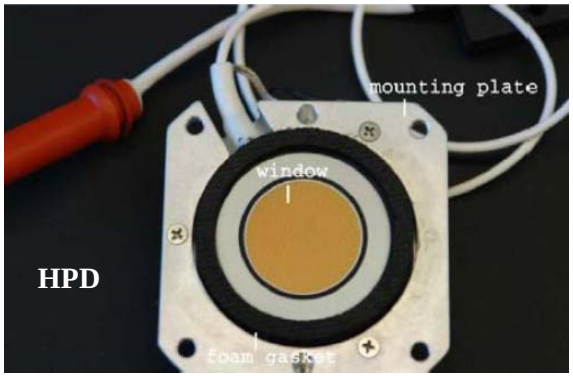
Оптический съём сигнала и фотоприёмники HCAL

Схема оптического съёма сигнала



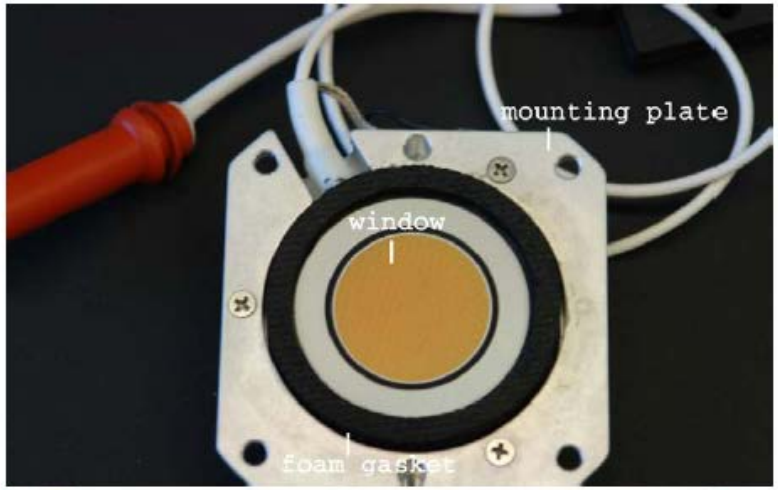
Пучки оптических волокон на входе HPD

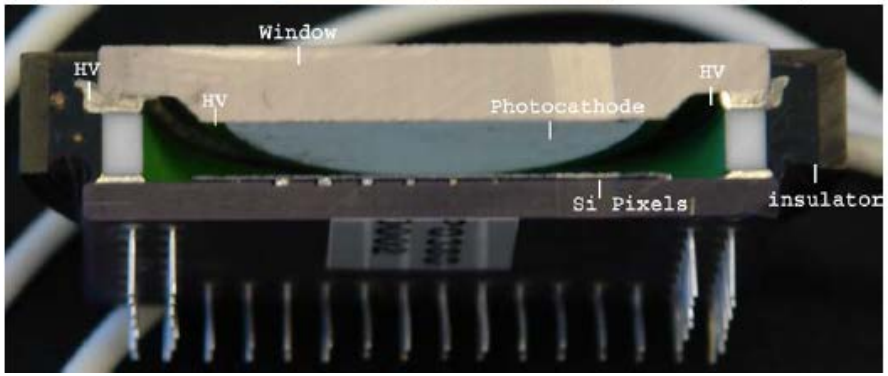


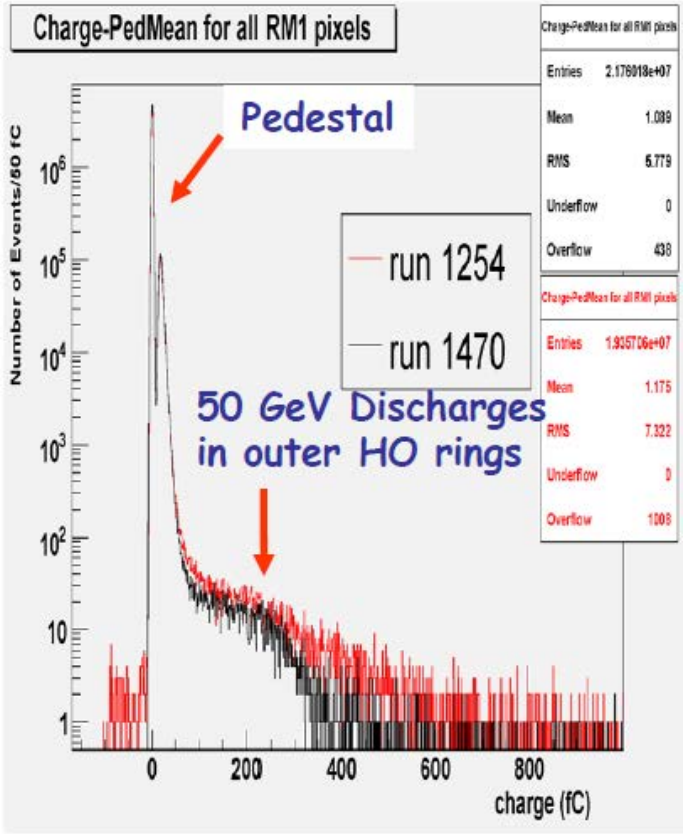


Сцитилляционный свет при помощи спектросмещающих и прозрачных волокон транспортируется к фотоприёмникам. В качестве фотоприёмников адронного калориметра используются 19-канальные гибридные фотодиоды (HPD).

Увеличение шума HPD в магнитном поле CMS

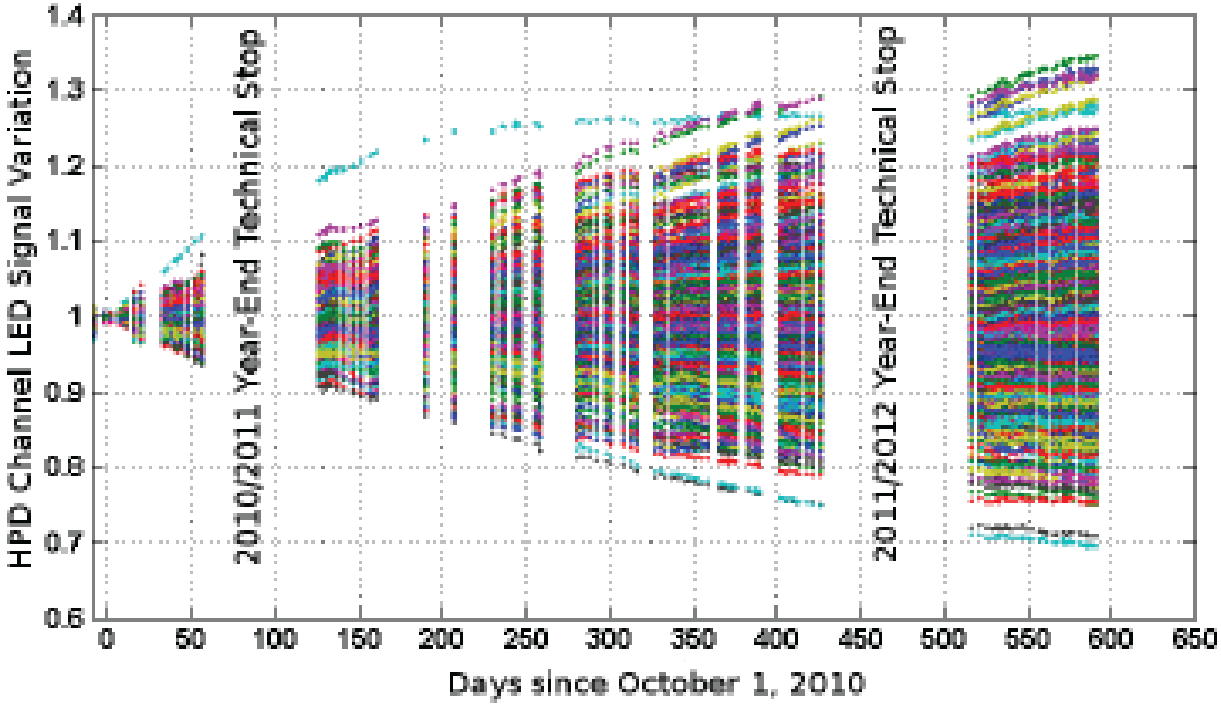






Если направления электрического и магнитного поля внутри HPD не совпадают, то некоторые из "отскочивших" от поверхности полупроводника электронов могут попадать на поверхность изолирующего диэлектрика и вызывать накопление заряда в изоляторе. В результате, могут возникнуть электрические разряды, приводящие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

Изменение амплитуды сигнала HPD, облучаемого стабильными во времени световыми импульсами



Отклик на световой сигнал >10% каналов HPD изменился (возрос или упал) более чем на 10% за 2 года работы LHC

Причины модернизации 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 (~$3x10^{34}$ $см^{-2}сек^{-1}$). Одним из важных результатов этих совещаний стало предложение заменить фотоприёмники адронного калориметра HPD на микропиксельные лавинные фотодиоды (также известные, как SiPM) .

Причины апгрейда:

-оказалось, что при напряжённости магнитного поля ~1-2 Тл (поле в HO) в HPD возникает электрические разряды, приводящие к увеличению шума HPD и к выходу их из строя;

- При работе в условиях LHC у некоторых HPD был обнаружен значительный (>20%) дрейф амплитуды сигнала.

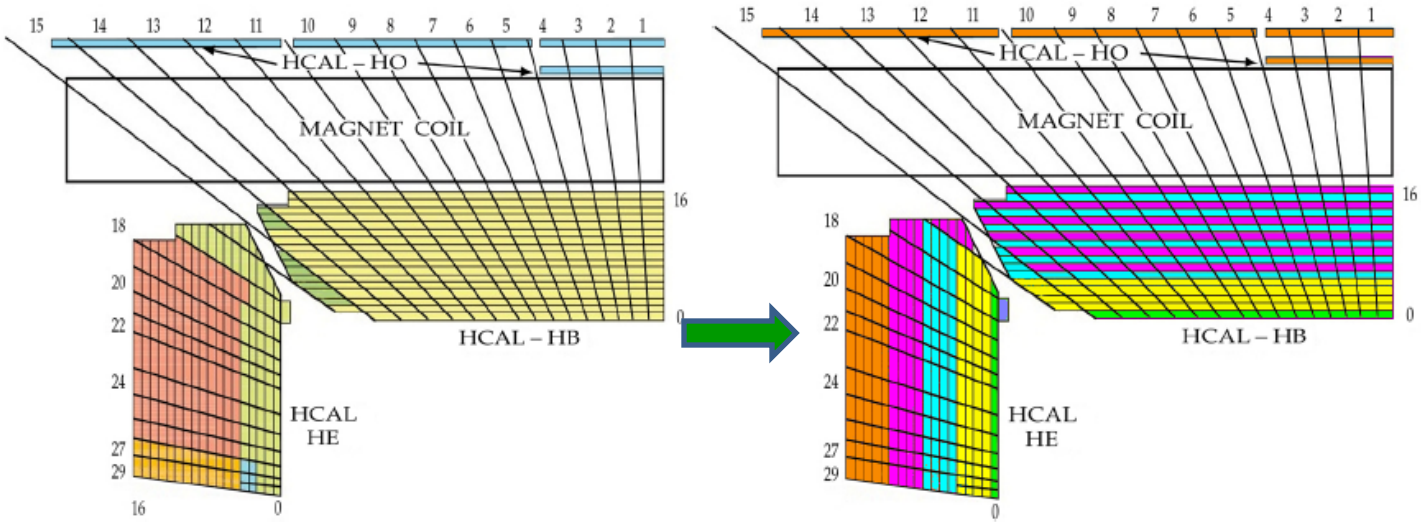
- в условиях высокой светимости калориметр будет "перегружен" сигналами от частиц с низкими энергиями (т.н. эффект наложений или "pileup") . Для лучшего выделения частиц с высокими энергиями в HB и HE было предложено увеличить продольную гранулярность калориметра. Считывание сигналов с разных слоёв калориметра 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.

Изменение продольной сегментации HCAL

Старая сегментация HCAL

Новая сегментация HCAL

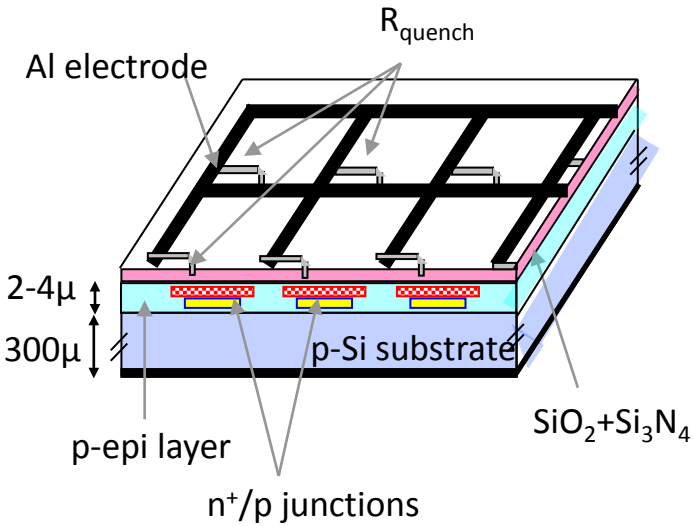


Использование микропиксельных лавинных фотодиодов в HCAL делает возможным изменение его продольной сегментации

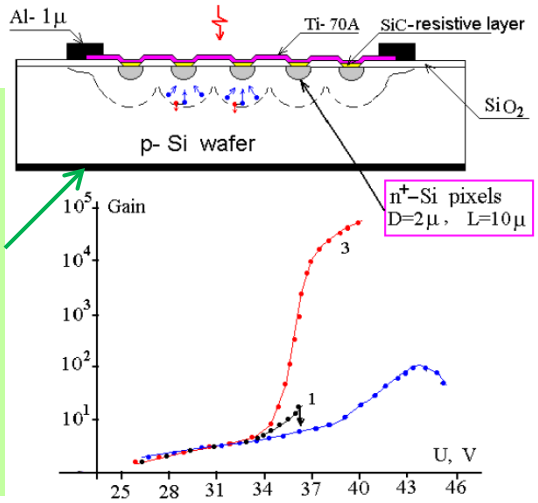
Новая продольная сегментация калориметра:

- 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

Структура и принцип действия МЛФД



В 1989 году А.Гасанов, З.Садыгов (ИЯИ РАН) и В.Головин (МЭЛЗ) разработали структуру метал-резистор-полупроводник (патент #1702831), которая стала основой для большинства микропиксельных лавинных фотодиодов, работающих в режиме Гейгера.



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

- 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 кОм - 100 МОм)
- Сигнал от одной ячейки Q=C*(V-VB), C - ёмкость ячейки, V-VB - "перенапряжение"
- После срабатывания напряжение на ячейке падает до напряжения пробоя VB, после чего оно восстанавливается с постоянной времени ~ R*C
- Вероятность регистрации фотона пропорциональна активной площади ячейки и растёт с увеличением перенапряжения

Требования к МЛФД CMS HCAL

Для модернизации HB/HE требуются МЛФД нового поколения

Основные требования к МЛФД для HB/HE:

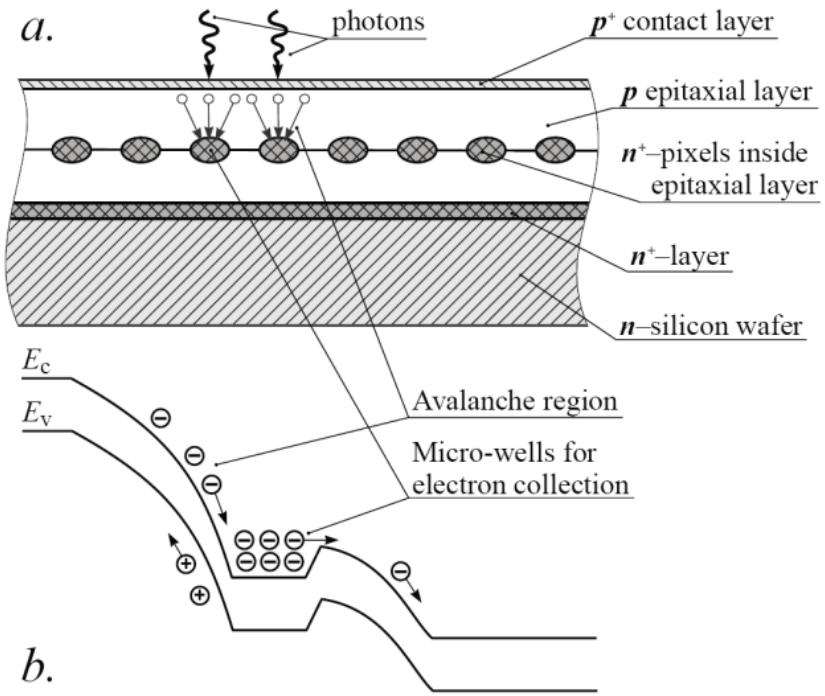
- чувствительная площадь: ~5 мм^2
- PDE(515нм)>15-20 %;
- Коэффициент усиления: ~10^5
- динамический диапазон: > 25 000;
- время восстановления ячейки: ~ 10^{-8} сек;
- радиационная стойкость:
  - изменение амплитуды сигнала <10% после $1*10^{12}$ нейтронов/см^2
  - темновой ток < 20 μA/mm^2 после $1*10^{12}$ нейтронов/см^2

Суммарное число МЛФД площадью ~5 мм^2, необходимое для модернизации адронного калориметра CMS ~22 000

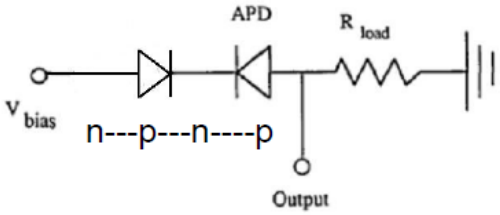
Фотоприёмники-кандидаты для HCAL CMS (Zecotek, Hamamatsu, KETEK)

Zecotek

Микропиксельные ЛФД разработанные З. Садыговым

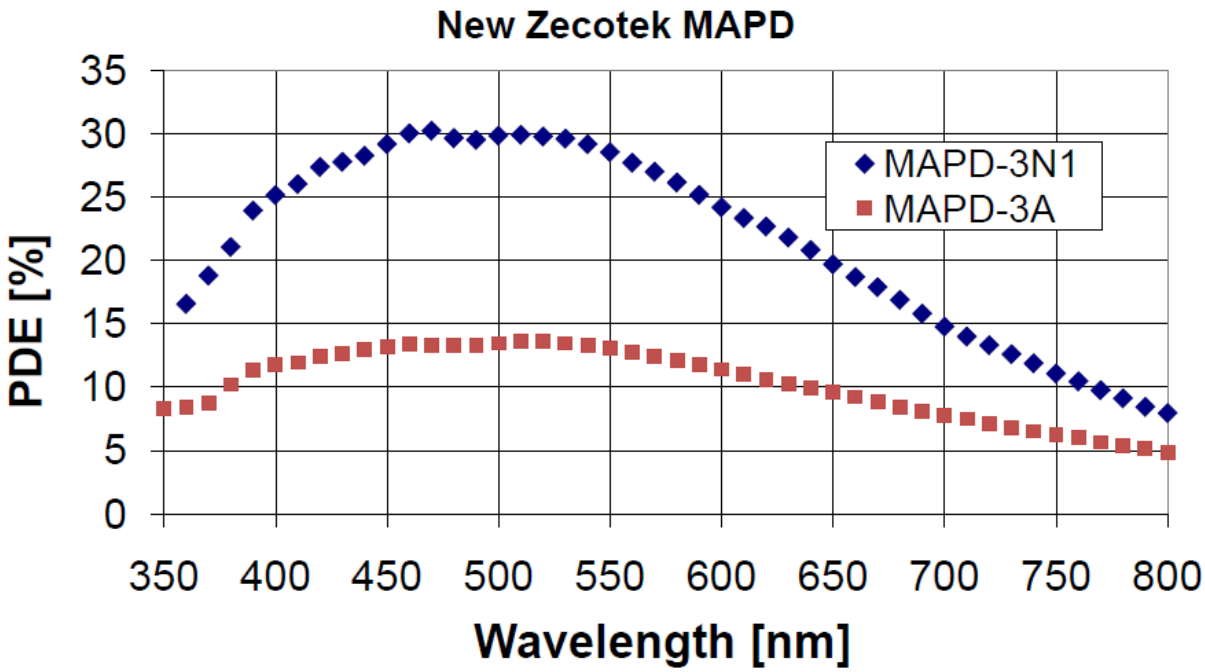


Структура с потенциальными ямами, находящимися на глубине 2-3 мкм. Область усиления находится перед потенциальной ямой. Резистора, как такового, нет. "Гашение" разряда происходит за счёт накопления заряда в потенциальной яме и уменьшения электрического поля в ОПЗ. Образовавшийся заряд уходит в подложку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



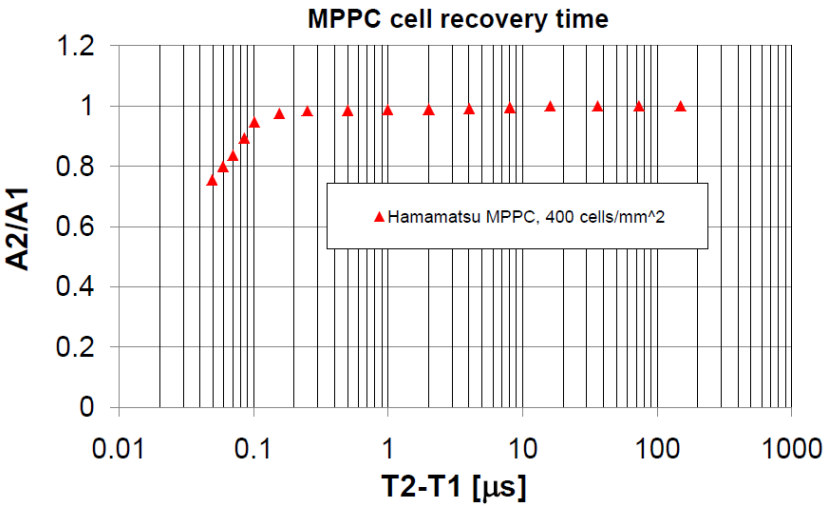
Производятся на предприятии "Микрон" (Зеленоград) и компанией Zecotek (Сингапур)

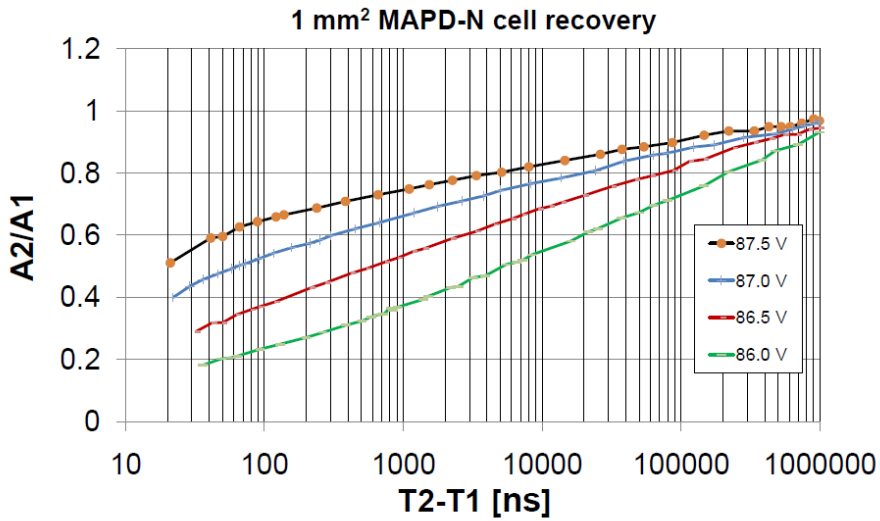
Спектральная чувствительность МЛФД

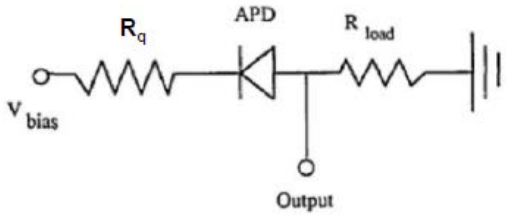


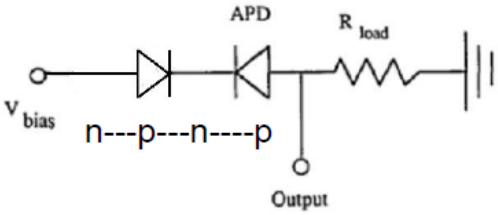
Эффективность регистрации фотонов зелёной области спектра PDE(515 nm) ~30% у MAPD-3N, что в 2.5 - 3 раза лучше, чем у CMS HPD.

Восстановление ячеек в ЛФД Hamamatsu и Zecotek



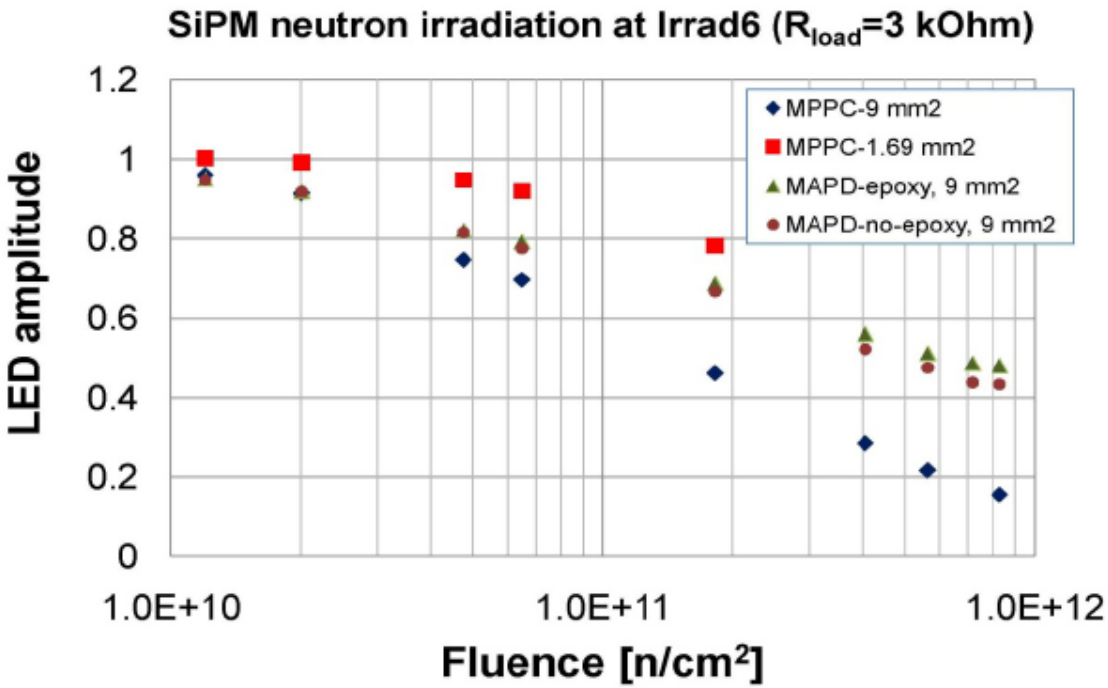






"Нестандартное" восстановление ячеек в МЛФД обусловлено инерционностью процессов "открывания-запирания" второго p-n перехода.

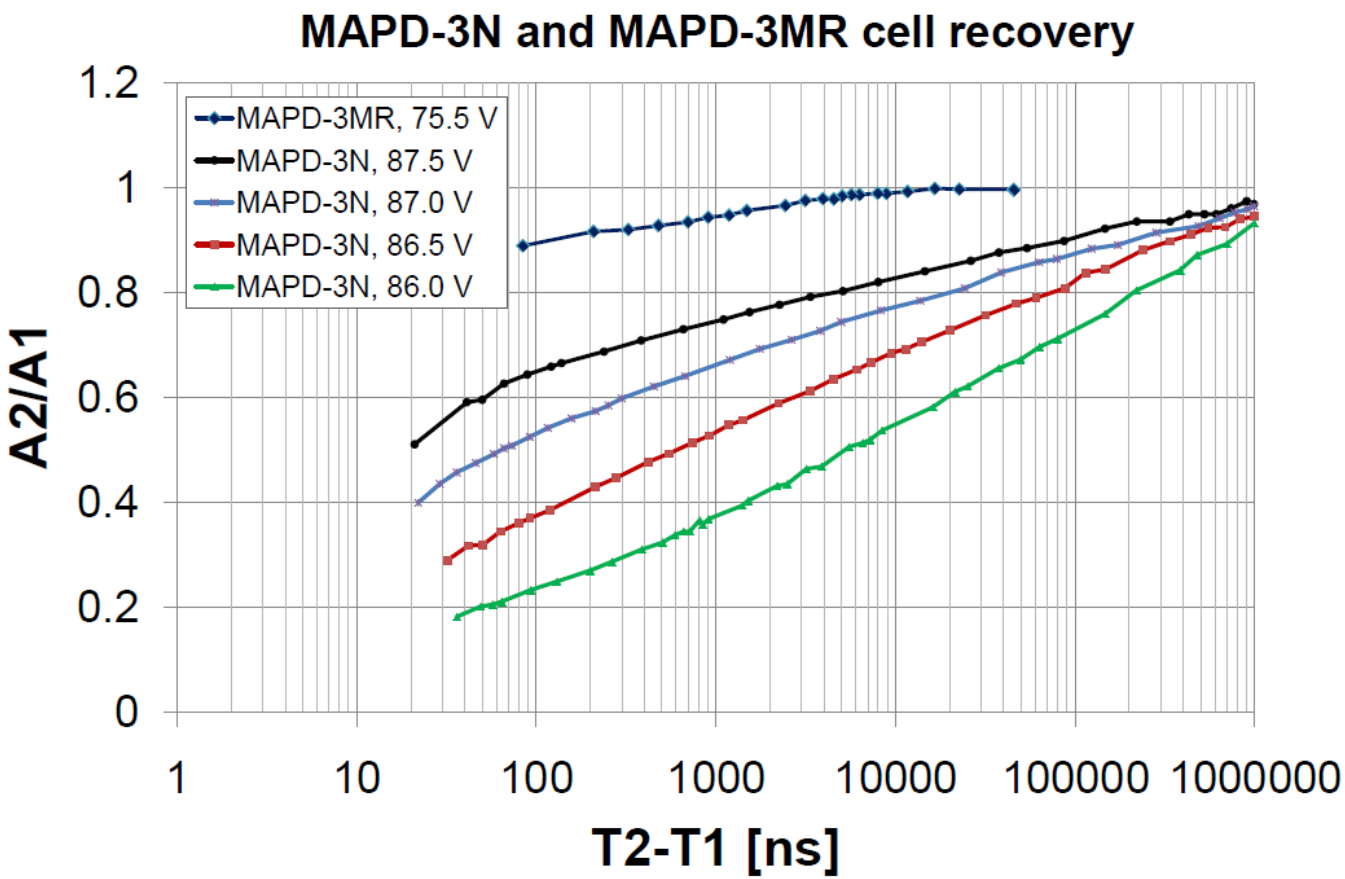
Исследования радиационной стойкости на пучке нейтронов (E~1 МэВ)



Большое время восстановления ячейки приводит к зависимости амплитуды сигнала от частоты событий и к падению коэффициента усиления из-за возрастании темнового тока МЛФД под действием радиации.

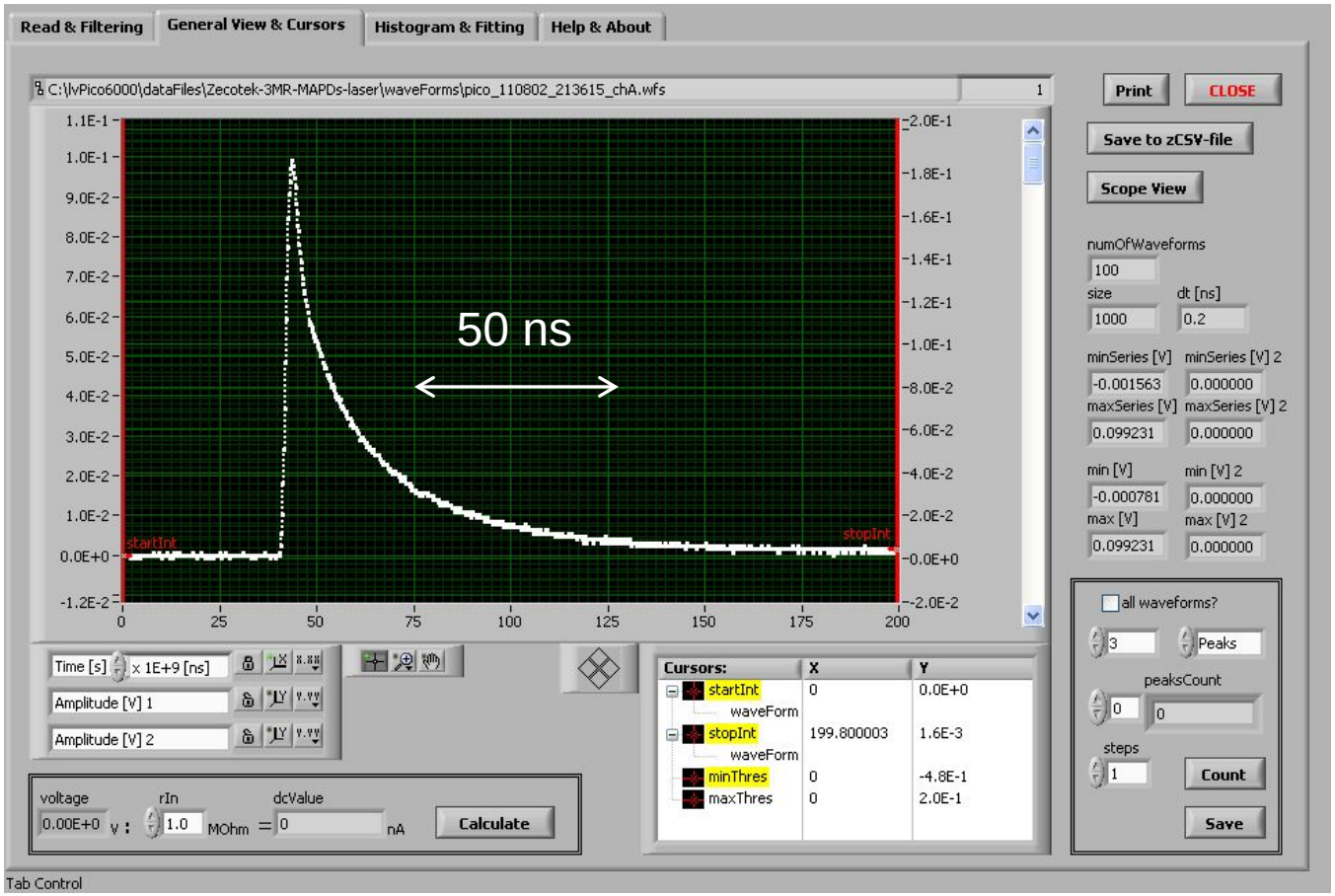
Между CMS и Zecotek был заключён контракт на разработку МЛФД с большим динамическим диапазоном (>15 000 ячеек/мм^2) и малым временем (<1 микросек) восстановления ячеек. В июле 2011 года Zecotek изготовил новые МЛФД и поставил их в ЦЕРН для дальнейшего исследования.

Восстановление ячеек в новых МЛФД Zecotek



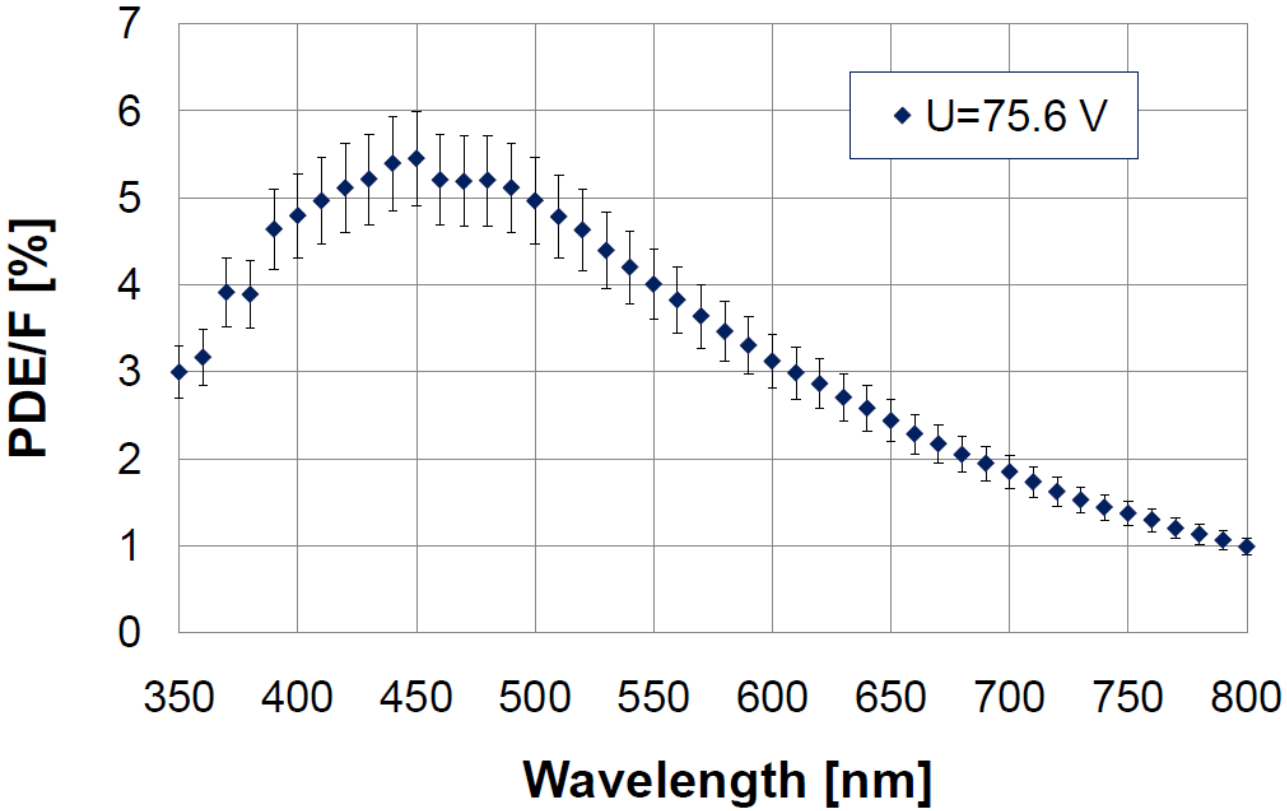
Время восстановления ячеек новых МЛФД существенно уменьшено: 95% амплитуды восстанавливается уже через 1 микросек …

35 ps laser response (25 Ohm load)



... и подтверждается быстрым откликом МЛФД на лазерный импульс...

PDE/F vs. Wavelength



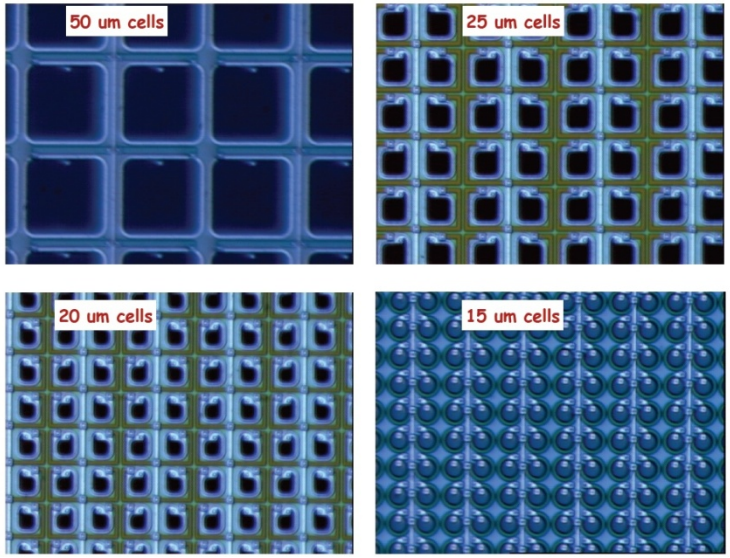
... но МЛФД работает при малых перенапряжениях (V-VB<1 В) и PDE/F мала. Требовался ещё один шаг в разработке, но из-за переноса производства и по финансовым соображениям этот ОКР был к сожалению остановлен.

Hamamatsu

MPPC (Hamamatsu) с увеличенным динамическим диапазоном

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

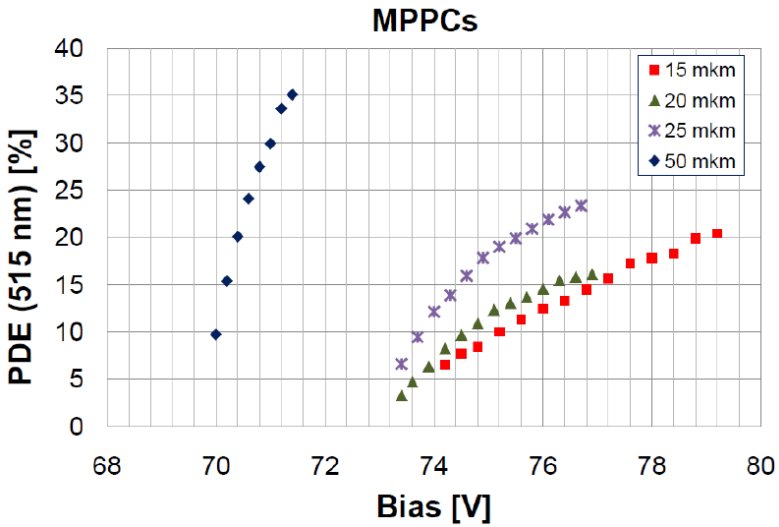
Фотография ячеек МЛФД, сделанная при помощи оптического микроскопа

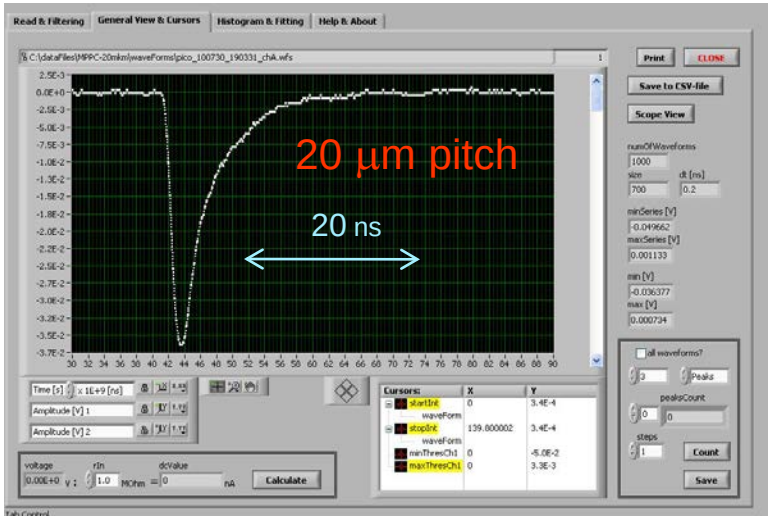


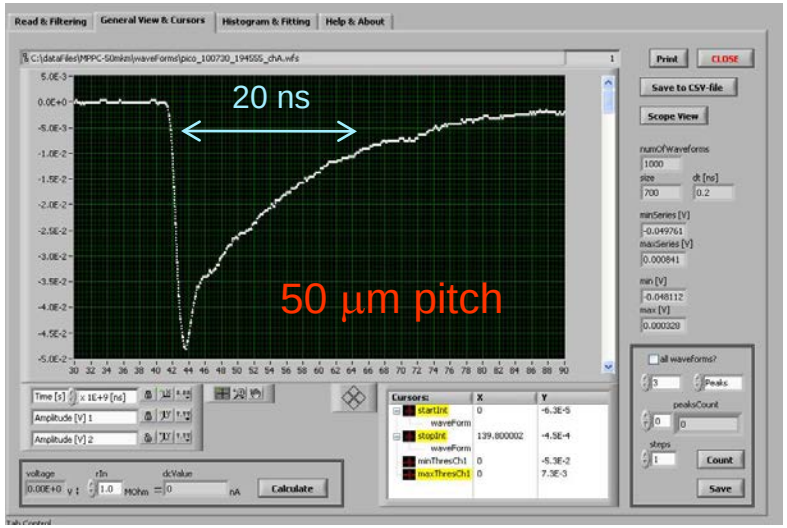
Основные параметры МГЛФД (Hamamatsu)

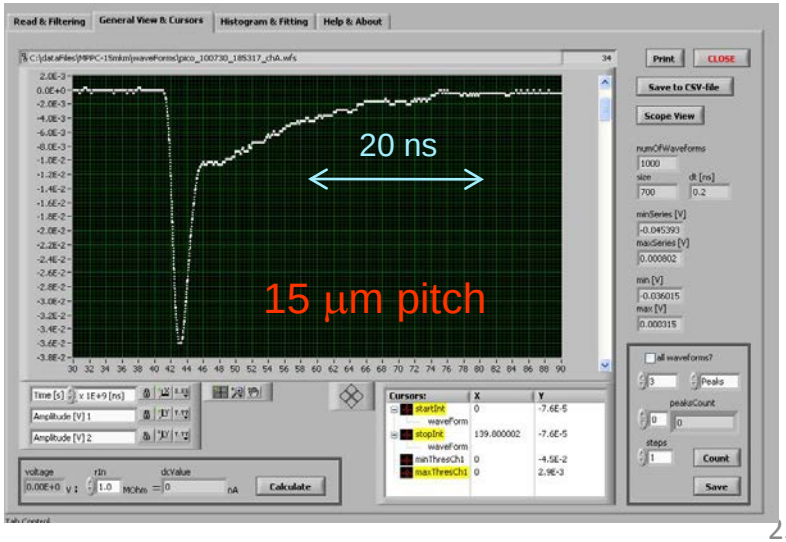
MPPC type	# cells 1/mm^2	C, pF	R_{cell}, kOhm	C_{cell}, fF	$\tau=R_c x C_c$, ns	VB, V T=23 C	V_{op}, V T=23 C	Gain(at V_{op}), X10^5
15 μm pitch	4489	30	1690	6.75	11.4	72.75	76.4	2.0
20 μm pitch	2500	31	305	12.4	3.8	73.05	75.0	2.0
25 μm pitch	1600	32	301	20	6.0	72.95	74.75	2.75
50 μm pitch	400	36	141	90	12.7	69.6	70.75	7.5

PDE и временной отклик



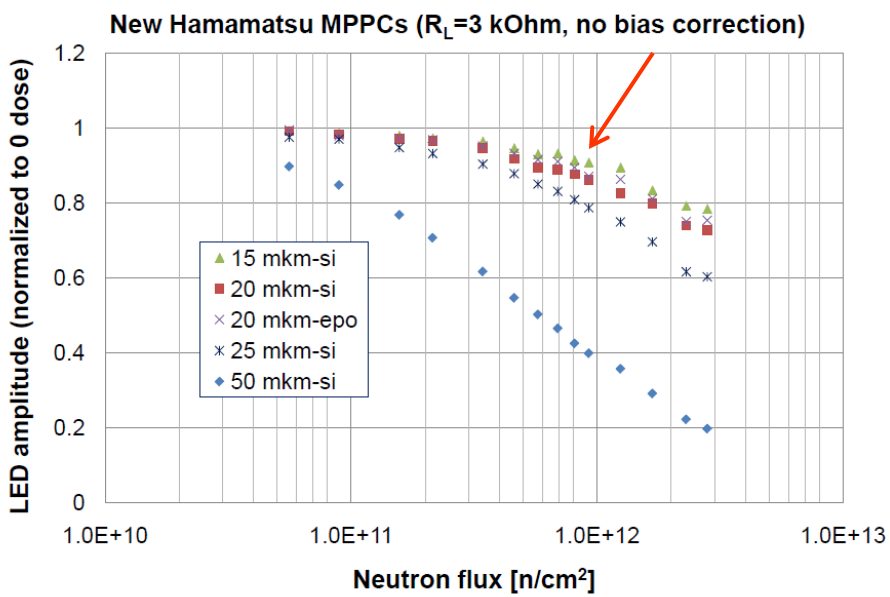


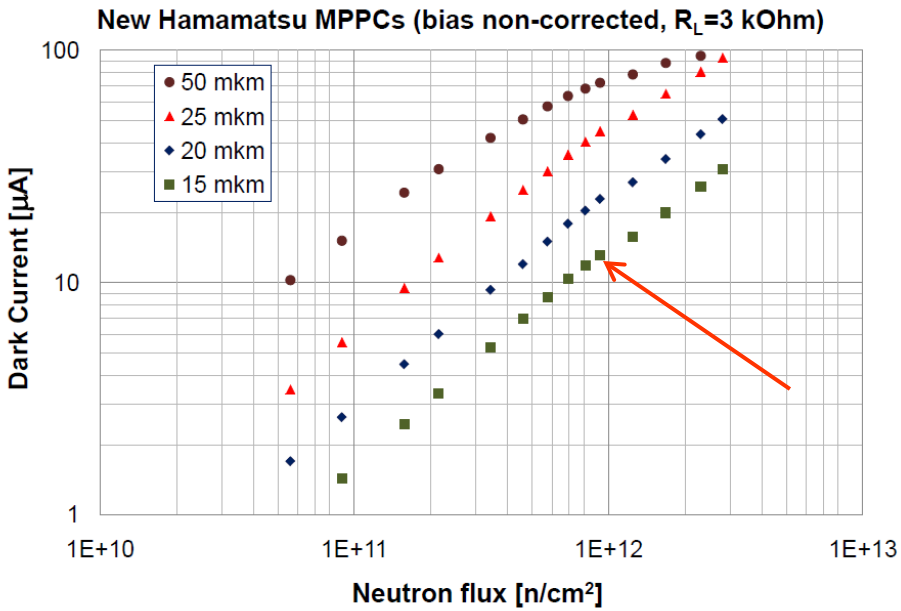




Исследования радиационной стойкости MPPC

Нейтроны, E~1 МеВ



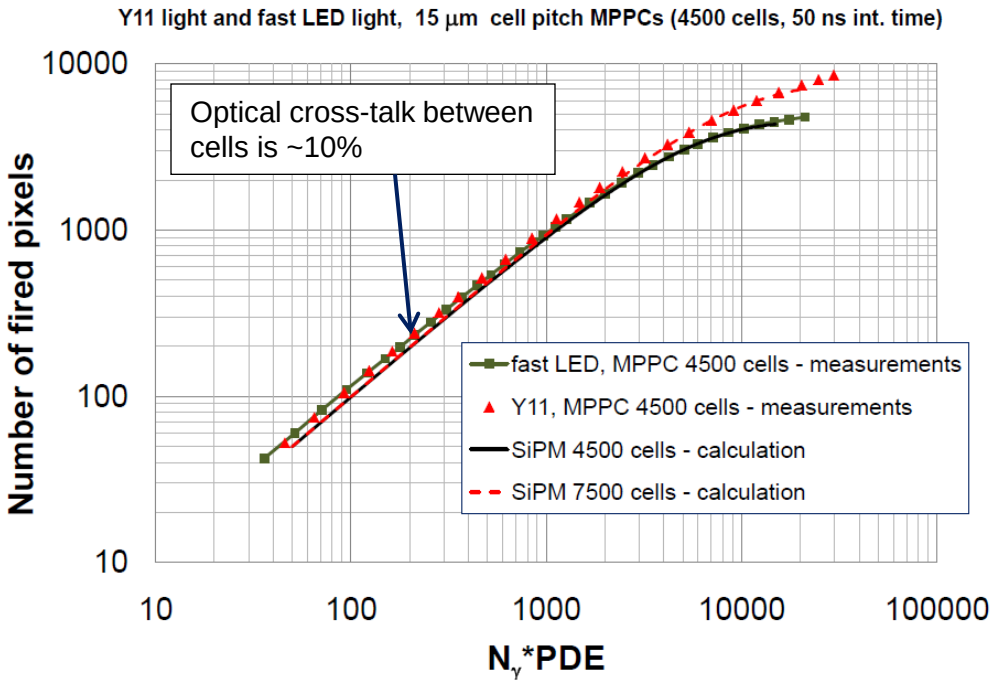


*После 1*10^{12} нейтронов/см^2 изменение отклика MPPC с шагом ячеек 15 микрон оказалось менее 10%, изменение темнового тока <15 μA*

Измерение линейности МЛФД

Для измерения линейности МЛФД мы использовали полистирольную палочку со спектросмещающей добавкой Y11. Центр палочки освещался быстрыми (~2.5 нсек FWHM) вспышками фиолетового (~400нм) светодиода. На противоположных концах палочки закреплялись исследуемый МЛФД и ЛФД с хорошей линейностью, работающий в линейном режиме. Калибровка шкалы в фотоэлектронах происходила при малых (~10-50 ф.э.) импульсах света, где МЛФД заведомо работал в линейной области.

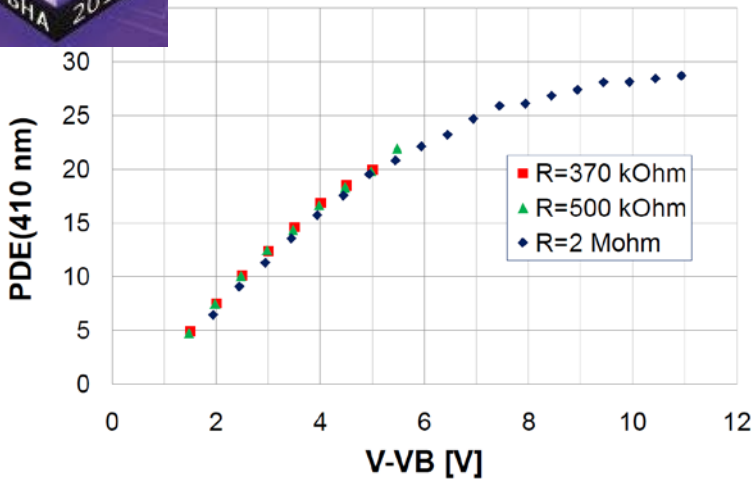
Линейность отклика MPPC (R_q=2 МОм, ячейка - 15 микрон) для света от WLS Y-11 и быстрого ультрафиолетового светодиода

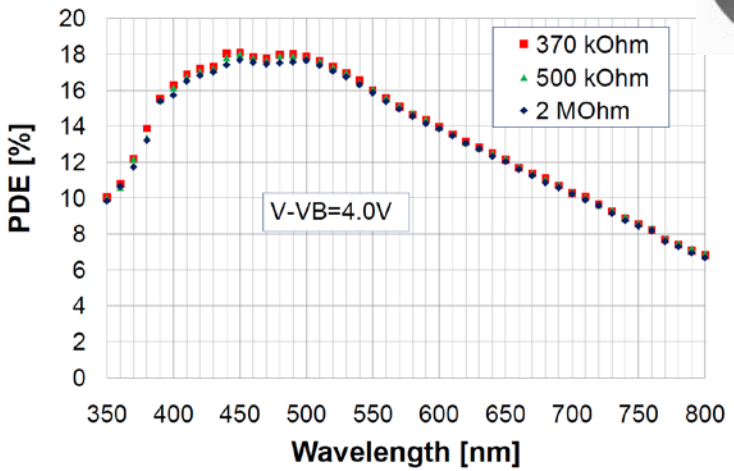


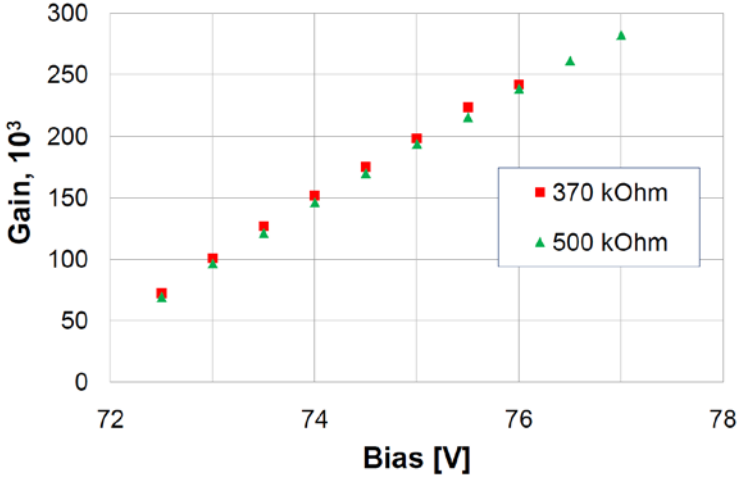
Диапазон линейности новых MPPC для света от Y-11 значительно увеличился по сравнению с теоретическим значением, определяемым количеством ячеек МГЛФД. Причина - время восстановления ячейки сравнимо (или даже короче) времени высвечивания WLS Y-11 (~10 нсек)

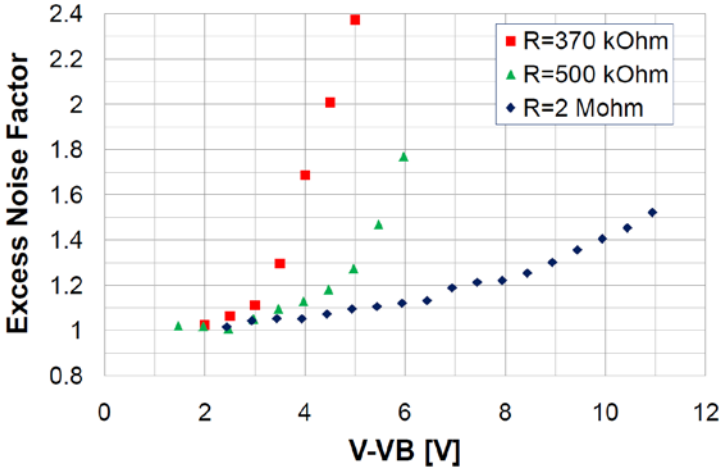
Мы попросили Hamamatsu изготовить MPPC с малым значением резисторов гашения (<1 МОм). В 2011 году такие MPPC были изготовлены (R_q=370 kОм и R_q=500 kОм).

Параметры новых MPPC (ячейка-15 микрон)



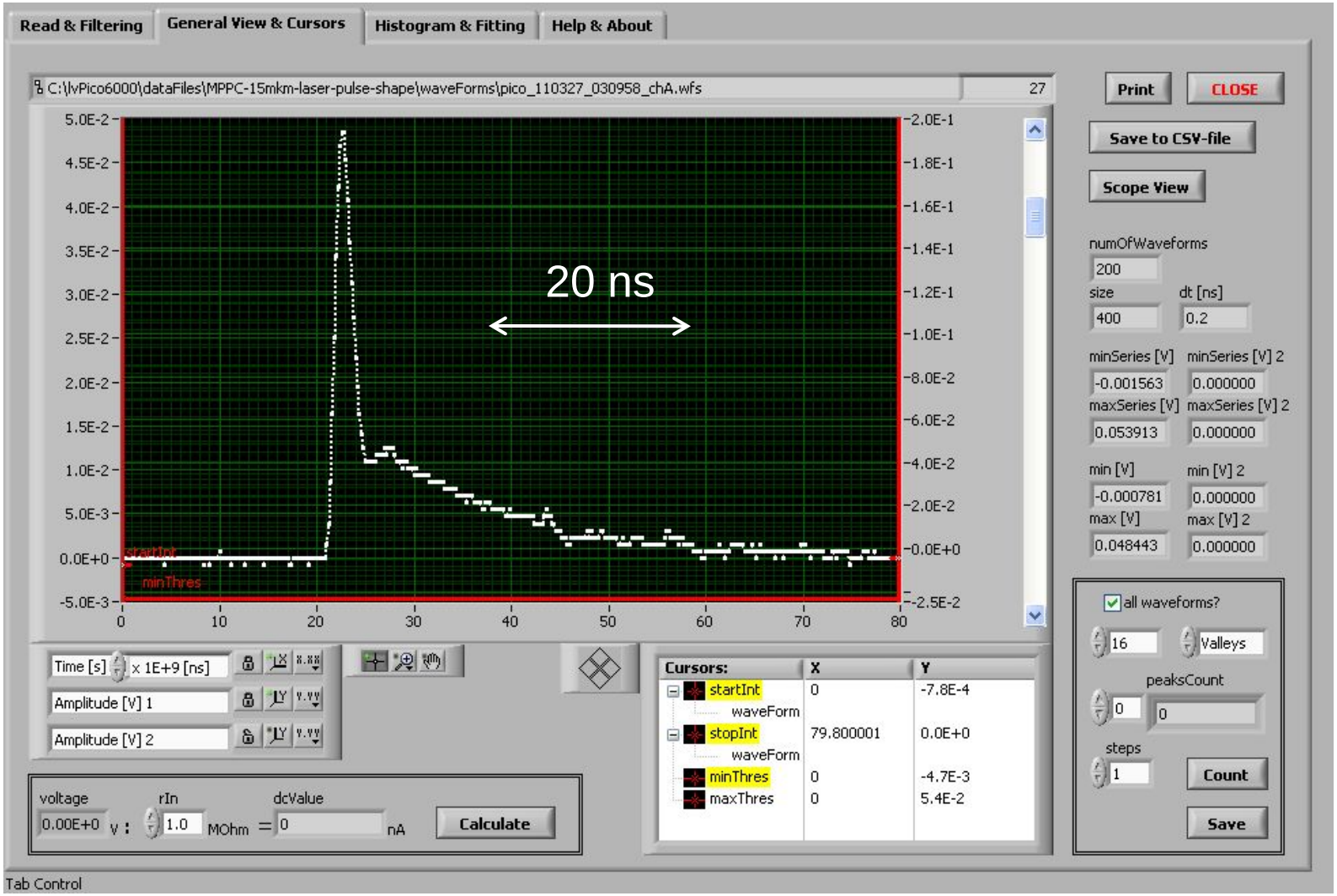




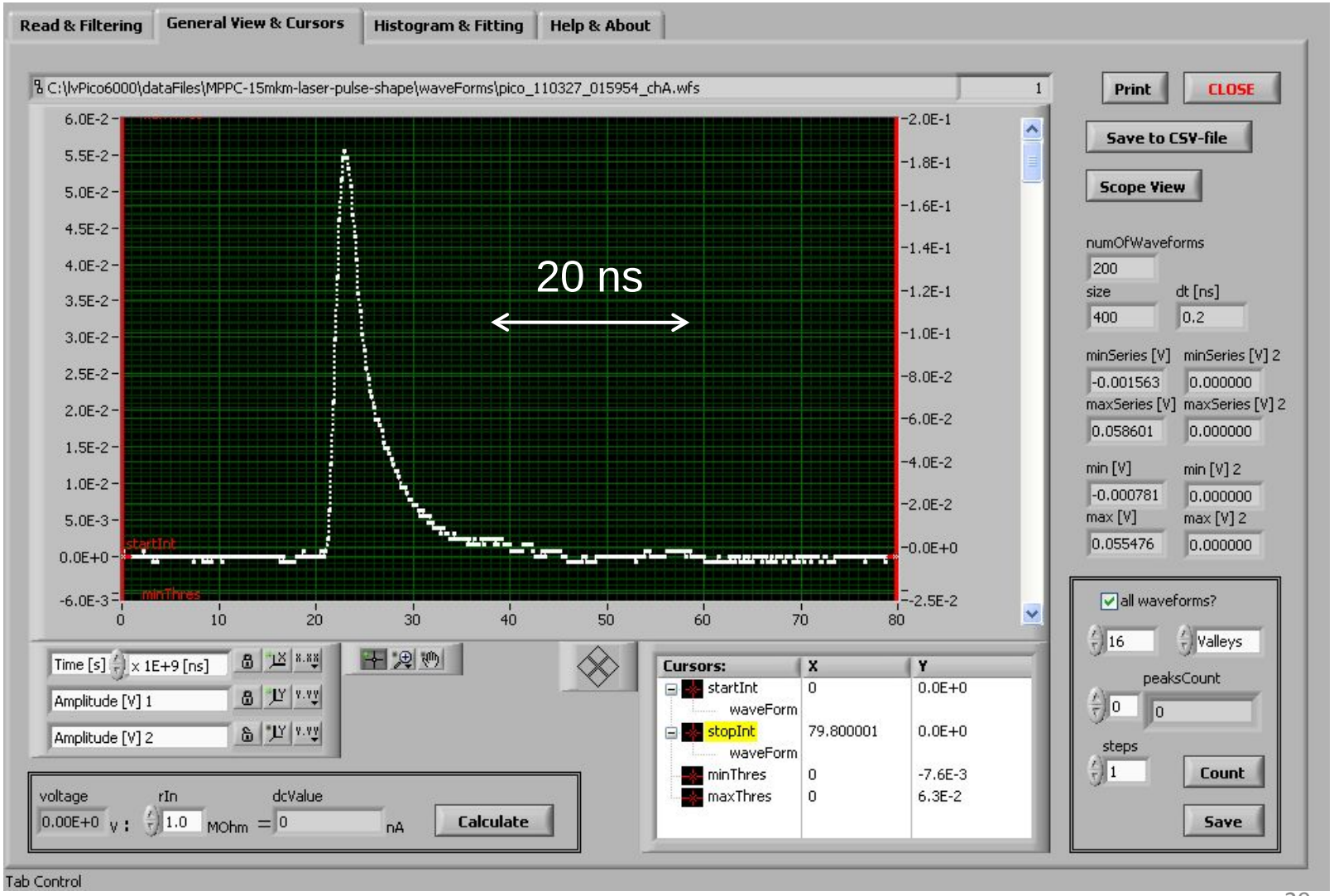


C_{cell}~8 fF, for R_q~500 kOhm → τ~4 ns

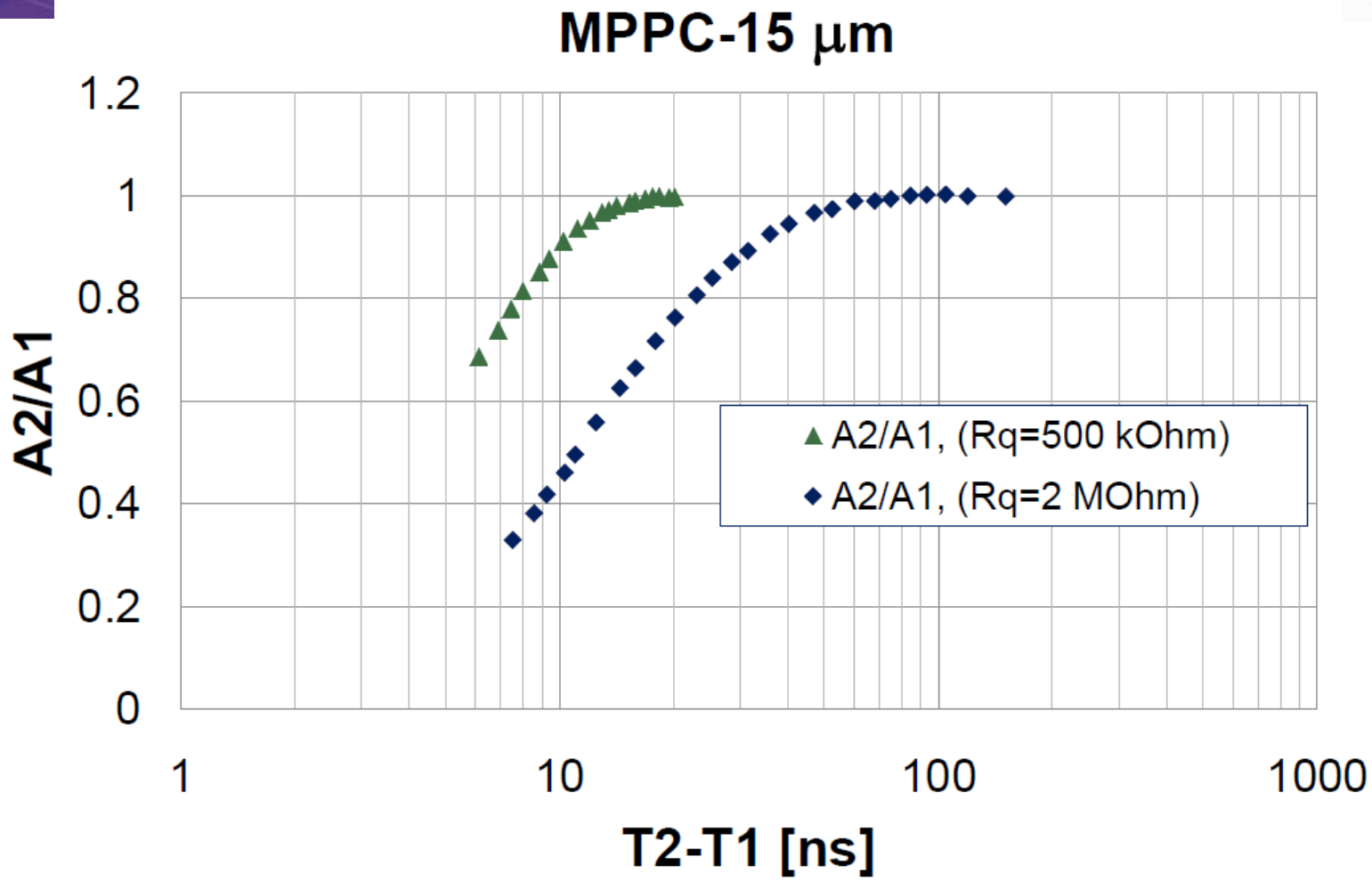
2 MOhm MPPC: 35 ps laser response



500 kOhm MPPC: 35 ps laser response

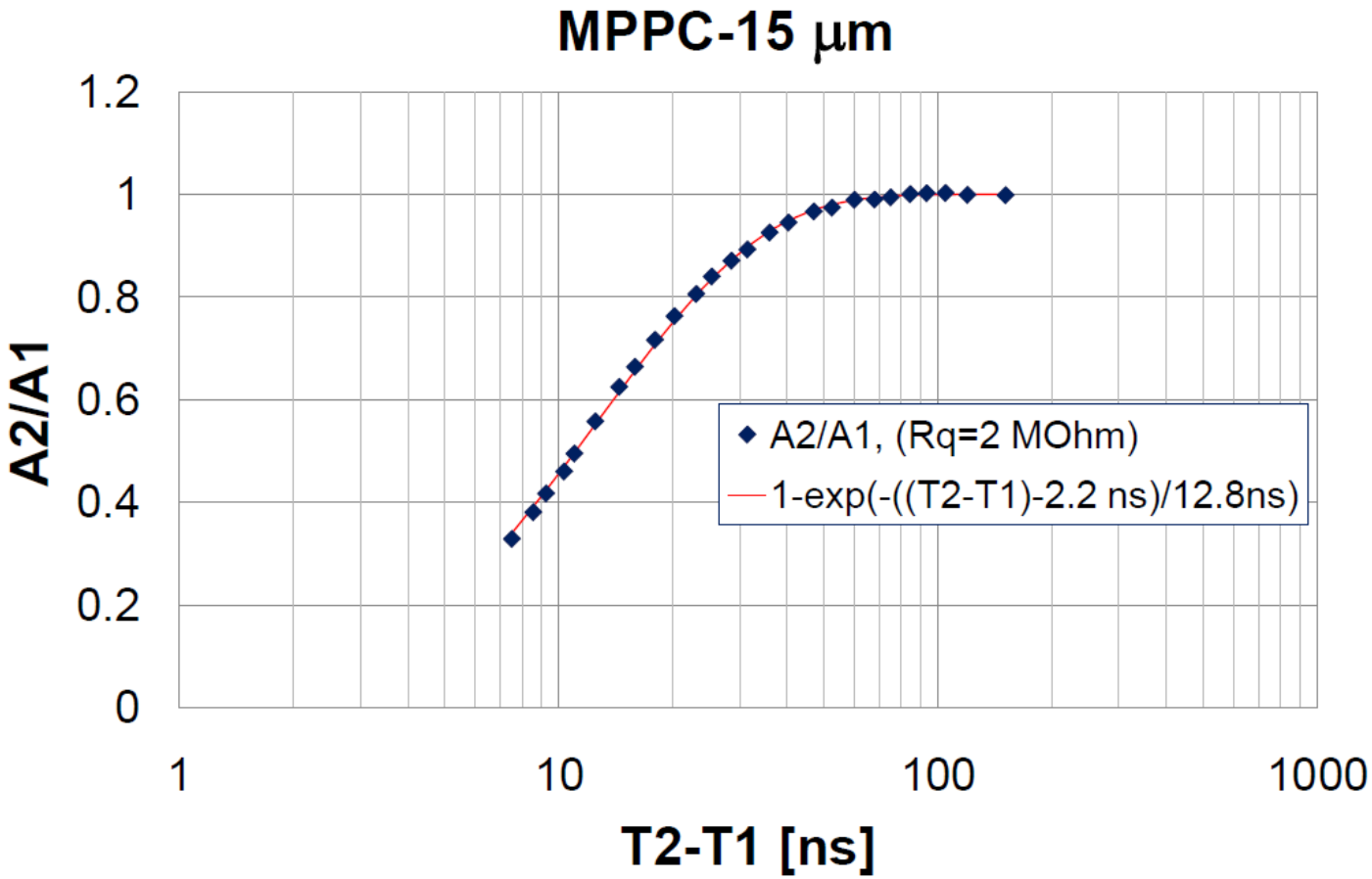


Cell recovery studies with fast UV LED



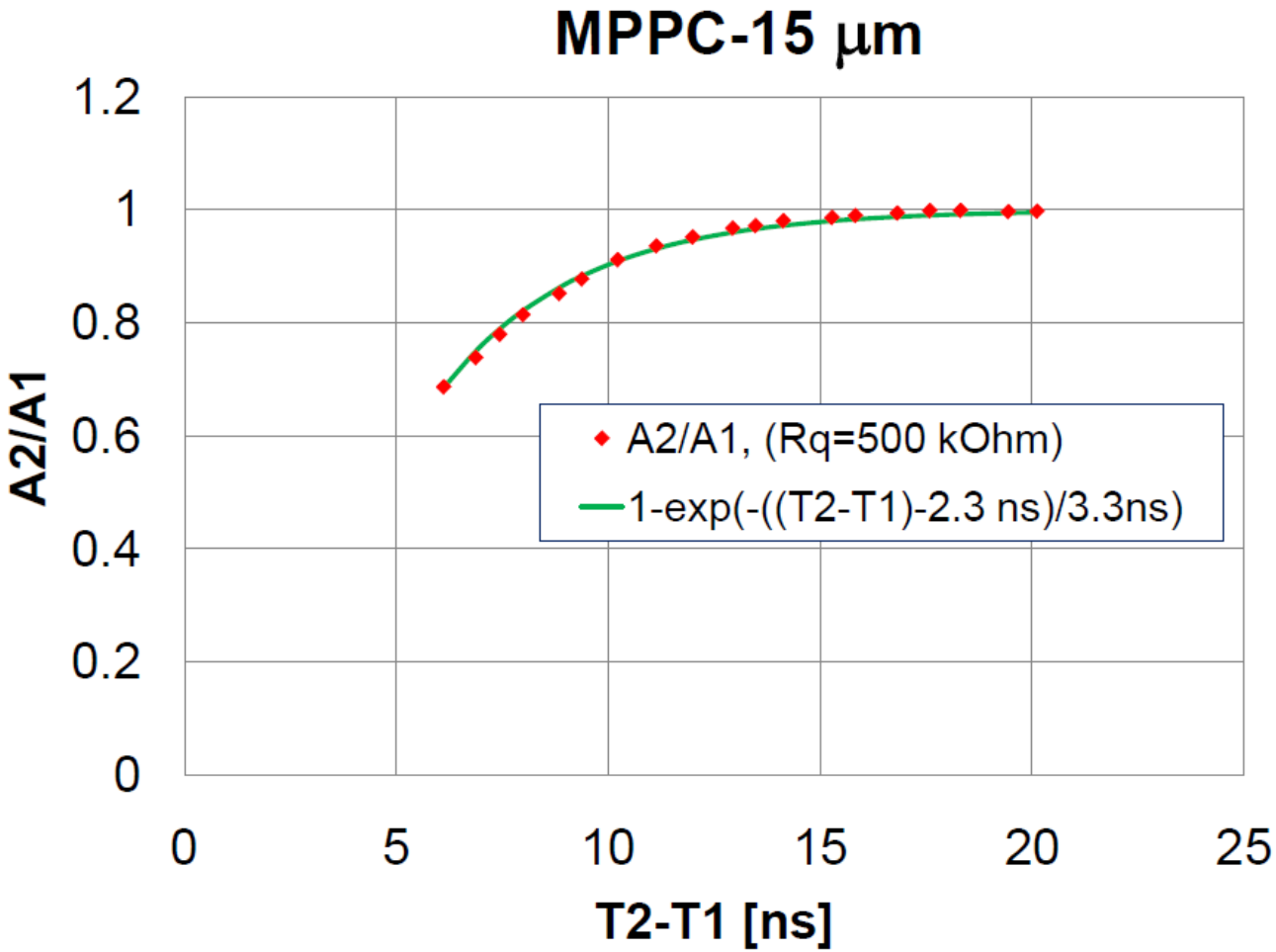
Measured using double LED pulse method

R_q= 2 MOhm cell recovery



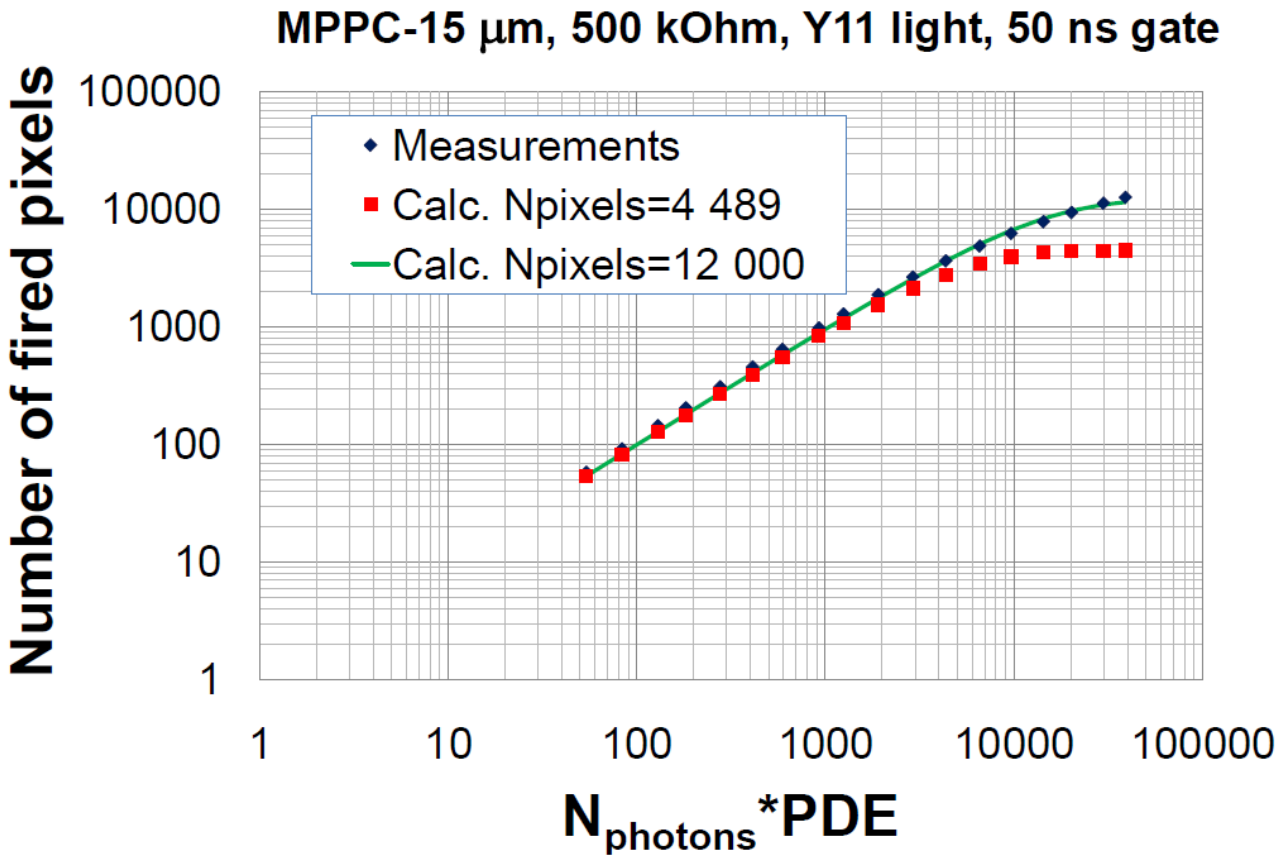
99% cell recovery after ~60 ns

R_q= 500 kOhm cell recovery



Через 15 нсек напряжение на ячейке восстанавливается до 99% от первоначального (до разряда) !!

Linearity for Y11 light (R_q=500 kOhm, 15 μm MPPCs)



Для света от Y11 новый MPPC имеет динамический диапазон сравнимый с "медленным" микропиксельным ЛФД, имеющим ~12 000 ячеек/мм² !!!

Параметры новых МЛФД (MPPC) Hamamatsu

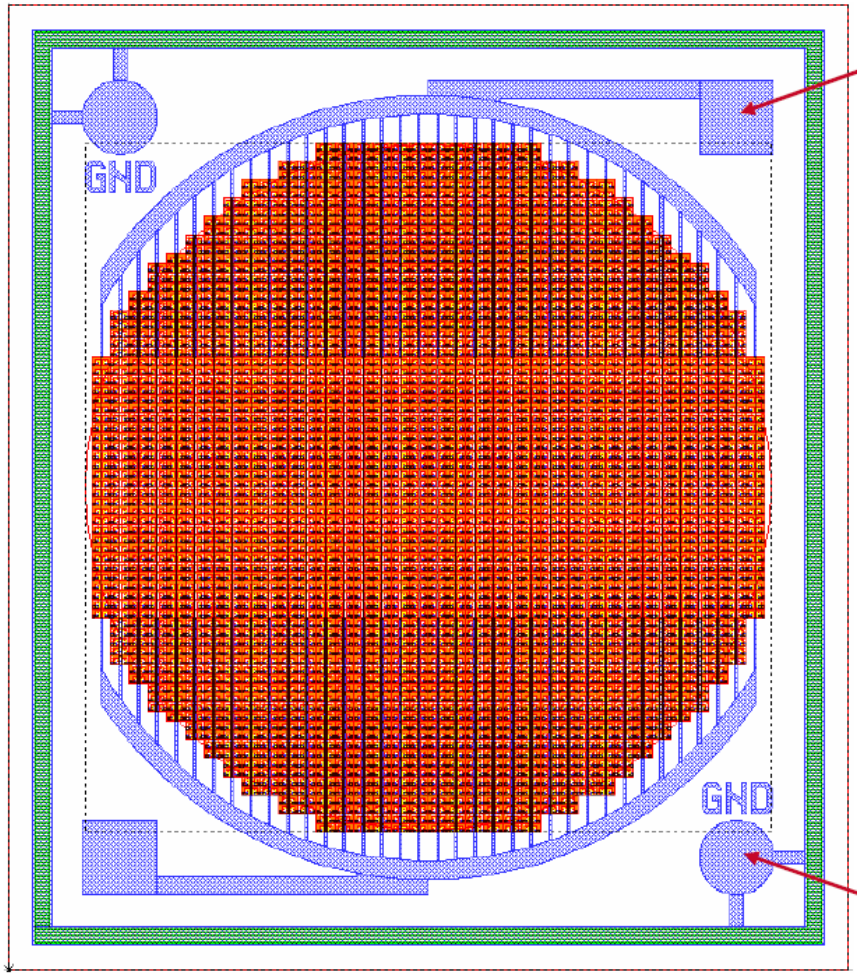
Динамический диапазон новых МЛФД Hamamatsu (шаг ячеек 15 микрон, R_q=500 кОм) для света, излучаемого Y11, возрос в 2.7 раза из-за быстрого времени восстановления ячеек (~4 нсек) этого МЛФД.

<u>Для перенапряжения V-VB=4 В:</u>

- Коэффициент усиления: $2*10^5$
- PDE(515 нм)~17 %
- ENF~1.1
- Диапазон линейности для света от Y11: ~60 000 ф.э./5мм^2

KETEK

1 mm^2 МЛФД КЕТЕК



- 2 Bias Bondpads, Size: 120 µm x 120 µm
- 2 GND Bondpads, Size: Ø120 µm
- Min. Distance active area – chip edge: 135 µm
- Cell Pitch: 15 µm
- Quantity of cells: 4384

- Dicing frame: 1.35 mm x 1.55 mm
- Chip size after dicing: 1.30 mm x 1.50 mm

- 10 µm microcell type too small for PDE ~ 15 %

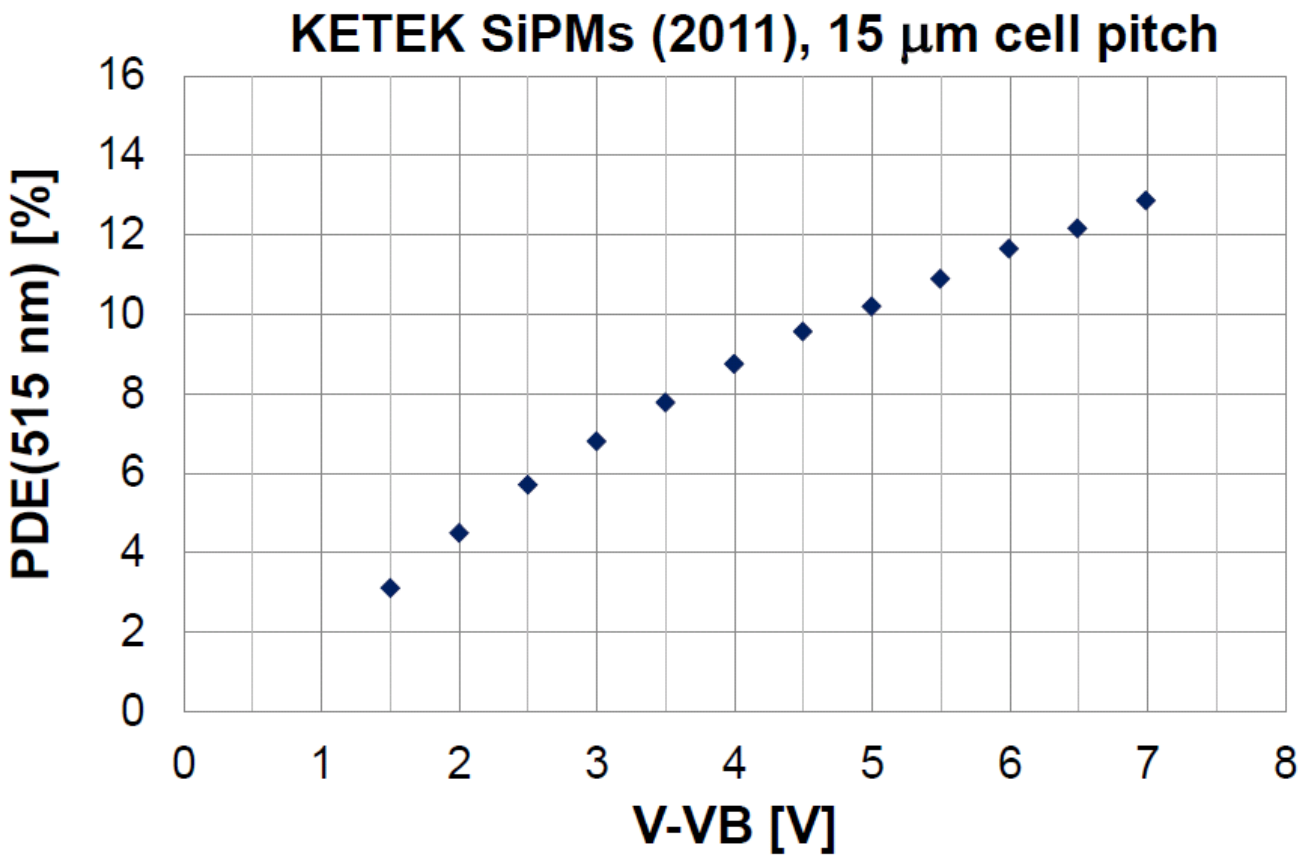
- Six different microcell versions:

  V1: GE = 12.7%
  V2: GE = 18.2%
  V3: GE = 20.9%
  V4: GE = 31.8%
  V5: GE = 24.3%
  V6: GE = 29.9%

- GND Bondpad Size: Ø120 µm

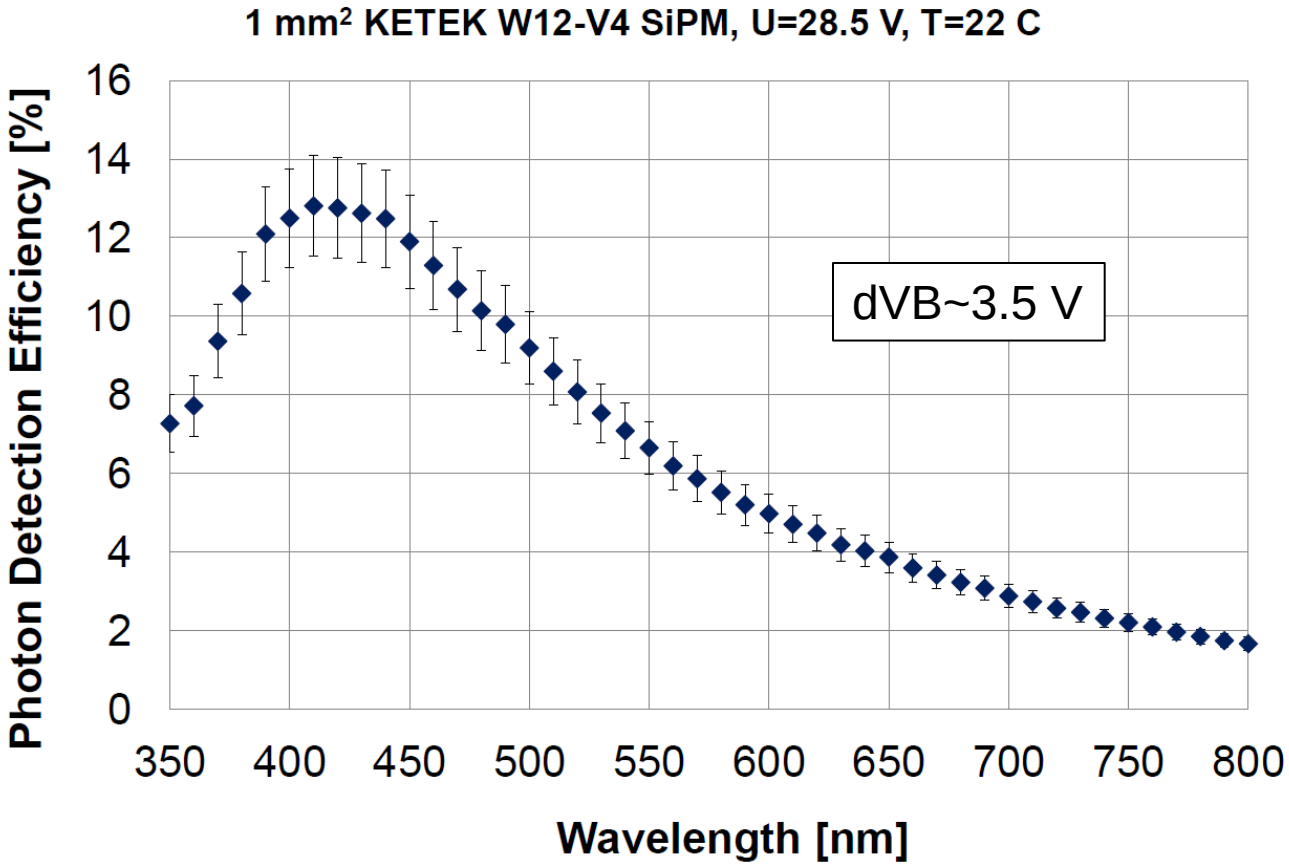
В 2011 году КЕТЕК (Германия) разработал МЛФД с шагом ячейки 15 микрон

1 mm^2 SiPM: PDE vs. dVB



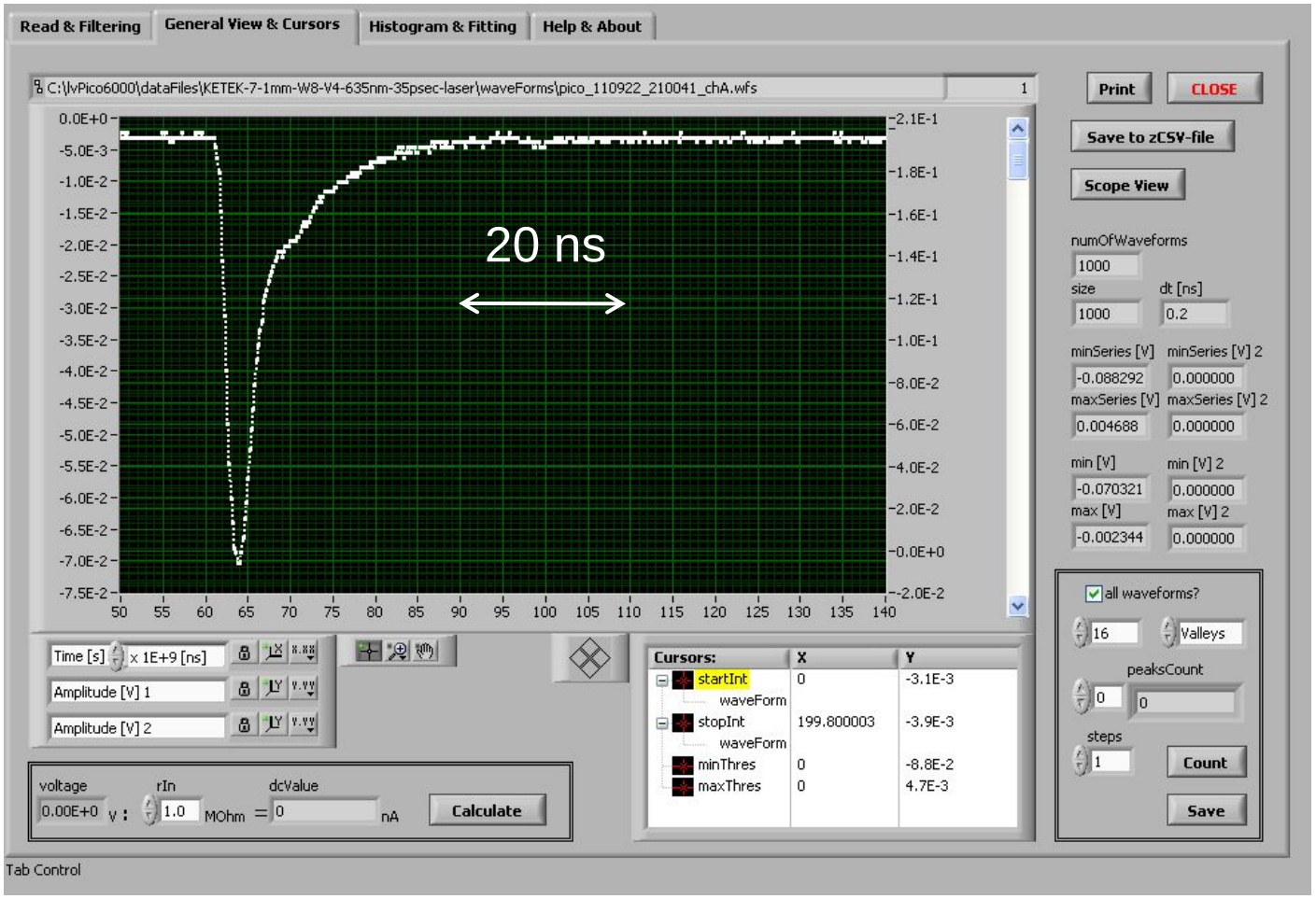
PDE(515 нм) достигает 12% при V-VB=6.5 В

1 mm^2 SiPM: PDE vs. Wavelength



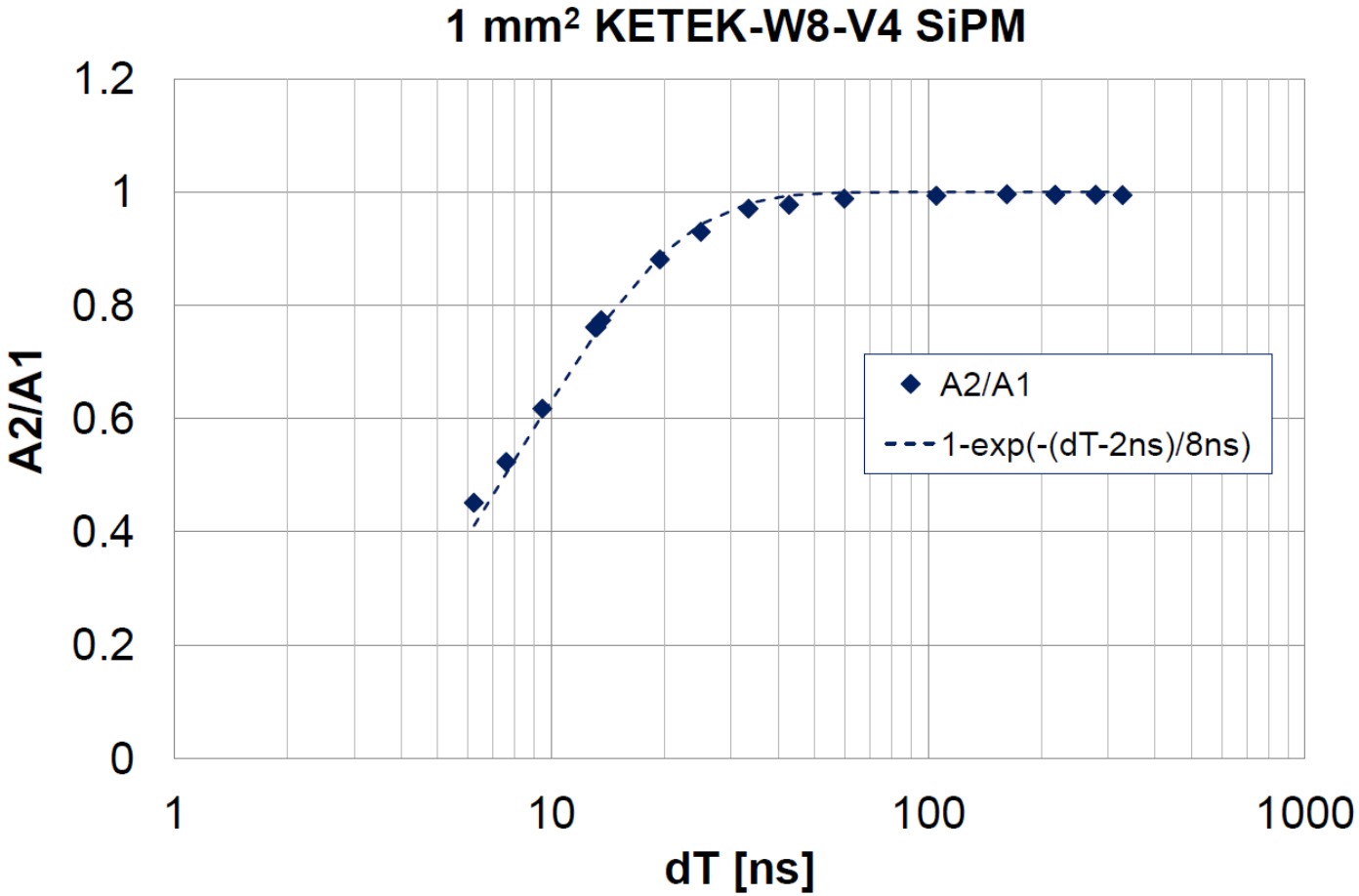
Пик спектральной чувствительности приходится на сине-фиолетовую область спектра.

1 mm^2 SiPM: 35 ps laser response (R_{load}=17 Ohm)



Быстрый отклик на 35 пикосекундный лазерный импульс

1 mm² SiPM: cell recovery

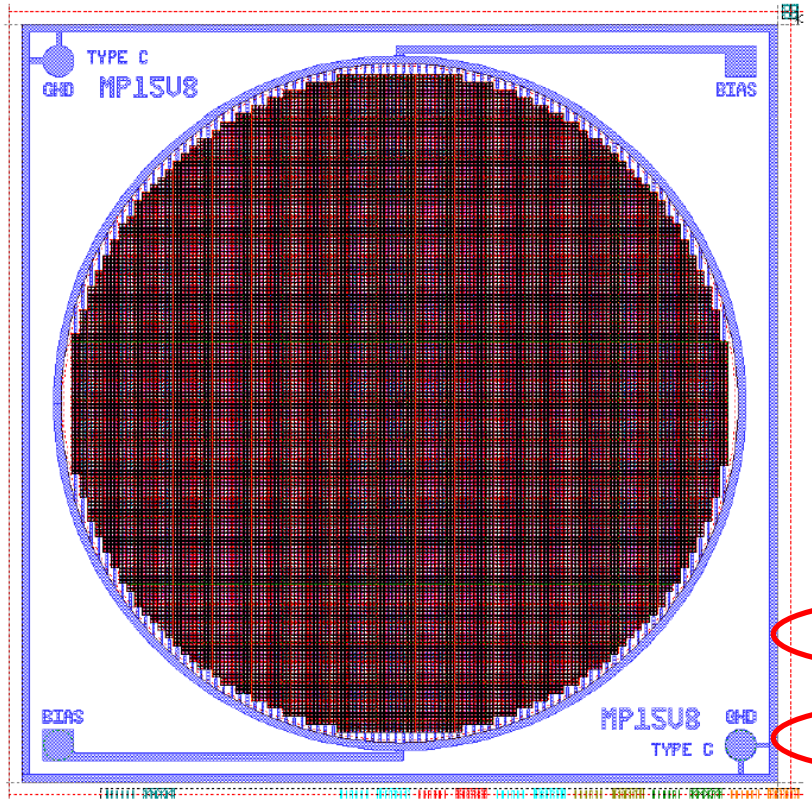


Время восстановления ячейки ~8 нсек

2012: новые МЛФД КЕТЕК

Chip Dimensions

Chip Type C



- 2 Bias Bondpads, Size: 120 µm x 120 µm
- 2 GND Bondpads, Size: Ø120µm
- Distance active area – chip edge > 230 µm
- Cell Pitch: 20 µm // 15 µm
- Quantity of cells: 12532 // 22376

- Dicing frame: 3.00 mm x 3.00 mm
- Chip size after dicing: 2.95 mm x 2.95 mm

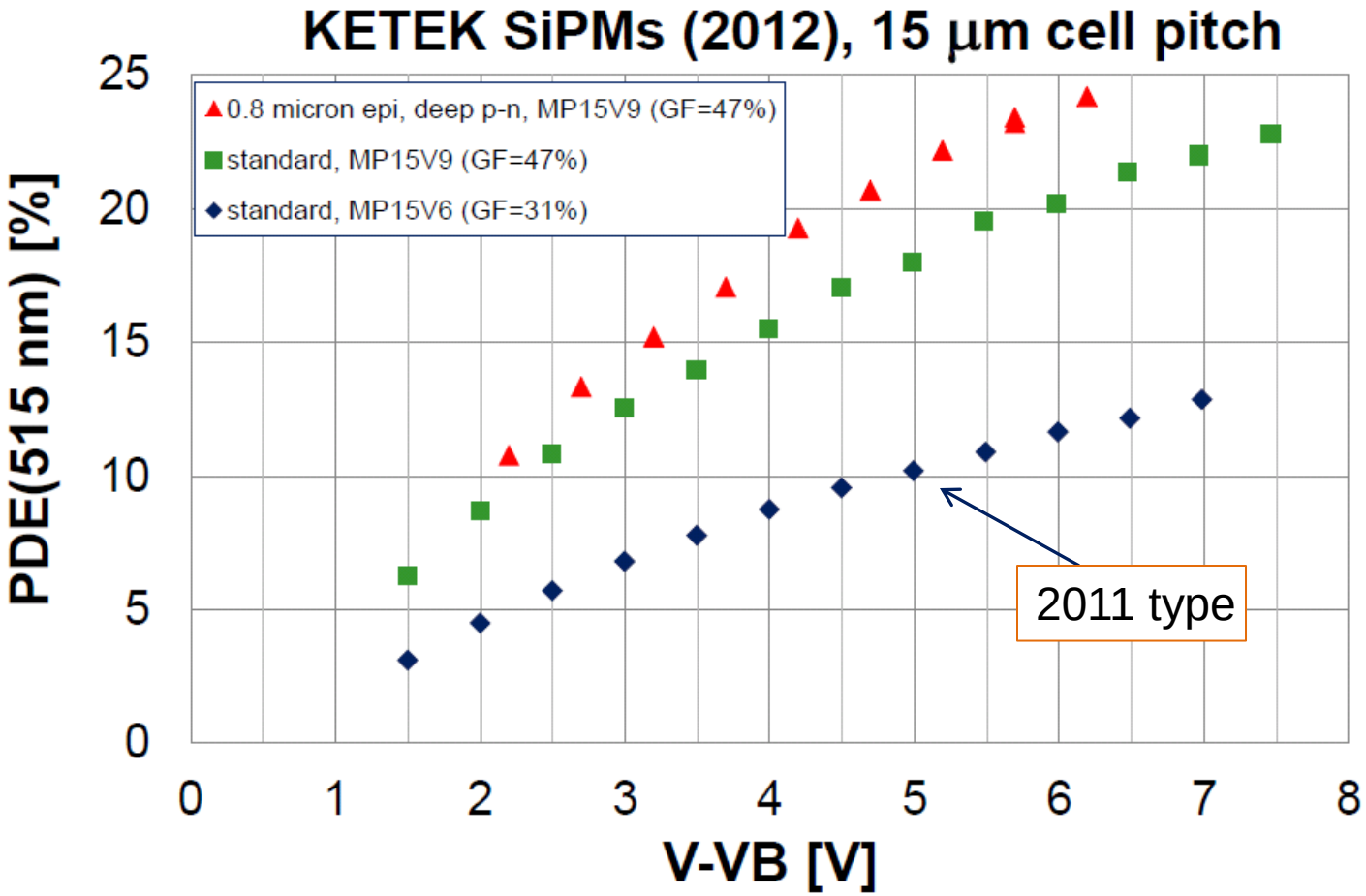
- Five different microcell versions:
  (GE according to anode area)

MP20V6: GE = 36.7%
MP20V8: GE = 42.5%

MP15V6: GE = 29.9%
MP15V7: GE = 33.6%
MP15V8: GE = 41.0%
MP15V9: GE = 47.1%

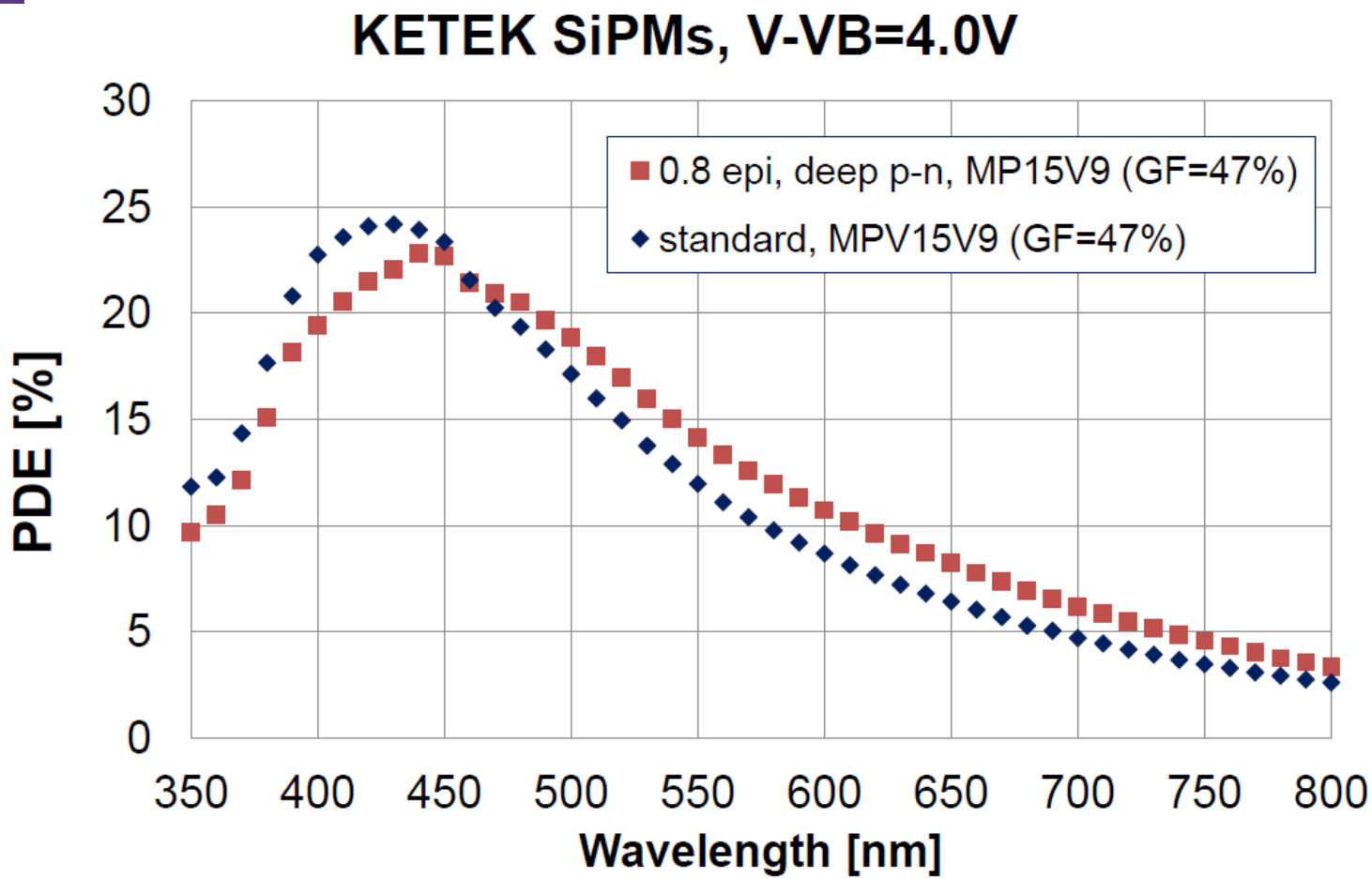
По сравнению с МЛФД, изготовленными в 2011 году МЛФД(2012) имеют увеличенный геометрический фактор (47% против 30% в 2011 году), введён дополнительный эпитаксиальный слой и "утоплен" p-n переход

PDE vs. dVB



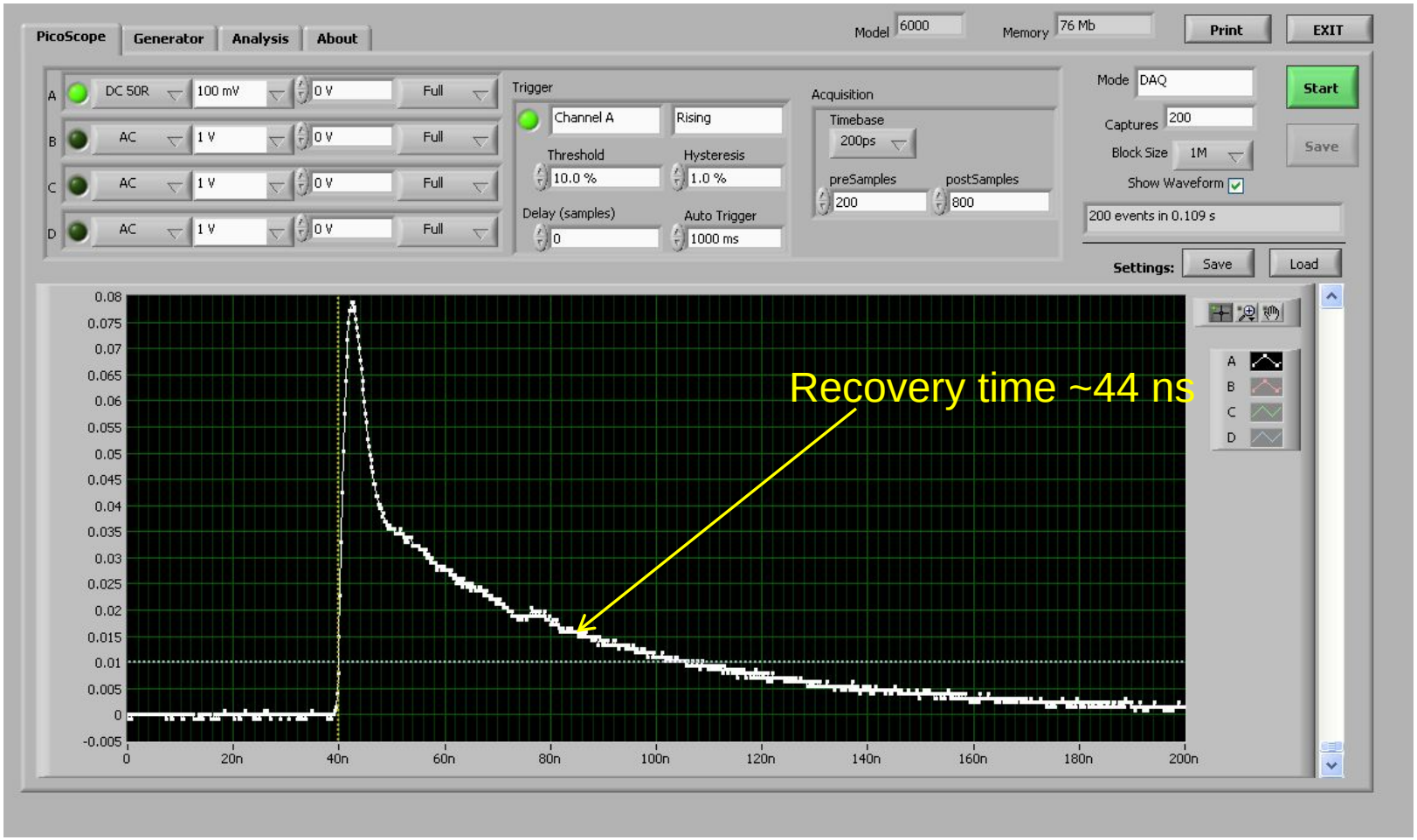
В новой структуре (дополнительная эпитаксия и более глубокий p-n переход) значительно возросла квантовая эффективность МЛФД !!

PDE vs. wavelength



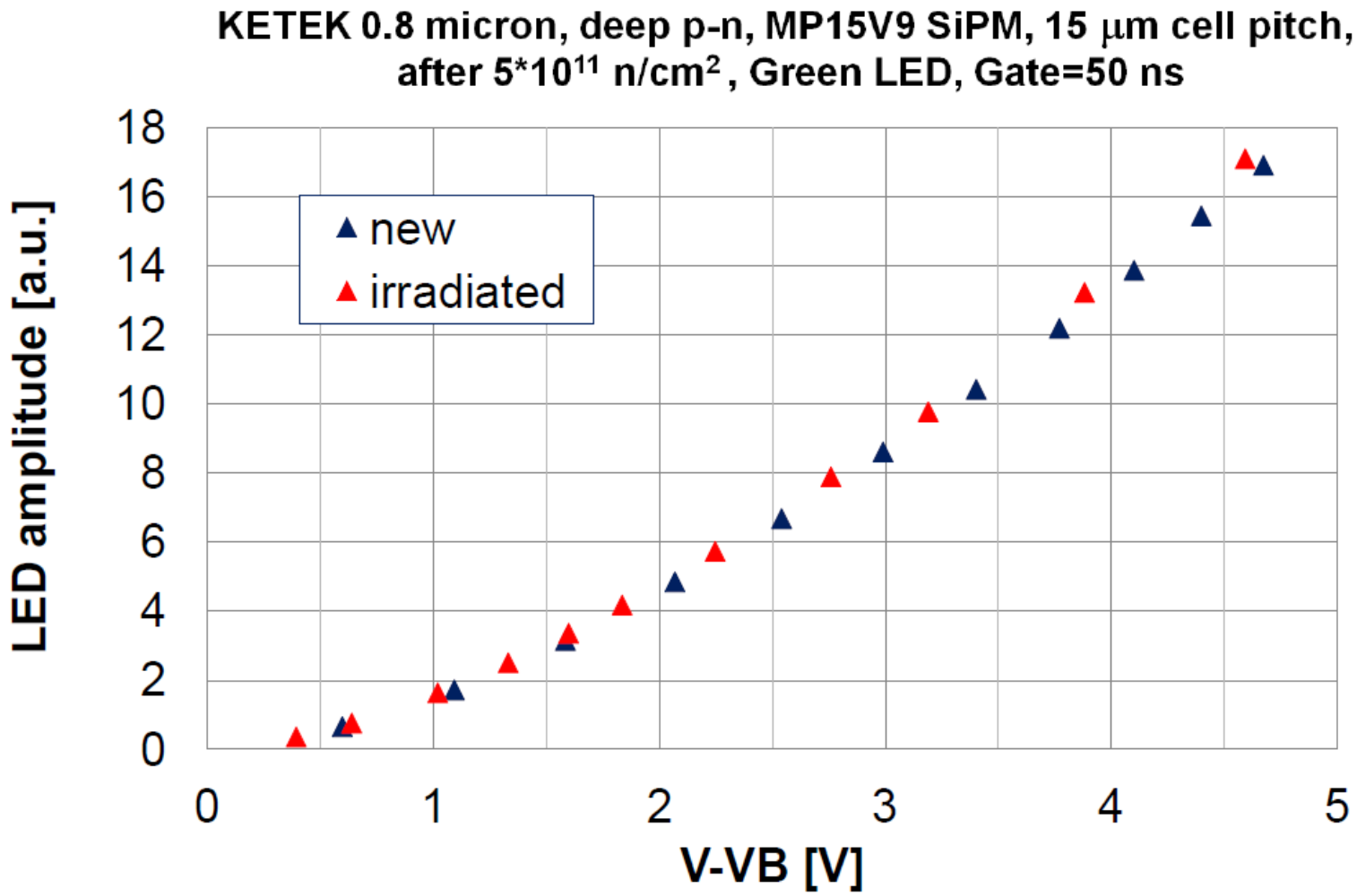
В новых (2012) МЛФД спектральная характеристика сдвинута в сторону зелёного света

KETEK SiPM laser response (0.8 micron epi, deep p-n)



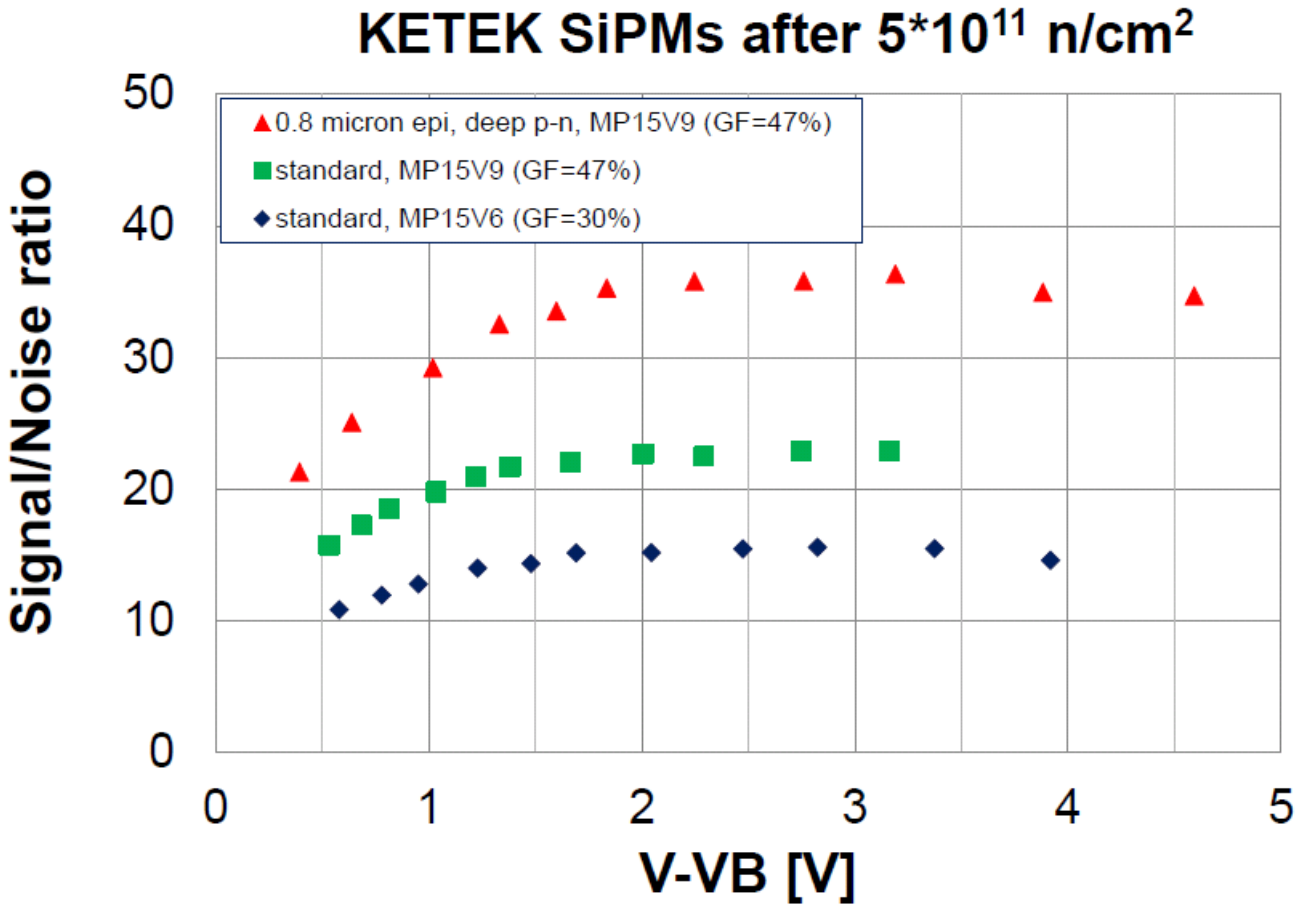
КЕТЕК ошибся при "допировании" поликремниевого резистора
--> время восстановления ~44 нсек

KETEK SiPMs after $5*10^{11}$ n/cm^2



Изменение амплитуды сигнала (~PDE*Gain) после облучения менее 5%

S/N after $5*10^{11}$ n/cm^2



МЛФД(2012/2011): Отношение сигнал/шум после облучения возросло более чем в 2.2 раза

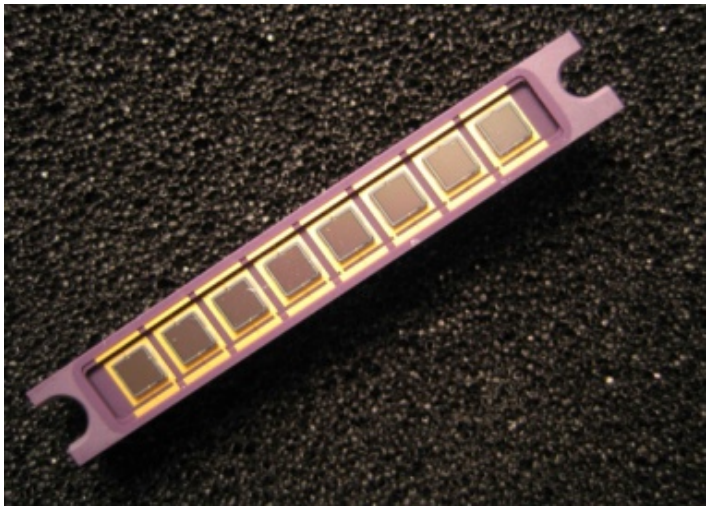
Параметры новых МЛФД КЕТЕК

<u>Для перенапряжения V-VB=4 В:</u>

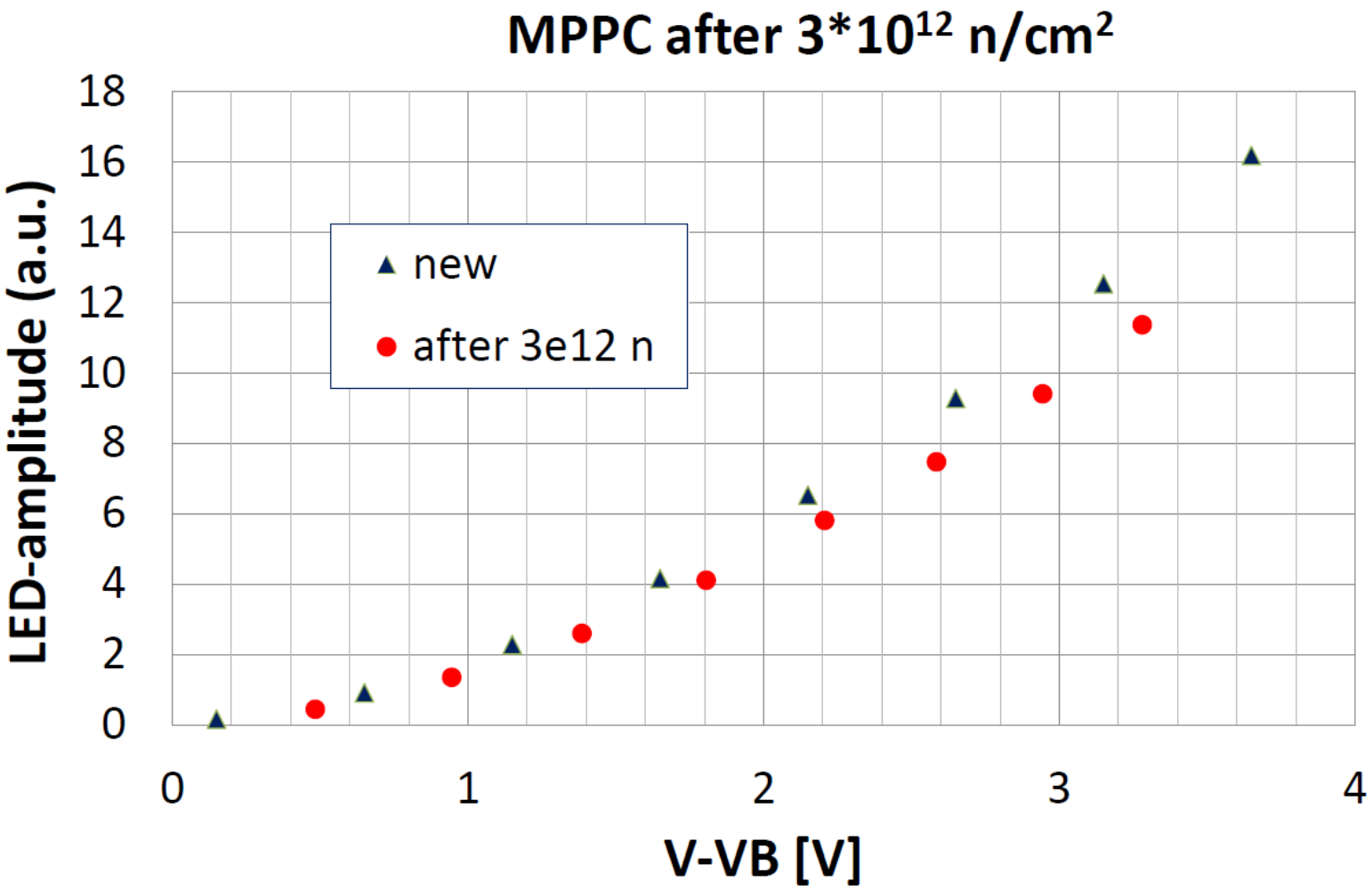
- Коэффициент усиления: $3.5*10^5$
- PDE(515 нм)~18 %
- ENF<1.2
- Время восстановления ячейки ~44 (8) нсек
- Диапазон линейности для света от Y11: >23 000 ф.э./5мм^2

KETEK vs. MPPC neutron irradiation studies

Матрицы МЛФД КЕТЕК и Hamamatsu были облучены потоком нейтронов ~ $3*10^{12}$ n/см^2 (E~1 МэВ). Индивидуальные МЛФД имели площадь ~5 мм^2 и шаг ячеек 15 микрон. Основные параметры МЛФД были измерены до и после облучения.

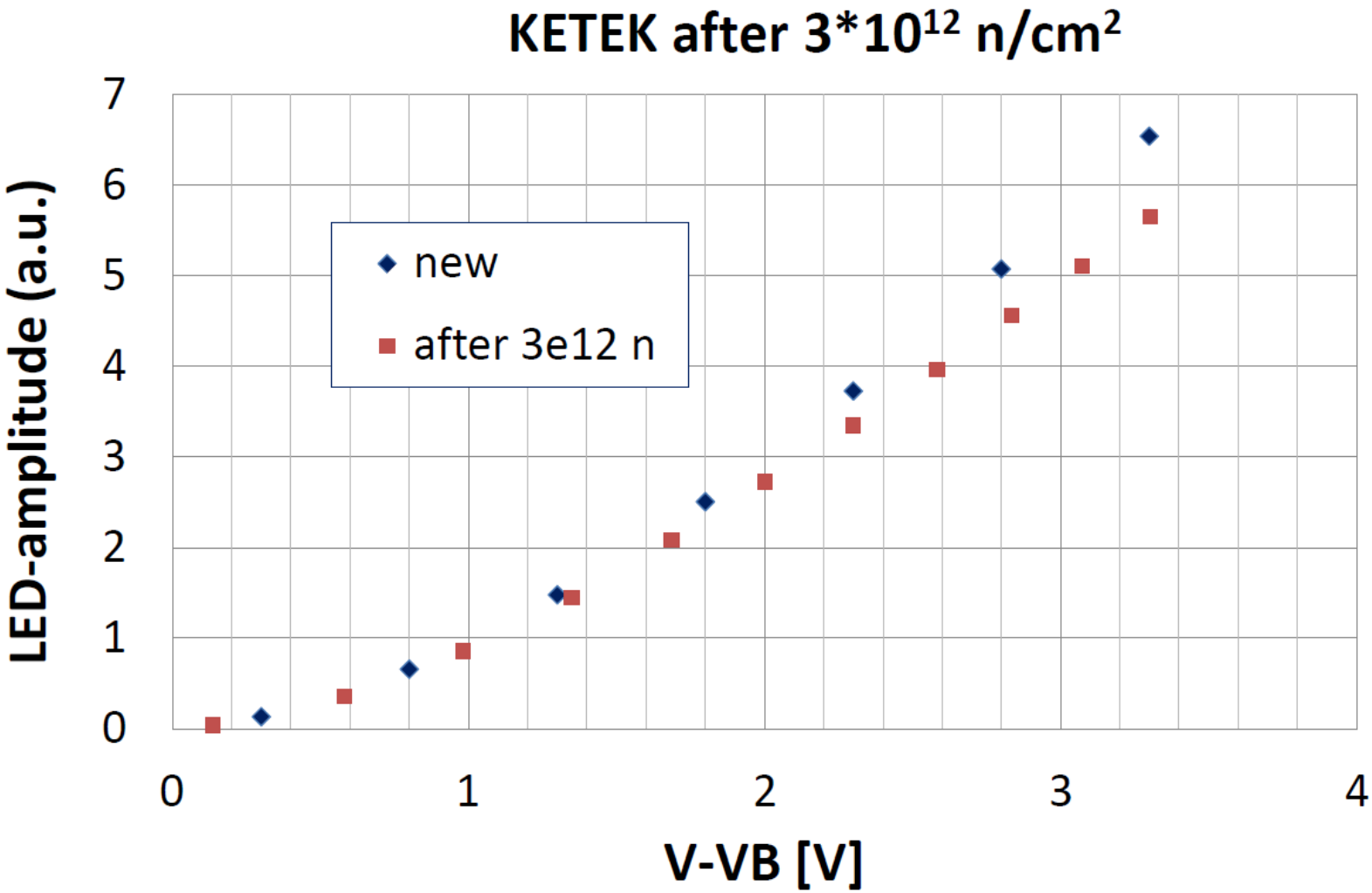


MPPC: LED amplitude vs. dVB



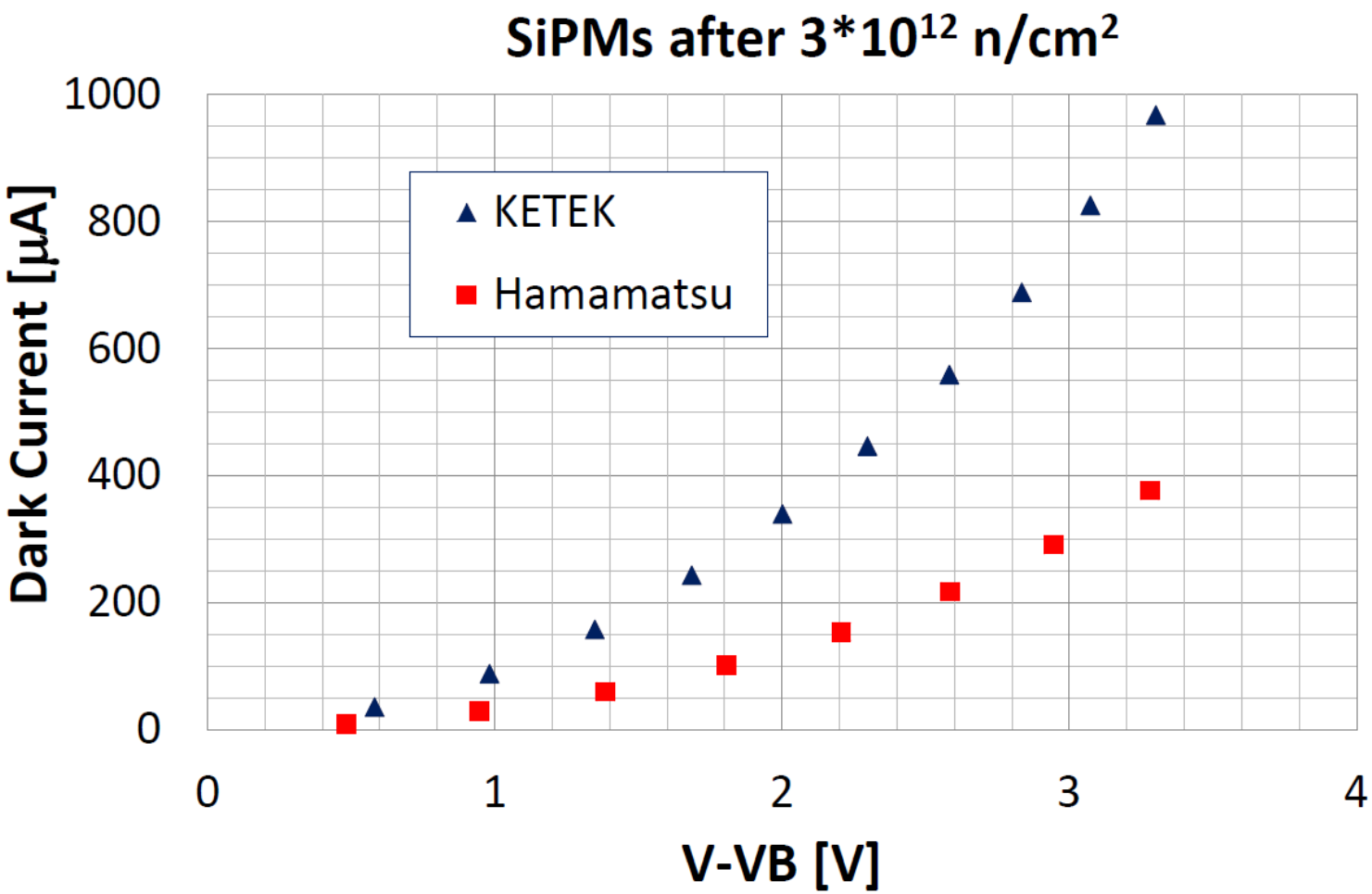
*Изменение амплитуды сигнала (Gain*PDE) меньше чем 10%*

KETEK: LED amplitude vs. dVB



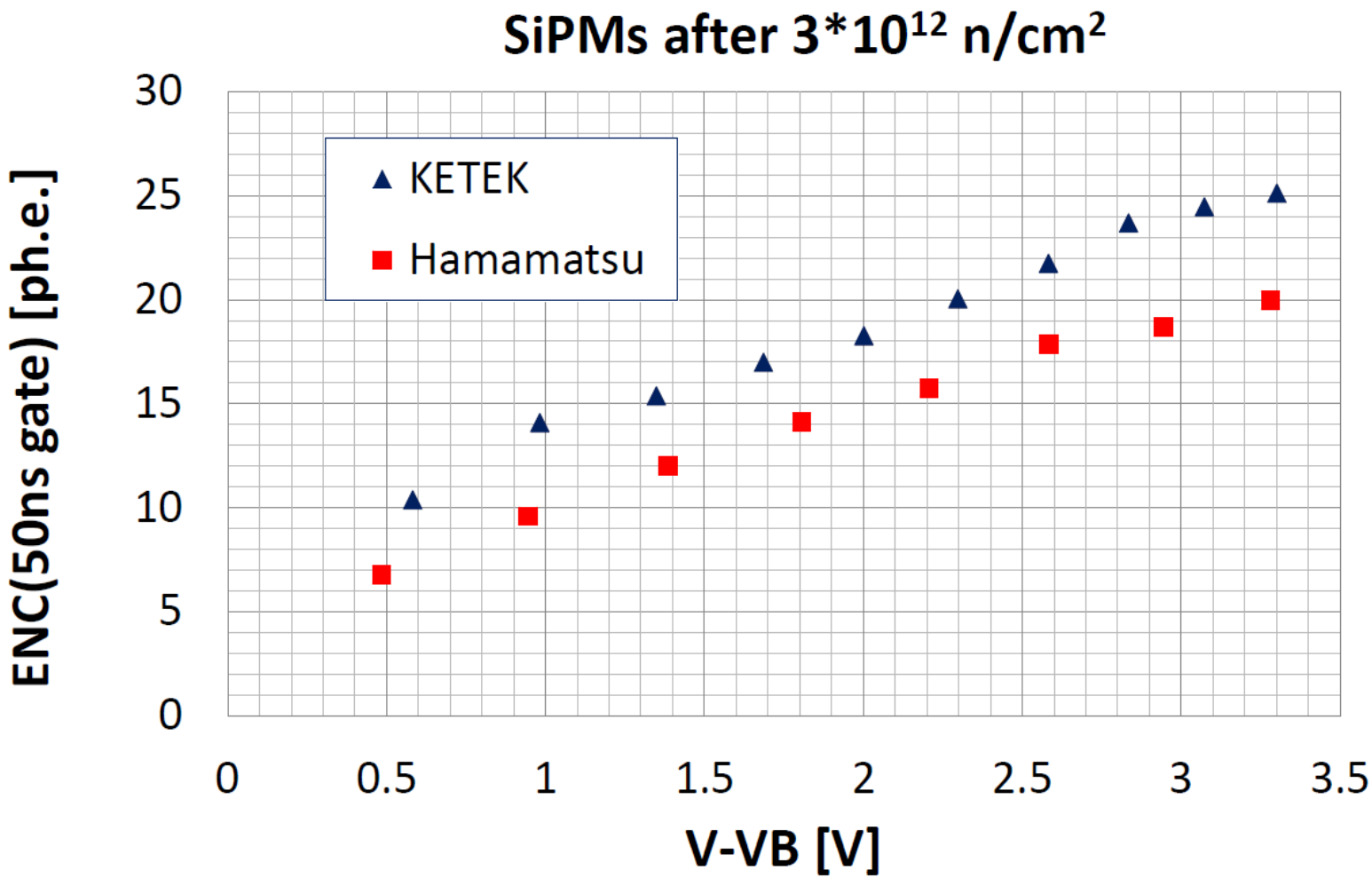
*Изменение амплитуды сигнала (~PDE*Gain) после облучения менее 10 %*

MPPC&KETEK: Dark Current vs. dV



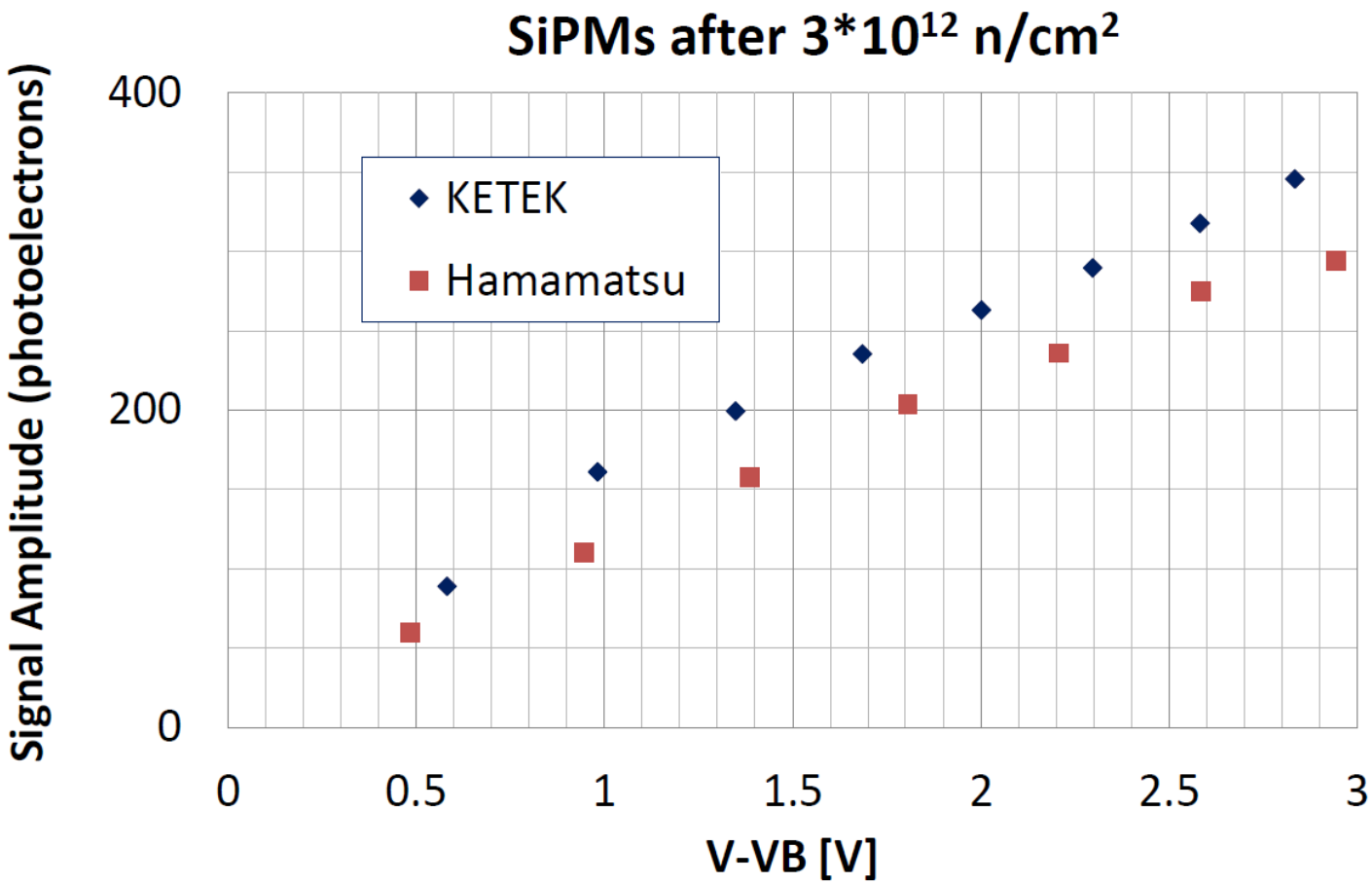
Темновой ток МЛФД КЕТЕК после облучения выше, чем ток Hamamatsu MPPC (в основном из-за лучшего геометрического фактора и большего коэффициента усиления)

MPPC&KETEK: ENC vs. dV



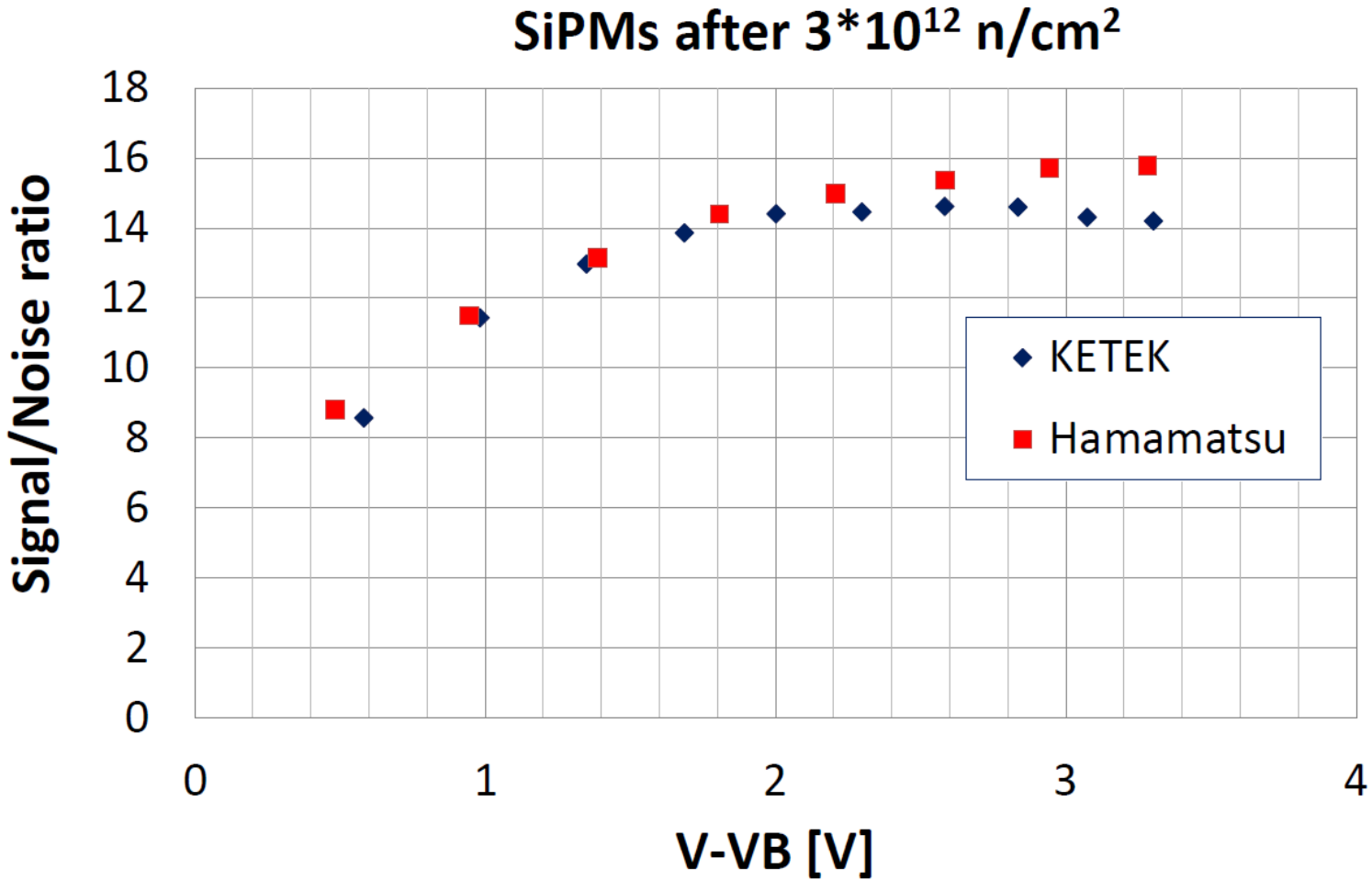
Шум МЛФД КЕТЕК после облучения несколько выше, чем шум Hamamatsu MPPC (в основном из-за лучшего геометрического фактора)

MPPC&KETEK: Amplitude in p.e. vs. dV



Амплитуда сигнала после облучения, выраженная в фотоэлектронах, выше для МЛФД КЕТЕК (из-за большего геометрического фактора)

MPPC&KETEK: S/N ratio vs. dV



Отношение сигнал/шум после облучения нейтронами одинаково для KETEK и Hamamatsu МЛФД

Заключение и ближайшие планы

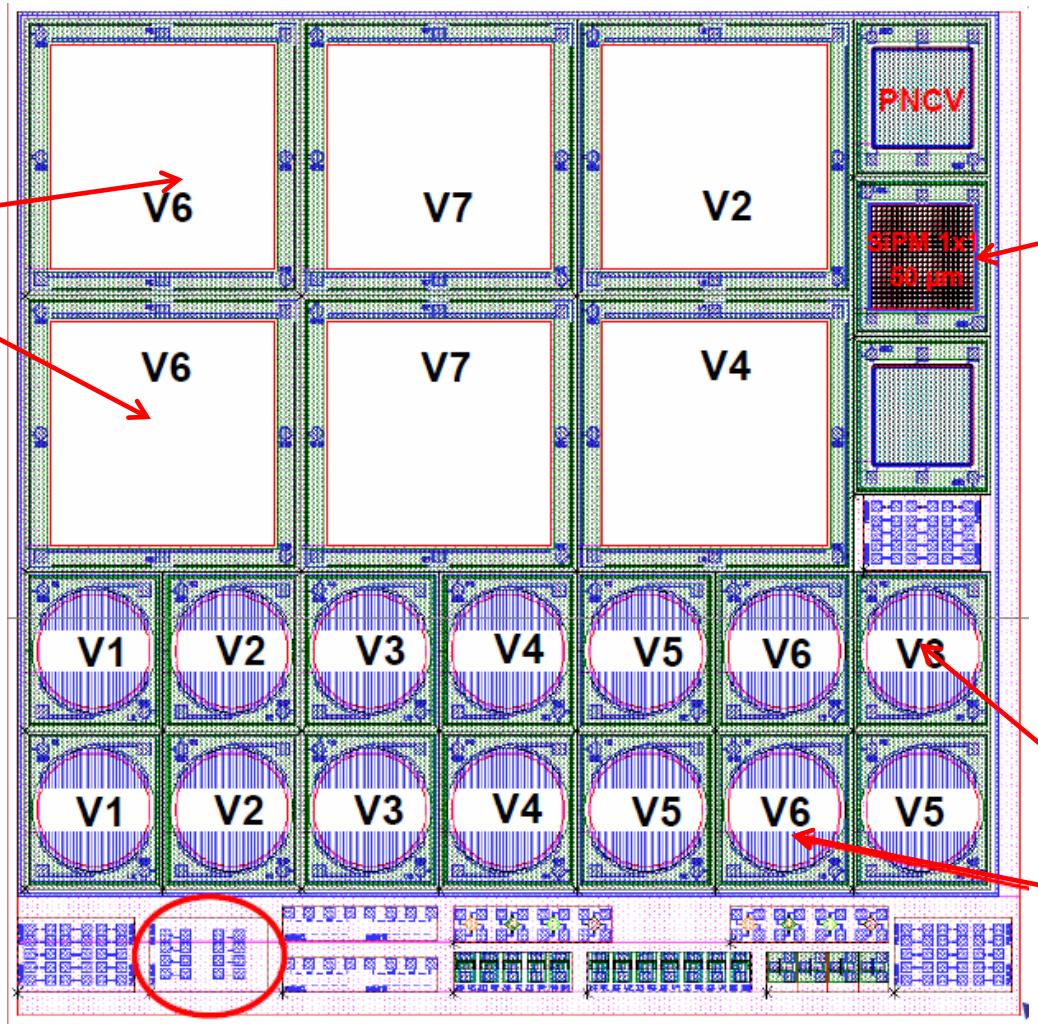
Новые МЛФД Hamamatsu и KETEK по своим параметрам (динамическому диапазону, квантовой эффективности, коэффициенту усиления, времени восстановления ячеек, радиационной стойкости) близки к требованиям программы модернизации CMS HCAL.

<u>Ближайшие планы:</u>

- пучковые тесты линеек МЛФД в модуле CMS HB&HE HCAL (ноябрь 2012 года);
- совместная работа с фирмами-разработчиками ЛФД по улучшению параметров ЛФД (PDE, динамический диапазон, радиационная стойкость, надёжность...) (середина 2013 года)
- утверждение электро-оптических параметров МЛФД для CMS HCAL, выбор корпуса и конструкции оптического модуля (середина 2013 года);
-выбор производителя/производителей (середина-конец 2013 года)
- изготовление опытной партии линеек МЛФД для CMS HB&HE HCAL, ~200 - 300 линеек (середина 2014 года)
- исследование опытной партии линеек МЛФД (конец 2014 года)
- изготовление/измерение/отбраковка линеек МЛФД для CMS HCAL (2015-2016 годы)
- изготовление оптических модулей (конец 2015 - начало 2017 года)
- установка оптических модулей и электроники в CMS HCAL (2017 год)

Бонус от R&D для CMS HCAL:
KETEK 50D-adv МЛФД

50 μm KETEK SiPMs

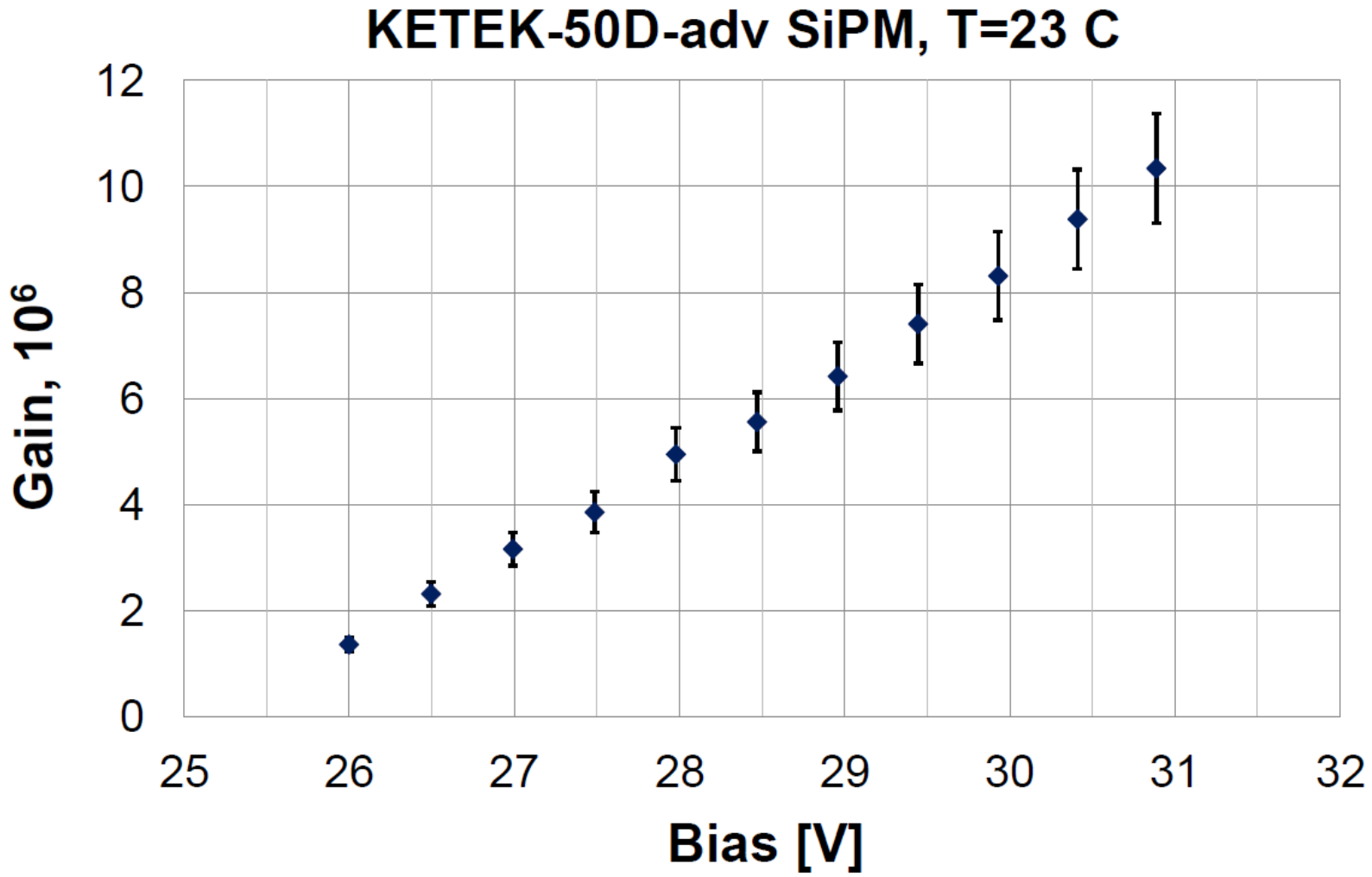


20 μm cell pitch

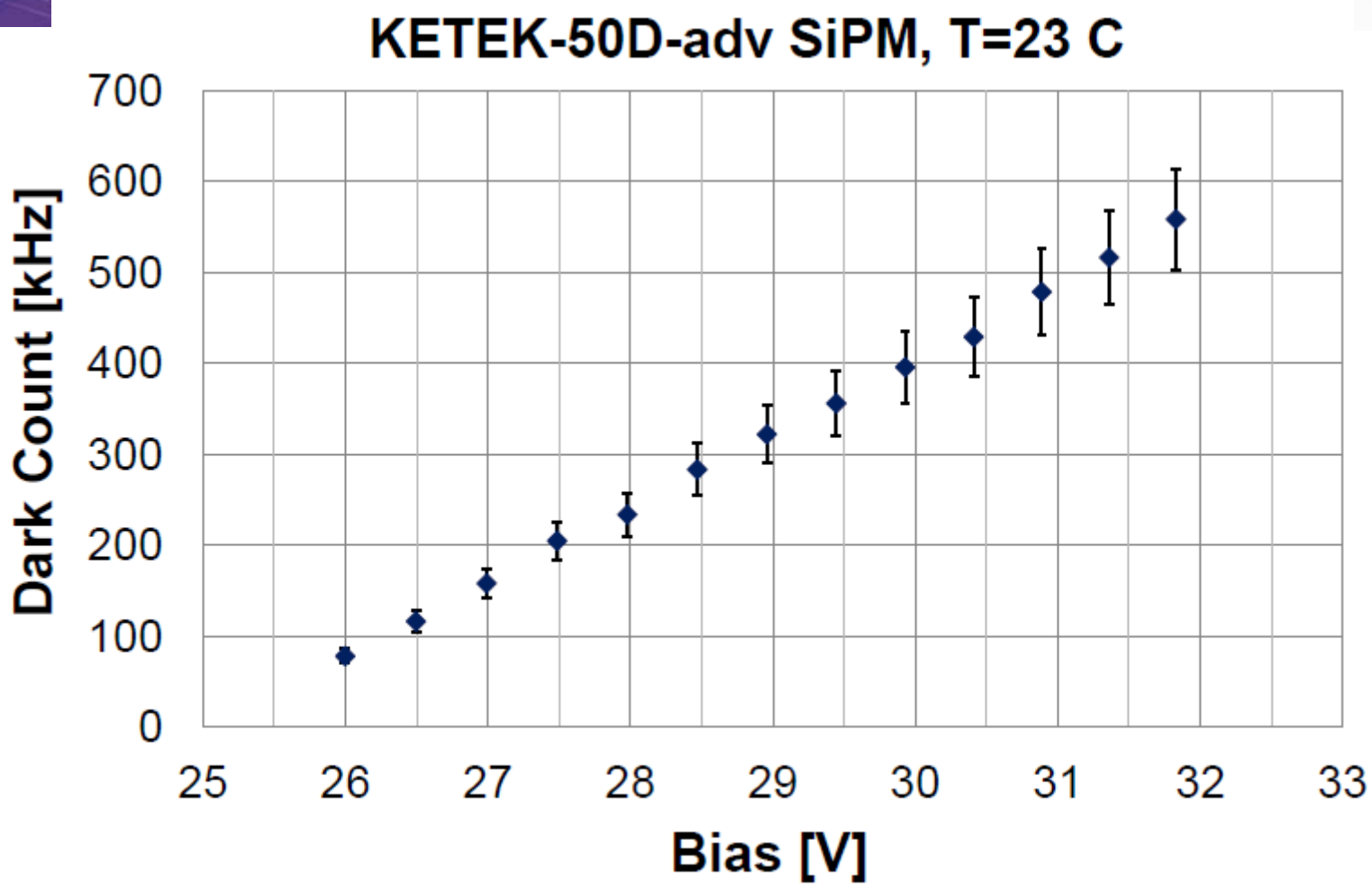
50 μm cell pitch

15 μm cell pitch

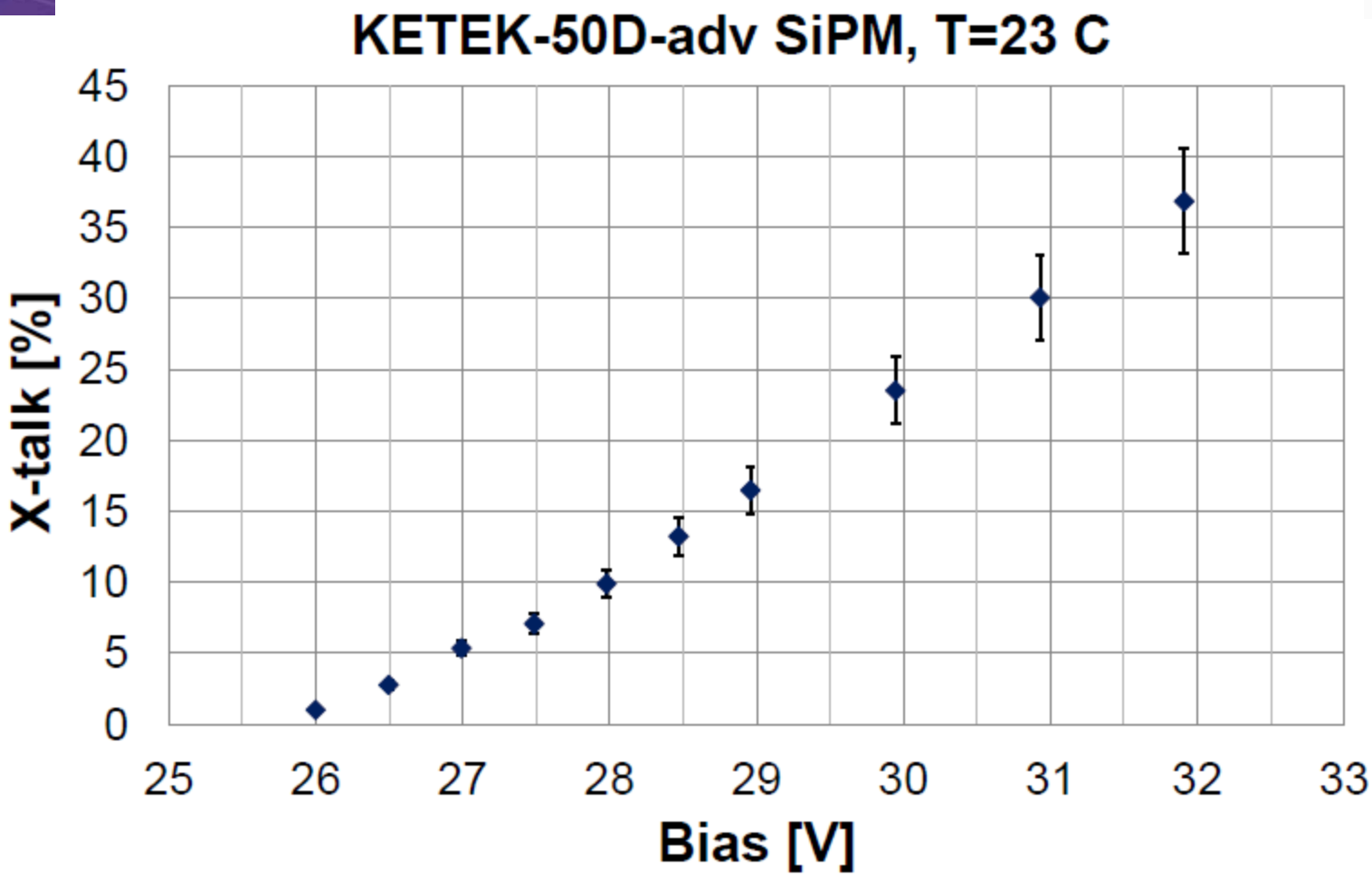
Gain vs. Bias


KETEK-50D-adv SiPM, T=23 C
Gain, 10^6
0
2
4
6
8
10
12
25
26
27
28
29
30
31
32
Bias [V]

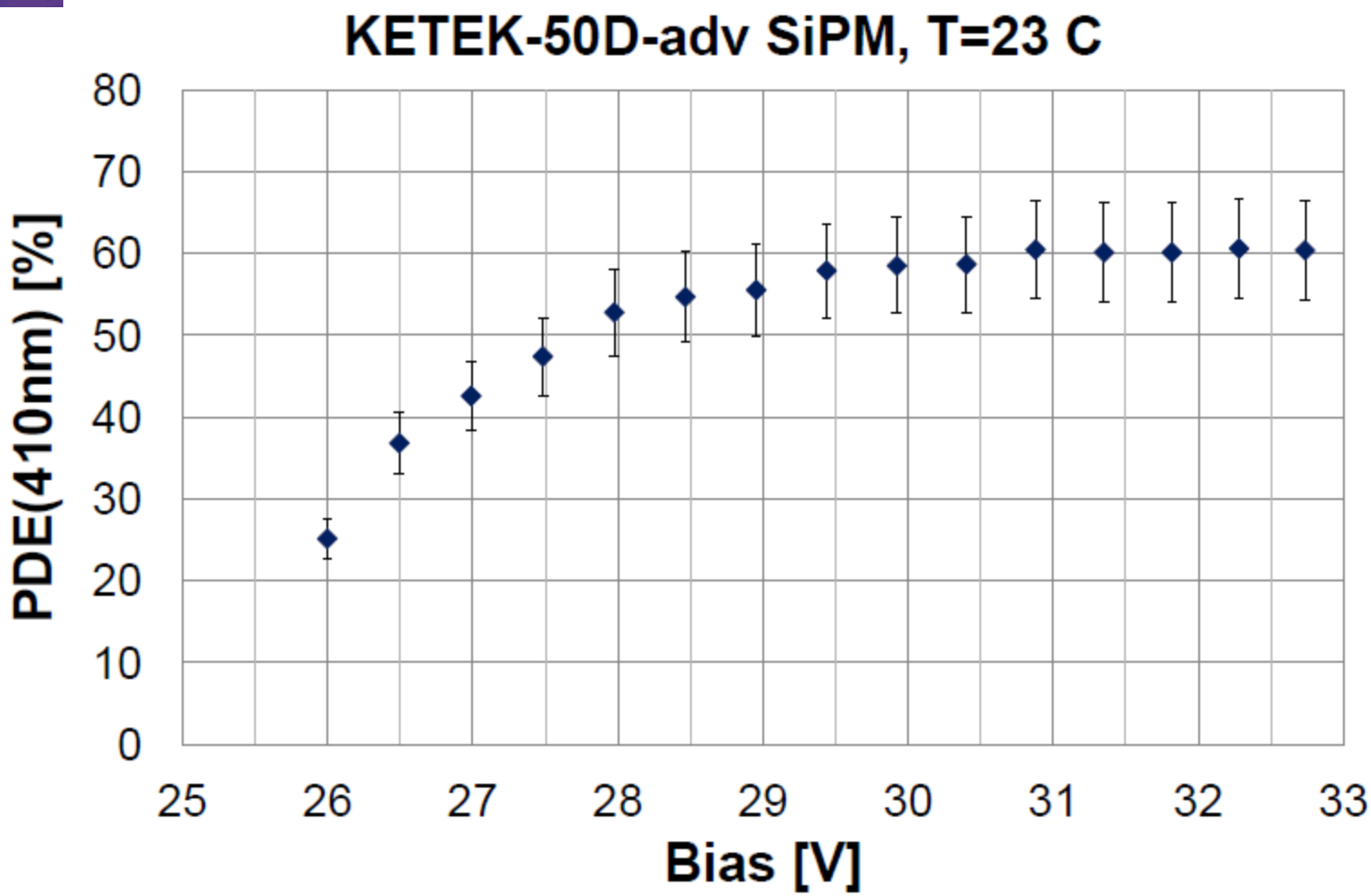
Dark Count vs. Bias



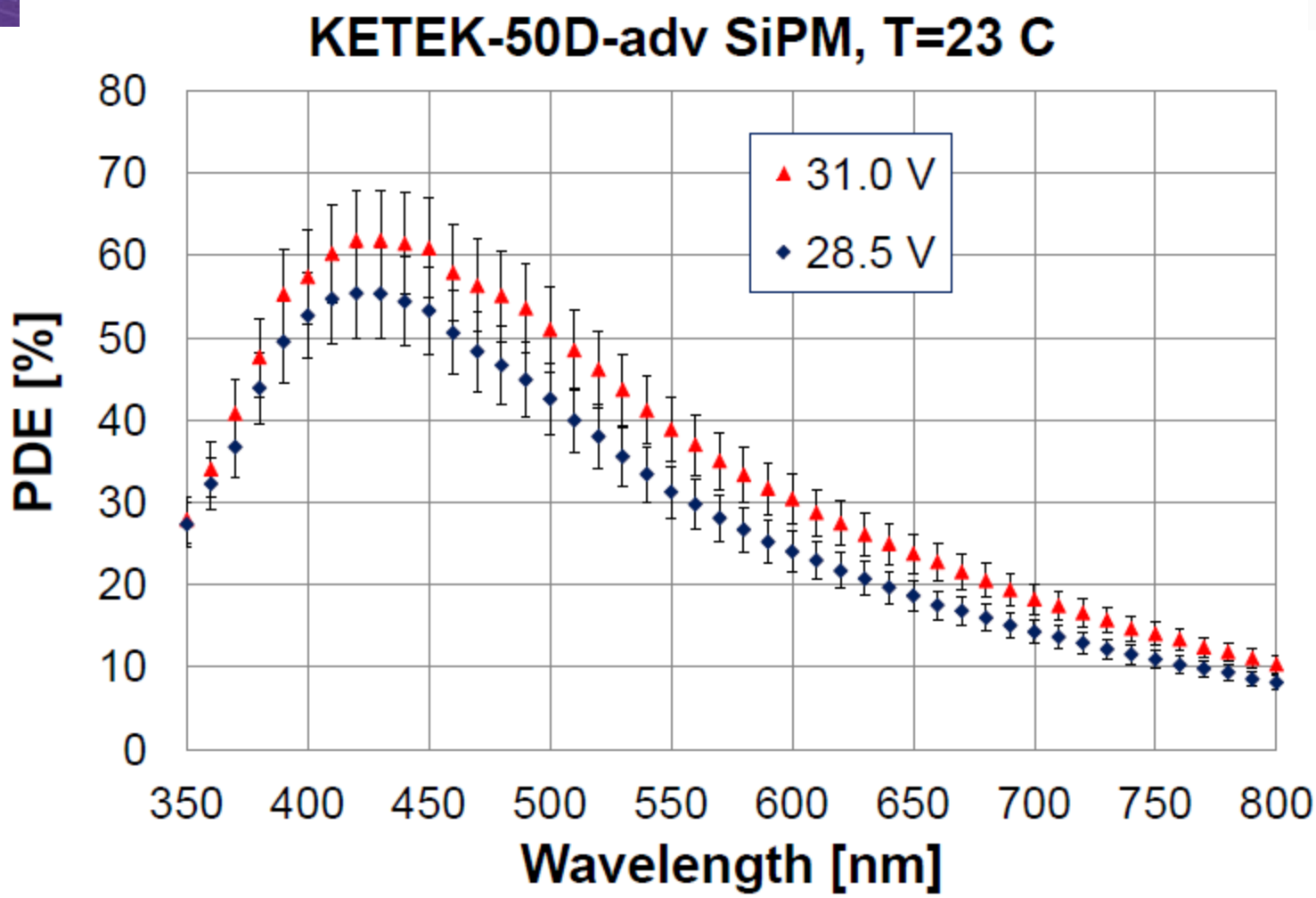
X-talk vs. Bias



PDE vs. Bias


KETEK-50D-adv SiPM, T=23 C
PDE(410nm) [%]
80
70
60
50
40
30
20
10
0
25
26
27
28
29
30
31
32
33
Bias [V]

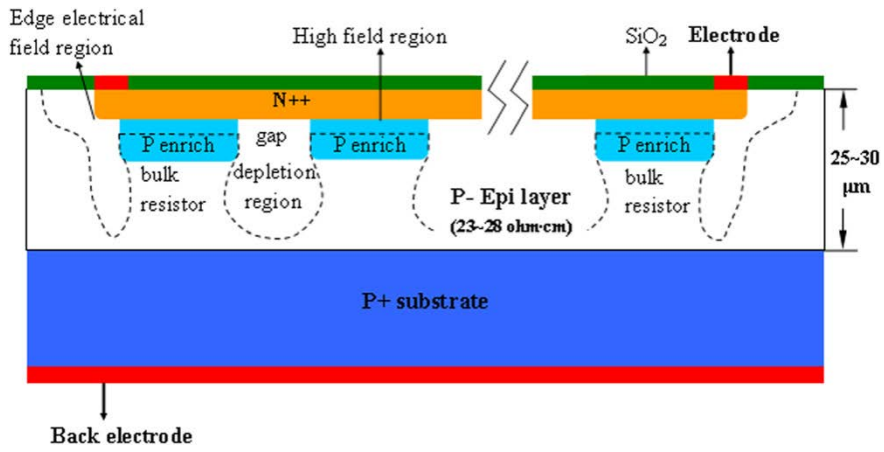
PDE vs. Wavelength



Дополнительно

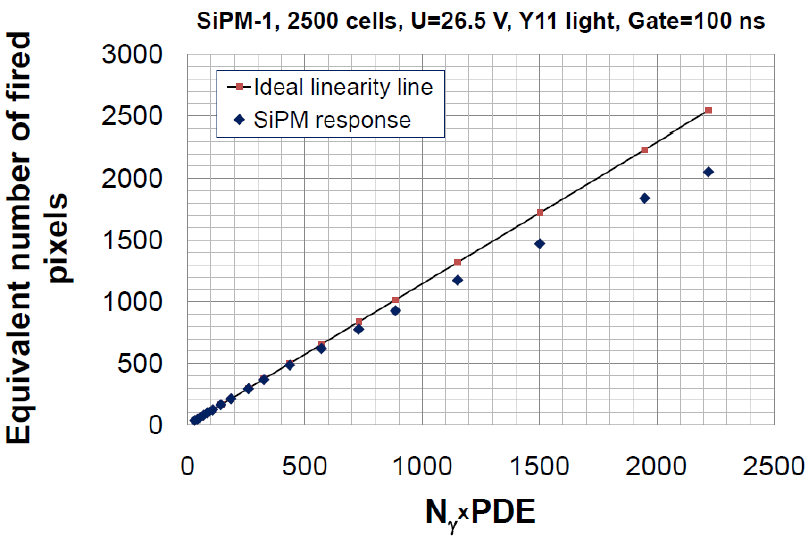
МЛФД с "объёмными" резисторами (made in China)

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

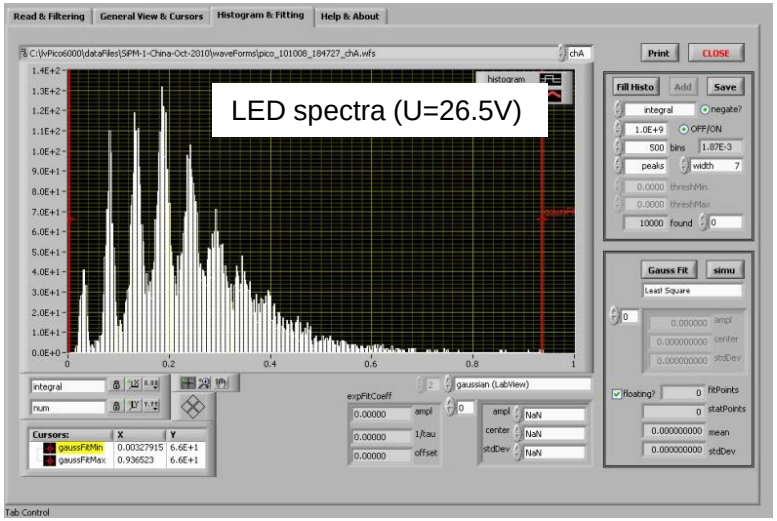


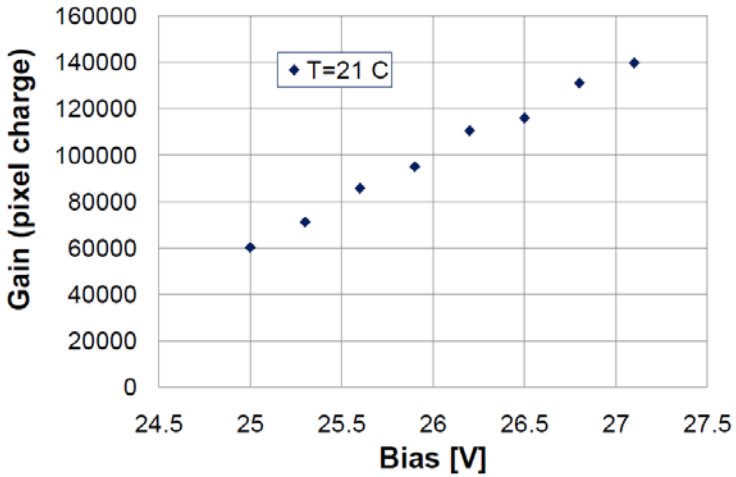
Novel Device Laboratory (Пекин, Китай) разработали и изготовили МЛФД с "объёмными" резисторами:

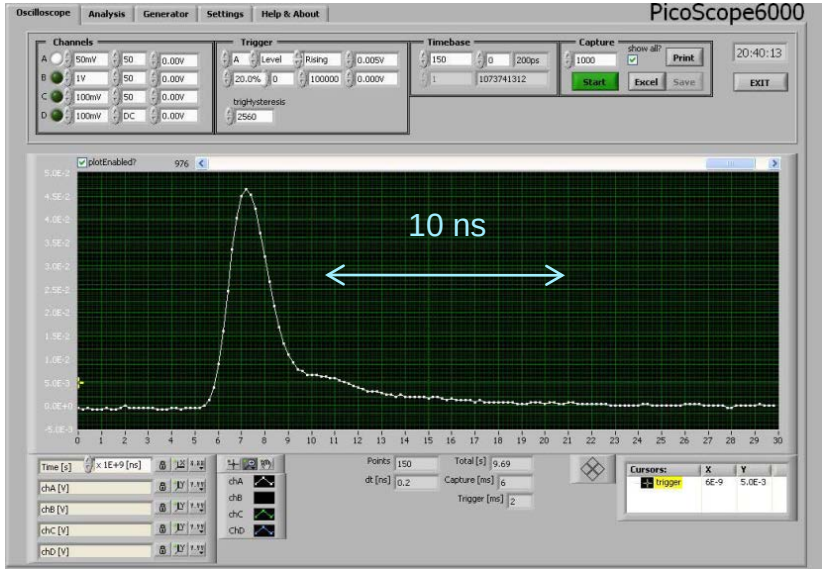
- чувствительная площадь - 0.25 мм^2
- число ячеек - 2 500
- рабочее напряжение - 26.5 В
- величина гасящего сопротивления - 200-300 кОм

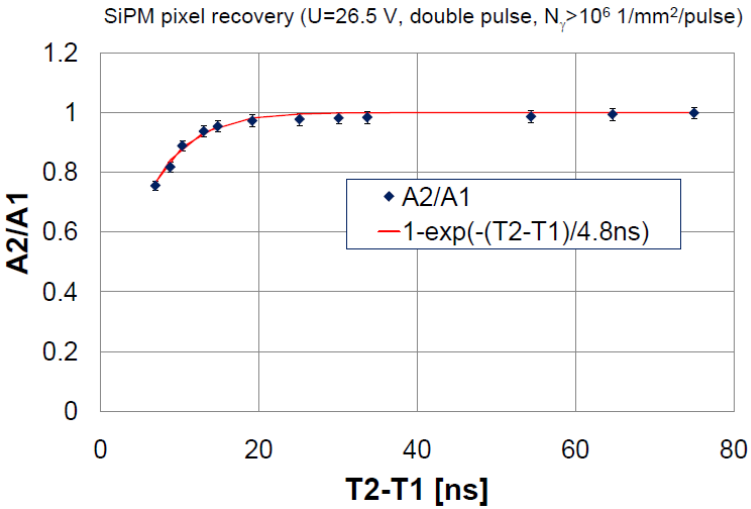
В отличие от МЛФД (MPI), китайский ЛФД изготовлен на кремнии p-типа.

Параметры МЛФД (NDL) - I

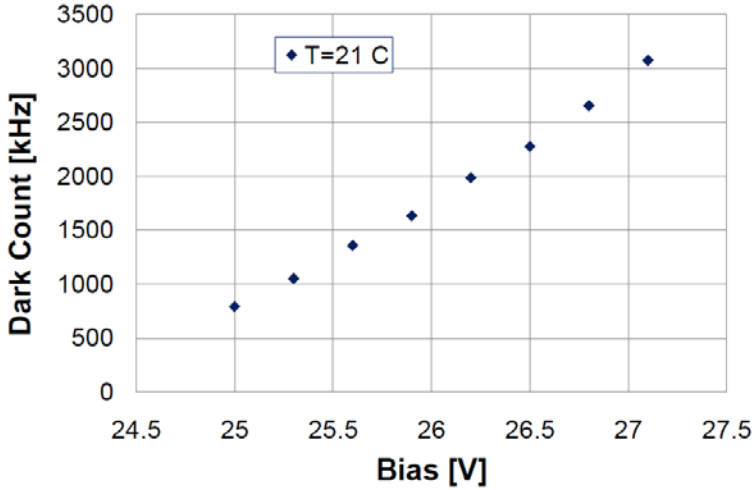


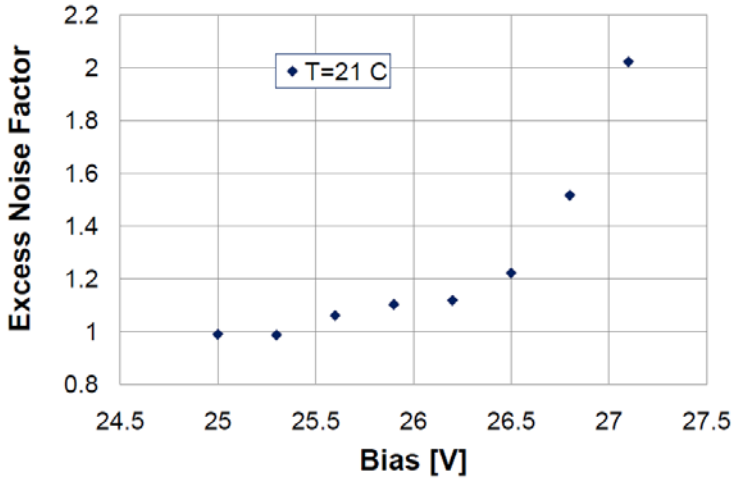


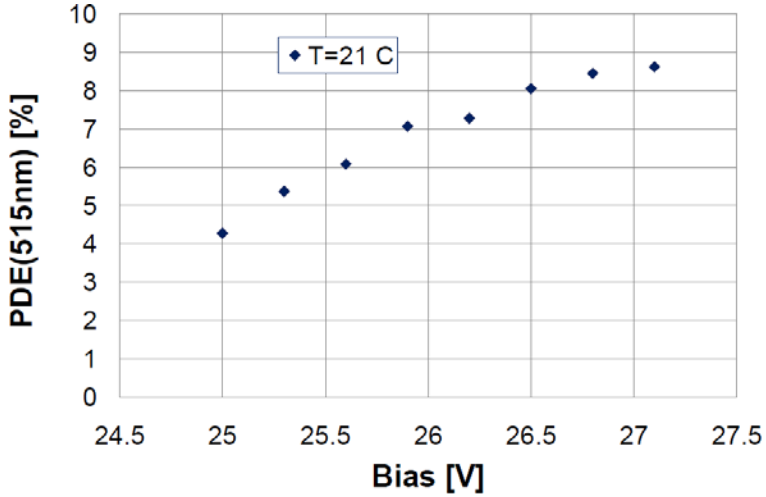


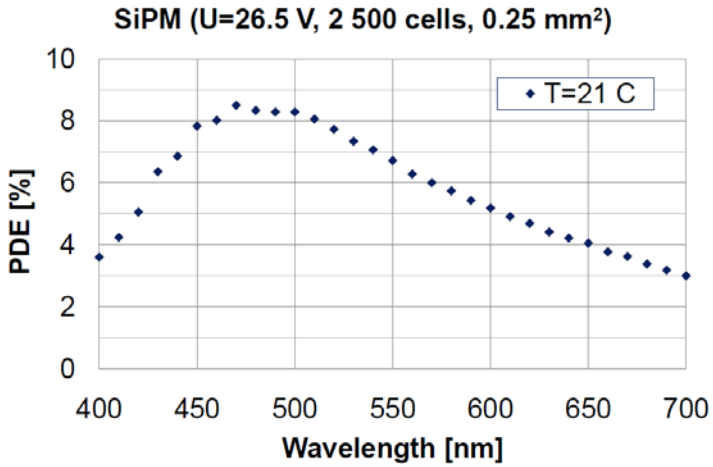


Параметры МЛФД (NDL) - II

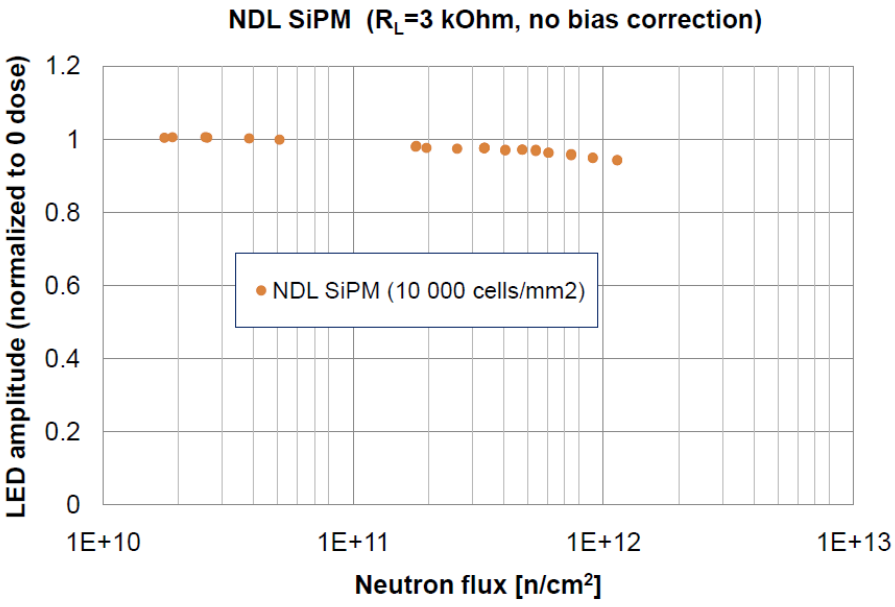


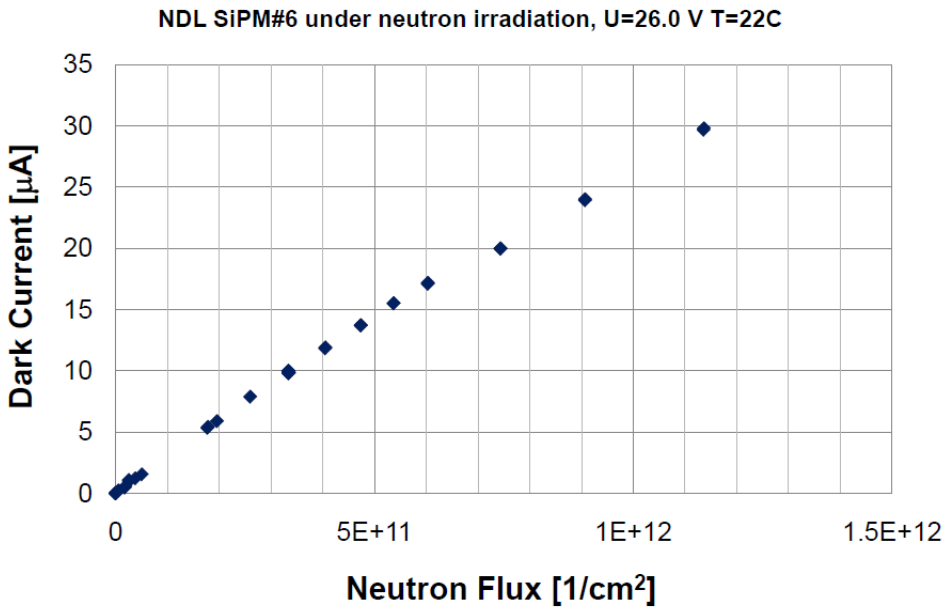






МЛФД (NDL) во время облучения нейтронами





Малый PDE на зелёном свете (~7-8%) и значительное возрастание темнового тока (и шумов) после облучения нейтронами затрудняет использование этого МЛФД в эксперименте CMS