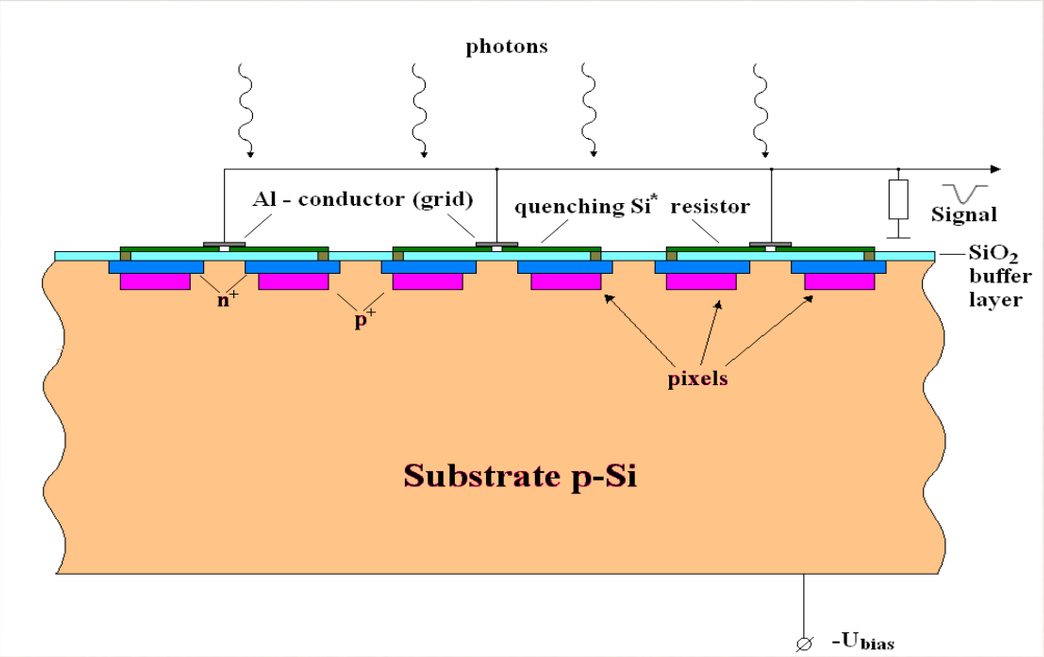
Лабораторный семинар ЛЯП ОИЯИ 17.05.2018

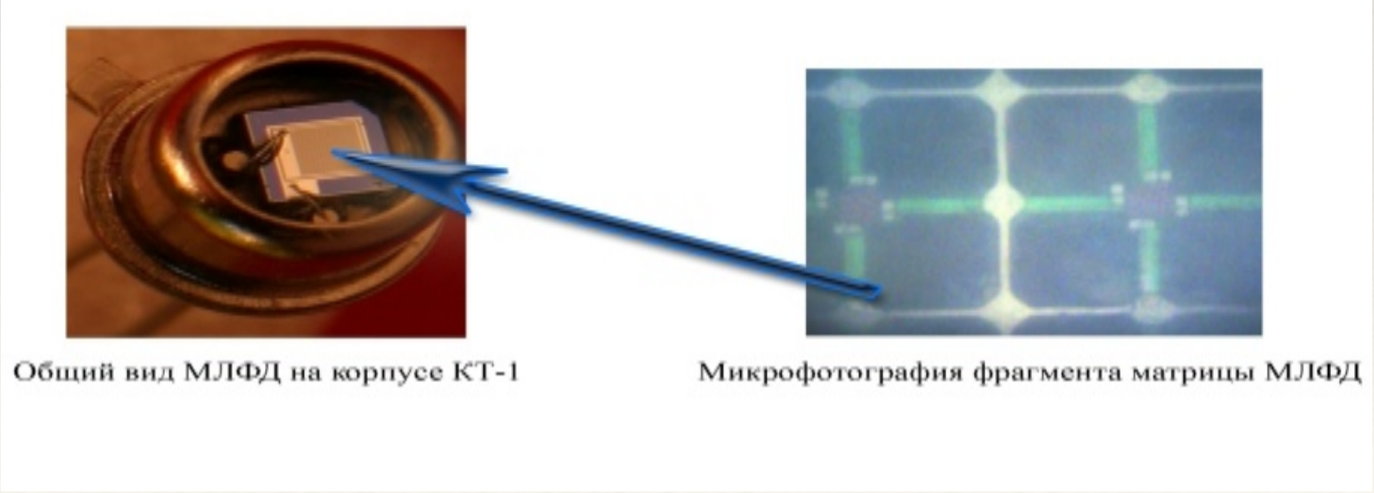
Измерение временного разрешения кремниевого фотоумножителя

Анфимов Николай
Рыбников Арсений

Кремнивый фотоумножитель - SiPM

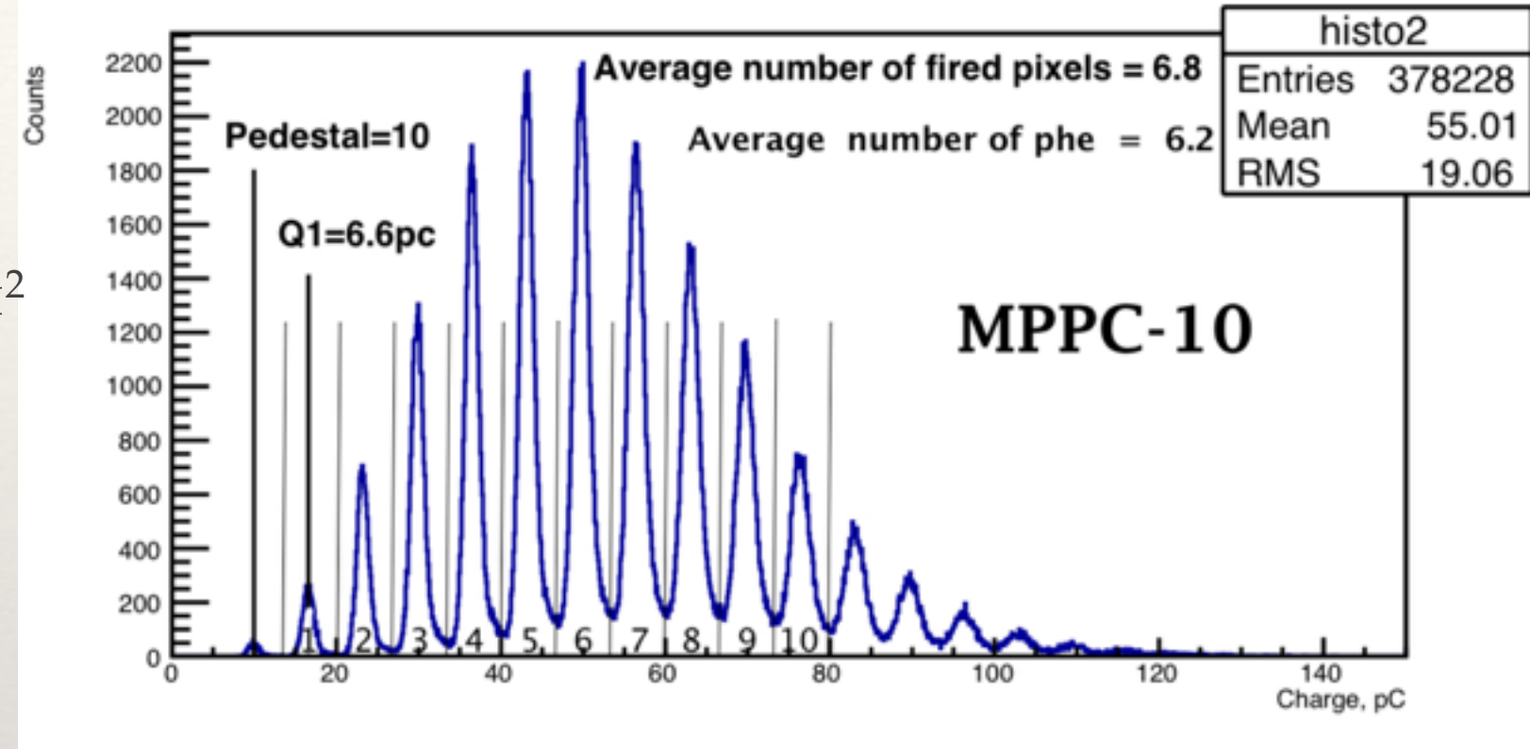
- Микропиксельный лавинный фотодиод - МЛФД (MAPD)
- Многопиксельный счетчик фотонов - MPPC
- Твердотельный фотоумножитель - SSPM
- ...





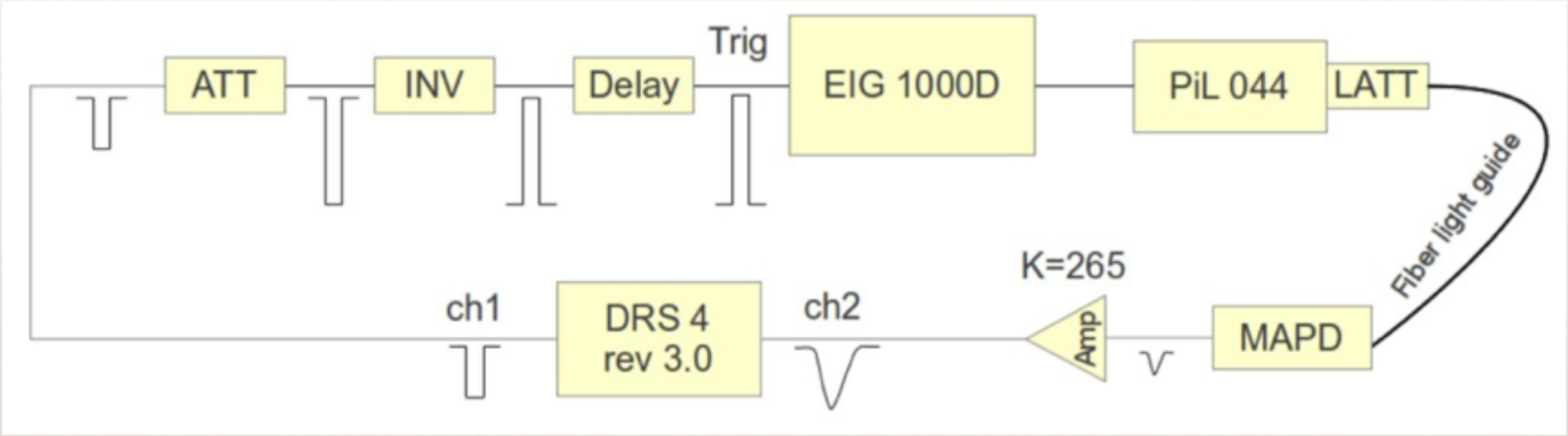
Идея метода

MPPC S12572-010C(X).
Размер активной области = 3x3 мм^2
Усиление = $1.5*10^5$
Время нарастания (0.1-0.9) = 3 нс
Время спада (0.9-0.1) = 50 нс
Шумы ~ МГц



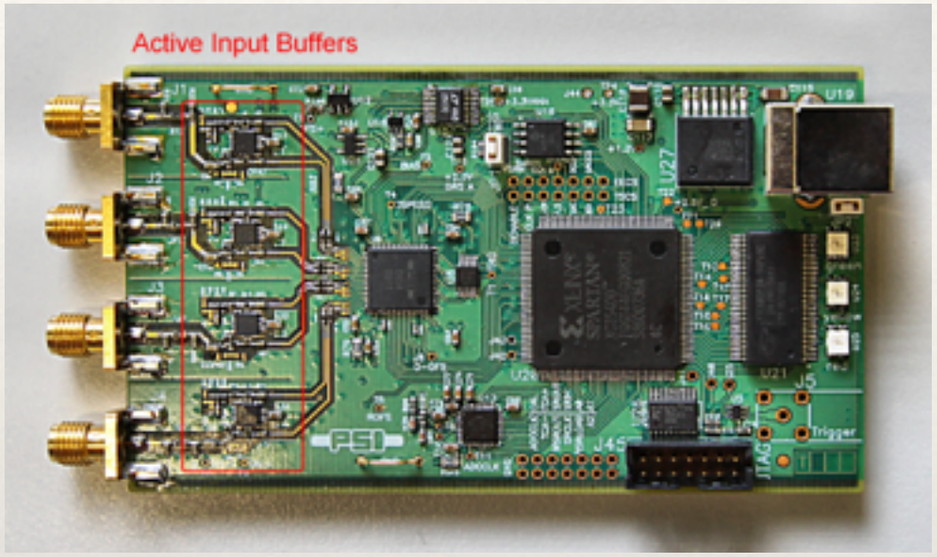
- Поскольку фотодиод обладает хорошим амплитудным разрешением, то легко можно делать селекцию событий соответсвующих отклику от 1, 2 и т.д сработавших пикселей делая совместный амплитудный и временной анализ

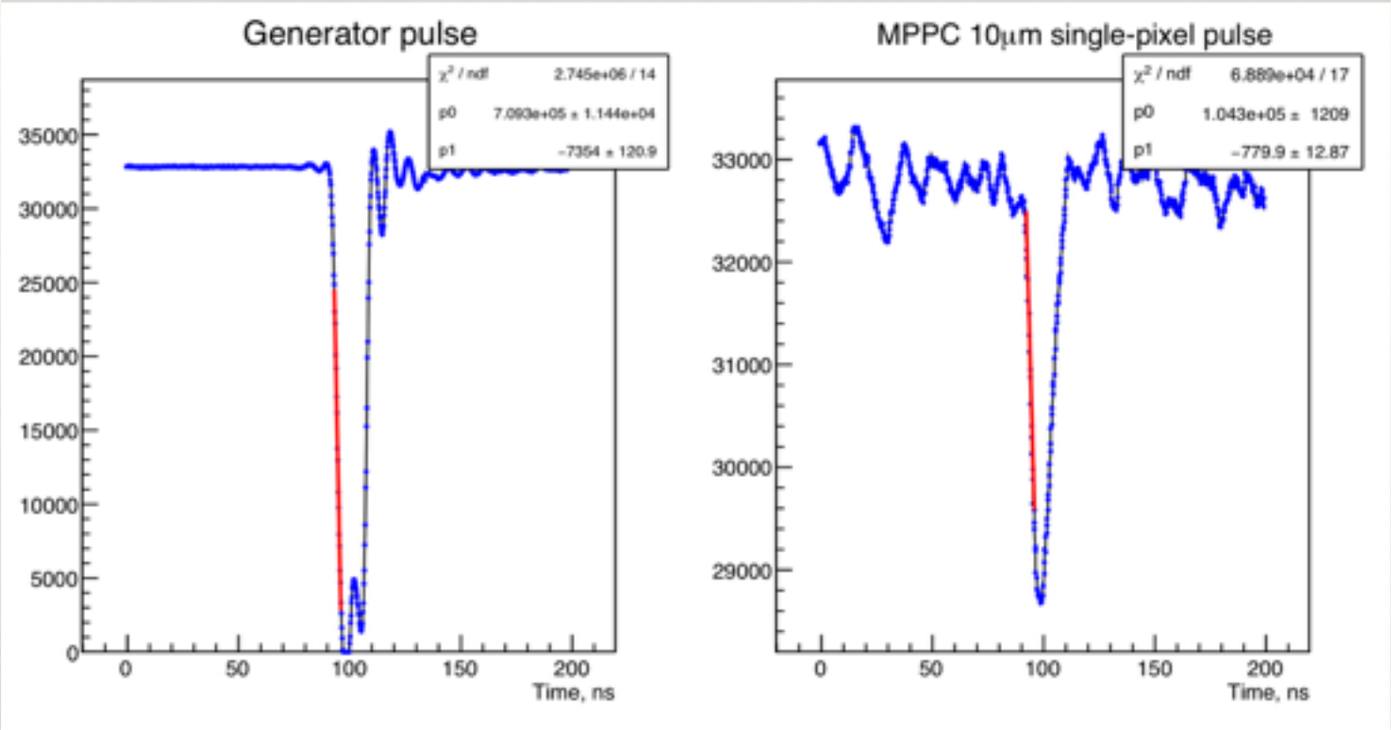
Схема экспериментальной установки



- PiL044 = Пикосекундный лазер 442 нм, 45 пс
- EIG 1000D - Генератор импульсов запускающий лазер (идет в комплекте)
- DRS4 rev 3.0 - АЦП с выборкой по времени (1В/14 бит, от 1 до 5 ГГц, полоса 700 МГц)
- Усилитель с усилением K=265, полоса ~ 50 МГц

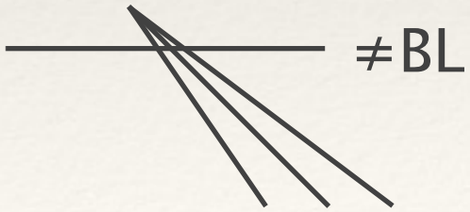
Анализ данных





- Используется Фурье Фильтр Низких Частот (обрезаются частоты выше 100 МГц) - убираем шумы АЦП
- Вычисляется базовая линия BL в каждом событии как среднее значение
- Фронт сигнала аппроксимируется линейной функцией p0 +p1*T
- Время вычисляется по формуле:

$$T = \frac{BL - p0 - C}{p1}$$

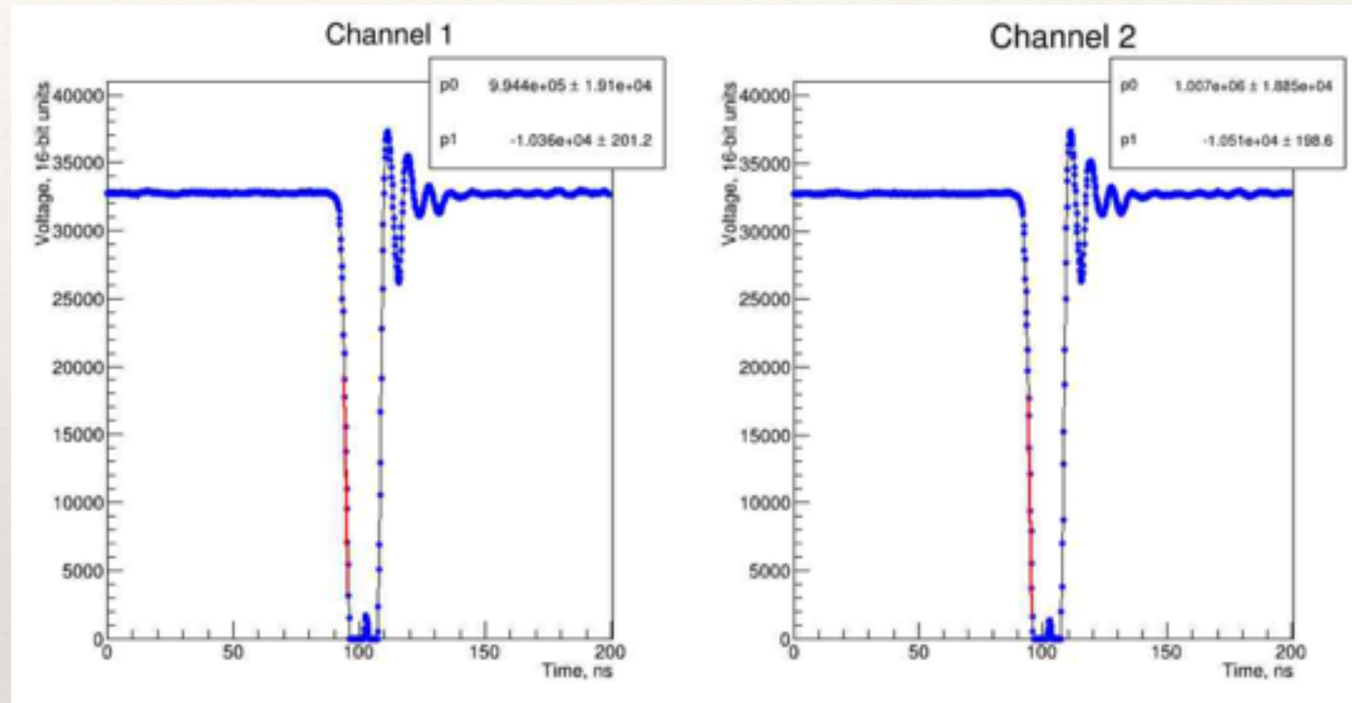


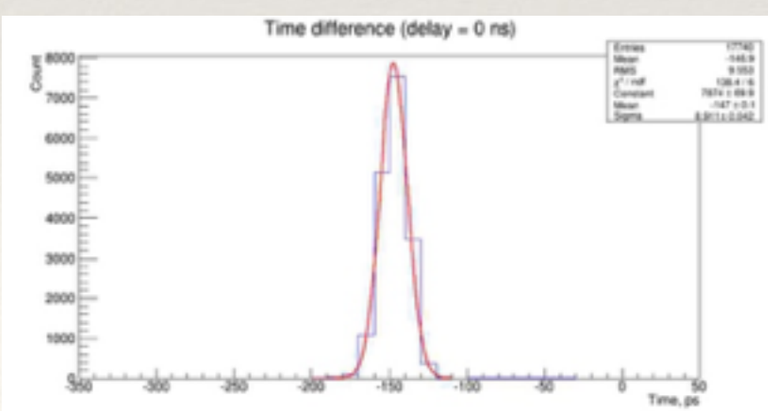
  - где C - некоторая константа (находится оптимум минимума флуктуаций времени из-за наклона прямой)

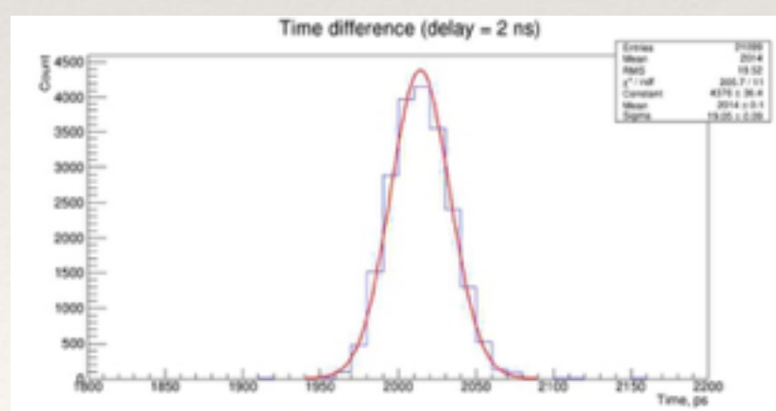
Определение шкалы

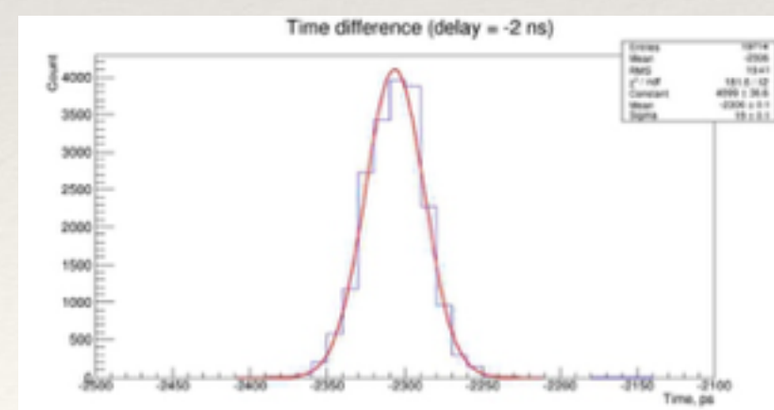
Разветивили сигнал с генератора
Использовали различные кабельные задержки
0 ns = - 147 ps, σT = 9 ps
2 ns = 2014 ps (ΔT = 2161 ps), σT = 19ps
-2 ns = 2306 ps (ΔT = 2159 ps), σT = 19ps

Особенность АЦП – чем больше задержка, тем хуже временное разрешение

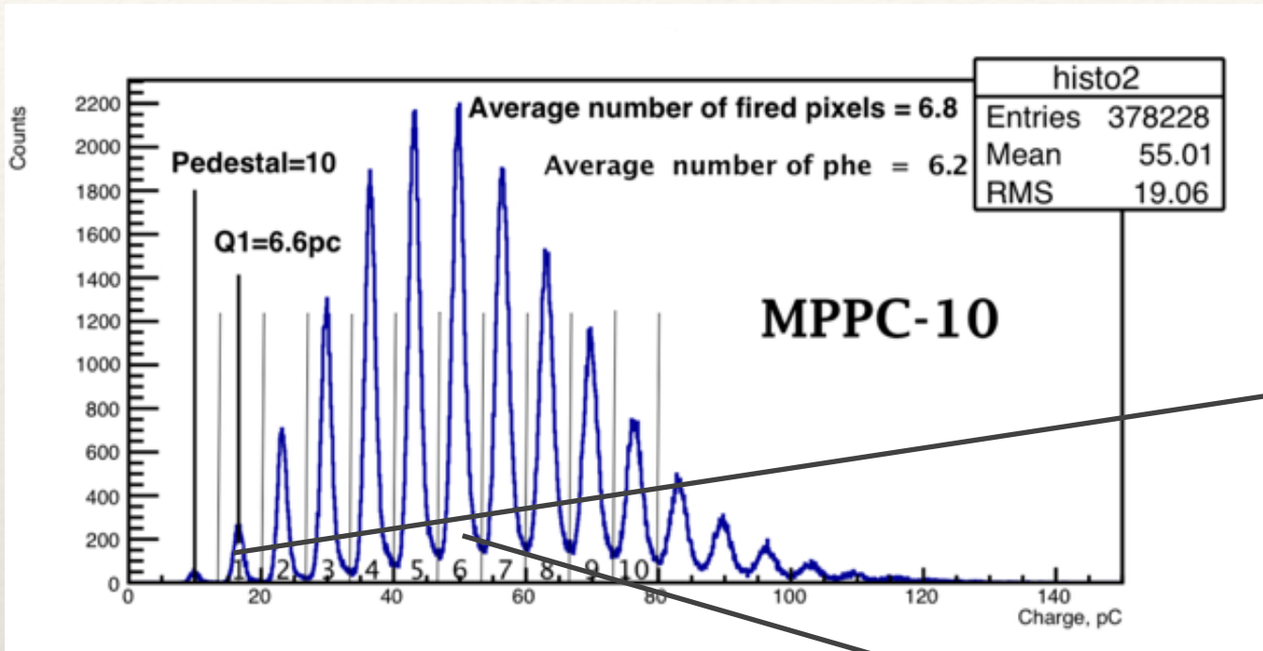


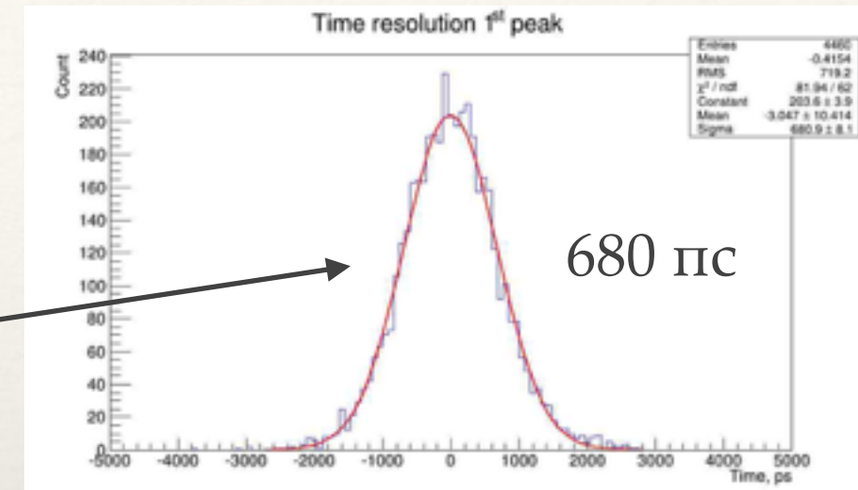


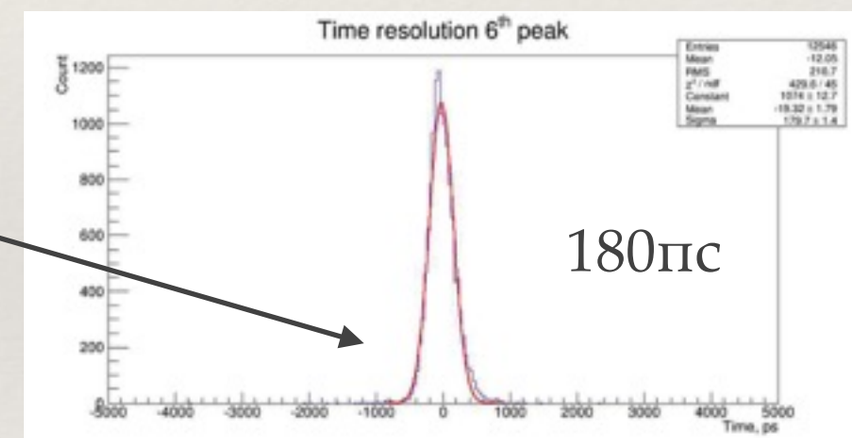


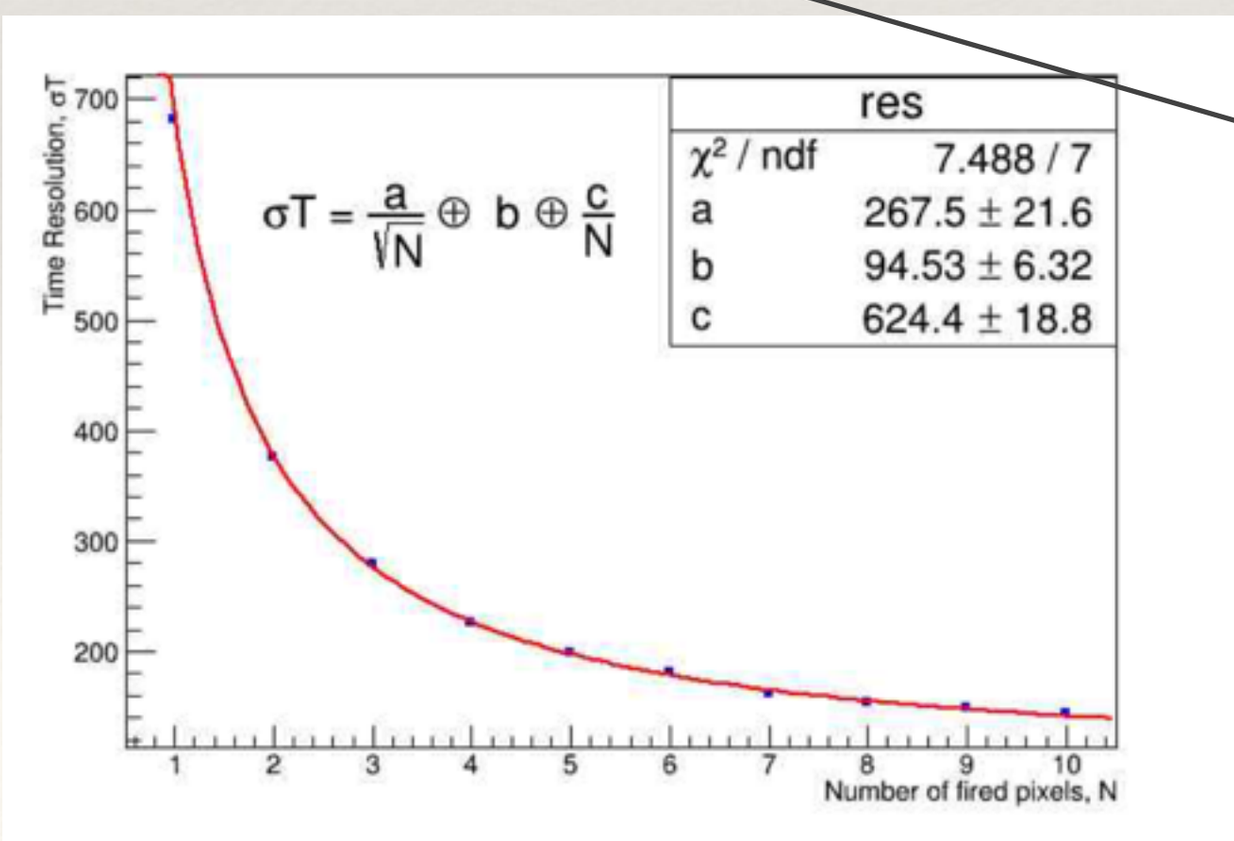


Амплитудно-временной анализ









a - характеризует собственное временное разрешение пикселя

b - константный член (шумы, диф. нелинейность)

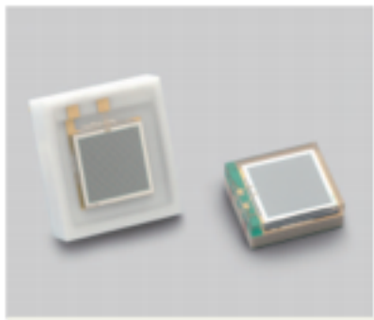
c - член связанный с соотношением сигнал шум.

Сравнение результатов

500 ps (FWHM) ~ 215 ps

Странно, но для диода с 15 мкм пикселем заявлено 400 ps. Хотя результаты других измерений демонстрируют обратную зависимость

HAMAMATSU
PHOTON IS OUR BUSINESS



MPPC® (multi-pixel photon counter)

S12572-010, -015C/P

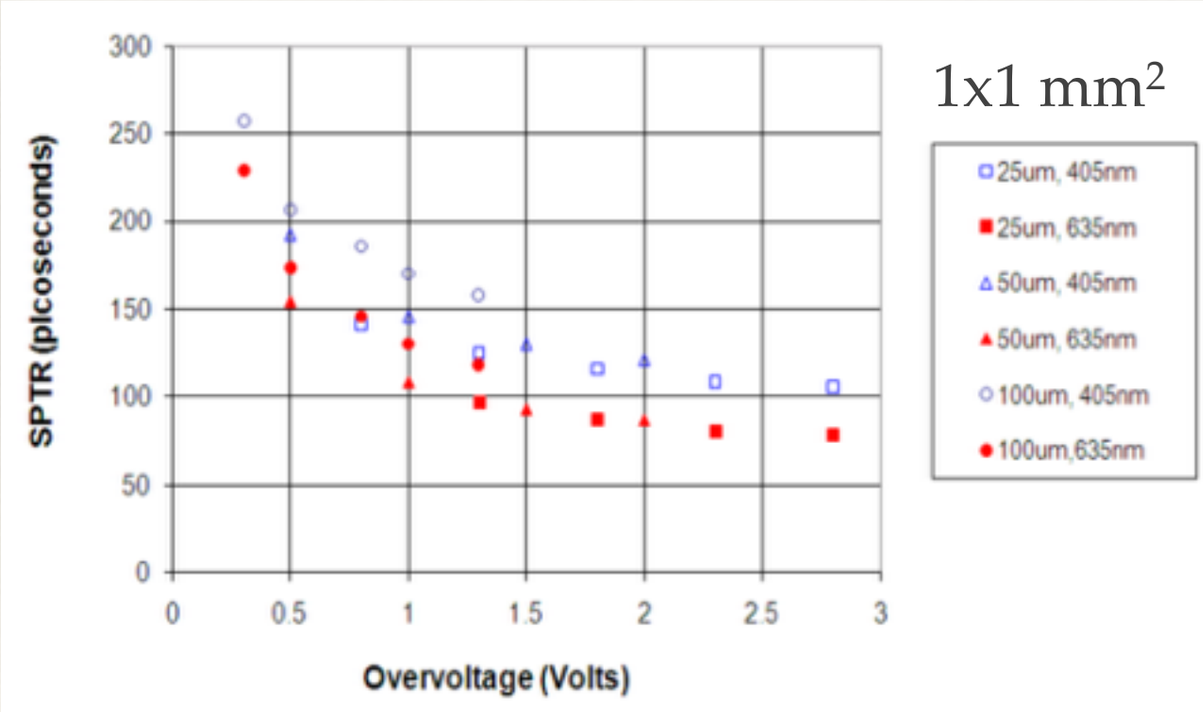
Low afterpulse, wide dynamic range, for high-speed measurement
Photosensitive area: 3 × 3 mm

These MPPCs utilize very small pixels arrayed at high densities to achieve a high-speed recovery time and wide dynamic range. Hamamatsu currently produces MPPC with a pixel density up to 10000 pixels/mm² (pixel pitch: 10 μm). Utilizing advanced technology to enhance photon detection efficiency minimizes the drop in photon detection efficiency that usually occurs due to shrinking the pixel pitch.

Electrical and optical characteristics (Ta=25 °C, unless otherwise noted)

Parameter		Symbol	S12572 -010C	S12572 -010P	S12572 -015C	S12572 -015P	Unit
Spectral response range		λ	320 to 900		320 to 900		nm
Peak sensitivity wavelength		λp	470		460		nm
Photon detection efficiency (λ=λp)*4		PDE	10		25		%
Dark count*5	Typ.	-	1000		1000		kcps
	Max.		2000		2000		
Time resolution (FWHM)*6		-	500		400		ps
Terminal capacitance		Ct	320		320		pF
Gain		M	1.35×10^5		2.3×10^5		-
Gain temperature coefficient		ΔTM	1.6×10^3		3.5×10^3		/°C
Breakdown voltage		VBR	65 ± 10		65 ± 10		V
Recommended operating voltage		Vop	VBR + 4.5		VBR + 4.0		V
Temperature coefficient of recommended operating voltage		ΔTVop	60		60		mV/°C

*4: Photon detection efficiency does not include crosstalk or afterpulses.
*5: Threshold=0.5 p.e.
*6: Single photon level
Note: The above characteristics were measured at the operating voltage that yields the gain listed in this catalog.
(Refer to the data attached to each product.)
The last letter of each type number indicates the package type (C: ceramic, P: surface mount type).



*A. Ronzhin, M. Albrow, K. Byrum, M. Demarteau, S. Los, E. May, E. Ramberg, J. Va'vra, A. Zatserklyaniy Tests of Timing Properties of Silicon Photomultipliers

Оптимизация интенсивности света для калибровки фотодетекторов

Анфимов Николай
Рыбников Арсений
Сотников Альберт

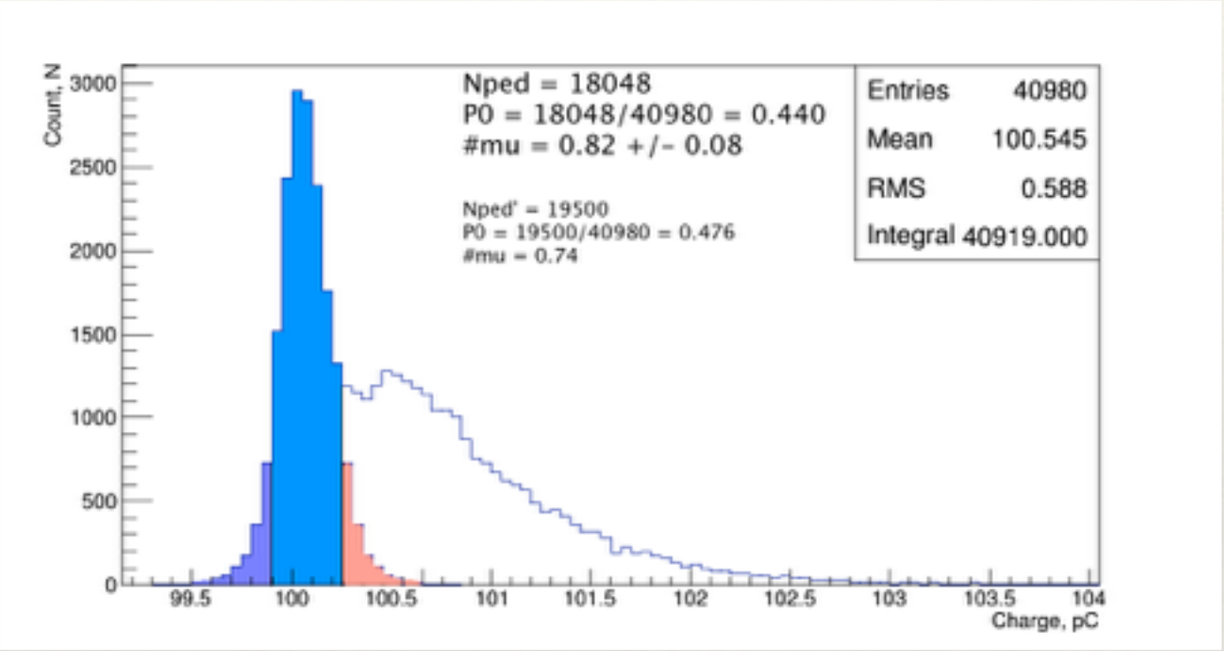
$$P_n = \mu^n \frac{e^{-\mu}}{n!},$$

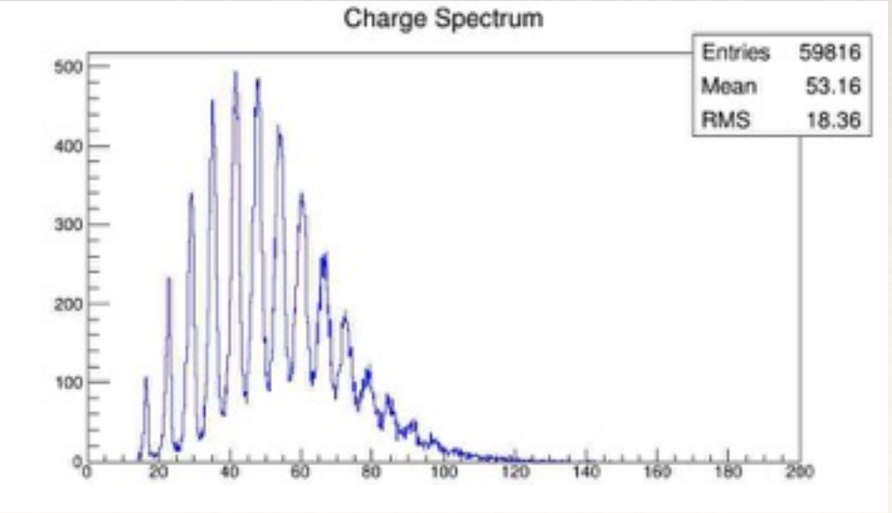
$$P_n = N_n/N$$

$$P_0 = e^{-\mu}$$

$$\mu = -ln(P_0) = -ln(N_0/N),$$

А как зависит точность?





Оптимизация интенсивности света для калибровки фотодетекторов

$$P_n = \mu^n \frac{e^{-\mu}}{n!},$$

$$P_n = N_n/N$$

$$\mu = -nW\left(-\frac{\sqrt[n]{P_n n!}}{n}\right)$$

$$\sigma_{\mu_n} = \left|\frac{d\mu}{dN_n}\right|\sigma_{N_n},$$

$$\sigma_{N_n} = \sqrt{NP_n q_n}$$

$$\sigma_{\mu_n} = \left|\frac{d\mu}{dP_n}\frac{dP_n}{dN_n}\right|\sigma_{N_n} = \frac{1}{N}\left|\frac{d\mu}{dP_n}\right|\sigma_{N_n}$$

$$\frac{d\mu}{dP_n} = \left(\frac{dP_n}{d\mu}\right)^{-1}$$

$$\frac{dP_n}{d\mu} = \frac{P_n(n-\mu)}{\mu}$$

$$\sigma_{\mu_n} = \frac{1}{\sqrt{N}}\left|\frac{\mu}{(n-\mu)}\right|\sqrt{\frac{q_n}{P_n}}$$

$$\boxed{\frac{\sigma_{\mu_n}}{\mu} = \frac{1}{\sqrt{N}}\sqrt{\frac{\mu^{-n}e^{\mu}n! - 1}{(\mu-n)^2}}}$$

Оптимизация интенсивности света для калибровки фотодетекторов

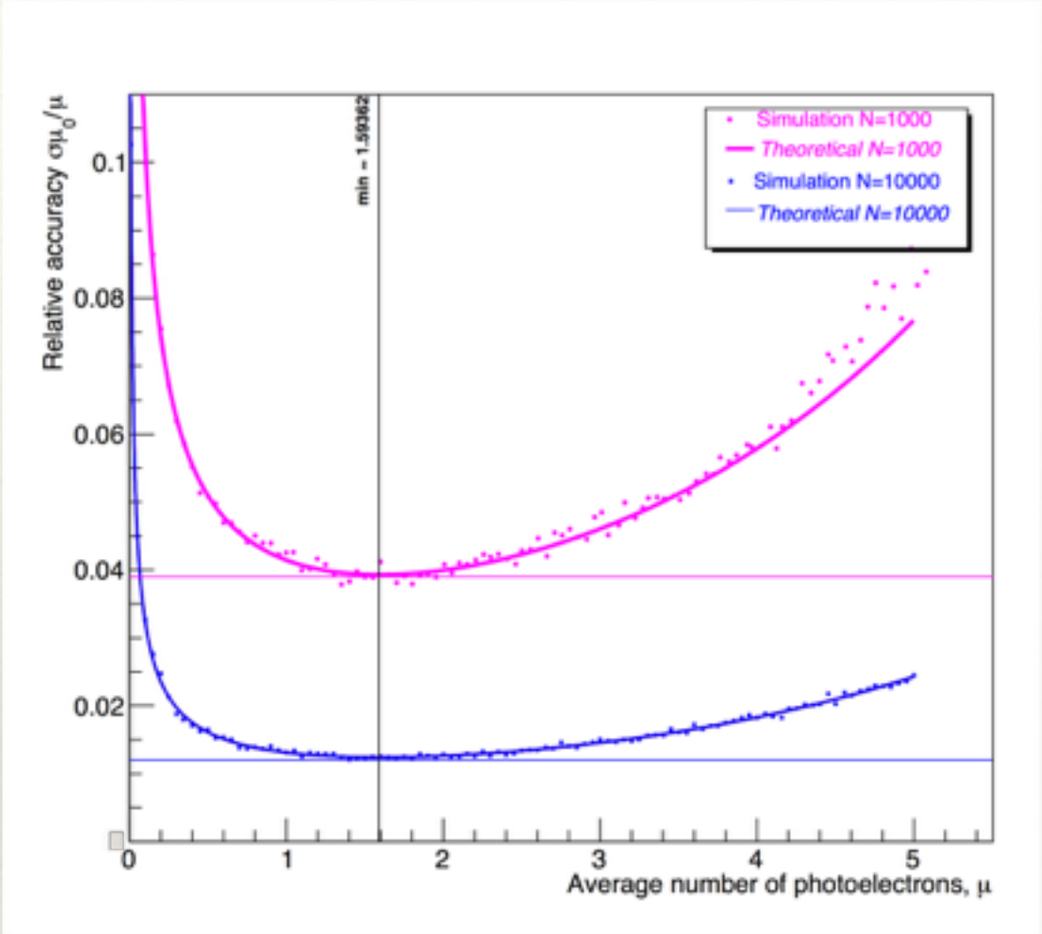
$$P_n = \mu^n \frac{e^{-\mu}}{n!},$$

$$P_n = N_n/N$$

$$P_0 = e^{-\mu}$$

$$\mu = -ln(P_0) = -ln(N_0/N),$$

$$\frac{\sigma_{\mu_0}}{\mu} = \frac{1}{\sqrt{N}}\sqrt{\frac{e^{\mu}-1}{\mu^2}}$$



Есть оптимум μ = 1.59

Данный случай также обсуждался в

R.Dossi, et al., Methods for precise photoelectron counting with photomul- tipliers, Nucl. Instr. and Meth. A 451 (2000) 623–637.

Где это может быть важно

- Массовые тесты фотодетекторов: SiPM, PMT и др
- Детальное изучение дифференциальных характеристик по поверхности. Пример: сканирующая станция в JUNO - 7LED*24Угла= 168 точек (1 ФЭУ). 10000 событий (500 Гц) - 1 час набора! + перемещения, переключения - 1.5 часа. Проверить надо 1000 ФЭУ!
- Изучение принципов работы, свойств фотодетктора по различным фотоэлектронным пикам.
- и др.

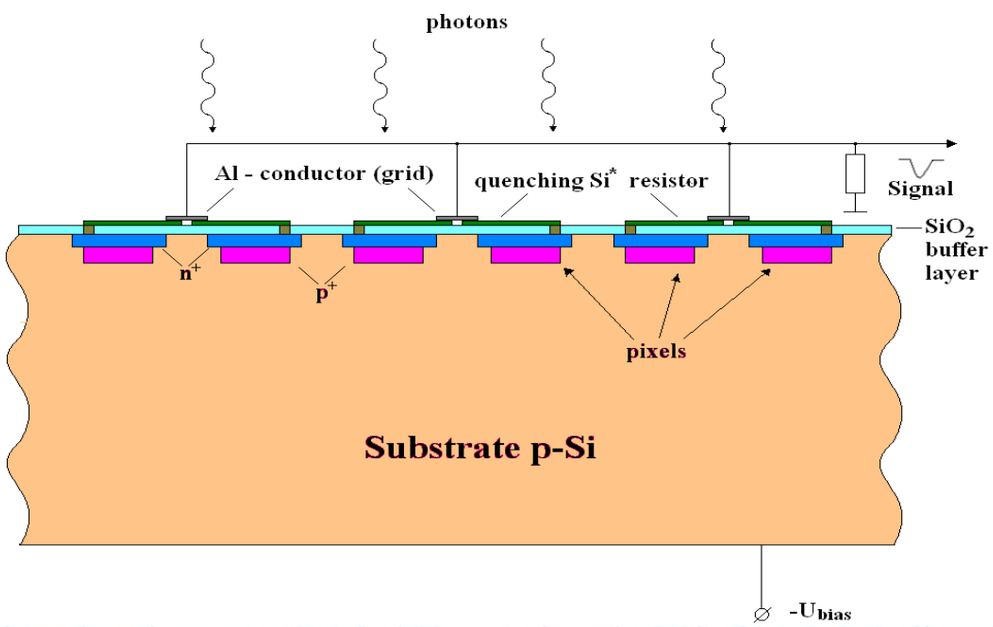
Результаты совместной работы ОИЯИ - Карлов Университет

Сканирование МЛФД лазерным пучком

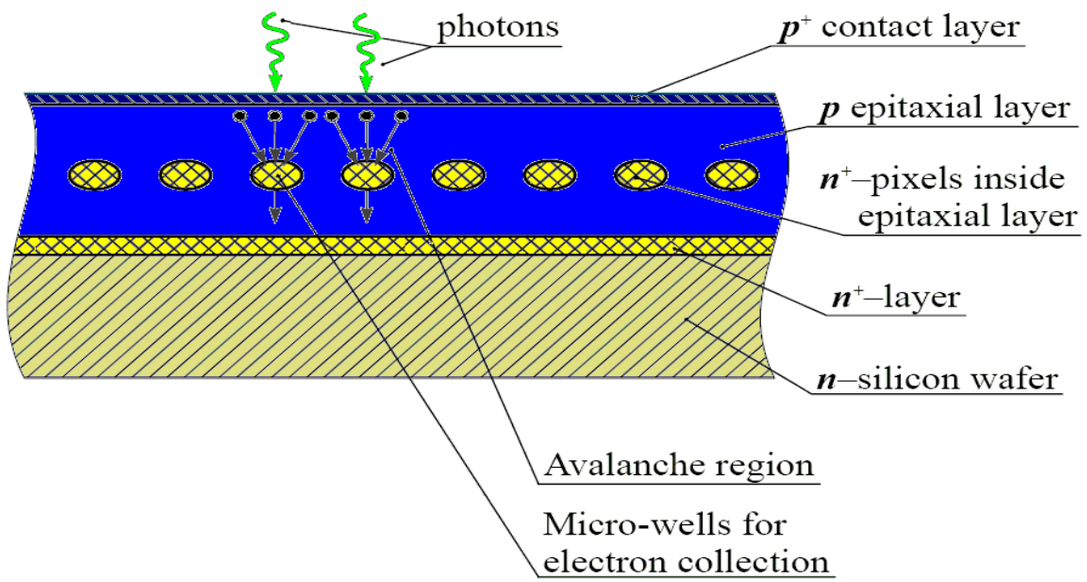
Николай Анфимов
Игорь Чириков-Зорин
Зиновий Крумштейн
Александр Ольшевский
Петер Кодыш
Вит Воробел
Руперт Лейтнер

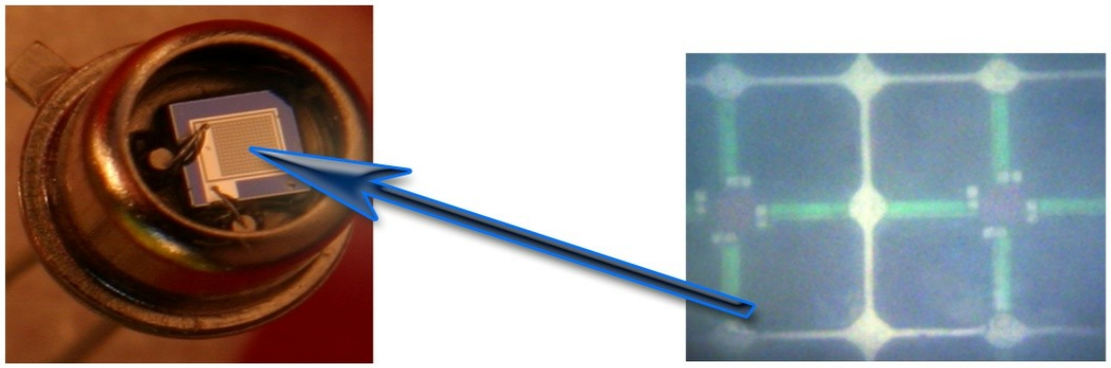
Микропиксельные лавинные фотодиоды.

пиксель >10 мкм



пиксель <10 мкм

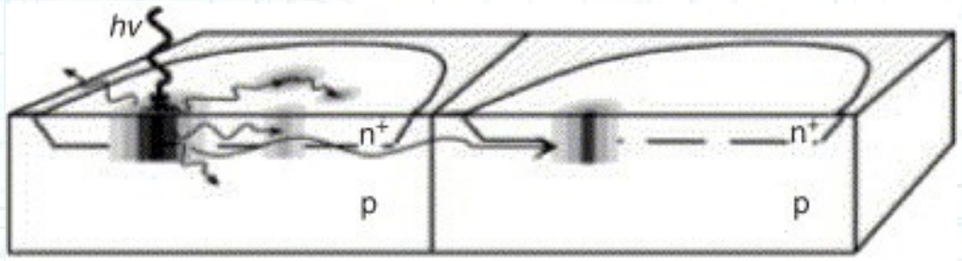




Основные характеристики МЛФД: Коэффициент усиления и перекрестные наводки

Коэффициент усиления МЛФД в отсутствие перекрестных наводок равен усилению пикселя:

$$G_{det} = G_{pix}$$



Перекрестные наводки увеличивают коэффициент усиления МЛФД:

$$G_{det} = n \cdot G_{pix}$$

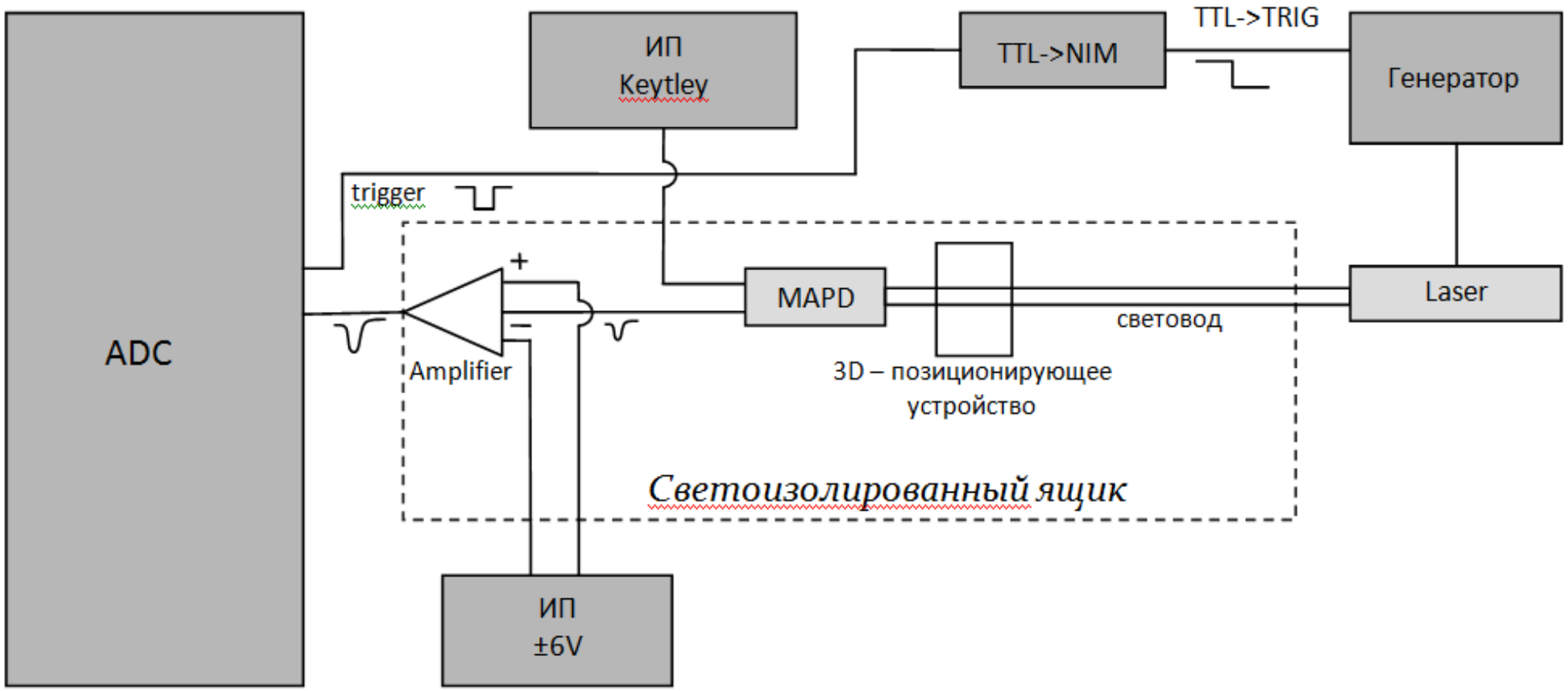
где n – среднее число пикселей сработавших на единичный фотоэлектрон или фактор перекрестных наводок.

Перекрестные наводки уменьшают диапазон линейности и увеличивают уровень шумов.

о перекрестных наводках, например, написано тут:

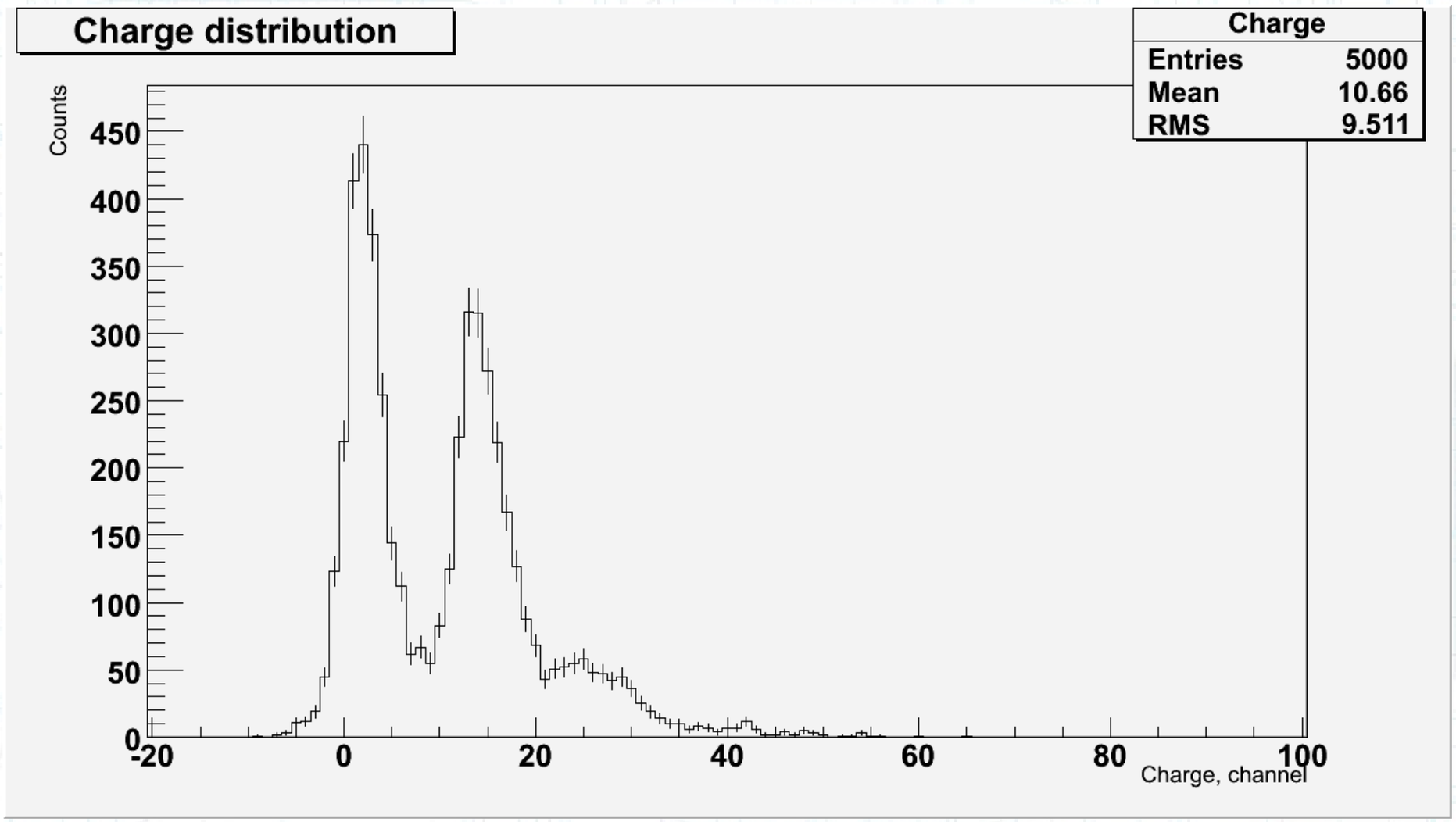
D. Renker. Geiger-mode avalanche photodiodes, history, properties and problems. NIM A 567(2006) 48-56.

Экспериментальная установка (блок-схема)

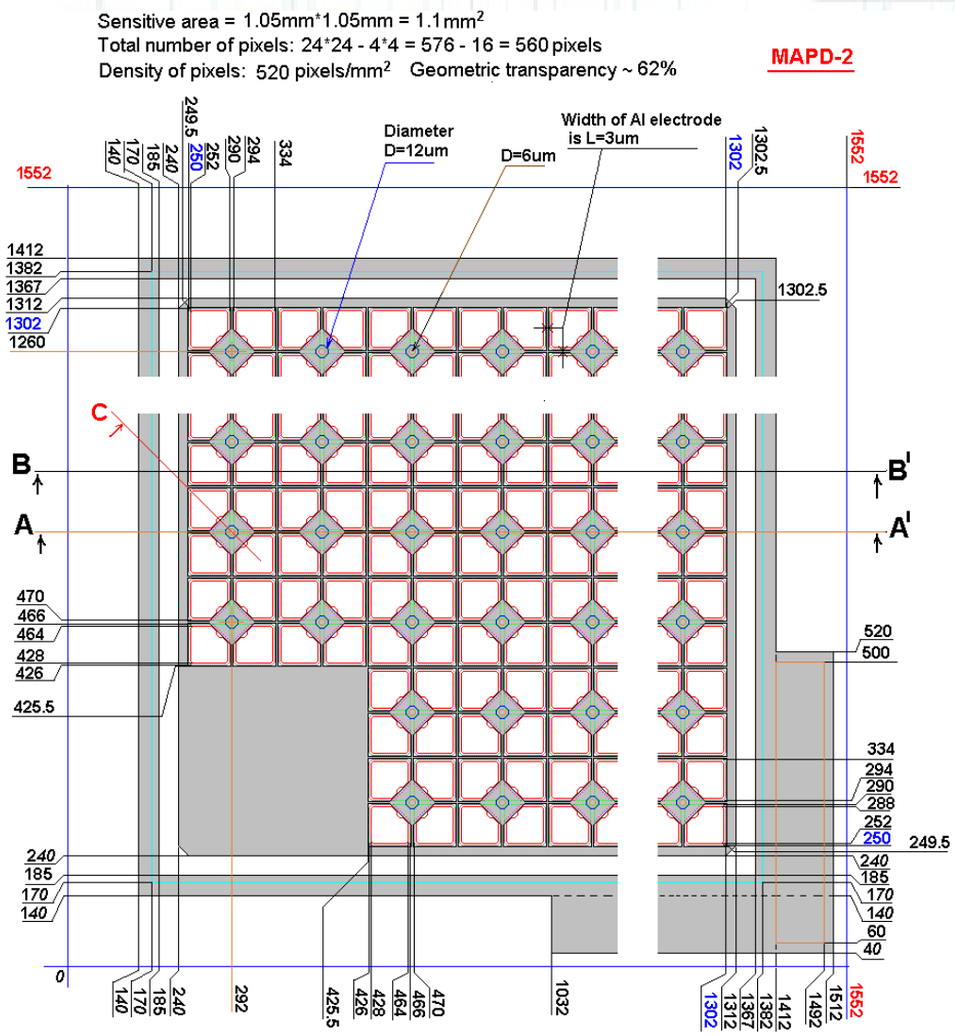


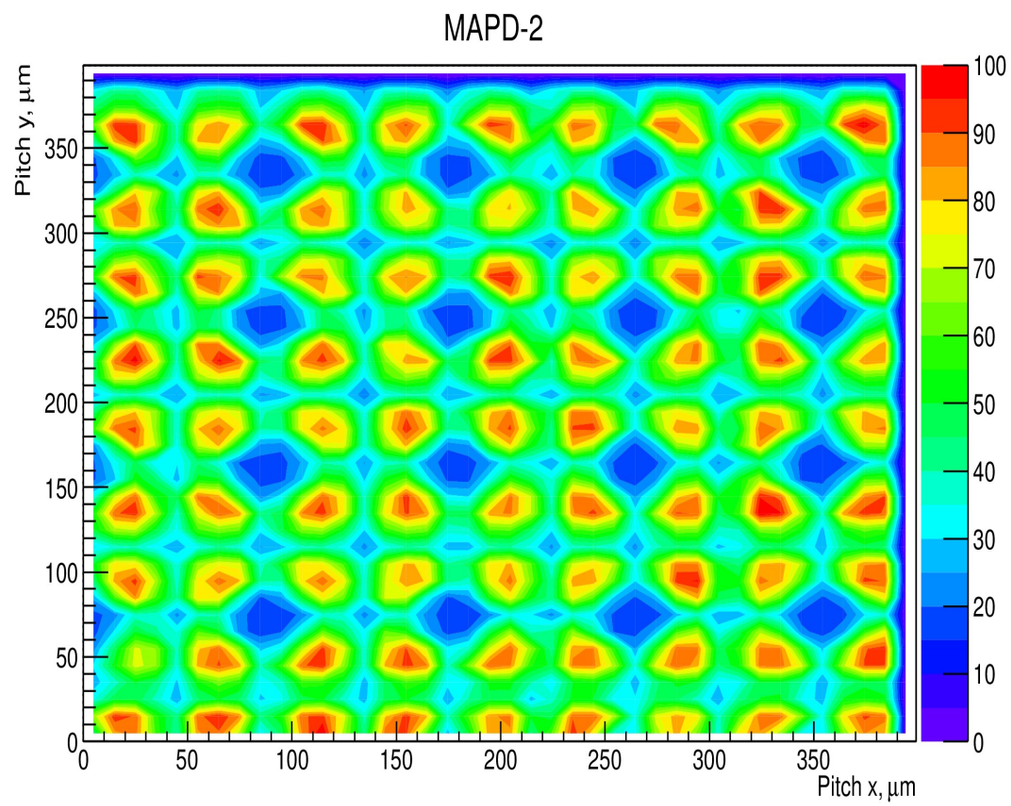
”Однопиксельные” спектры MAPD-2

- Размер пятна лазера (sigma ≈ 1 мкм). Размер пикселя = 41 мкм.
- При попадании в центр пикселя дожны быть видны исключительно однопиксельные амплитуды. Однако, из-за эффекта перекрестных наводок видны и большие амплитуды.



Распределение относительной величины PDE по поверхности MAPD-2





Расчетный фактор заполнения = 0.62

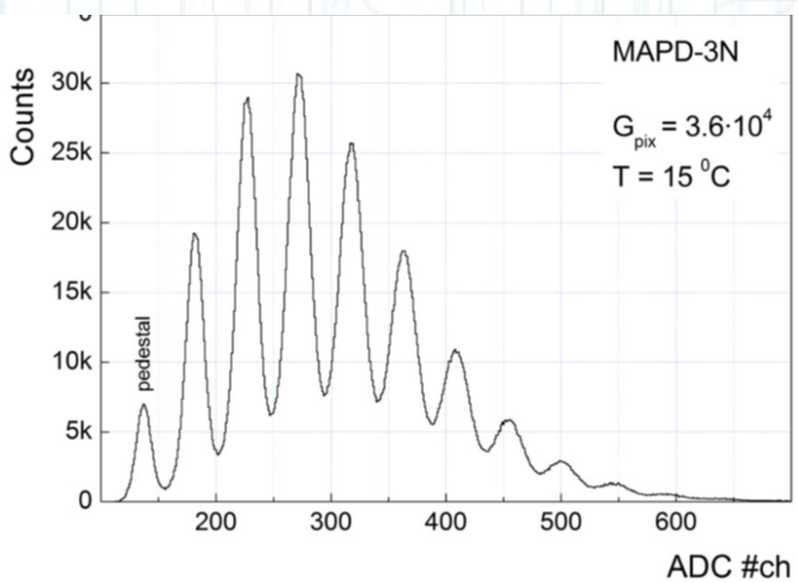
Измеренный ”фактор заполнения” 0.58 +/- 0.07

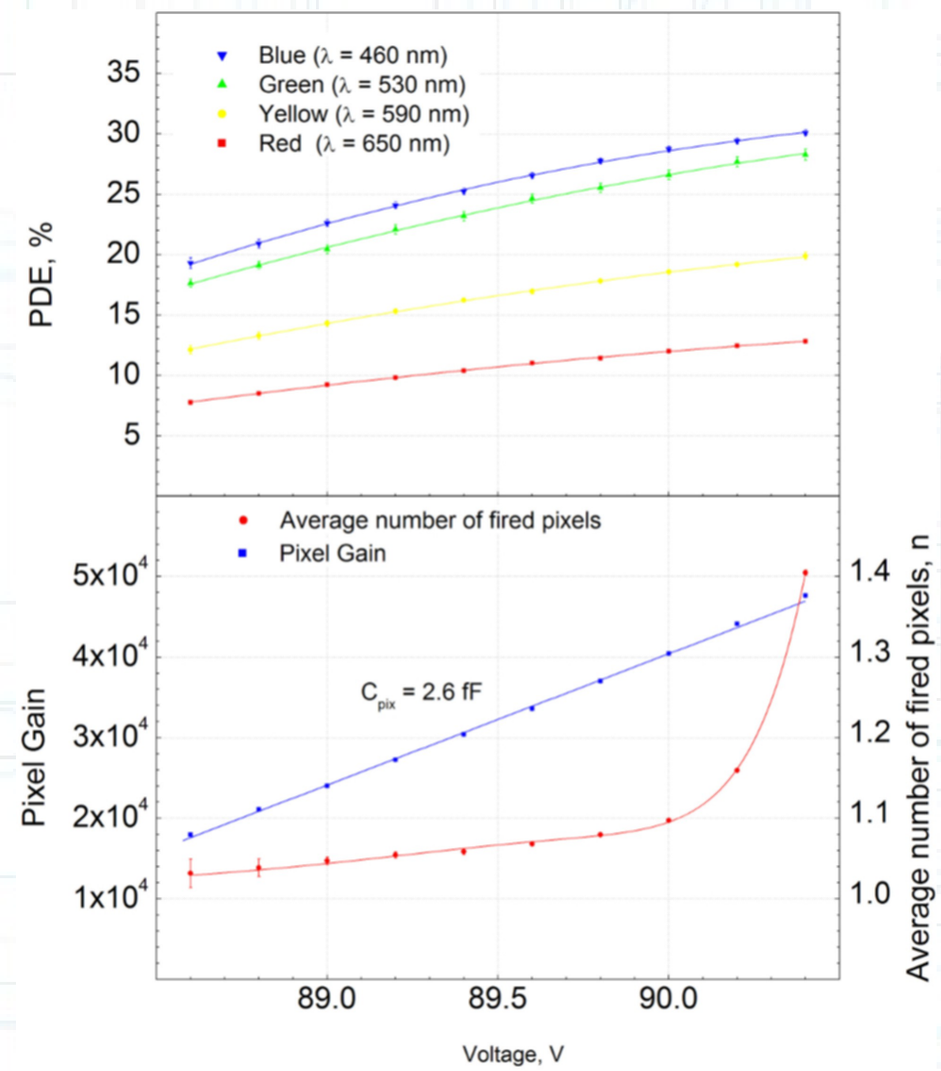
Однородность пикселей по эффективности < 5%

Однородность пикселей по усилению < 9%

Сканирование глубинного фотодиода MAPD-3N

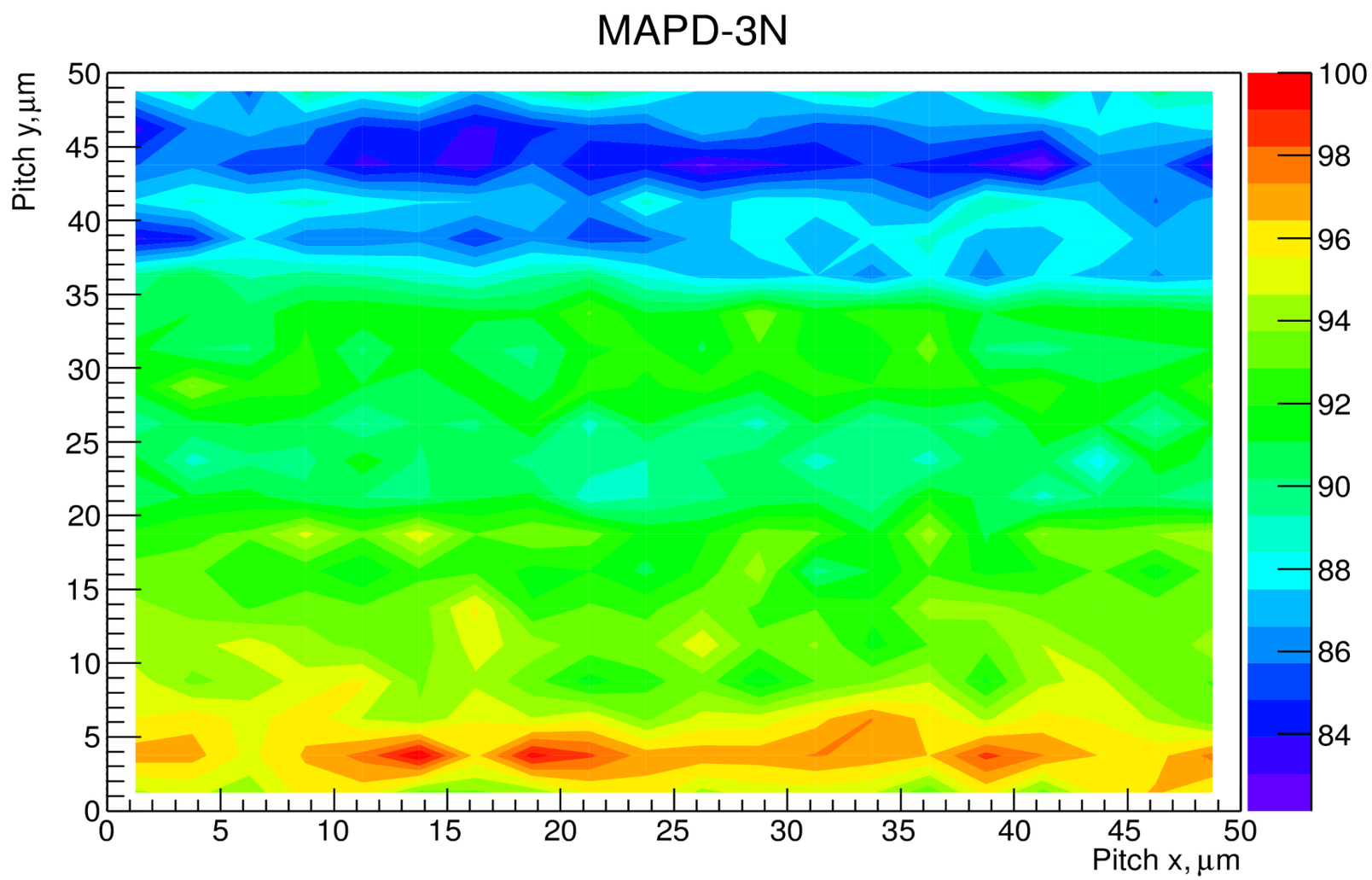
- Размер пикселя d = 5 мкм.
- Шаг между пикселями h = 8 мкм.
- Плотность пикселей 15 000 мм$^{-2}$.
- Рабочее напряжение 89 – 95 В
- Квадратная упаковка пикселей.





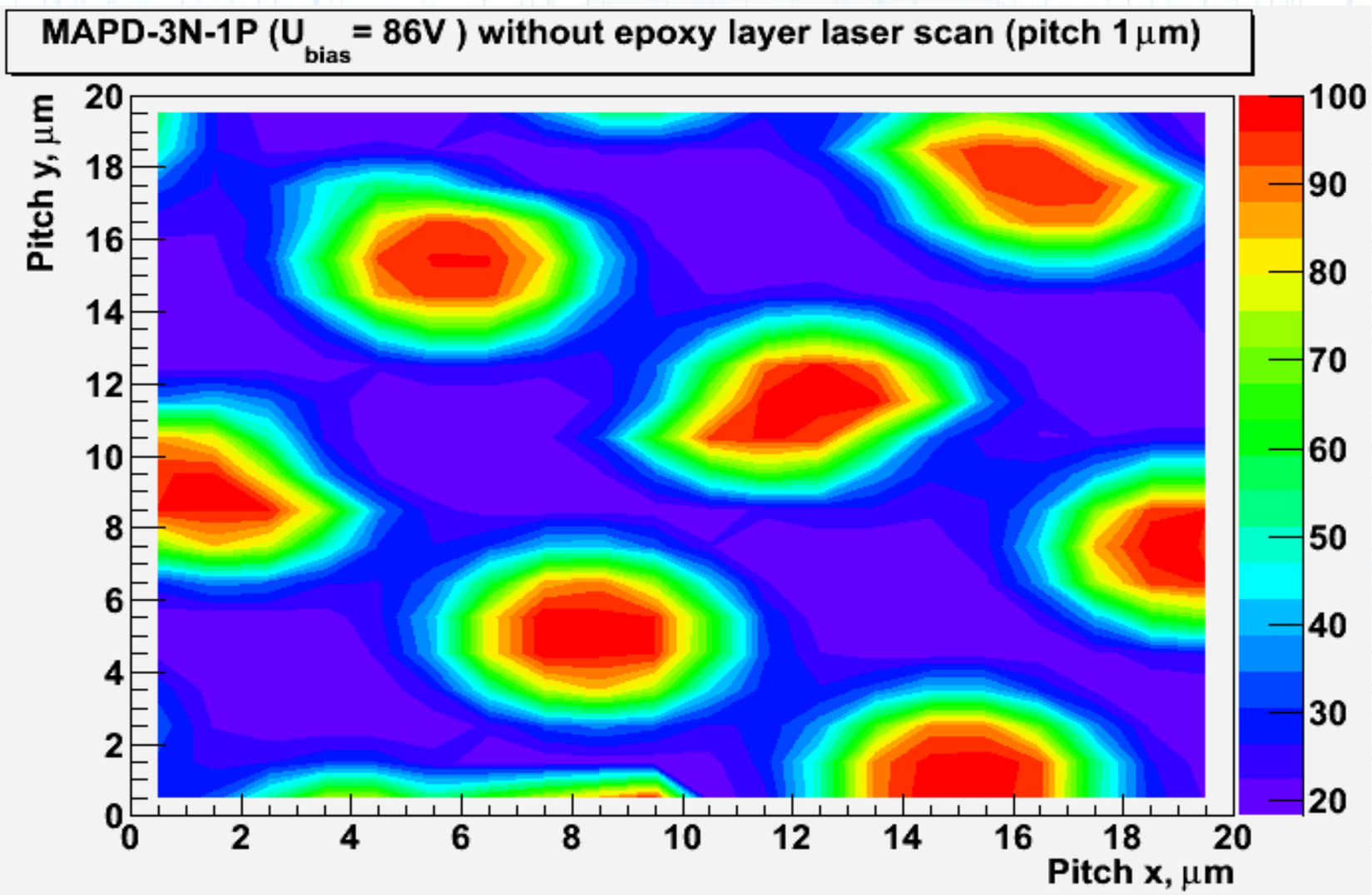
Первые трудности с глубинным МЛФД (Прага, КУ, 2009 г.)

- Нужно работать без эпоксидного слоя.
- Необходима электроника позволяющая работать в однофотоэлектронном режиме.



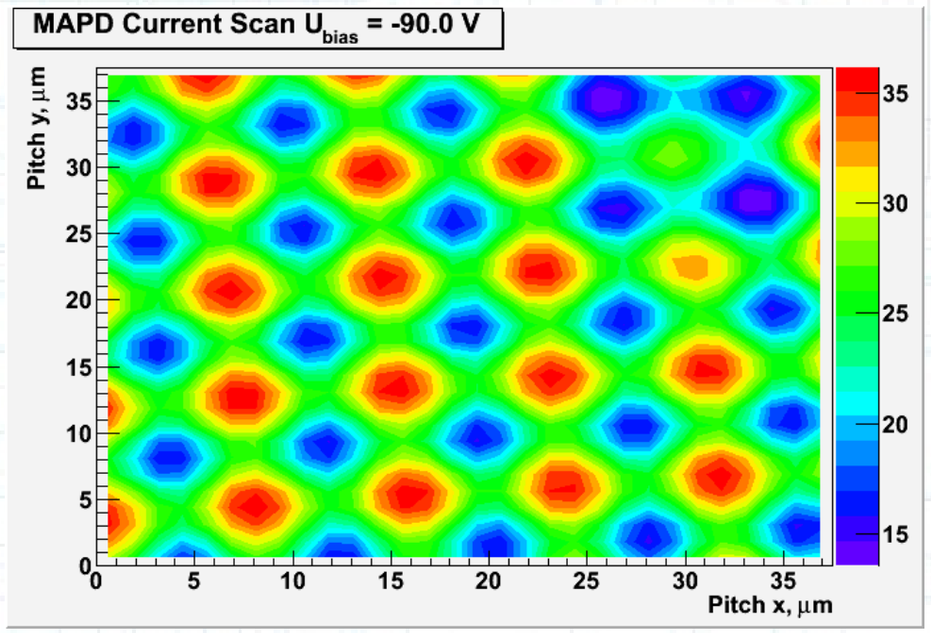
Первые измерения в токовом режиме (филиал НИИЯФ МГУ лето 2011 г)

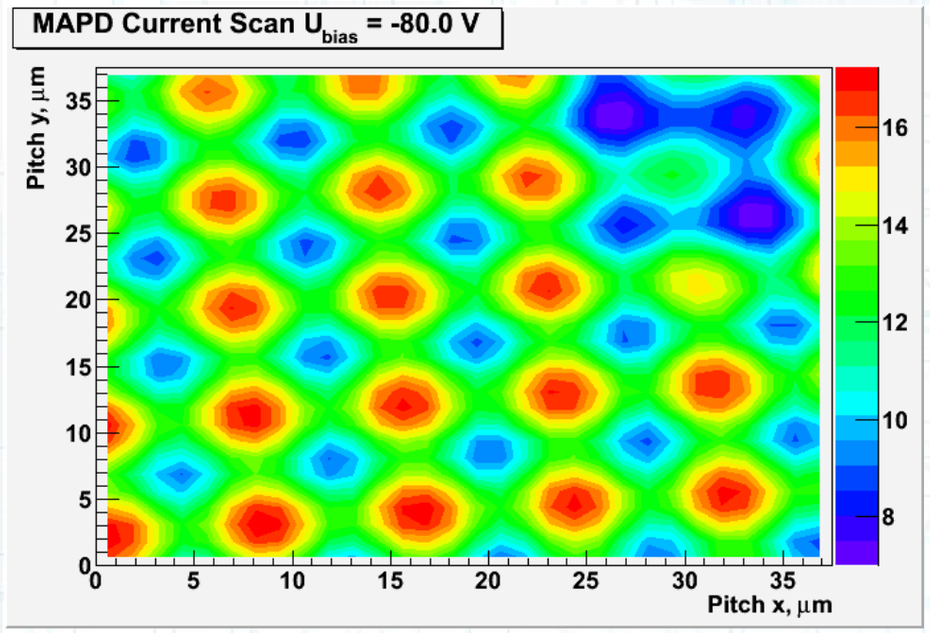
- Использовался голубой (λ=442 нм) лазер конфокального микроскопа в филиале НИИЯФ МГУ), размер пятна (sigma < 0.8 мкм)
- Шаг позиционирования (X-Y) лазера от 50 нм.
- Измерялся фототок при помощи пикоамперметра Keithley.
- Фотодиод без эпоксидного слоя.



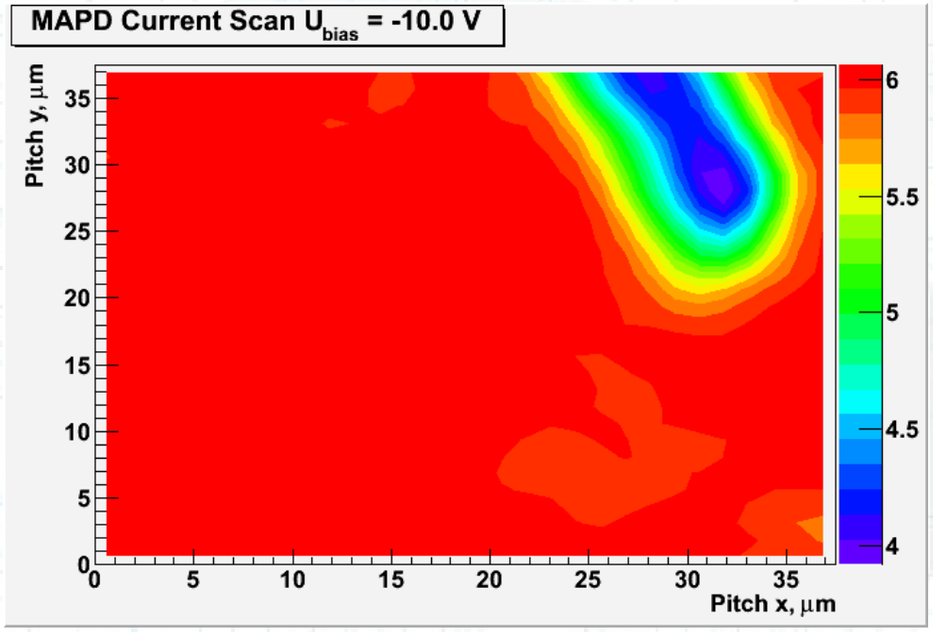
Измерения в токовом режиме (Прага, КУ зима 2012 г)

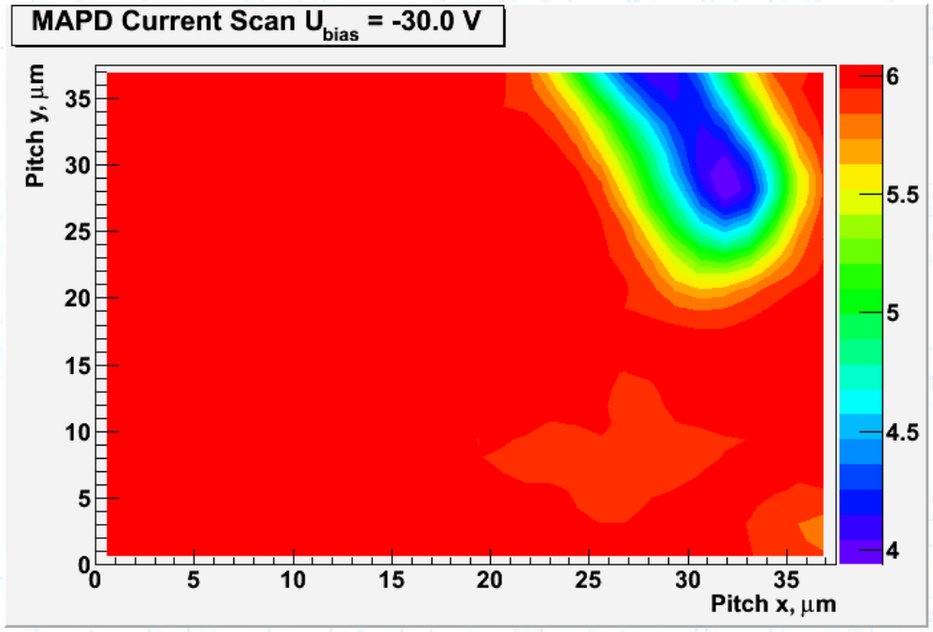
- Использовались образцы MAPD-3N без эпоксидного слоя.
- Схема измерений как и в предыдущем случае
- Использовался красный (λ=660 нм) лазер. Размер пятна (sigma ≈ 1 мкм).

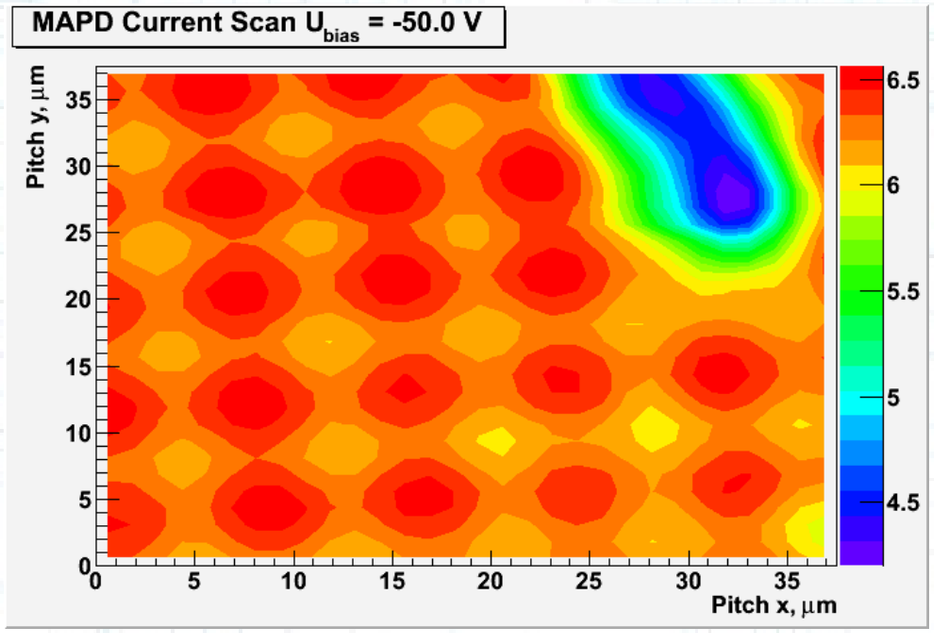


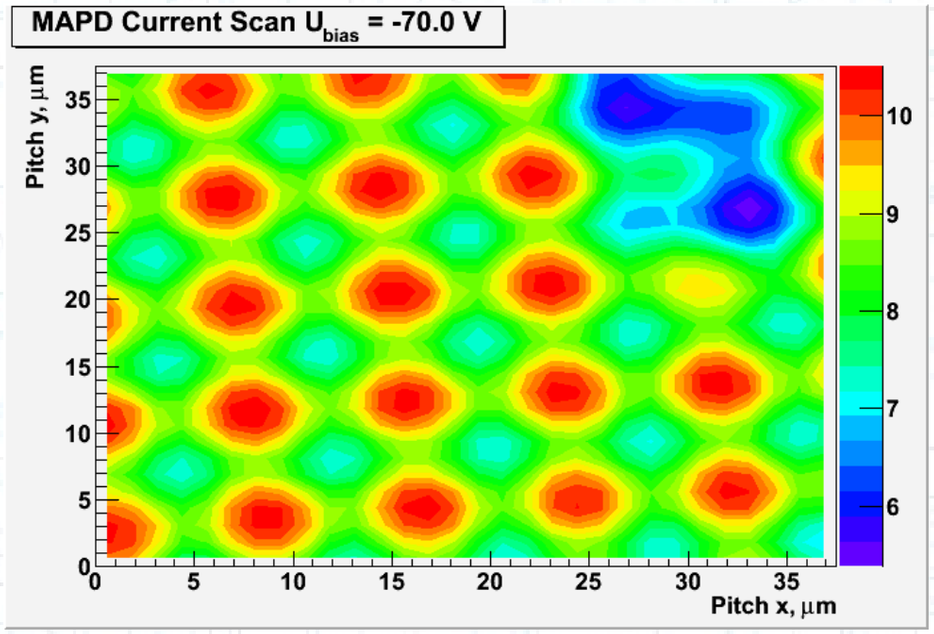


Измерения в токовом режиме (Прага, КУ зима 2012 г): различные напряжения



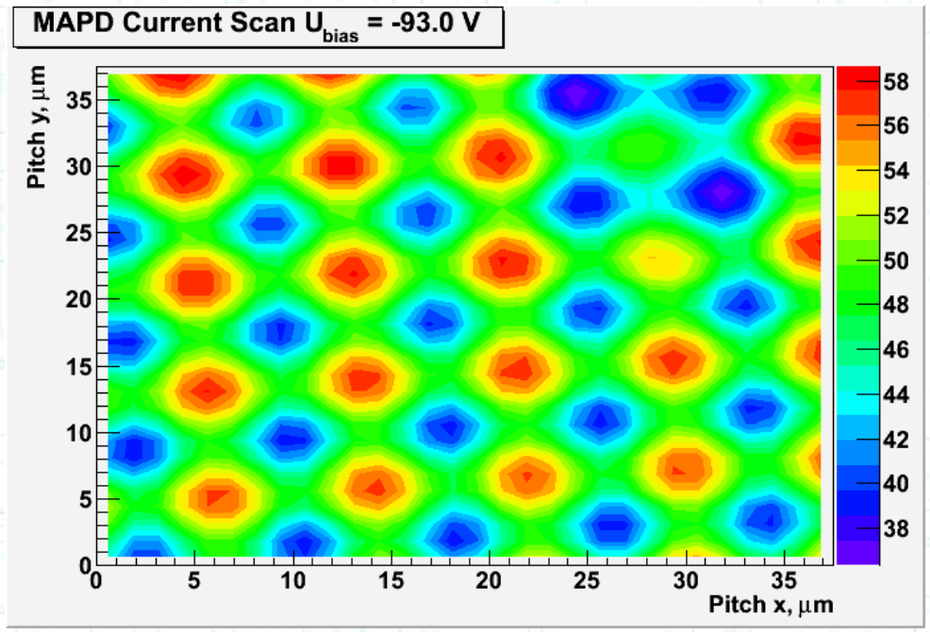


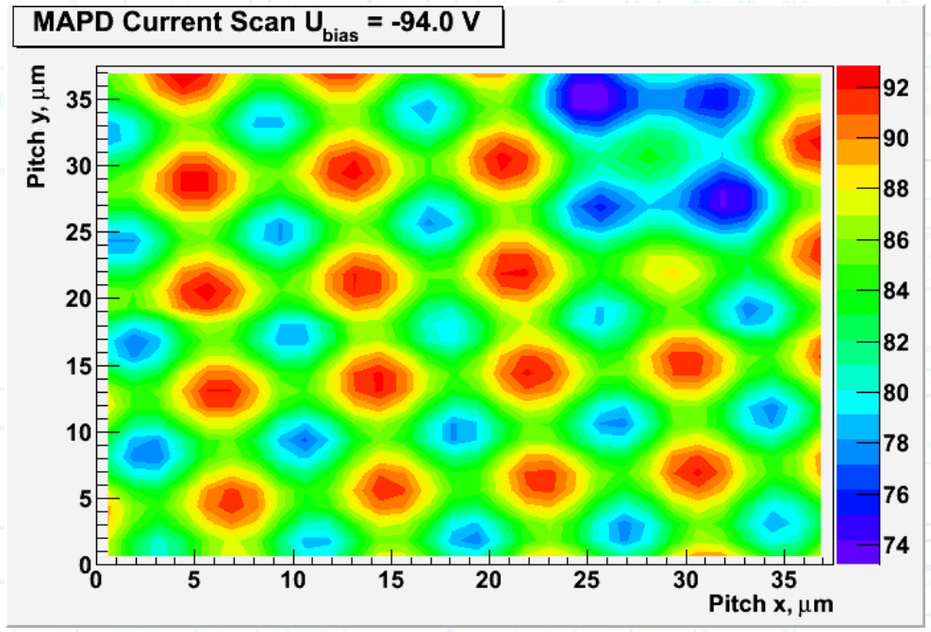


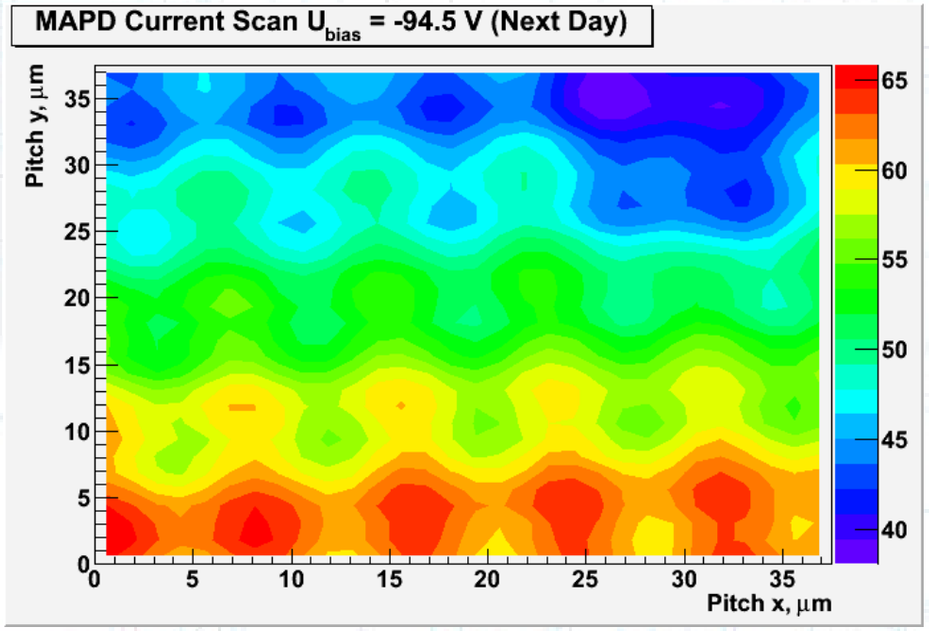


Измерения в токовом режиме (Прага, КУ зима 2012 г): проблема ”гейгеровского” режима

- При рабочем напряжении возникает подозрение, что эффективность регистрации становится более однородной

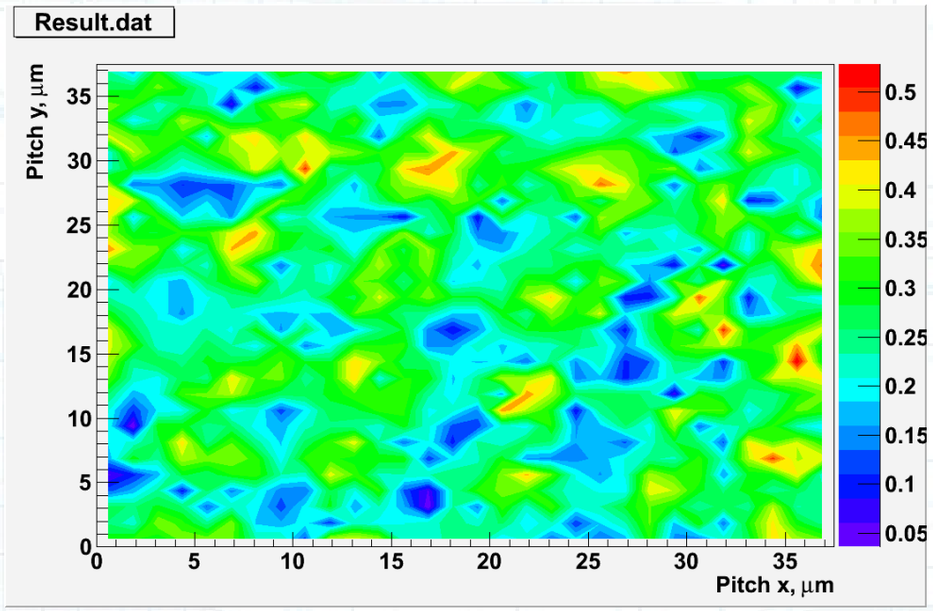


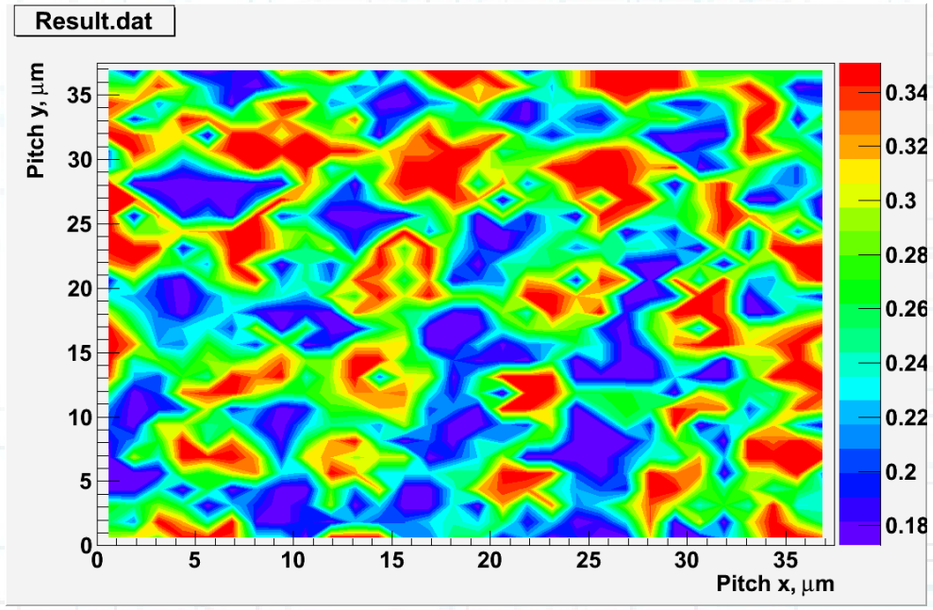


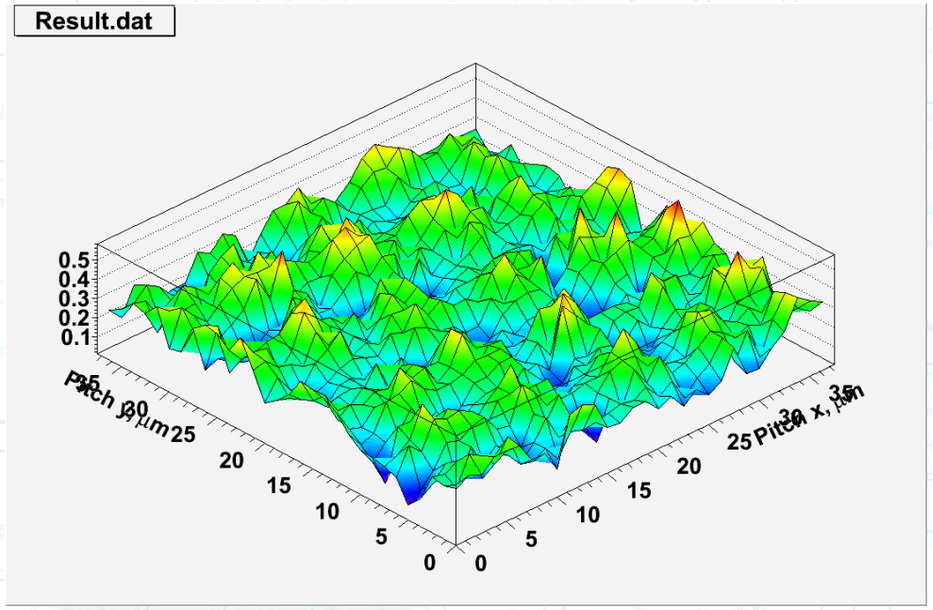


Измерения в однофотоэлектронном режиме

- MAPD-3N (U = 93.5 В)

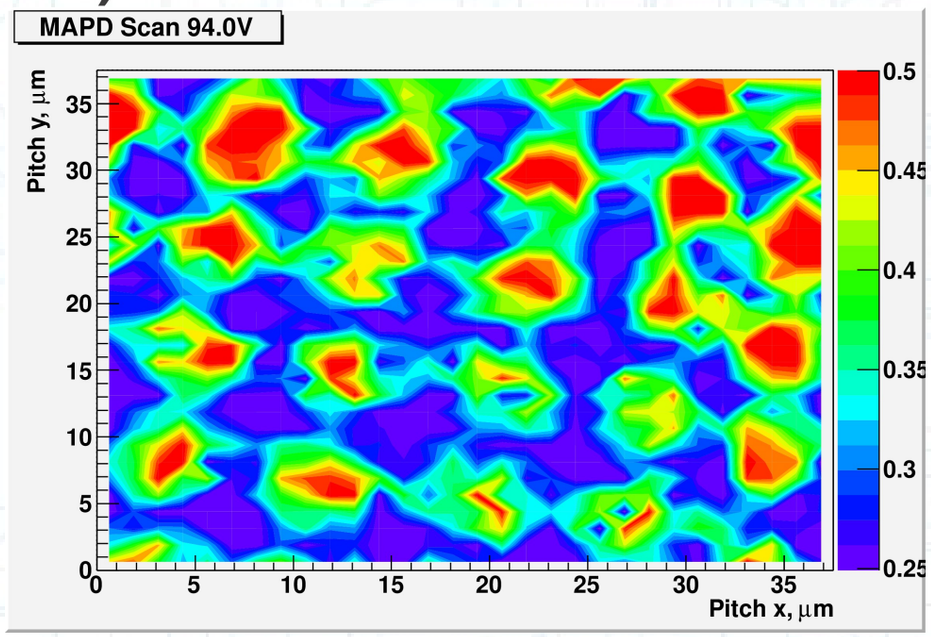


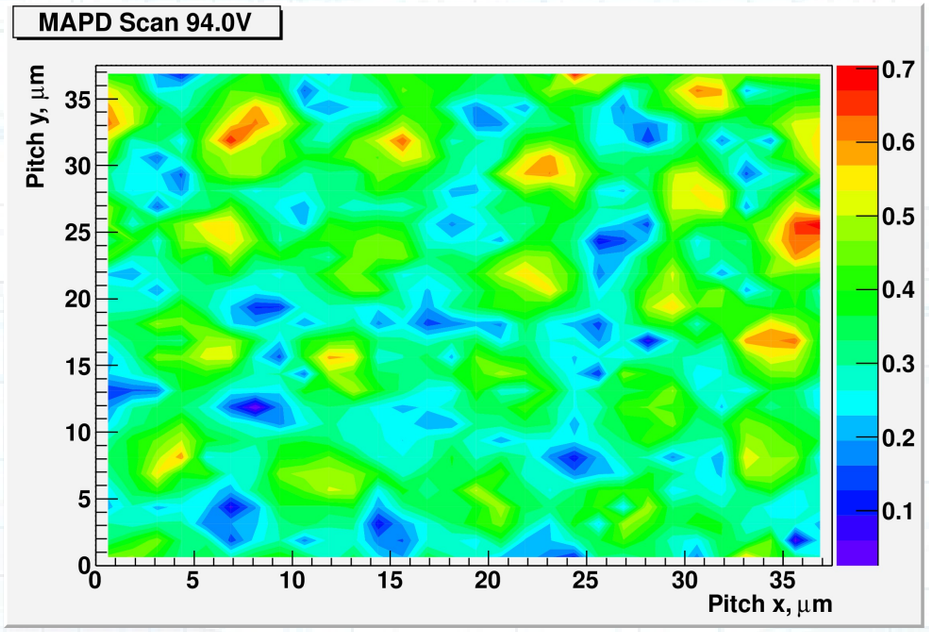


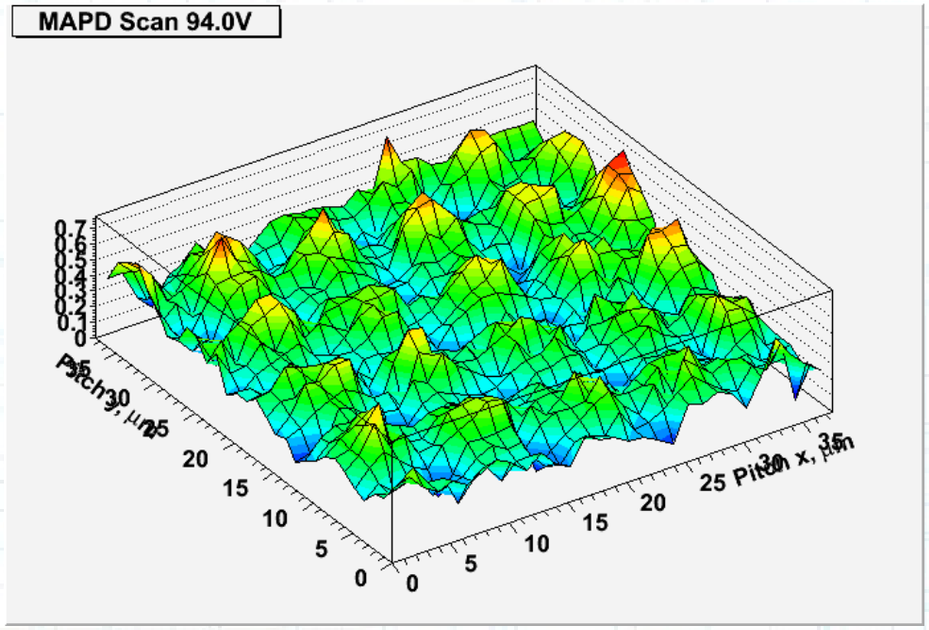


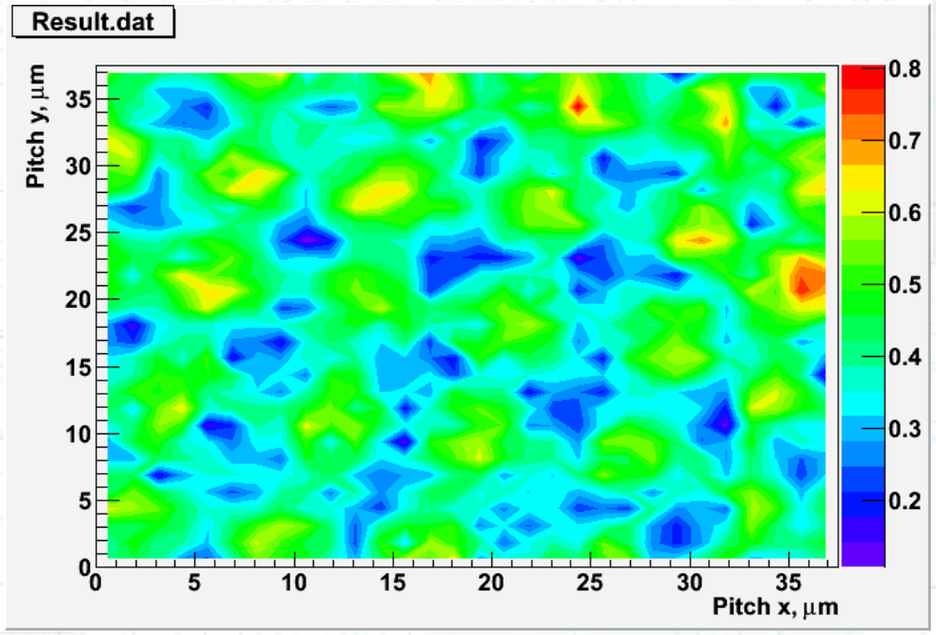
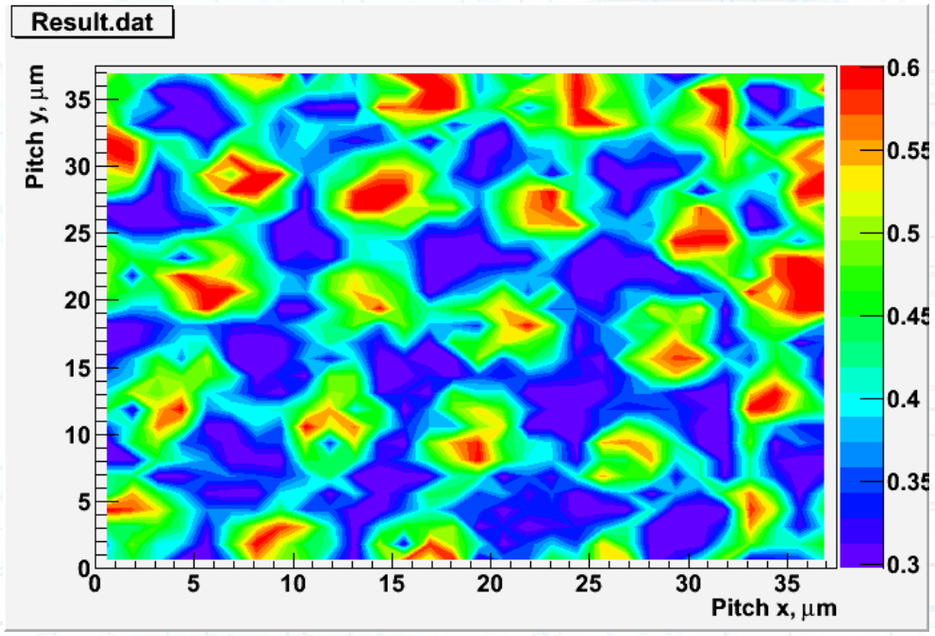
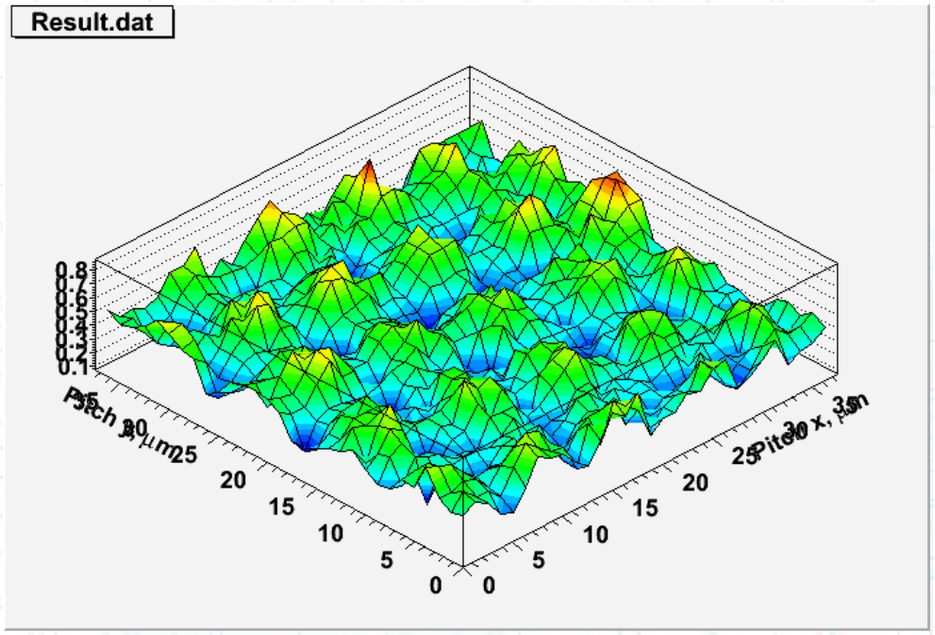
Измерения в однофотоэлектронном режиме

- MAPD-3N (U = 94.0 В)







Измерения в однофотоэлектронном режиме

- MAPD-3N (U = 94.5 В)