

Изучение пиксельных арсенид галлиевых детекторов на основе микросхемы Timepix

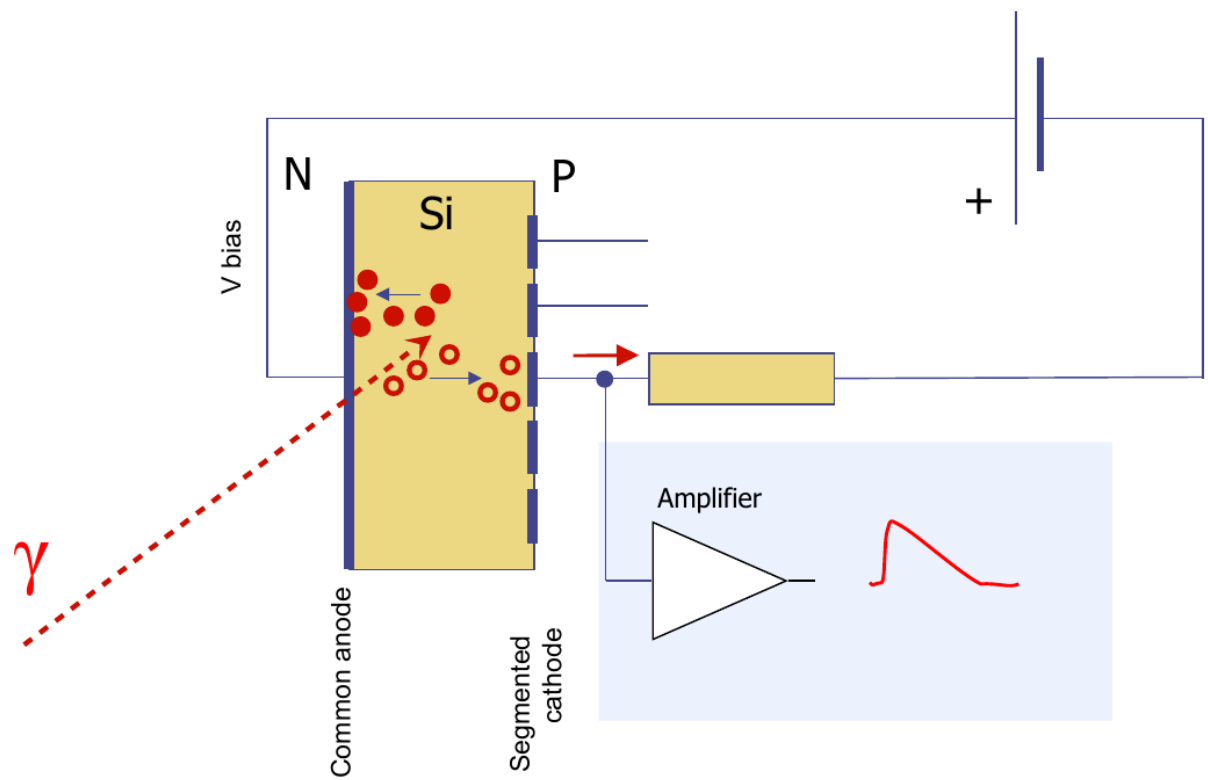
П. Смолянский

НЭОВП ЛЯП

22.12.2017



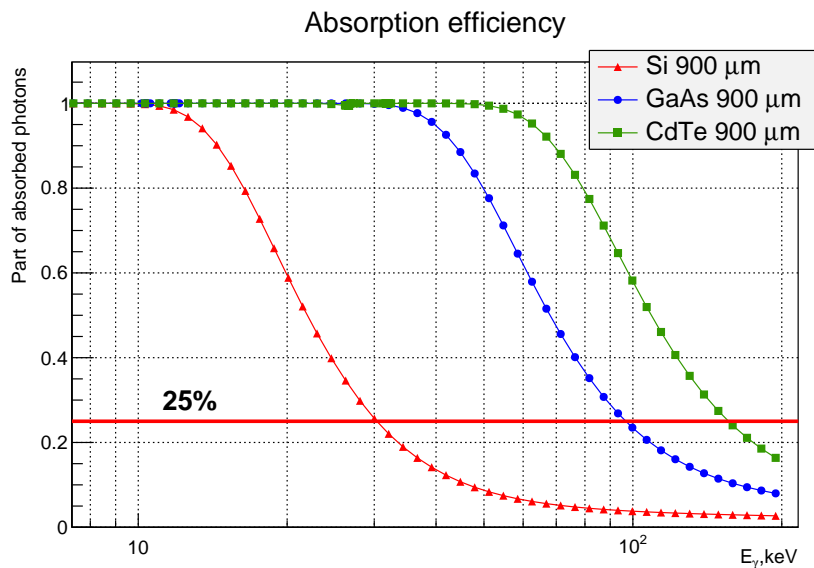
Основы п/п детекторов



Арсенид галлия как детекторный материал

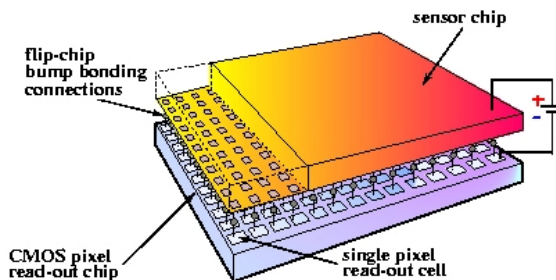
- GaAs – третий по распространенности п/п материал после кремния и германия
- GaAs, выращенный методом Чохральского (LEC-GaAs), ограничен для применения в детекторной тематике из-за низкого удельного сопротивления, высокого уровня шумов и низкой ССЕ
- Технология компенсации арсенида галлия хромом (GaAs:Cr), разработанная в ТГУ, позволила преодолеть эти ограничения ($\rho \sim 10^9$ Ом·см, $\tau_e \sim 10$ нс)

- применим для производства детекторов частиц
- $Z(\text{GaAs}) \sim 32$ vs $Z(\text{Si}) = 14 \Rightarrow$ более высокая эффективность регистрации гамма-квантов
- высокая радиационная стойкость при комнатной температуре (до 1.5 МГр)



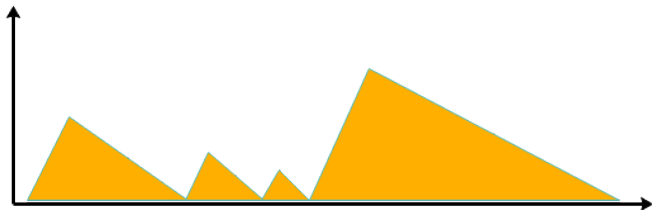
Medipix – семейство гибридных пиксельных микросхем считывания:

- Разработаны в CERN коллаборацией Medipix
- Пиксельная матрица: 256x256 квадратных пикселей размером 55 мкм
- Физические размеры микросхемы:
 $16.1 \times 14.1 \times 0.7 \text{ mm}^3$
- Две основных ветви развития микросхем Medipix:
 - ▶ Medipix – счет одиночных фотонов с возможностью установки до 8 порогов
 - ▶ Timepix – основан на временных измерениях сигнала (TOA, длительность сигнала \sim энергии частицы)
- Используемые материалы для сенсоров:
Si, **GaAs:Cr**, CdTe, CZT



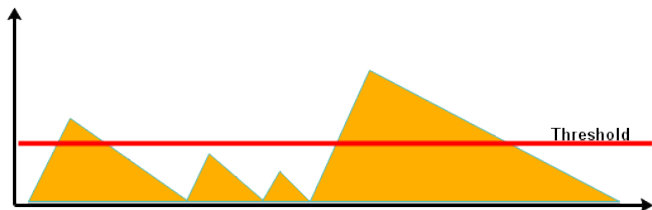
Счет одиночных фотонов

Интегральный подход



- Аналоговый сигнал
- Шум + сигнал

Счет одиночных фотонов

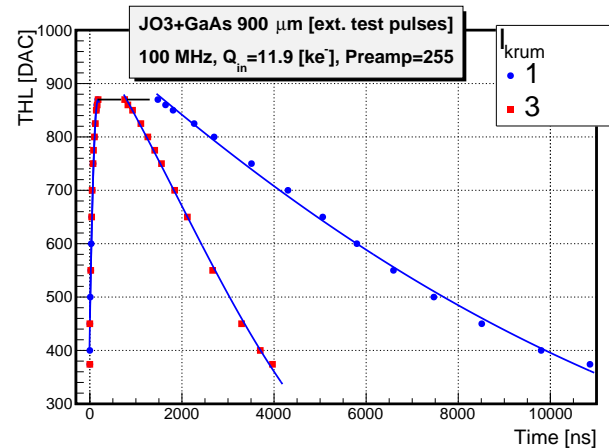
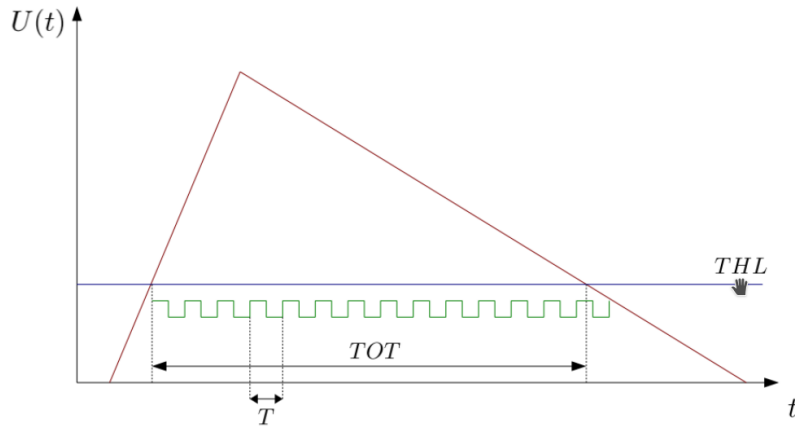


- Цифровой сигнал
- Шум отсекается



Метод Time-over-Threshold

- Измерение длительности сигнала на уровне порога вместо измерения амплитуды
- Длительность спада сигнала контролируется I_{krum} ЦАП



- Значение $[TOT] \Rightarrow [c]$: TOT / f , где $f \in (2, 100)$ МГц



Contents lists available at ScienceDirect

Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A

journal homepage: www.elsevier.com/locate/nima



Characterisation of a GaAs(Cr) Medipix2 hybrid pixel detector

Lukas Tlustos^{a,*}, Georgy Shelkov^b, Oleg P. Tolbanov^c

^a CERN, PH/MIC/ESE, CH-1211 Geneva 23, Switzerland

^b JINR, Dubna, Russia and Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, Russia

^c Siberian Physical-Technical Institute of Tomsk State University, Tomsk, Russia

2011

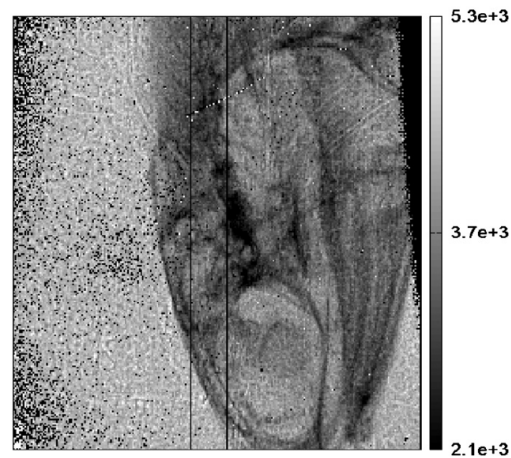
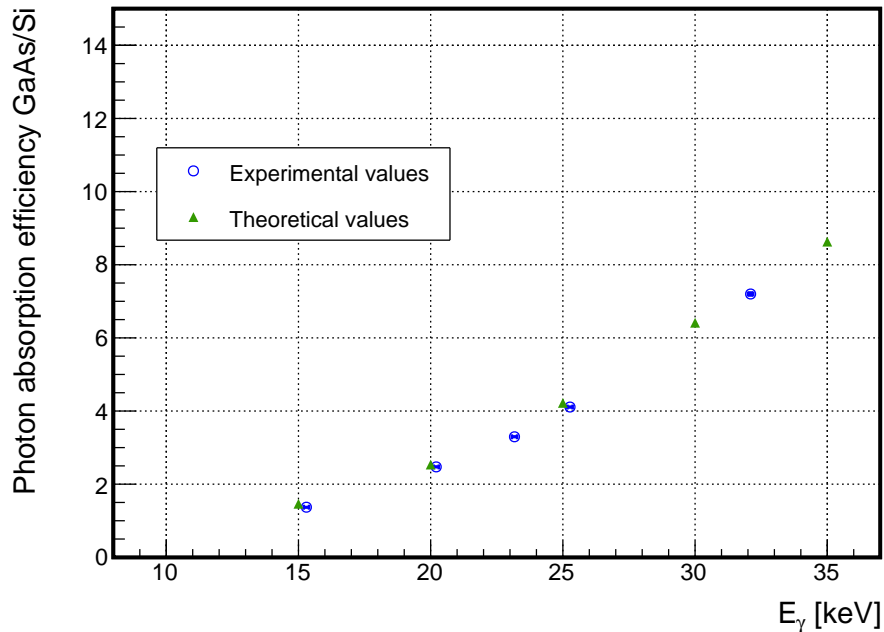


Fig. 8. Flatfield corrected image of the head of an anchovy.

- Высокая эффективность регистрации гамма-квантов (> 10 кэВ)
- Низкие темновые токи
- Высокая эффективность сбора заряда
- Однородность материала по площади
- Стабильность характеристик во времени
- Высокое пространственное и энергетическое разрешение

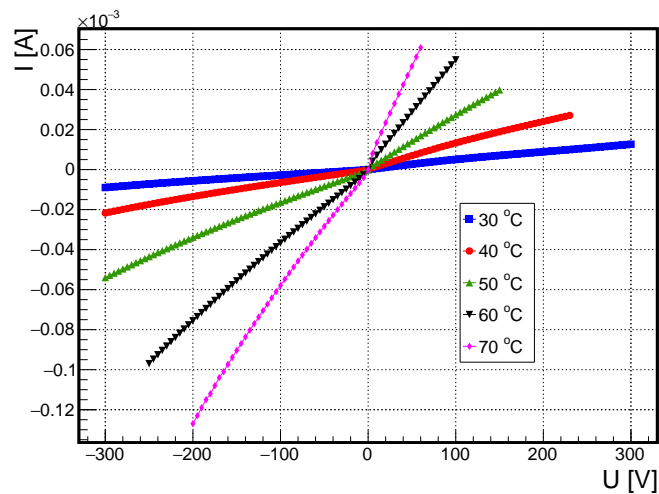
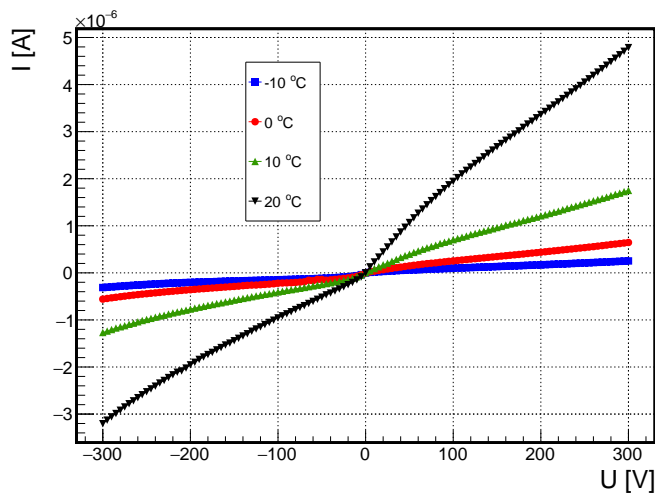
Эффективность регистрации гамма-квантов GaAs vs Si

- $Z(\text{GaAs}) \sim 32$ vs $Z(\text{Si}) = 14 \Rightarrow$ более высокая эффективность регистрации гамма-квантов
- Сравнение для Timepix детекторов с Si и GaAs:Cr сенсорами толщиной 500 мкм
- В 4 раза большая эффективность на 25 кэВ



Вольт-амперные характеристики

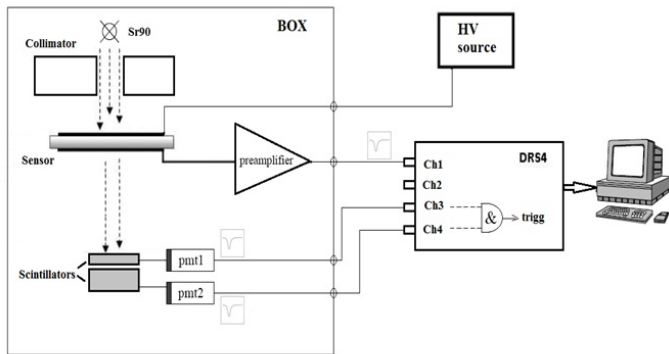
- ВАХ для диапазона от $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $70\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Значения темнового тока в рамках допустимых значений для Timepix (10 нА/пиксель)
- Удельное сопротивление при $20\text{ }^{\circ}\text{C}$: $\sim 10^8\text{ Ом}\cdot\text{см}$



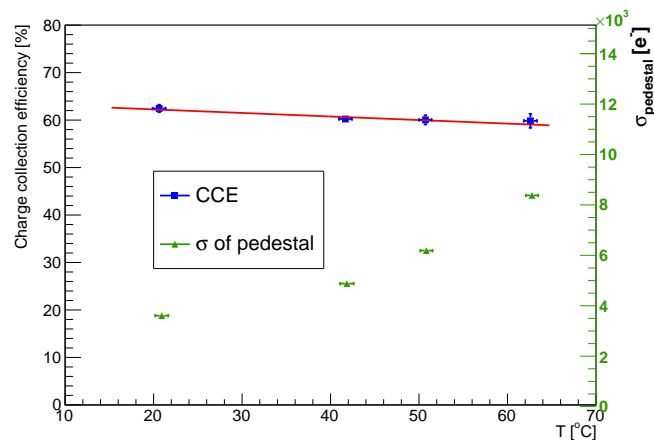
Эффективность сбора заряда (CCE)

- Измерения на падовом детекторе $4.5 \times 4.5 \times 0.63 \text{ mm}^3$
- $CCE = \frac{Q_{meas}}{163.4 \cdot 630}$ (для МИЧ в GaAs: $0.7 \text{ кэВ/мкм} \Rightarrow 163.4 \text{ e}^-h^+ \text{ пар/мкм}$)
- CCE практически не меняется с ростом температуры ($0.075 \text{ \%}/^\circ\text{C}$)

Схема измерений



Зависимость CCE(T)



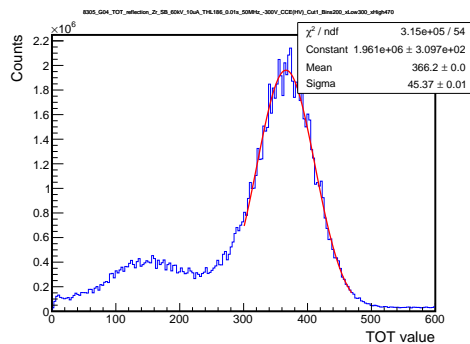
Транспортные характеристики носителей заряда

- Классическое уравнение Хехта:

$$Q(U) = Q_0 \cdot \frac{\mu\tau}{d^2} \cdot U \cdot (1 - e^{-\frac{d^2}{\mu\tau U}})$$

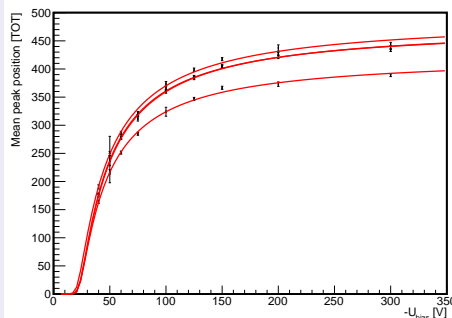
- Используется рентгеновское характеристическое излучение (РХИ) **Zr** фольги
- Гамма-кванты, соответствующие линии $K_{\alpha} = 15.7$ кэВ имеют длину свободного пробега в GaAs < 25 мкм \Rightarrow большая часть взаимодействий произойдет вблизи общего электрода
- Среднее значение зарегистрированного фотопика 15.7 кэВ определено для каждого пикселя при различных напряжениях смещения
- Полученные зависимости «Положение пика vs напряжение смещения» для каждого пикселя были фитированы модифицированным уравнением Хехта для случая малых пикселей

TOT спектр Zr фольги



П. Смолянский (НЭОВП ЛЯП)

CSE(U)



GaAsCrTimepix

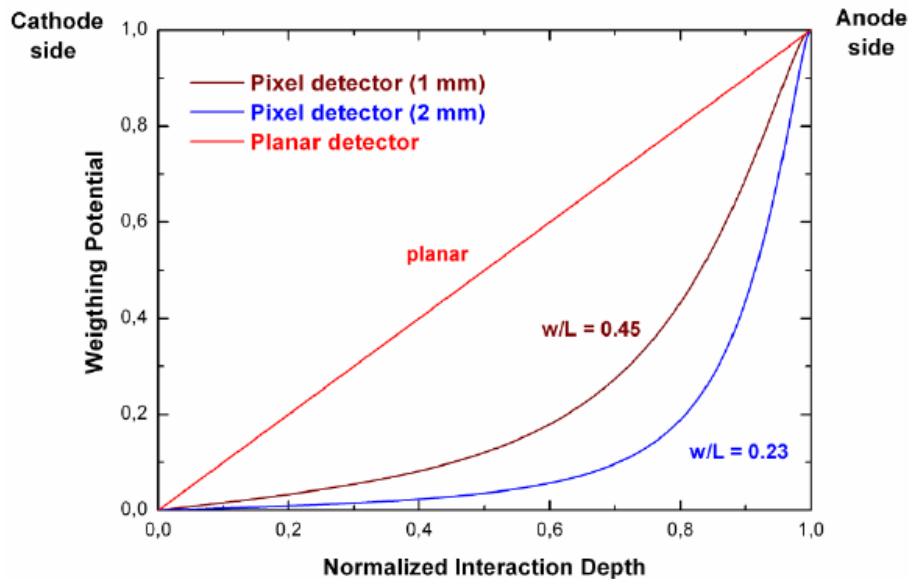
22.12.2017

12 / 36

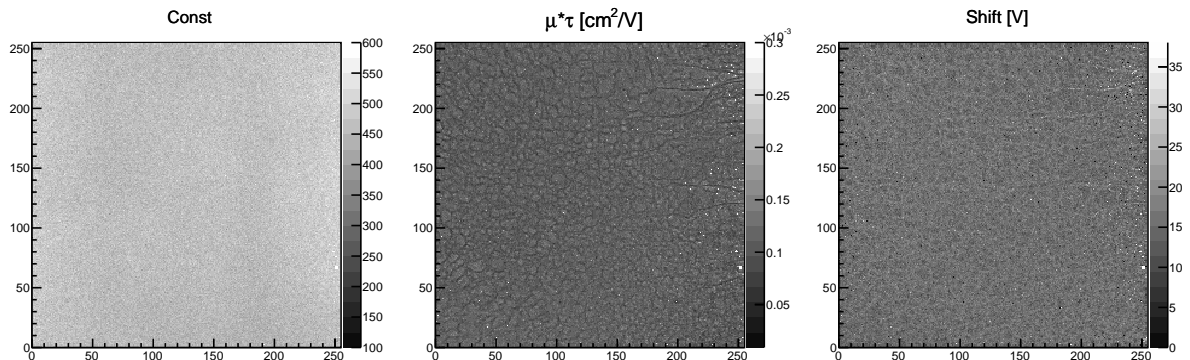
Уравнение Хехта для детекторов с малыми пикселями

В пиксельных детекторах с размером пикселя 55 мкм эффект малого пикселя существенен и классическое уравнение Хехта неприменимо. Модифицированное уравнение [arxiv:1701.03459]:

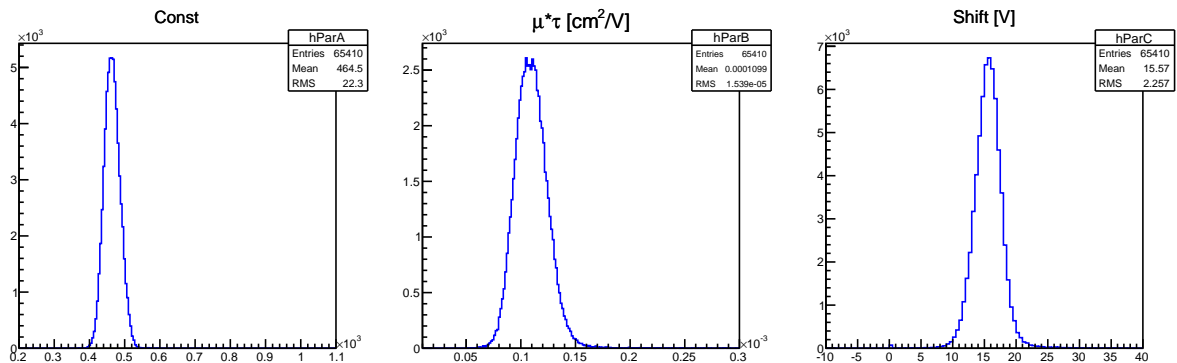
$$Q(U) = Q_0 \cdot \frac{d}{\mu\tau \cdot (U - U_0)} \cdot \int_0^d w(x) \cdot e^{-\frac{-x \cdot d}{\mu\tau \cdot (U - U_0)}} dx + e^{-\frac{d^2}{\mu\tau \cdot (U - U_0)}}$$



Распределение $\mu^*\tau$ по площади



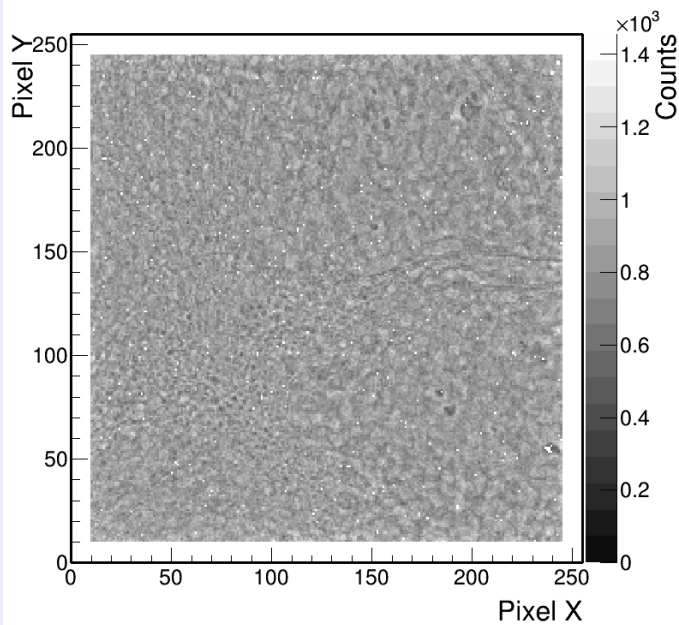
$\mu_e\tau_e = 1.1 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{V}$, RMS = 7.5 % по матрице



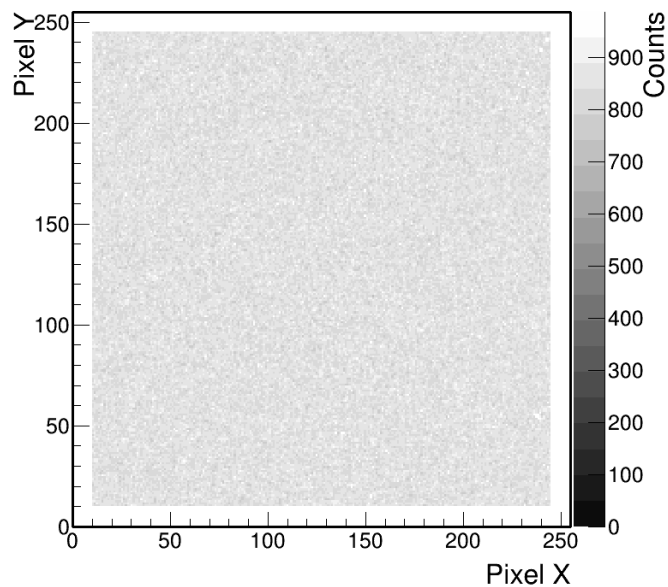
Однородность отклика по площади

- RMS сократилось в 3 раза после коррекции на открытое поле

Raw image

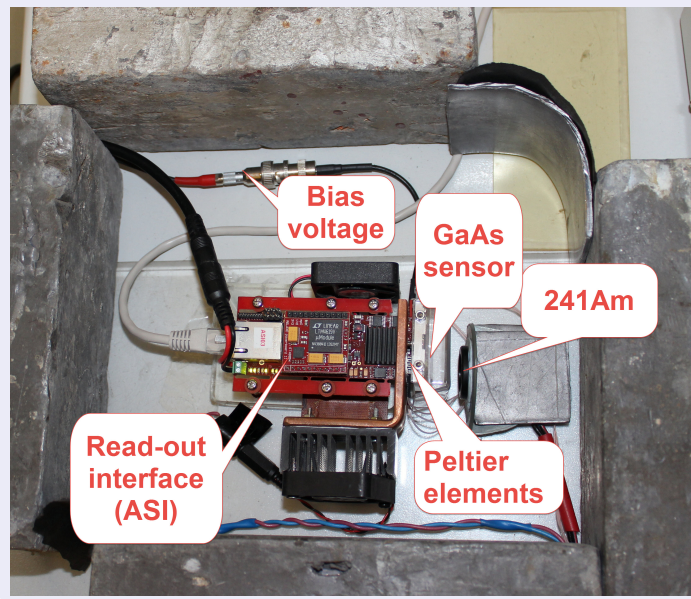


Corrected image



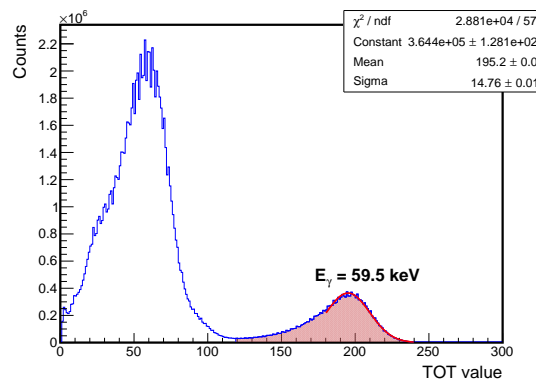
Стабильность детектора в режиме TOT

Фотография стенда



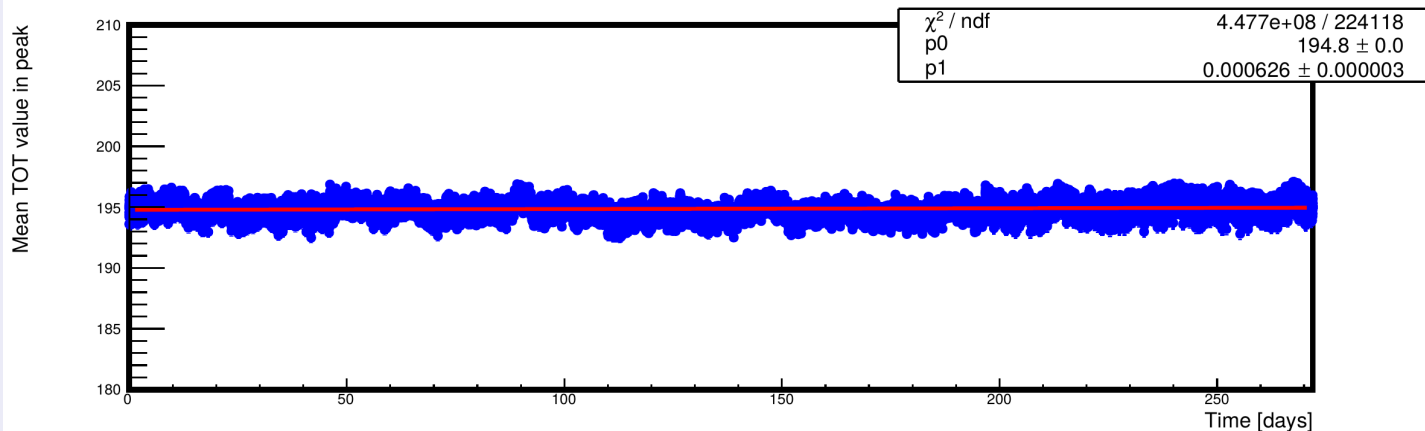
- Timerpix + GaAs:Cr sensor ($1000\ \mu\text{m}$) при $T_{stab} = 20 \pm 0.2^{\circ}\text{C}$ в режиме TOT
- облучение источником ^{241}Am , как меняется положение линии $E_{\gamma} = 59.5\ \text{кэВ}$ во времени?
- ~ 1 год непрерывных измерений

Измеряемый ^{241}Am спектр



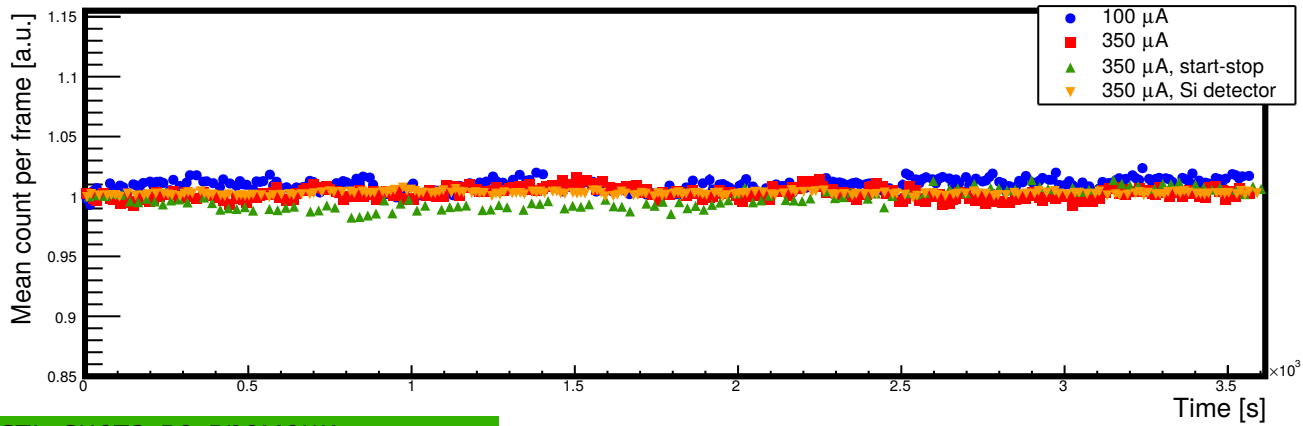
Стабильность детектора в режиме TOT

Положение линии 59.5 кэВ во времени

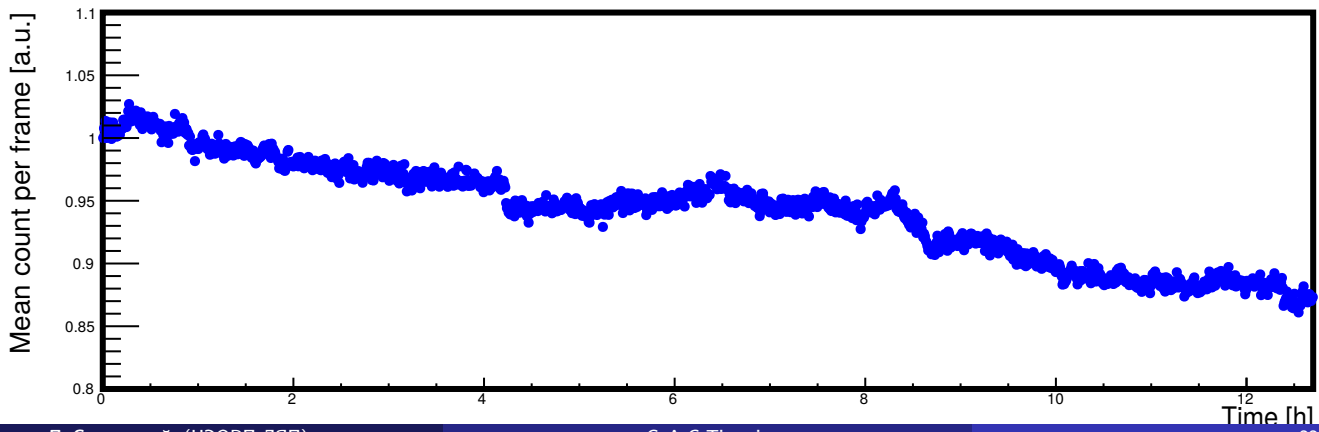


- Средняя позиция пика увеличилась менее, чем на промиле за год
- 33 новых «мертвых» пикселя за год

Стабильность работы в счетном режиме

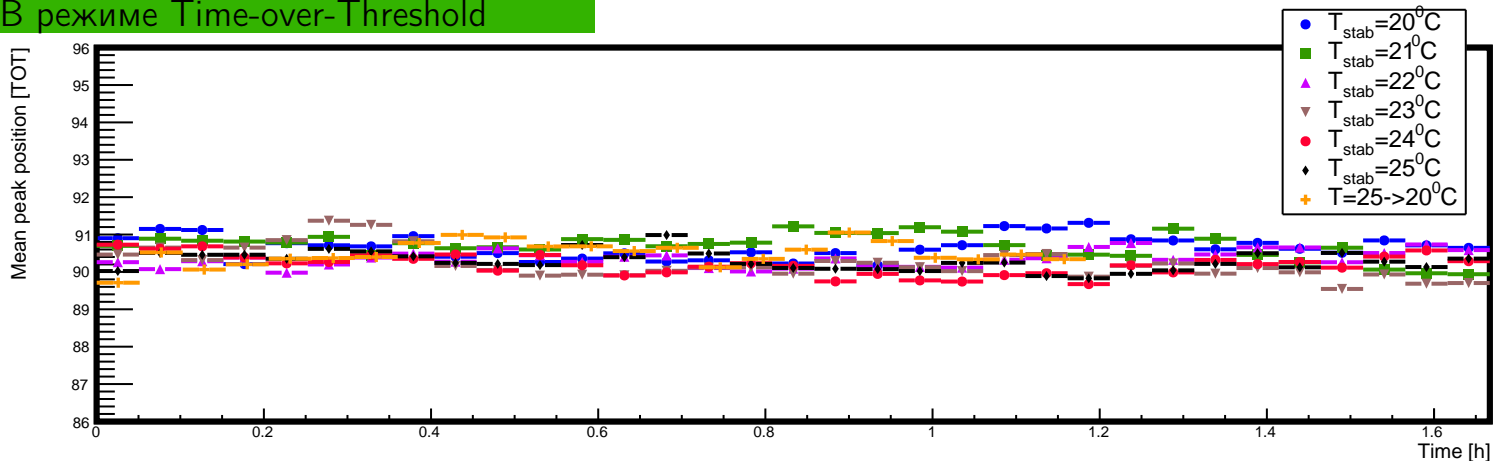


Скорость счета во времени

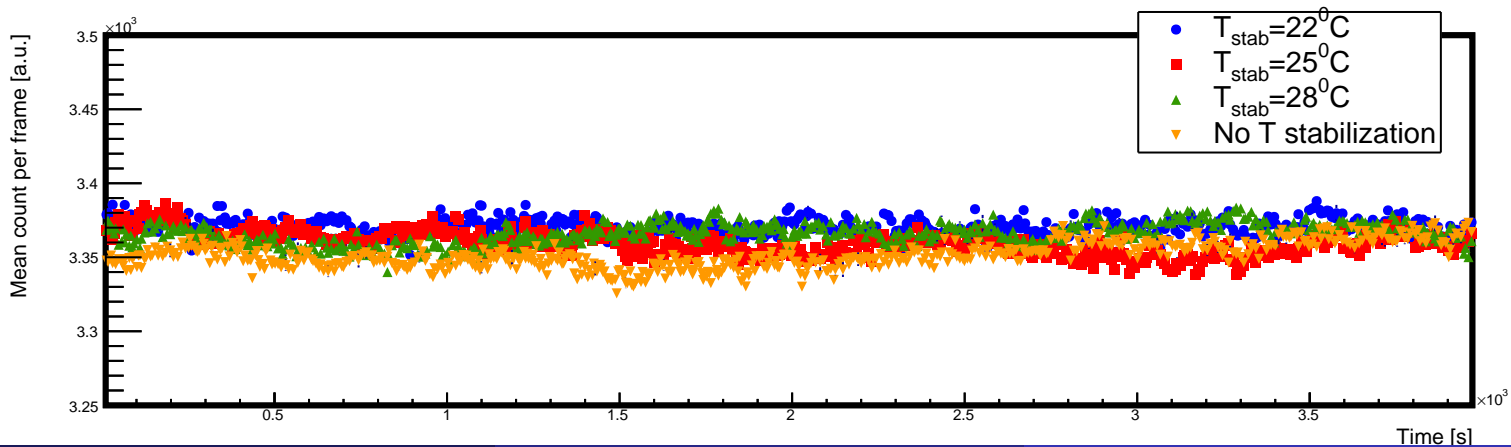


Температурная зависимость

В режиме Time-over-Threshold

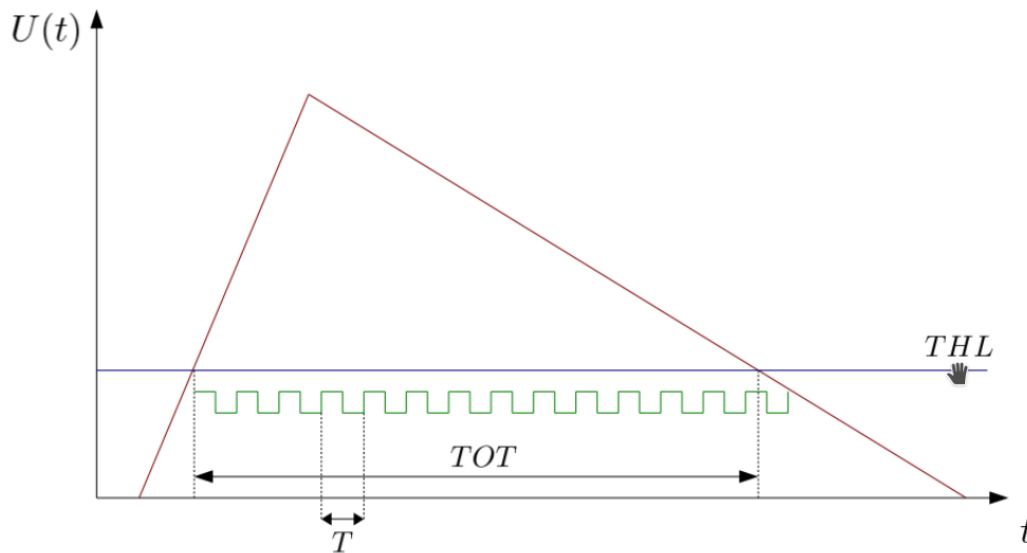


В счетном режиме



Энергетическая калибровка в режиме TOT

Для прямого измерения энергии, выделившейся в сенсоре детектора в результате прохождения частицы, используется режим Time-over-Threshold



Энергетическая калибровка: установление соответствия между энергией поглощенных частиц E и длительностью импульса (в единицах TOT), создаваемого прошедшей частицей в канале каждого пикселя

- Попиксельная калибровка
- Обобщенная калибровка

Схема калибровки Timepix детектора в режиме TOT

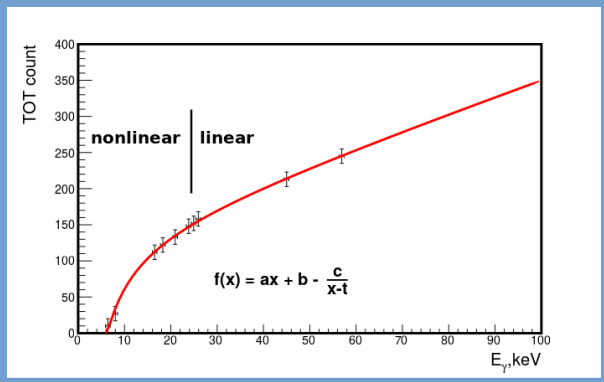
Запись спектров РХИ известных металлов (от Ni до Ta) в единицах TOT → диапазон калибровки от 6 до 60 кэВ



Идентификация в TOT спектрах пиков с известной энергией E → μ, σ



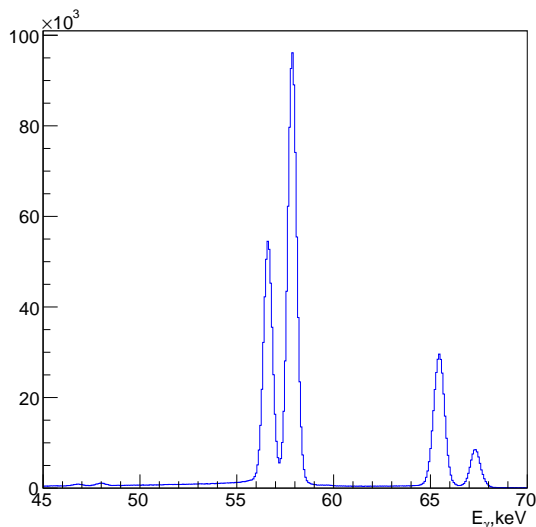
Фитирование полученной зависимости
TOT(E) эмпирической функцией
[J.Jakubek, 2011]:

$$TOT(E) = a \cdot E + b - \frac{c}{E-t}$$


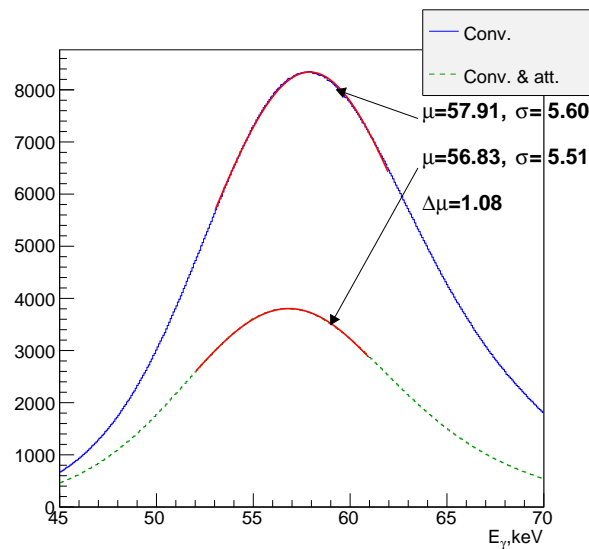
Смоделированный спектр характеристического излучения тантала

- Энергетического разрешения Timerix детектора недостаточно для разделения K_α , K_β спектральных линий => неточность калибровки
- Моделирование спектра GaAs:Cr-Timerix детектора с учетом разрешения и эффективности детектора

Спектр измеренный детектором Canberra
($\sigma=0.1$ кэВ @ 5.9 кэВ)

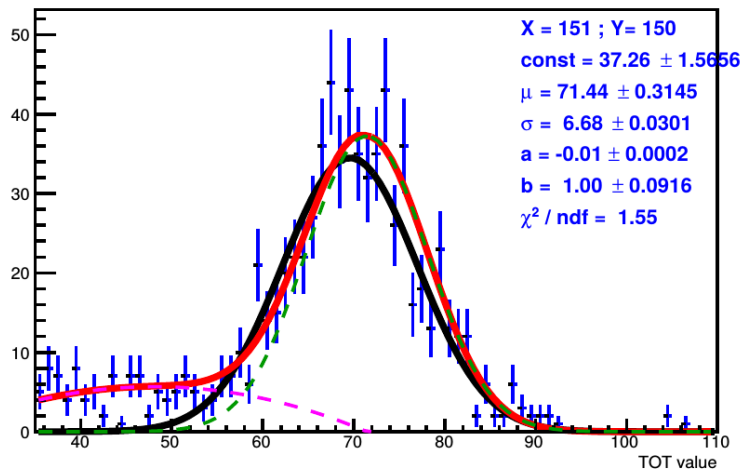


Смоделированный спектр для Timerix детектора



Функция для фита попиксельных спектров

Фитирование спектральных пиков в каждом пикселе с помощью функции распределения Гаусса дает некорректные результаты



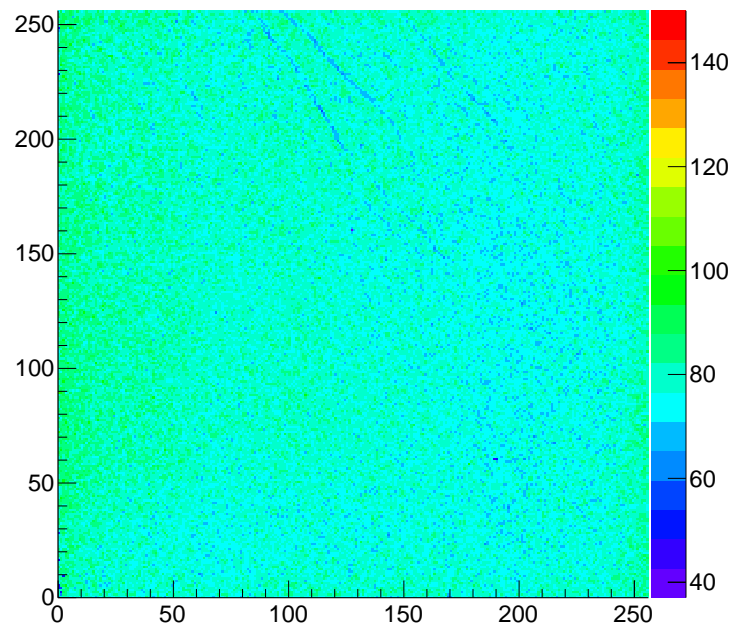
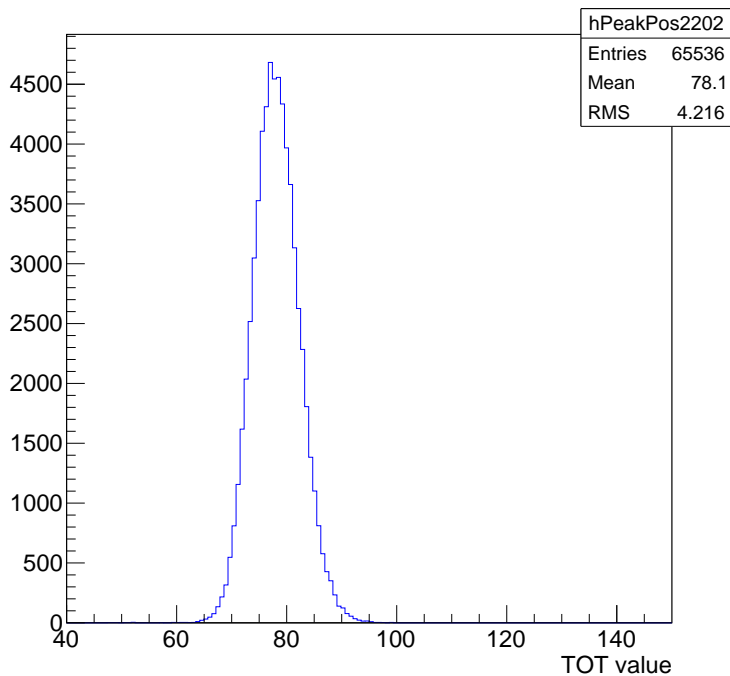
Решение – комбинация гауссиана с квадратичным полиномом:

$$F = \begin{cases} K \cdot \exp\left(-\frac{(ToT-\mu)^2}{2\sigma^2}\right), & \text{если } ToT > \mu; \\ K \cdot \exp\left(-\frac{(ToT-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) + a \cdot ToT^2 + b \cdot ToT + c, & \text{если } ToT < \mu. \end{cases}$$

Дополнительное условие, накладываемое на квадратичный полином: $a\mu^2 + b\mu + c = 0$.

Распределение положения фитируемого пика

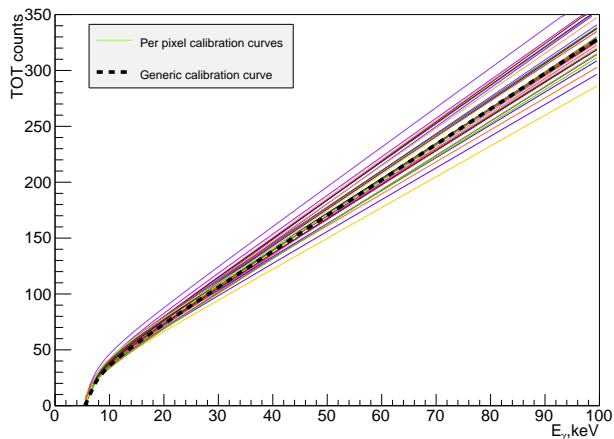
- RMS $\sim 5.4\%$
- Хорошо различимы области с меньшим значением CCE



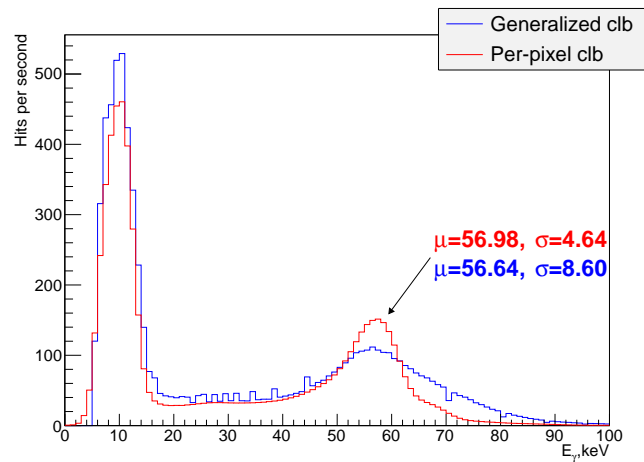
Результаты попиксельной калибровки

- Энергетическое разрешение увеличилось вдвое на 57 кэВ по сравнению с обобщенной калибровкой
- σ : 12 % @ 20 кэВ, 8 % @ 57 кэВ
- Точность калибровки: 0.5 %

Калибровочные кривые



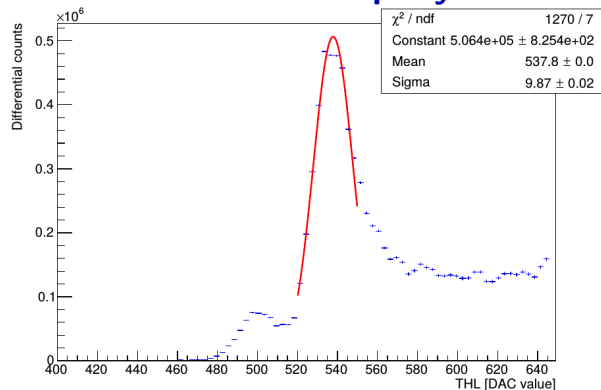
Спектр ²⁴¹Am



Энергетическое выравнивание порогов (equalization)

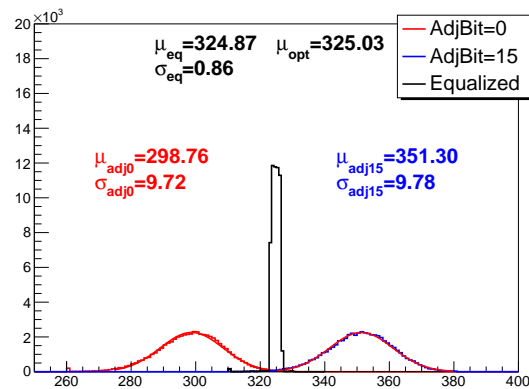
- Коэффициенты усиления электроники пикселей отличаются
- Разброс порогов $RMS = 235 e^- \Rightarrow RMS=35 e^-$ путем шумовой эквализации
- При работе в счетном режиме при порогах » уровня шумов процедура выравнивания порогов по краю шумового спектра становится неэффективной

Скан по порогу



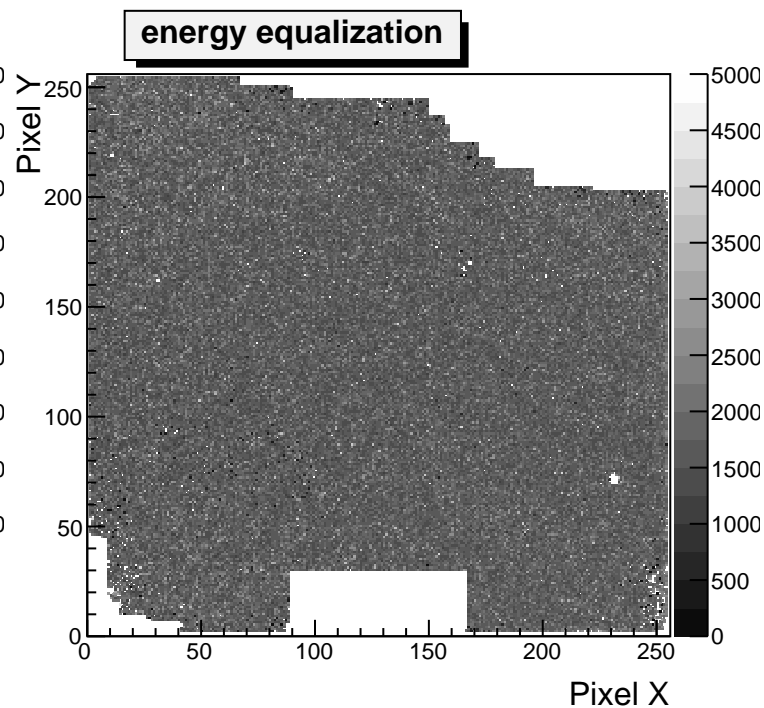
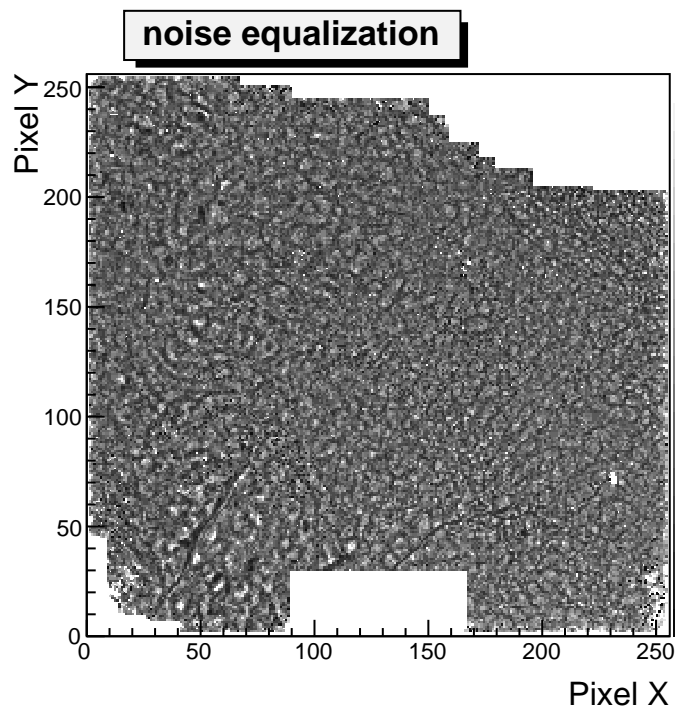
Энергетическая эквализация:

- РХИ линии, в окрестности которой нужно установить порог
- находятся распределения значения порогов $\overline{THL_0}$ и $\overline{THL_{15}}$ в пике РХИ при AdjBit=0 и AdjBit=15
- определяется оптимальное значение порога $THL_{opt} = (\overline{THL_0} + \overline{THL_{15}}) / 2$
- для каждого пикселя AdjBit выбирается таким образом, чтобы значение THL для пикселя было максимально близко к THL_{opt}



Распределение счета после эквализации по шумам и энергетической эквализации

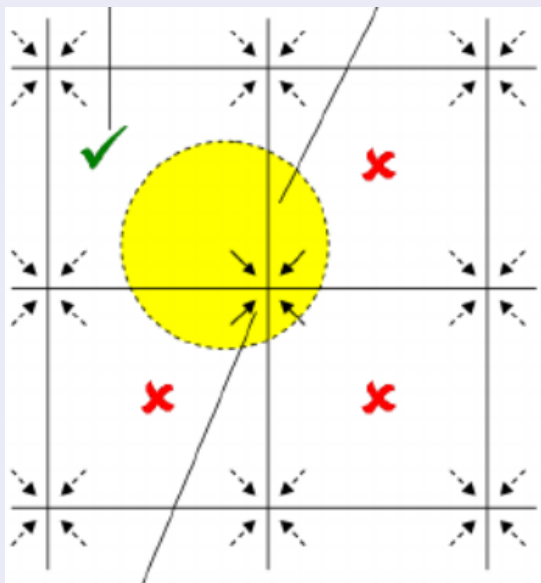
- Засветка характеристическим излучением $E=15.7-17.5$ кэВ
- Установленный порог $THL=15$ кэВ
- Разброс счета (RMS) сократился вдвое по сравнению с шумовой эквализацией



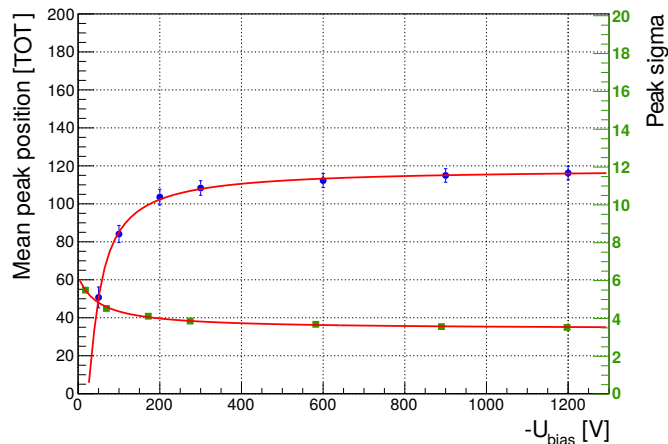
Эффект разделения заряда

- Заряд от одиночного взаимодействия гамма-кванта с сенсором может быть наведен на несколько соседних пикселей
- $\sigma = \sqrt{\frac{2nk_B T l d}{e U_{bias}}}$ – пространственное увеличение облака носителей заряда за счет диффузии
- В TOT режиме этот эффект может быть частично уменьшен путем суммирования сигналов в соседних пикселях (кластере)

Эффект разделения заряда

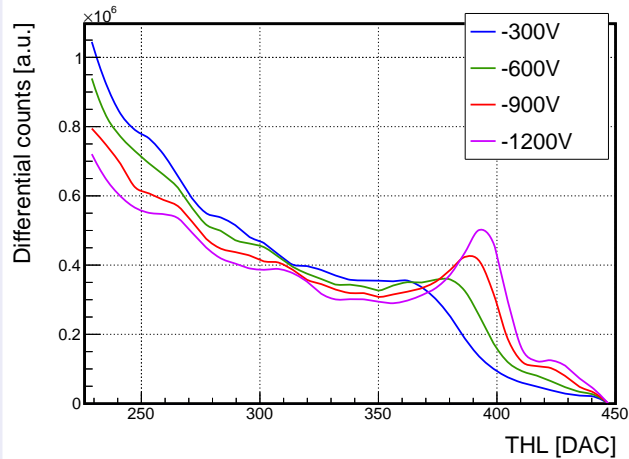


CSE(U_{bias}) в TOT режиме

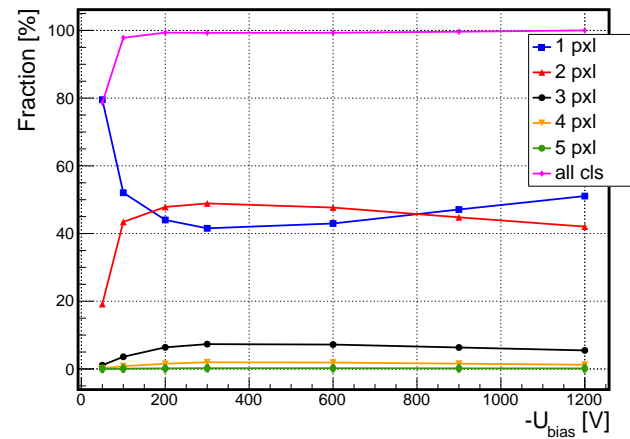


Энергетическое разрешение в счетном режиме

Сканы по порогу при разных U_{bias}



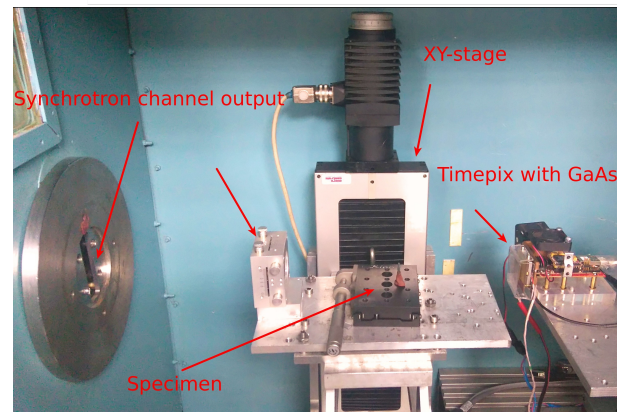
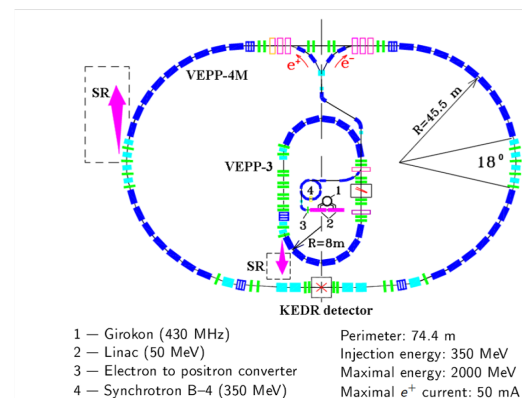
Размер кластера от U_{bias}



- увеличение напряжения смещения выше «рабочих» значений позволило существенно поднять энергетическое разрешение детектора в счетном режиме (до $\sigma = 6-7\%$ @ 24 кэВ)
- максимально протестированное напряжение смещение для 500 мкм GaAs:Cr детектора $-1200\text{ В} \Leftrightarrow 24\text{ кВ/см}$

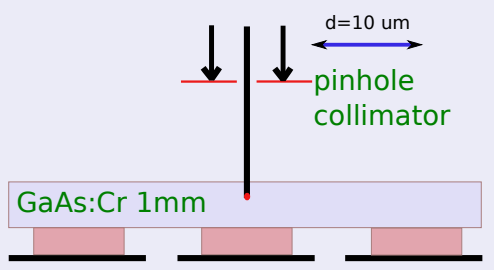
Измерения на синхротроне ВЭПП-3М

- Measurements were done at electron-positron storage rings VEPP-3M and VEPP-4M, serving as sources of synchrotron radiation
- VEPP-3M:
 - ▶ Electron beam energy: 2 GeV
 - ▶ Beam current up to 100 mA
 - ▶ Bunch length: 1 ns
 - ▶ Period: 125 ns
 - ▶ Flux up to: $6 * 10^{10} \text{ ph/mm}^2/\text{s}$
- SR station "X-ray microscopy and microtomography":
 - ▶ Energy range of monochromatic radiation: 6 - 44 keV
 - ▶ Monochromated SR beam size: 2 mm x 40 mm
 - ▶ Collimator down to $10 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$

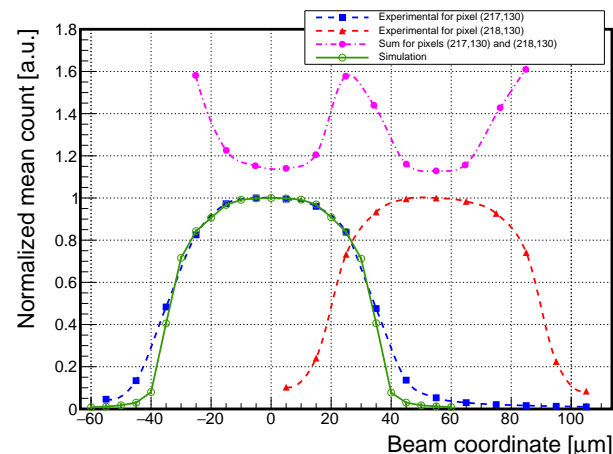


Geometrical mapping of pixel sensitivity

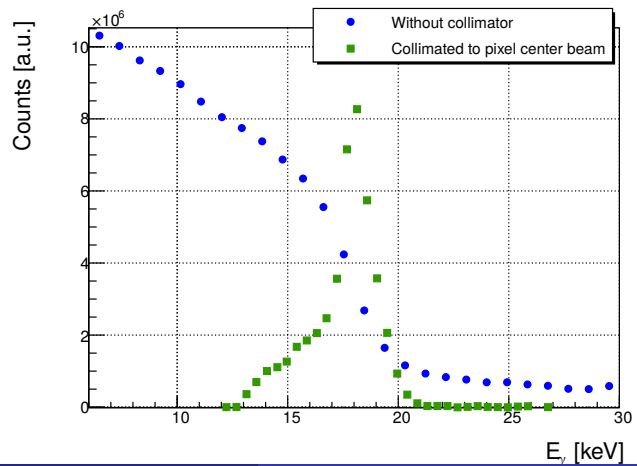
Scan with pinhole collimator



- Несколько пикселей детектора было просканировано с шагом 10 мкм с помощью сколлимированного пучка фотонов $10 \times 10\text{ }\mu\text{m}^2$ с энергией 18 кэВ
- Получены зависимость отклика пикселя от положения сколлимированного пучка
- Измерено энергетическое разрешение отдельного пикселя: $\sigma=4.5\text{ \%}$ @ 18 кэВ
- Получена оценка увеличения облака носителей заряда за счет диффузии: $\sigma \sim 17\text{ }\mu\text{m}$ для GaAs:Cr толщиной 1 мм



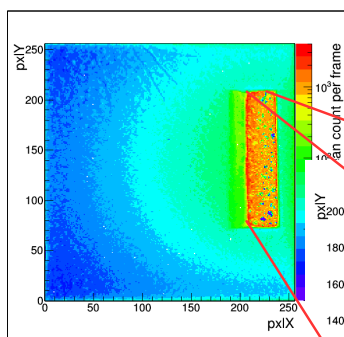
ERF of a single pixel and ERF of whole detector



Отклик детектора при больших потоках фотонов

Beam size: 2 mm x 8 mm

Photon energy: 28 keV; $F_0 = 9 \cdot 10^8$ ph/mm²/s



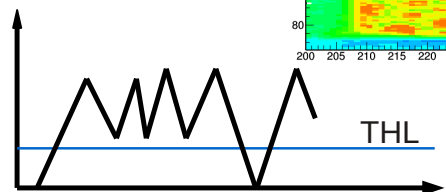
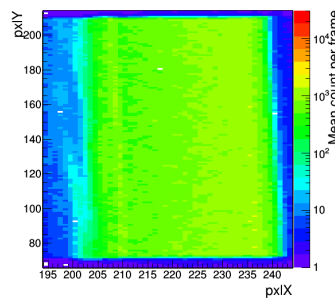
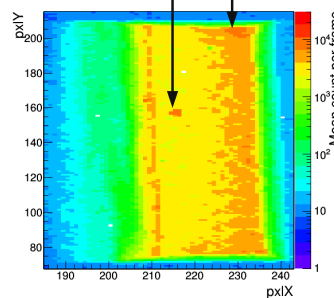
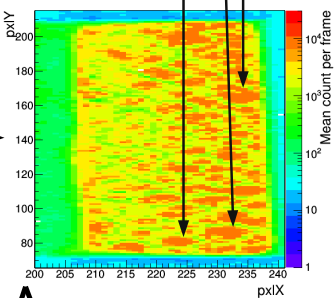
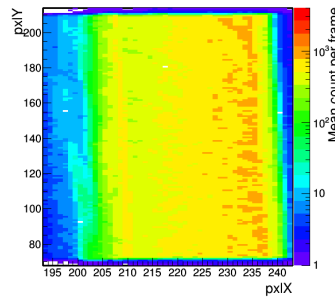
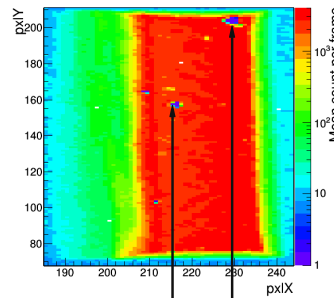
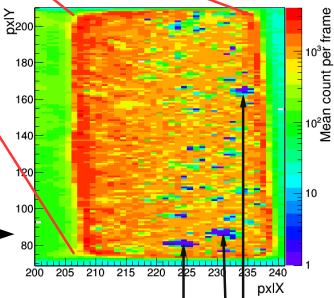
F_0

$0.28 \cdot F_0$

$0.02 \cdot F_0$

Medipix mode
(groups of pixels are counting « detector average »)

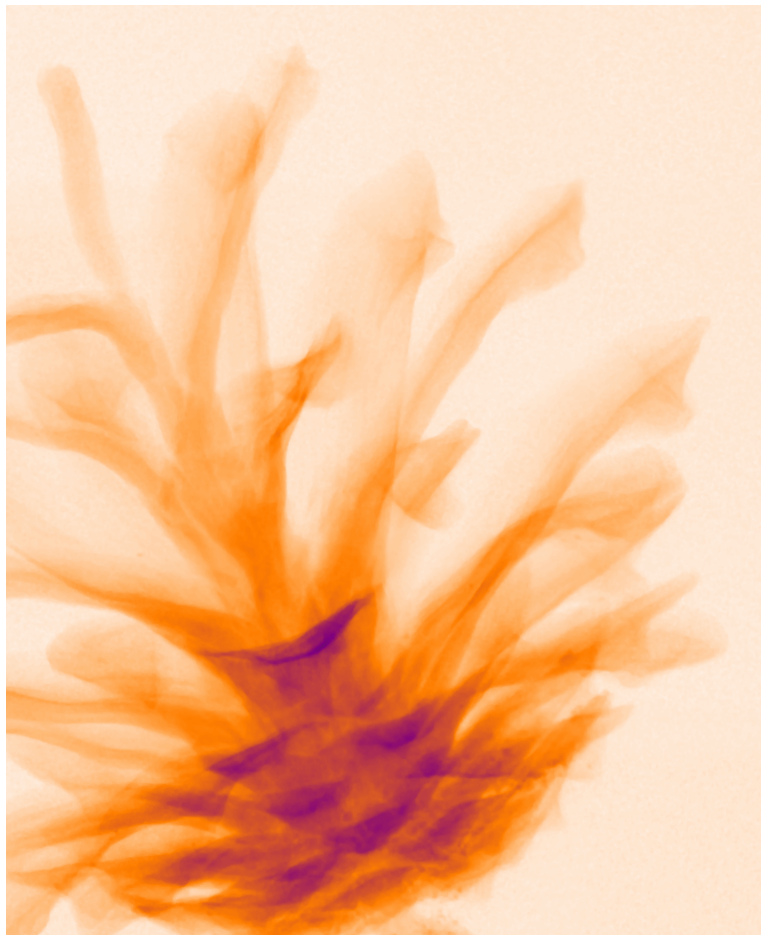
TOT mode
(groups of pixels are at counter limit)



Summary and conclusions

- 1 Систематически изучены характеристики новых пиксельных детекторов на основе чипа Timepix и сенсоров из GaAs:Cr различной толщины (300, 500, 1000 мкм): энергетическое разрешение, пространственное разрешение, соотношение сигнал-шум, долговременная стабильность, зависимость характеристик детекторов от температуры, эффективность регистрации гамма-квантов
- 2 Определены оптимальные настройки детекторов для различных режимов работы
- 3 Эффект разделения заряда существенно ограничивает применение GaAs:Cr сенсоров с толщиной более 500 мкм и размером пикселя 55 мкм в приложениях, где требуются спектральные измерения в режиме счета фотонов. В случае использования GaAs:Cr сенсора толщиной 500 мкм энергетическое разрешение Timepix детектора в режиме счета фотонов может достигнуть значения 2.5 кэВ (FWHM) при 25 кэВ
- 4 Разработан метод и создан комплекс программ для итеративной энергетической калибровки пиксельных детекторов на основе GaAs:Cr и чипа Timepix, работающих в режиме измерения энергии, с использованием линий характеристического рентгеновского излучения. В результате достигнуто энергетическое разрешение 8 % на 57 кэВ для GaAs:Cr-Timepix детекторов с толщиной сенсора 1 мм, что вдвое лучше разрешения, получаемого после обобщенной калибровки
- 5 Полученные результаты дают возможность сделать вывод о том, что свойства пиксельных GaAs:Cr детекторов позволяют использовать их в системах рентгеновской радиографии и томографии наряду с кремниевыми, таким образом расширяя диапазон высокого поглощения гамма-квантов до 60 кэВ.

- 1 A. Butler, ..., P.I. Smolyanskiy, et al. *Measurement of the Energy Resolution and Calibration of Hybrid Pixel Detectors with GaAs:Cr Sensor and Timepix Readout Chip. Physics of Particles and Nuclei Letters, Vol. 12, No. 1, 2015*
- 2 A. Guskov, G. Shelkov, P. Smolyanskiy, A. Zhemchugov. *On the possibility to use semiconductive hybrid pixel detectors for study of radiation belt of the Earth, J. Phys.: Conf. Ser. 675 032018, 2016*
- 3 S.M. Abu Al Azm, ..., P. Smolyanskiy, et al. *Response of Timepix Detector with GaAs:Cr and Si Sensor to Heavy Ions, Physics of Particles and Nuclei Letters, Vol. 13, No. 3, 2016*
- 4 P. Smolyanskiy, et al. *Characterization of GaAs:Cr-based Timepix detector using synchrotron radiation and charged particles, J. Inst. 11, C12070, 2016*
- 5 P. Smolyanskiy, et al. *Study of a GaAs:Cr-based Timepix detector using synchrotron facility, J. Inst. 12, P11009, 2017*
- 6 P. Smolyanskiy, et al. *Properties of GaAs:Cr-based Timepix detectors, submitted to NIMA*



Спасибо за
внимание!

Backups