

Исследование температурной зависимости характеристик матриц КФУ

Тимофей Углов

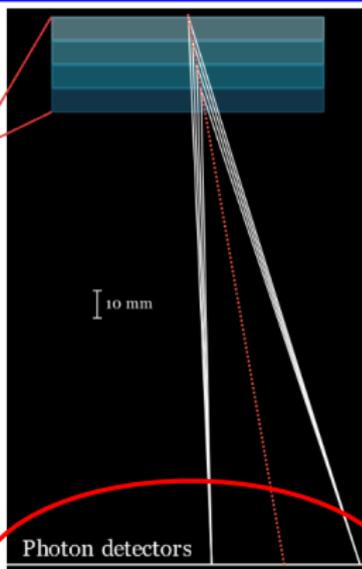
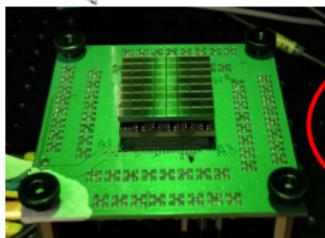
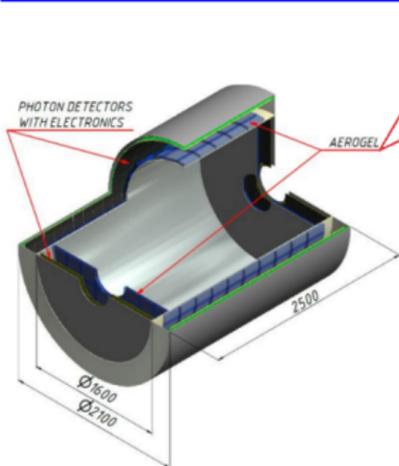
ВШЭ, ФИАН

Сессия-конференция Отделения ядерной физики РАН
ИЯФ СО РАН, Новосибирск

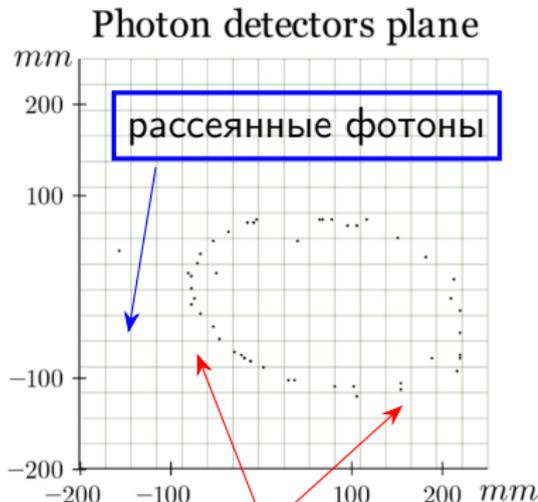
11 марта 2026 г.

Фокусирующие детекторы черенковских колец (FARICH)

Детектор ФАРИЧ для проекта СЧТФ, моделирование в пакете Aurora



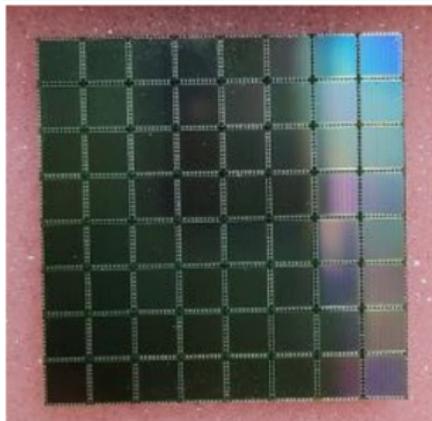
матрицы КФУ



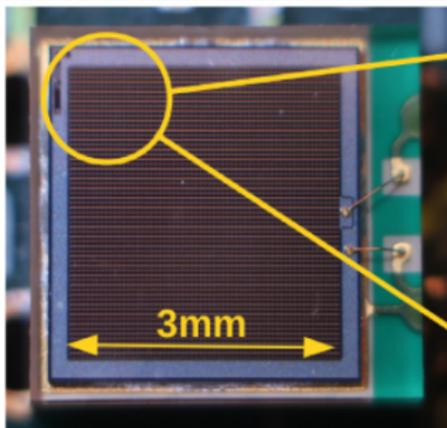
СИГНАЛЬНОЕ «КОЛЬЦО»

arXiv:2506.14247

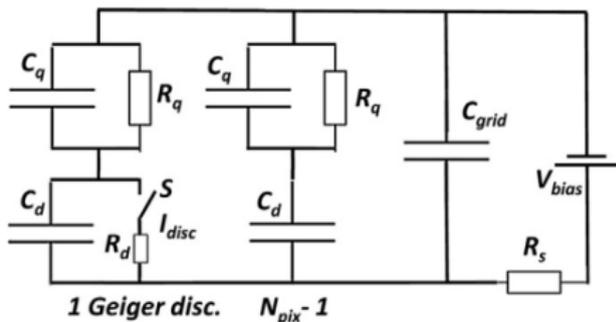
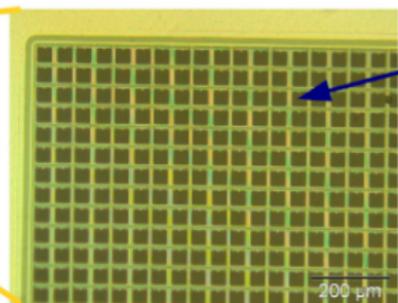
Кремниевые фотоумножители (SiPM)



матрица КФУ



КФУ



ЭКВИВАЛЕНТНАЯ СХЕМА
КФУ

Цели и задачи исследования

- КФУ шумят
- Частота шумовых срабатываний зависит от температуры КФУ и быстро растет с ростом температуры
- Контролировать шум можно по величине темнового счета (DCR)

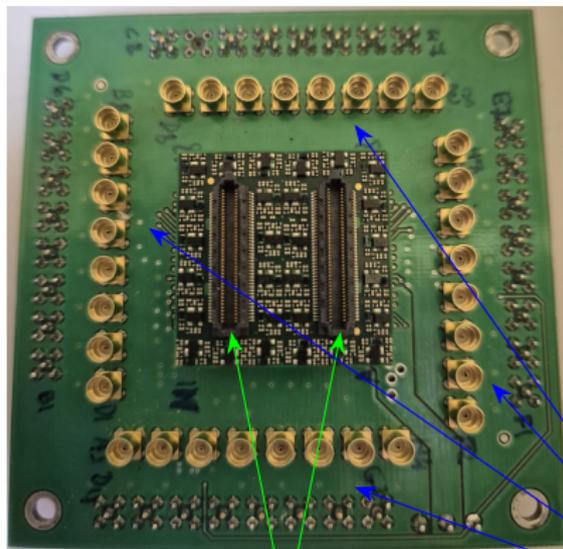
Цель:

исследовать температурную зависимость параметров матрицы SiPM КЕТЕК PA3325-WB-0808

- создать термостабилизированный стенд, позволяющий набирать данные с матрицы КФУ с лазерным освещением и в случайном режиме
- Для каждого канала определить коэффициент усиления и напряжение пробоя при различных температурах
- Проверить однородность каналов матрицы
- Определить температурную зависимость характеристик матрицы

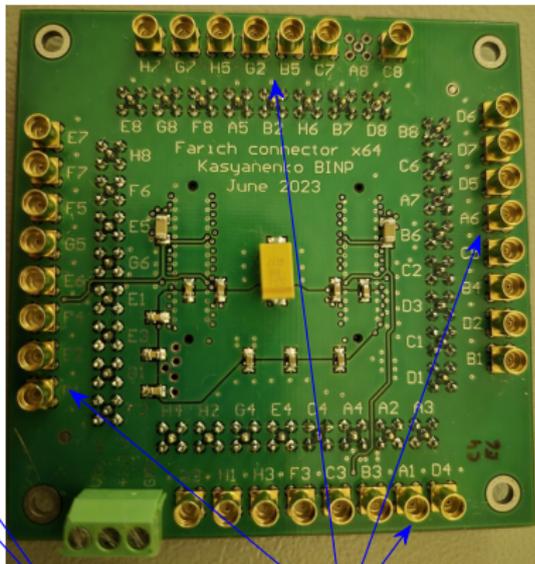
Плата усилителей

Лицевая сторона платы



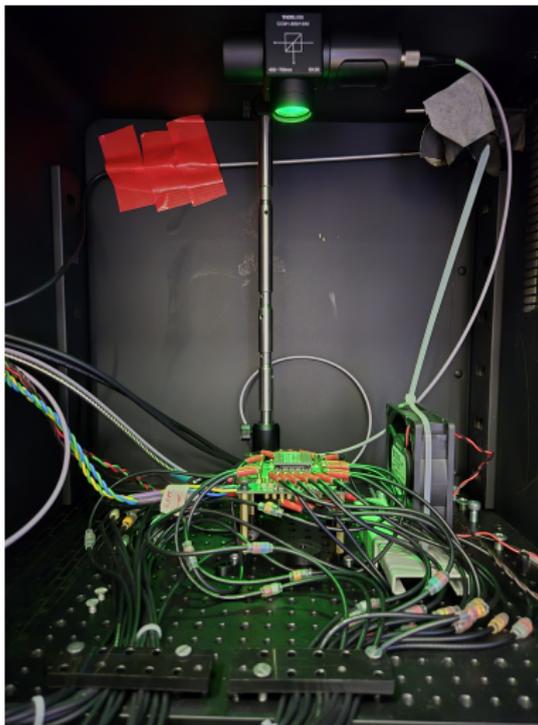
разъемы для подключения КФУ

Оборотная сторона платы



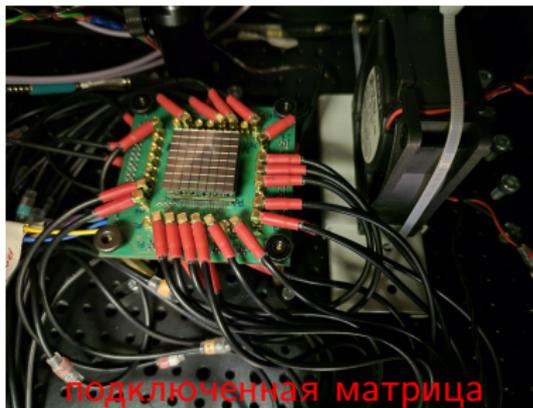
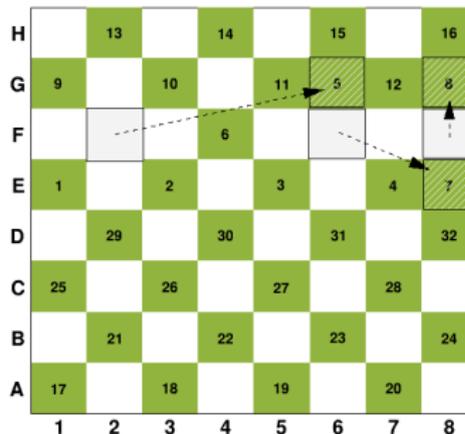
разъемы для снятия сигнала

Внешний вид установки



плата в термокамере

Map of connected pixels

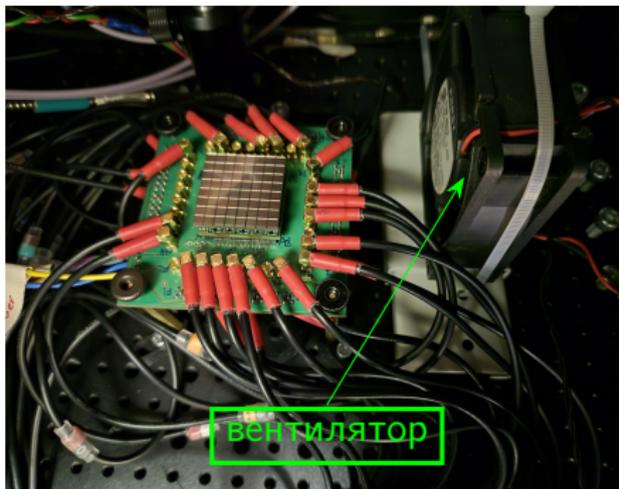


подключенная матрица

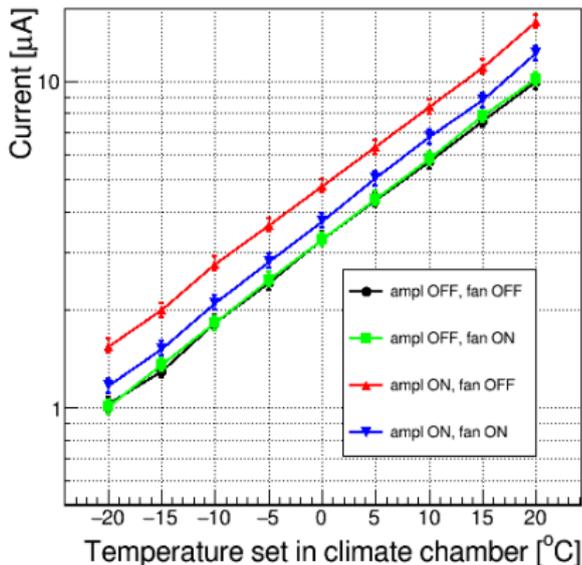
Контроль температуры по темновому току

Усилители для матрицы производят много тепла

Матрица как полупроводниковый термодатчик

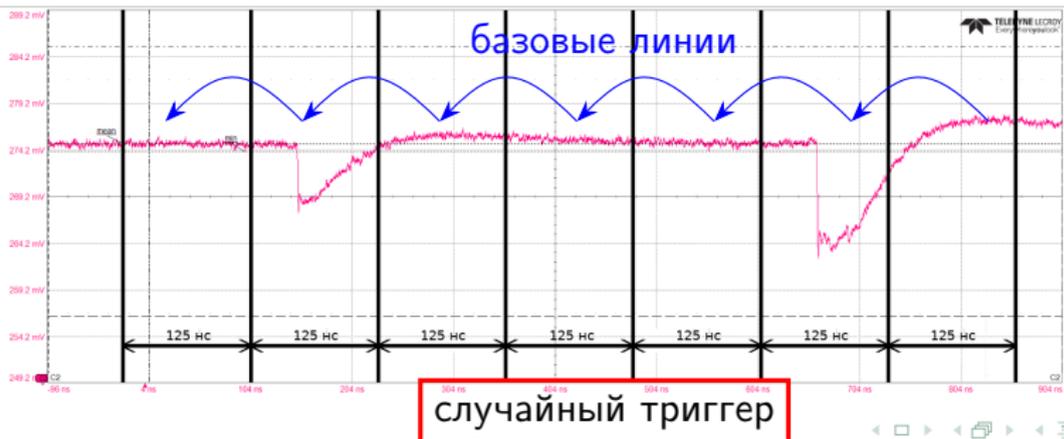
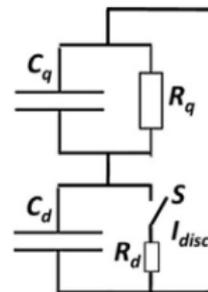


KETEK matrix current at $V_{\text{bias}} = +27 \text{ V}$



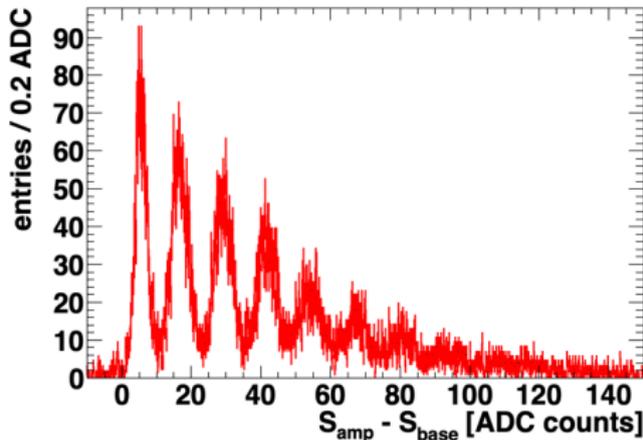
Без отвода тепла температура КФУ поднимается на $\sim 7^{\circ}\text{C}$

Сигнал на осциллографе



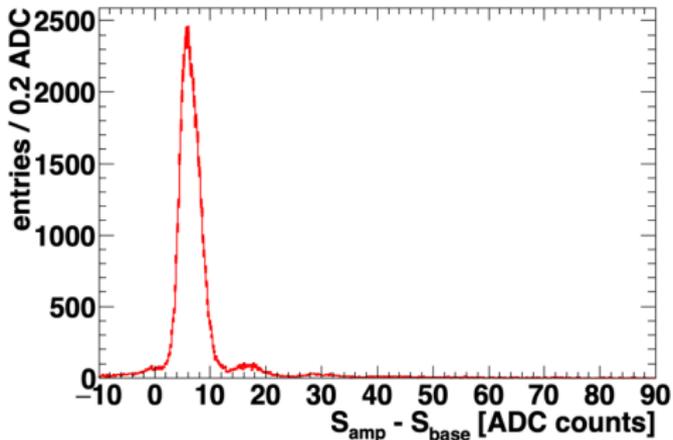
Спектры

Matrix 3, channel F4: $T = 0^{\circ}\text{C}$, $V_{\text{bias}} = 30.0\text{ V}$, synchron. mode



триггер от лазера

Matrix 3, channel F4: $T = 0^{\circ}\text{C}$, $V_{\text{bias}} = 30.0\text{ V}$, asynch. mode



случайный триггер

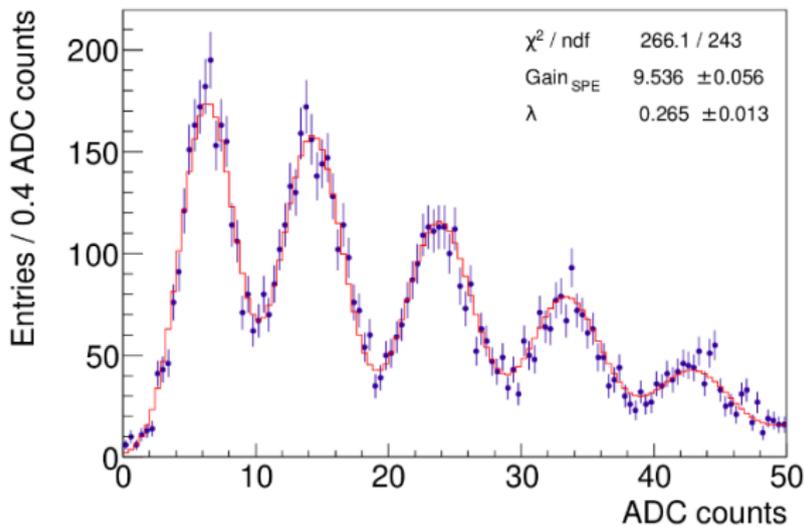
Пьедестал (базовая линия) пособытийно вычтен

Калибровка

$$f(x) = P_\mu(0) \cdot f_p(x|x_0) + P_\mu(1) \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} dy f_p(y|x_1) \mathcal{N}(x - y|x_1, \sigma) +$$

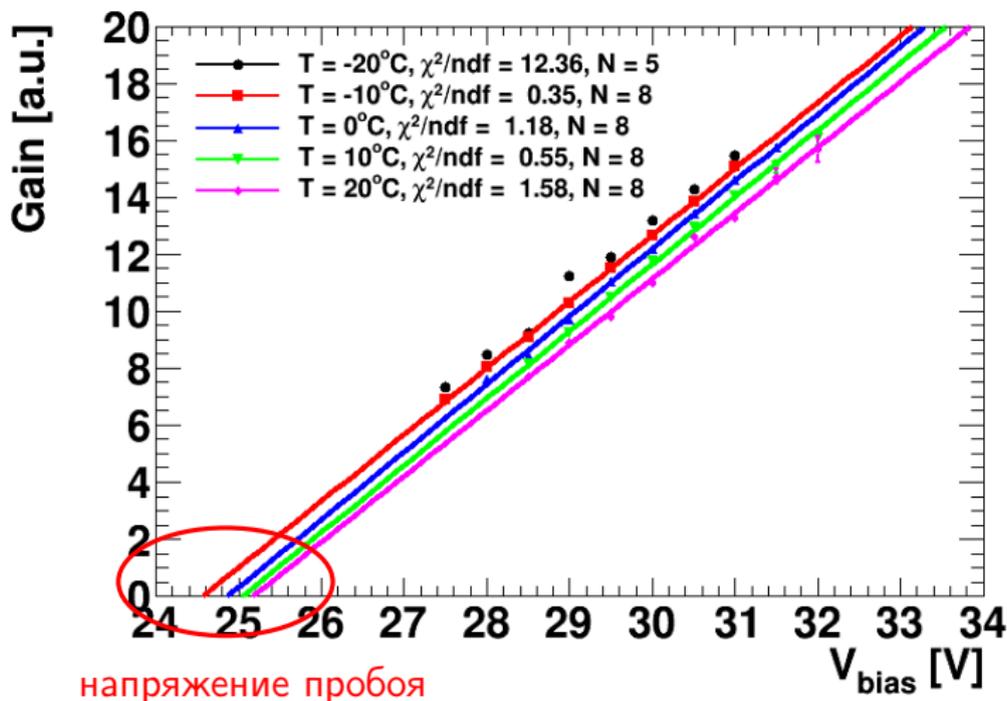
$$+ \sum_{n=2} [(n-1) \cdot \lambda \cdot P_\mu(n-1) + (1 - n \cdot \lambda) \cdot P_\mu(n)] \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} dy f_p(y|x_n) \mathcal{N}(x - y|x_n, \sqrt{n}\sigma)$$

$$x_1 = x_0 + G_{\text{SPE}}; \quad x_n = x_1 + n \cdot G, \quad n > 1$$



Определение напряжения пробы

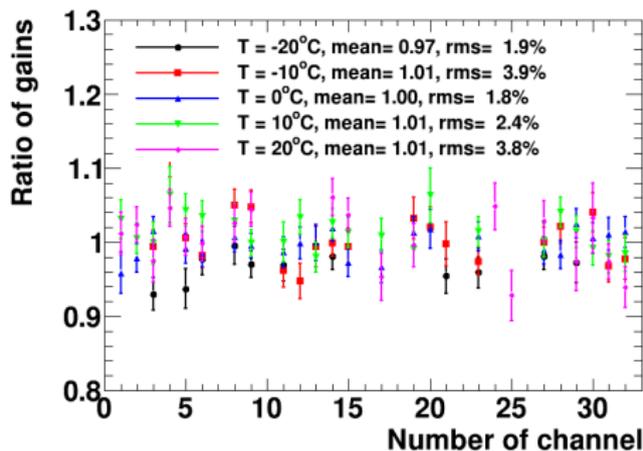
Matrix 3, run 1, channel 15 (H6), $\delta_{\text{slope}} = 1.0\%$



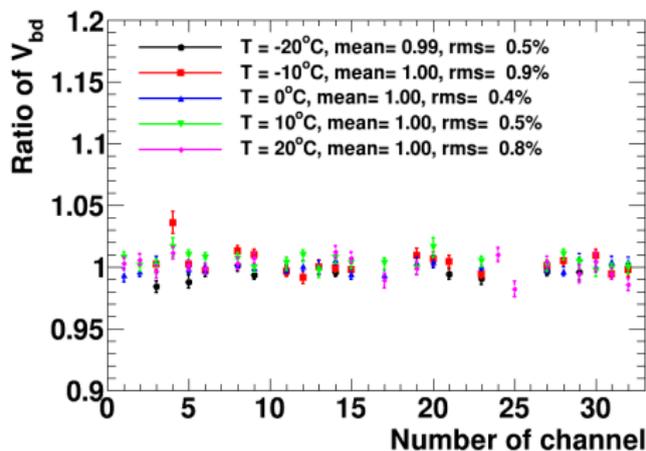
Однородность КФУ по матрице

Измерения проведены трижды для определения воспроизводимости

Ratio: $(m1,r2)/(m1,r1)$ at $V_{ov} = 5.0$ V



Ratio: $(m1,r2)/(m1,r1)$

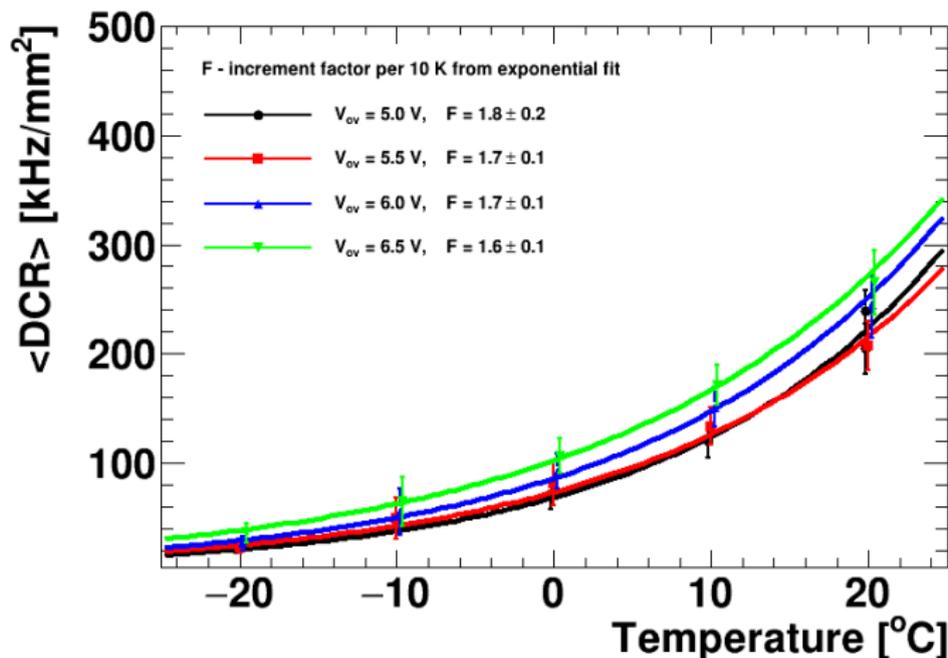


Отношение коэффициентов усиления при фиксированном значении перенапряжения

Отношение напряжений пробоя

Темновой счет как функция температуры

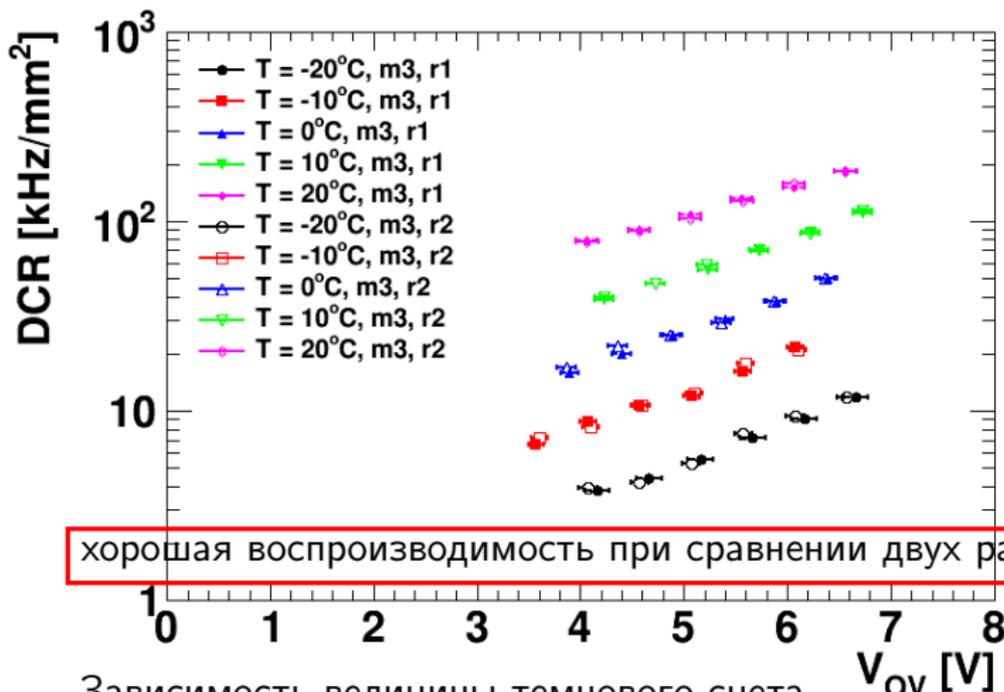
Matrix 3, run 3



Зависимость величины темнового счета от температуры при различных значениях перенапряжения

Темновой счет как функция перенапряжения

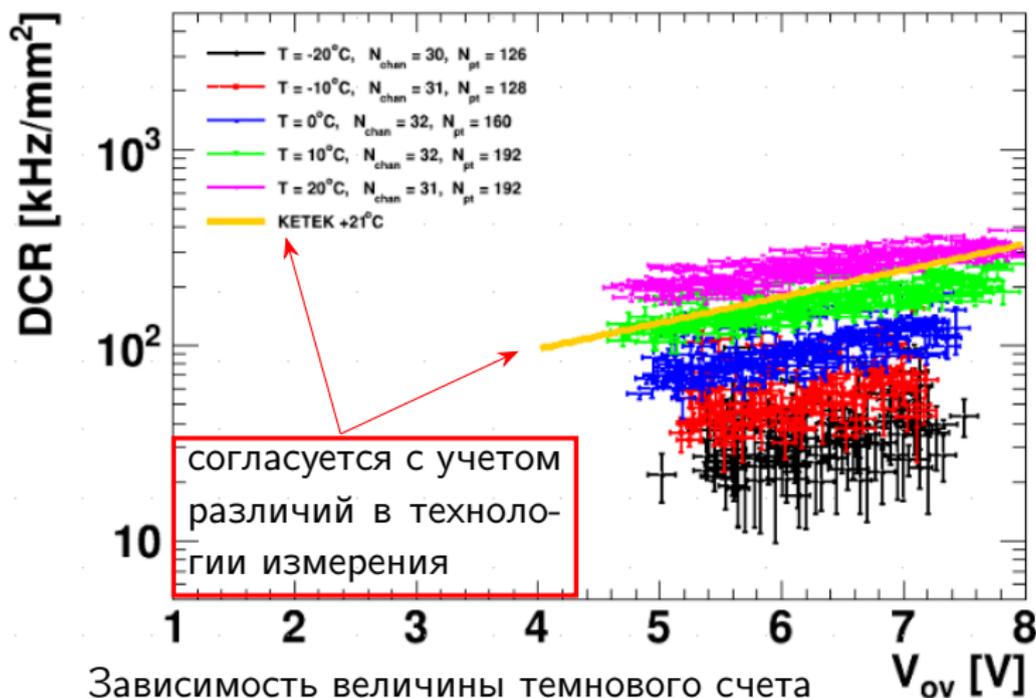
Channel 18 (A5)



Зависимость величины темнового счета от перенапряжения при различных значениях температуры.

Темновой счет как функция перенапряжения (2)

Matrix 3, run 3



Зависимость величины темнового счета от перенапряжения при различных значениях температуры.

Корректировка напряжения пробоя

Разброс напряжений пробоя δ_{Vbd} , коэффициентов усиления δ_G и необходимый диапазон регулировки напряжения питания Δ для выравнивания коэффициентов усиления КФУ.

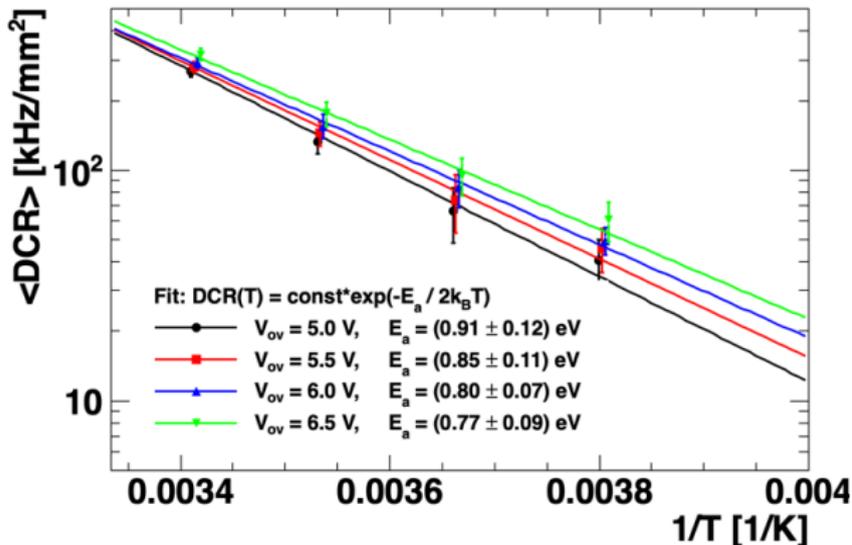
Оценки получены для перенапряжения 5 В.

Т	Матрица 1			Матрица 2			Матрица 3		
	δ_{Vbd}	δ_G	Δ	δ_{Vbd}	δ_G	Δ	δ_{Vbd}	δ_G	Δ
-20°С	0.8%	10%	2.2 В	0.9%	10%	2.1 В	0.7%	10%	1.7 В
-10°С	0.8%	9%	2.0 В	0.7%	10%	1.9 В	0.7%	9%	1.6 В
0°С	0.7%	9%	1.9 В	0.8%	10%	1.8 В	0.7%	9%	1.4 В
+10°С	0.8%	9%	1.8 В	0.8%	9%	1.8 В	0.7%	9%	1.3 В
+20°С	0.7%	8%	1.6 В	0.8%	9%	1.6 В	0.7%	9%	1.3 В

Вариации напряжения питания матриц для компенсации разброса усиления надо отсчитывать от перенапряжения. *Например 2.2 В при перенапряжении 5В дает диапазон изменения усиления более 40%.*

Проверка: измерение энергии активации

Matrix 2



$$\text{DRC}(T) = C \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{2k_B T}\right); \quad E_a \approx 0.8 \text{ эВ}$$

Выводы

- Разработана методика и проведено детальное исследование температурной зависимости параметров матриц КФУ производства КЕТЕК.
- Дана оценка разброса параметров КФУ по матрице и между матрицами.
- Оценен необходимый диапазон подстройки индивидуального напряжения питания КФУ для выравнивания параметров.
- Очевидна необходимость охлаждения матриц SiPM в реальном детекторе

