



Изучение радиационной стойкости усилителей на  
основе GaN транзисторов к гамма-излучению при  
создании сцинтилляционных детекторов в  
экспериментах по регистрации редких мюонных  
распадов

*Атанов Н.В., Баранов В.Ю., Васильев И.И., Давыдов Ю.И., Москаленко В. Д.*

# Введение

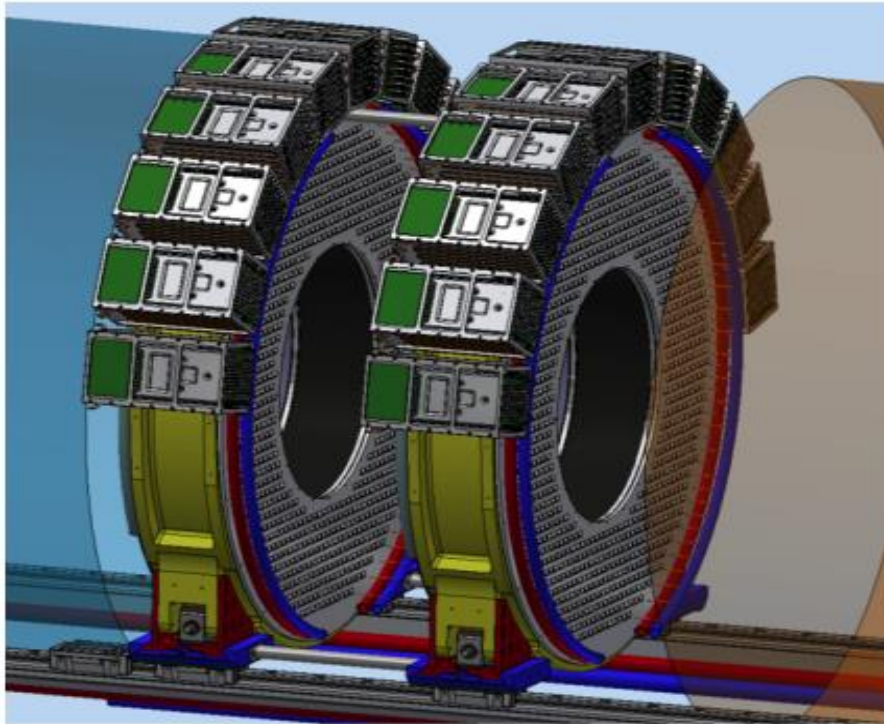


Рисунок 1 – ЭМ калориметр эксперимента Mu2e<sup>[1]</sup>

Correlation of mean measured displacement threshold  $E_d$  with reciprocal lattice constant  $1/A_0$

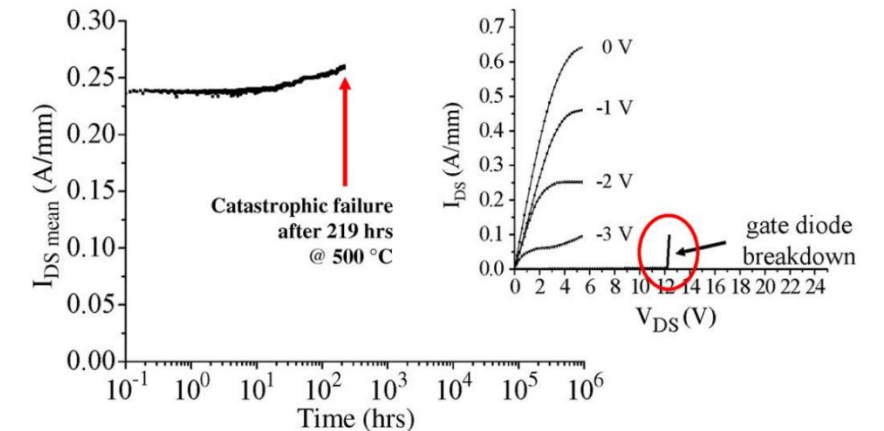
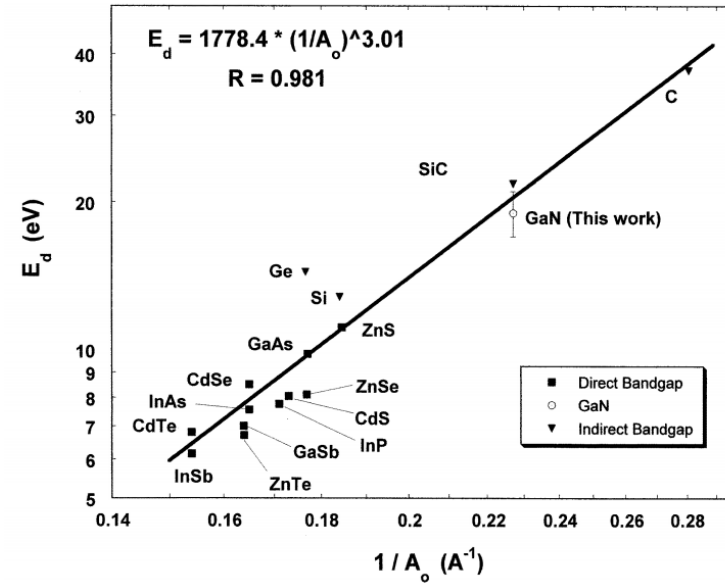


Рисунок 2 – Пороговая энергия смещения атомов для GaN и цикл отказа транзистора AlGaN/GaN при температуре эксплуатации от 300 до 500 °C<sup>[2]</sup>

[1] M. Angelucci et al. "The MU2E experiment at Fermilab," 2015, URL: <https://library.lnf.infn.it/rapporto-dattivita-2015/>

[2] D. Maier et al., "Testing the Temperature Limits of GaN-Based HEMT Devices," in IEEE Transactions on Device and Materials Reliability, vol. 10, no. 4, pp. 427-436, Dec. 2010, doi:10.1109/TDMR.2010.2072507

# Схема установки для облучения гамма-квантами MRCFG-25 (ИРП, Азербайджан)

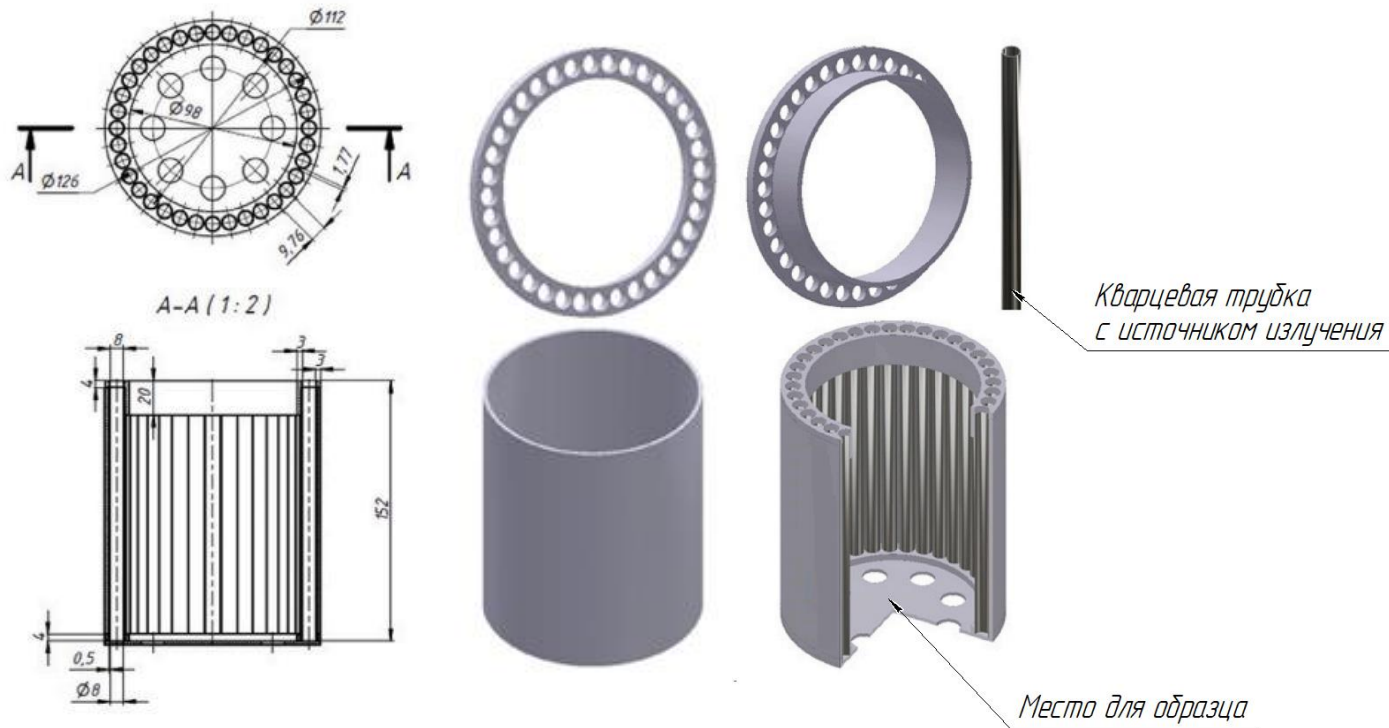


Рисунок 3 – Схематическое изображение расположения источника гамма-излучения  $^{60}\text{Co}$  в установке “Modern Radiation Chemical Facility Gamma-25”<sup>[3]</sup>

- Камера цилиндрической формы из нержавеющей стали  $H = 152$  мм, внешним  $D = 126$  мм, внутренним  $D = 98$  мм.
- Всего 36 цилиндров  $L = 148$  мм и  $D = 8$  мм, из них 9 содержат источник гамма-излучения –  $^{60}\text{Co}$ .
- Образец располагался на высоте 45 мм от уровня источника  $^{60}\text{Co}$ .
- В зависимости от целей эксперимента материалы могут располагаться внутри камеры на высоте от 0 до 142 мм.

# Поглощенная доза гамма-излучения $^{60}\text{Co}$

- Эталонный образец аланин  $\text{C}_3\text{H}_7\text{NO}_2$  с плотностью 1,42 г/см<sup>3</sup>
- При слабом источнике – 0,00212 Гр/с – 0,212 рад/с
- При сильном источнике – 1,28 Гр/с – 128 рад/с

Таблица 1 – Расчет поглощенной в веществе транзистора GaN дозы гамма-излучения

Номер образца	Время облучения, мин	Расчётная поглощенная доза, Мрад
1	30	0,23
2	155	1,19
3	264	2,03
4	391	3,00

# Схема измерения переходных и выходных характеристик транзистора

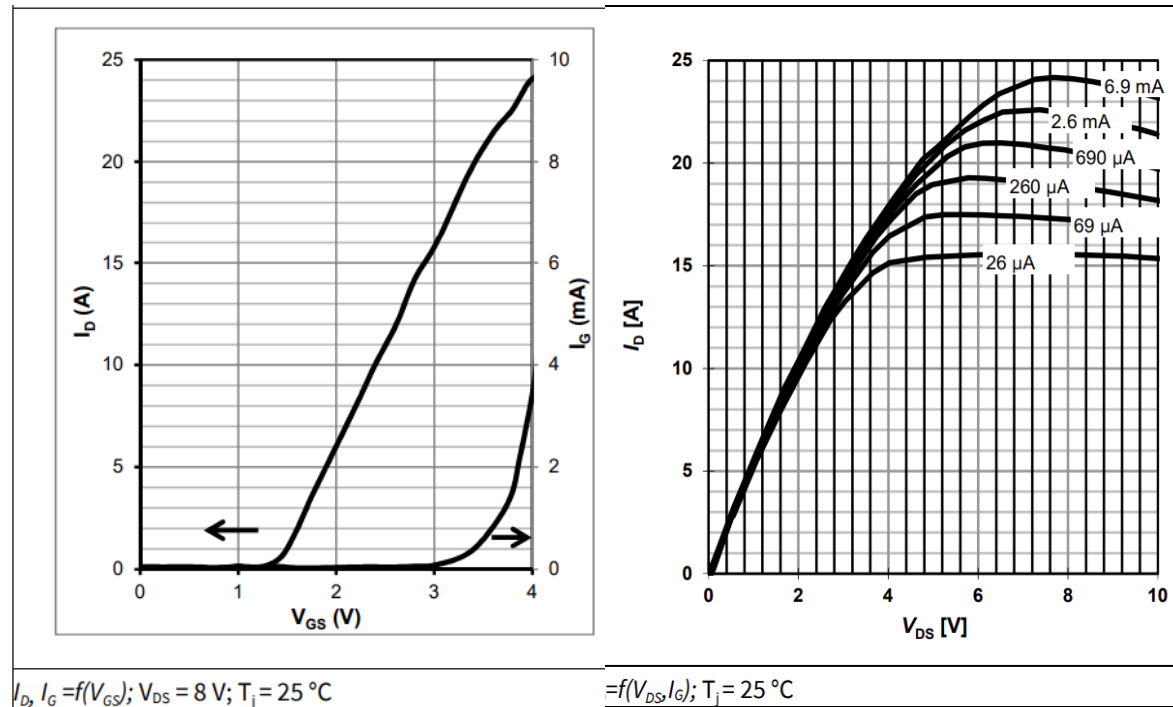
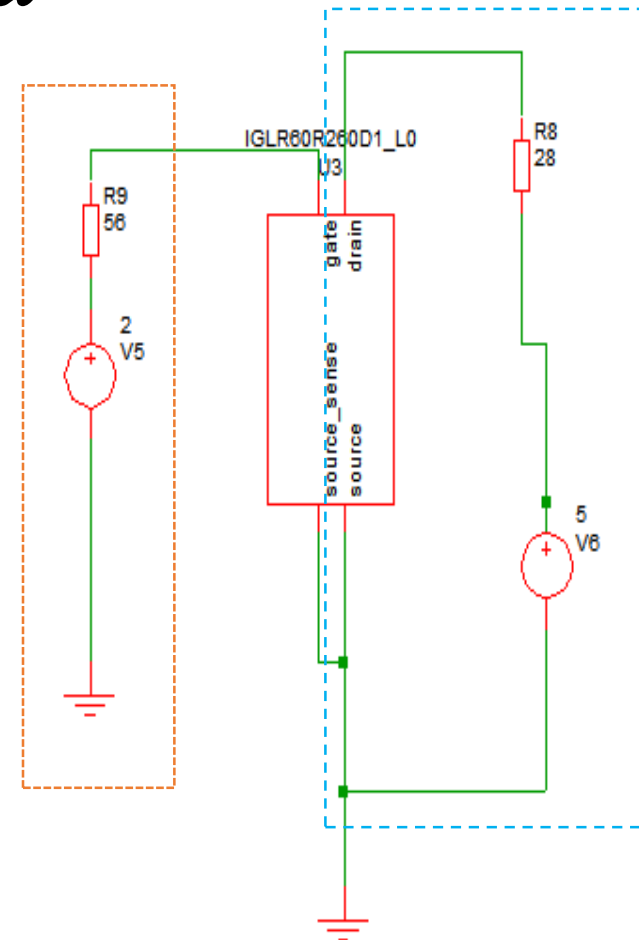


Рисунок 4 – Переходная и выходная характеристики транзистора IGLR60R260D1<sup>[4]</sup>



1. Переходная характеристика:  
 $I_{ds} = f(V_{gs}), V_{ds} = 5 \text{ V}$
2. Выходные характеристики:  
 $I_{ds} = f(V_{ds}, V_{gs})$

Рисунок 5 – Схема для снятия переходных и выходных характеристик транзистора IGLR60R260D1

# Переходные и выходные характеристики транзистора IGLR60R260D1

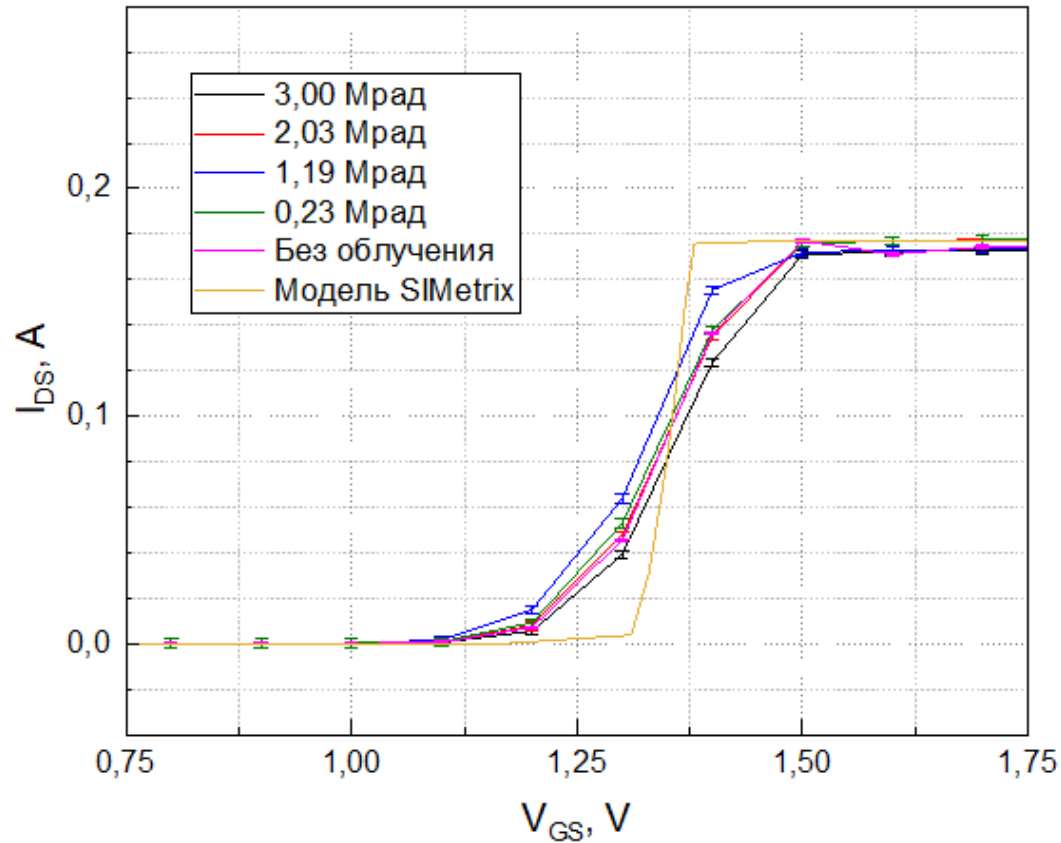


Рисунок 6 –Переходные характеристики транзистора IGLR60R260D1,  $V_{\text{сток-исток}} = 5$  В

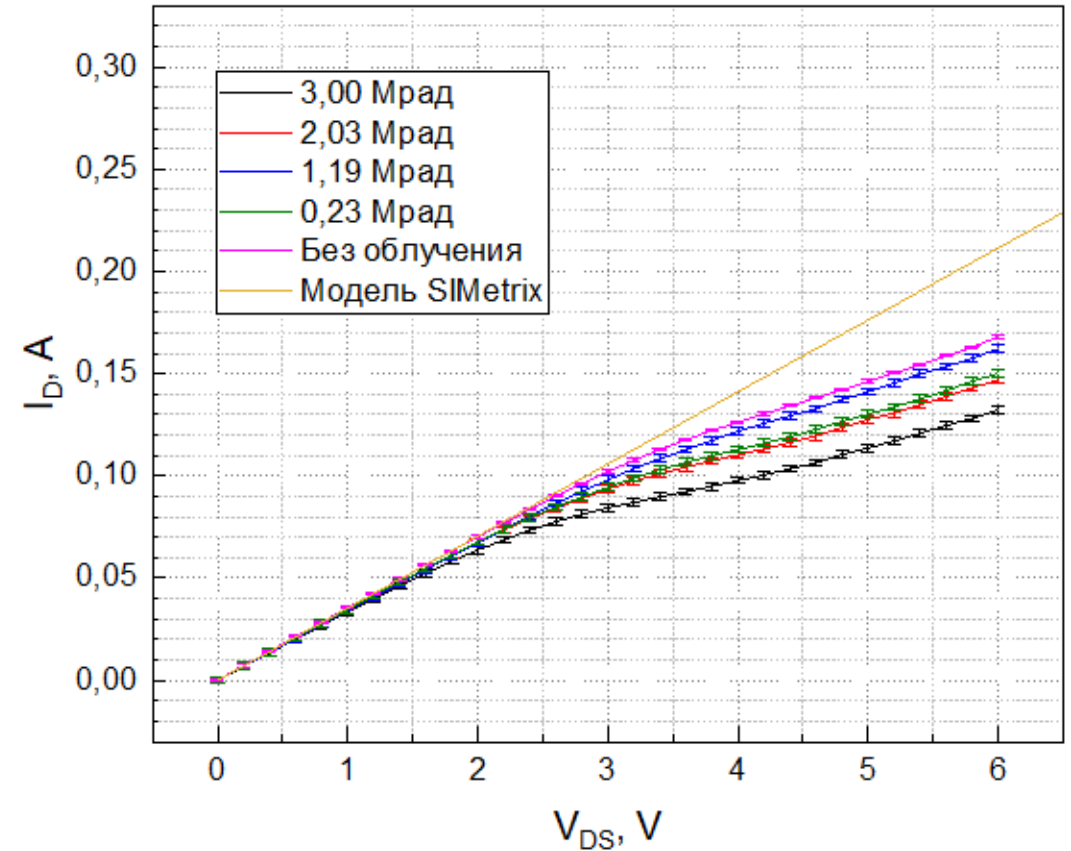


Рисунок 7 –Выходные характеристики транзистора IGLR60R260D1,  $V_{\text{затвор-исток}} = 1,4$  В

# Разработка усилителя для ячейки калориметра с SiPM. Измерение энергии космических мюонов

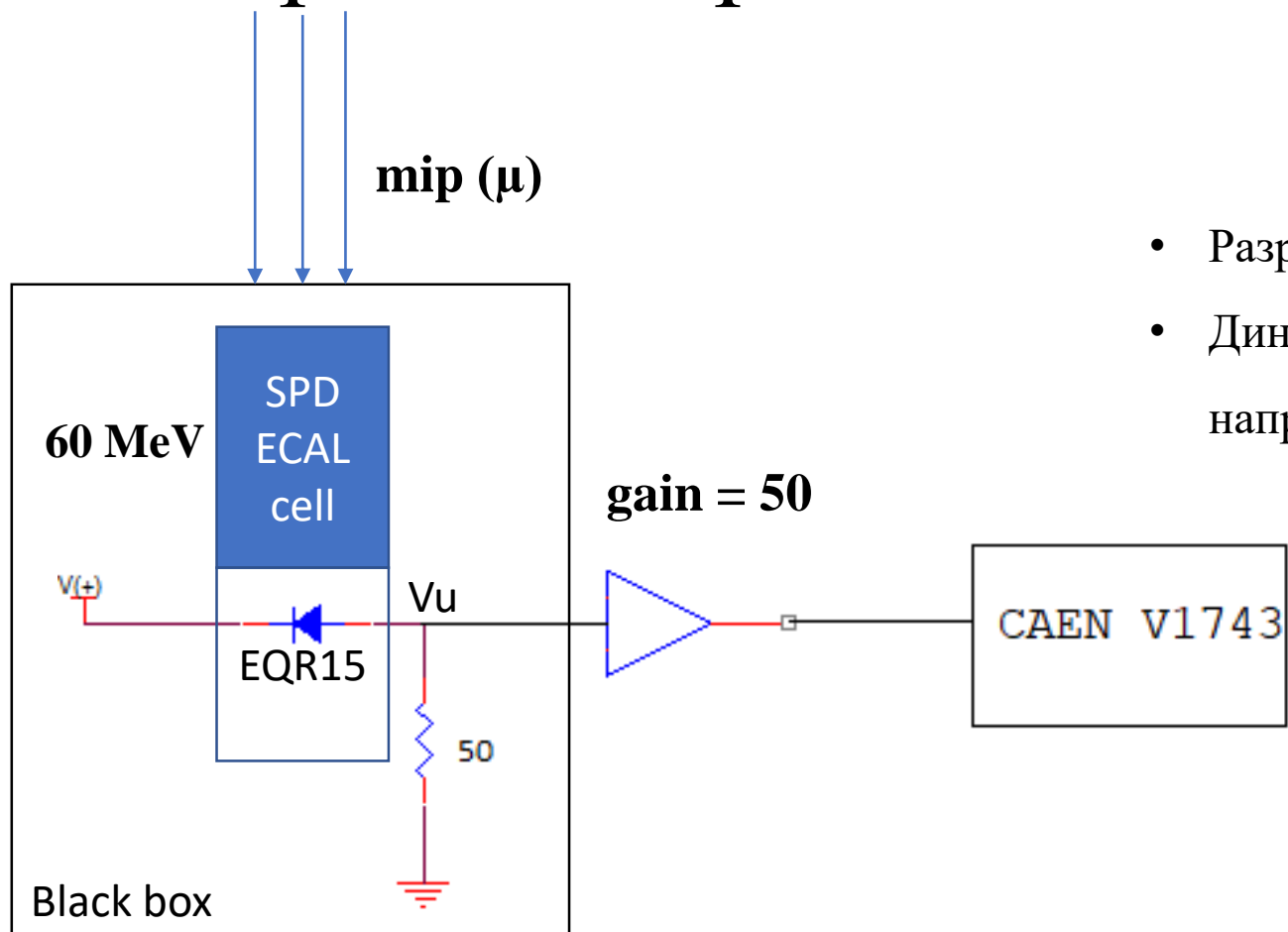


Рисунок 8 – Схема ячейки калориметра SPD

- Разрядность 12 бит
- Динамический диапазон входного напряжения 2,5 В



Рисунок 9 – Характеристики дигитайзера CAEN v.1743<sup>[5]</sup>

[5] CAEN V1743 16 Channel 12bit 3.2 GS/s Switched Capacitor Digitizer URL: <https://www.caen.it/products/v1743/>

# Схемотехническое решение для усилителя на дискретных элементах. Моделирование.

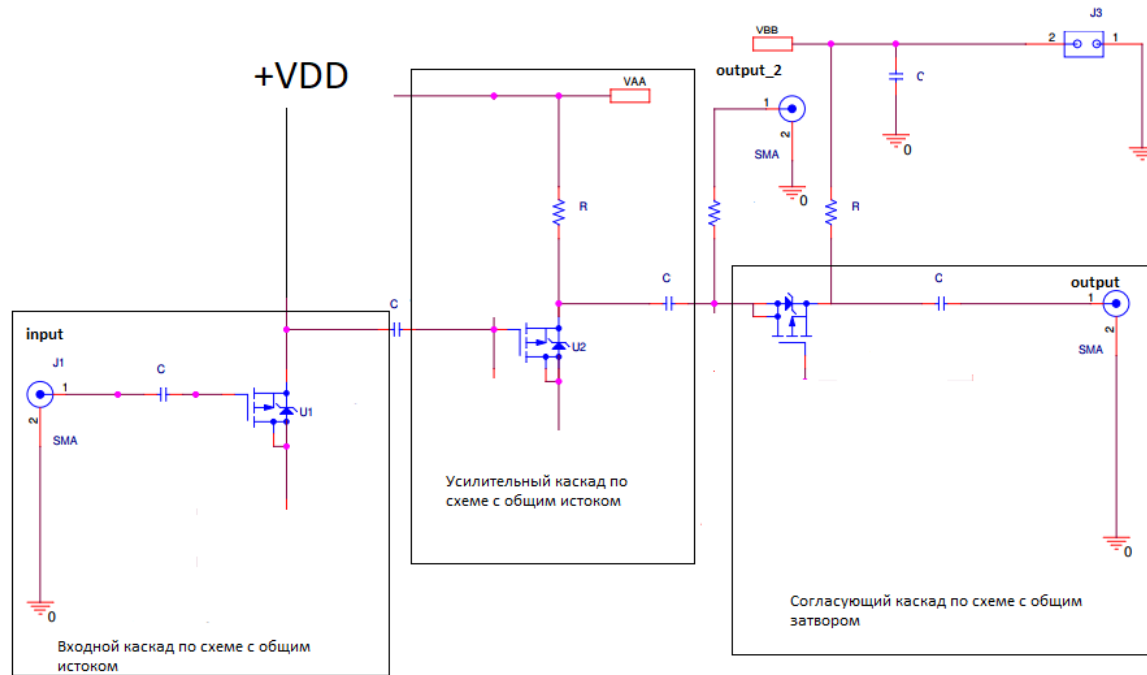


Рисунок 10 – Схема для усилителя на дискретных транзисторах GaN

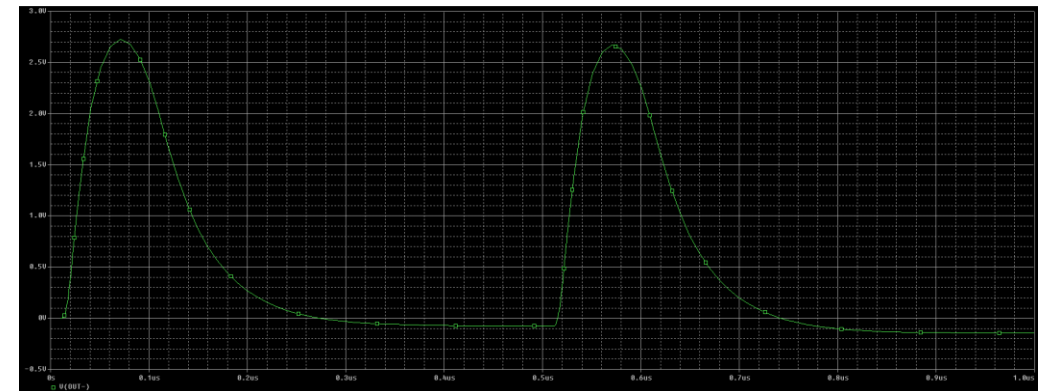
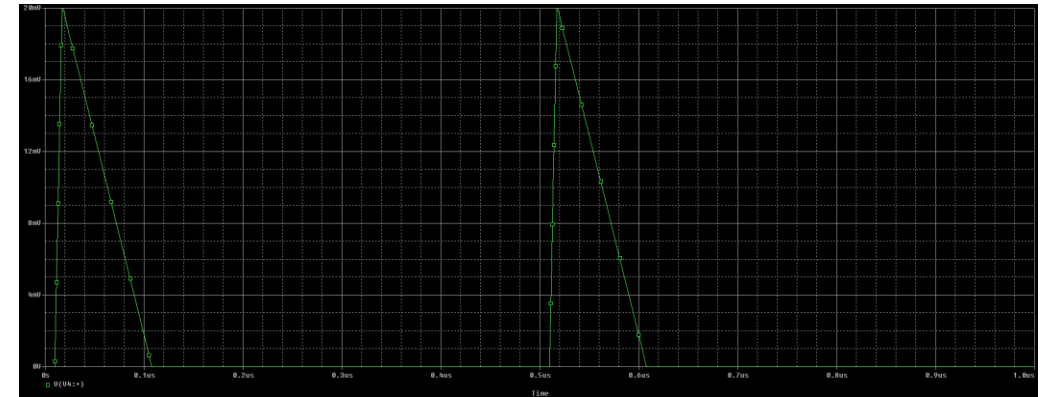


Рисунок 11 – Сигнал на входе и выходе усилителя. Напряжение на входе 20 мВ, напряжение на выходе 2,5 В



# Изготовление усилителя

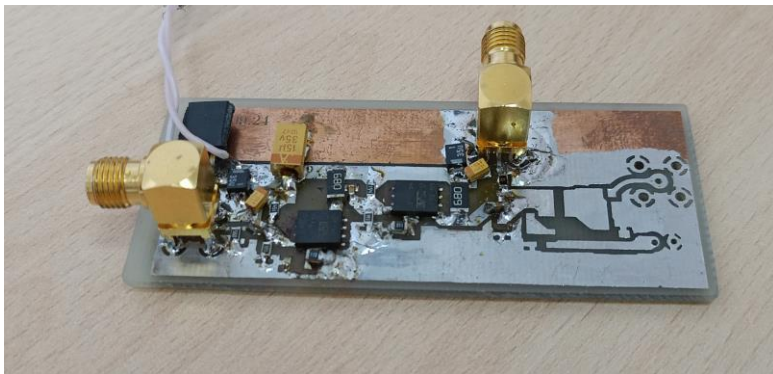
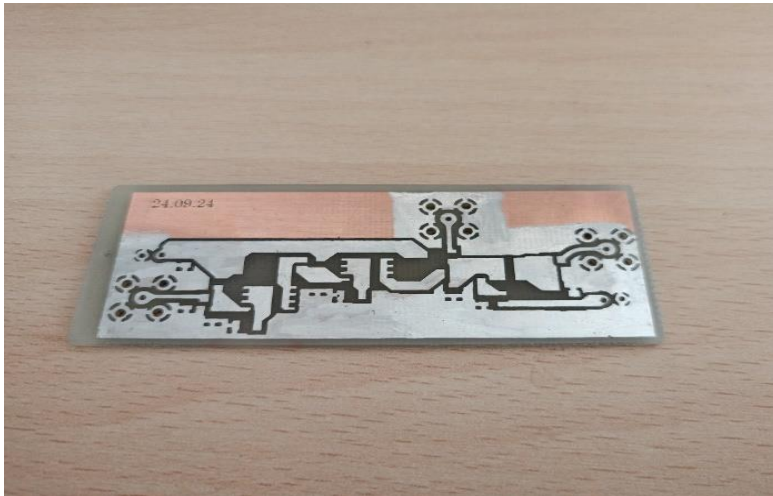


Рисунок 12 – Печатная плата для усилителя, сборка

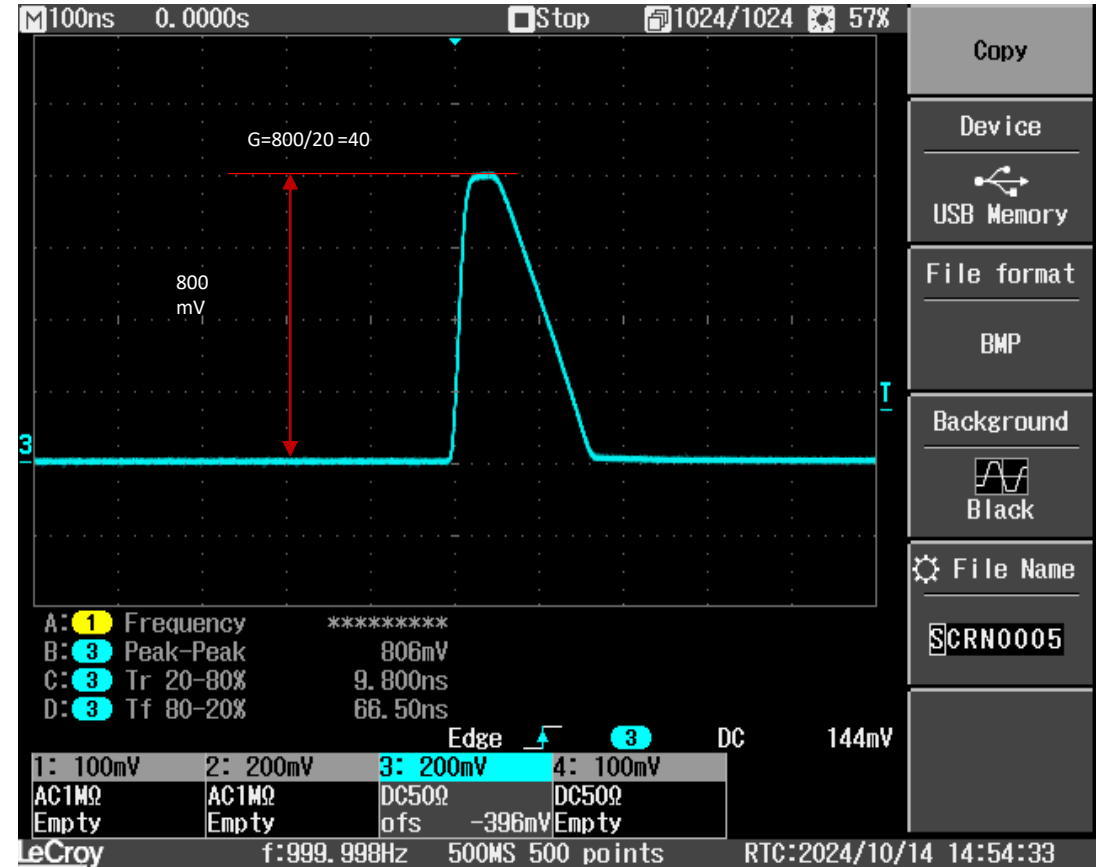


Рисунок 13 – Сигнал на выходе усилителя. Напряжение на входе 20 мВ, напряжение на выходе 800 мВ

# Сравнение АЧХ и ФЧХ усилителей

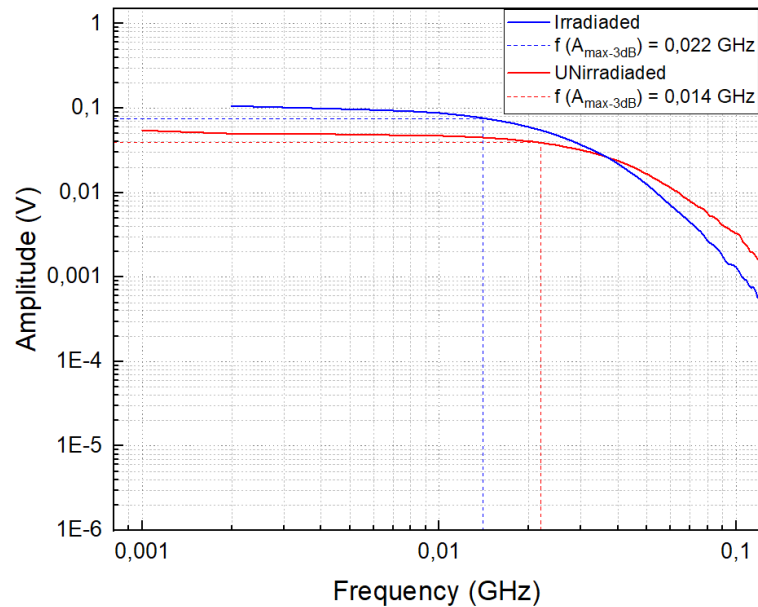


Рисунок 14 – АЧХ усилителей с необлученным и облученными транзисторами

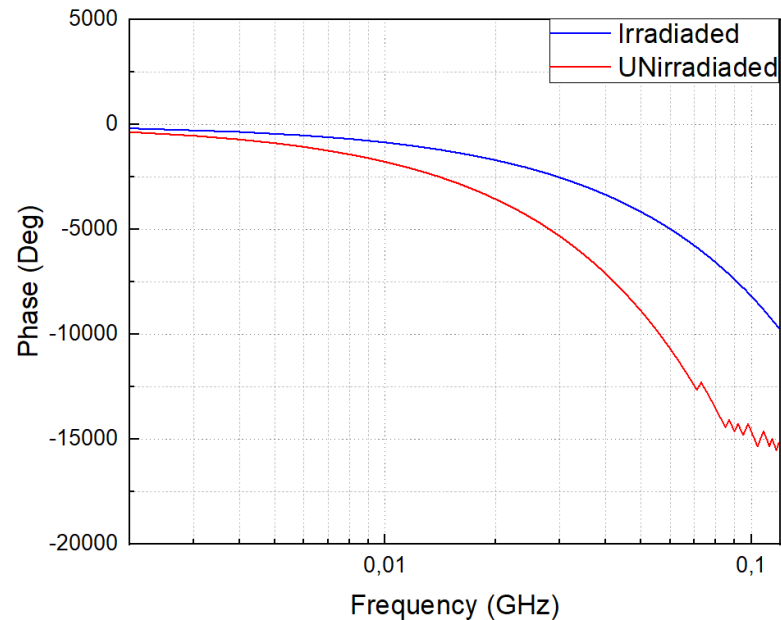


Рисунок 15 – ФЧХ усилителей с необлученным и облученными транзисторами

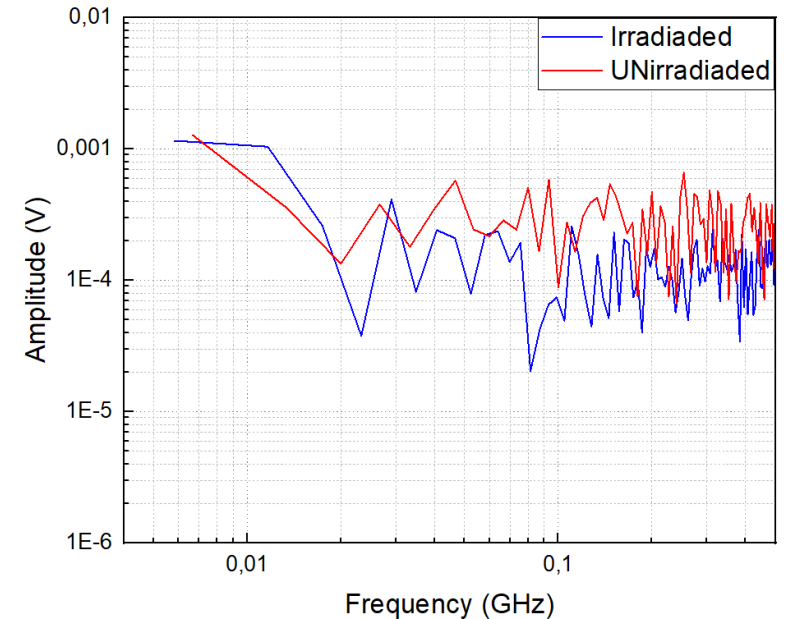


Рисунок 16 – АЧХ шума усилителей с необлученным и облученными транзисторами

Спектральная плотность шума

- Для усилителя с облученными транзисторами:  $5,2 \cdot 10^{-7} \text{ В}/\sqrt{\text{Гц}}$
- Для усилителя с необлученными транзисторами:  $8,5 \cdot 10^{-7} \text{ В}/\sqrt{\text{Гц}}$

# Заключение

- Разработана печатная плата и собран усилитель на основе транзисторов Infineon IGLR60R260D1
- Проведена настройка и измерения коэффициента усиления транзисторов
- Проведены испытания радиационной стойкости транзисторов на установке MRCFG-25 с гамма источником  $^{60}\text{Co}$
- Исследование показало достаточную радиационную стойкость при поглощенной дозе до  $\sim 3$  Мрад

*Это позволяет предложить использовать GaN как перспективный материал для разработки усилителей для современных высокозагруженных детекторов*

## Планы:

- Проведение облучения транзистора со сравнением характеристик одного и того же образца по мере набора дозы
- Изучение структуры AlGaIn/GaN транзисторов на наличие дефектов после радиационного воздействия



Спасибо за внимание