

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

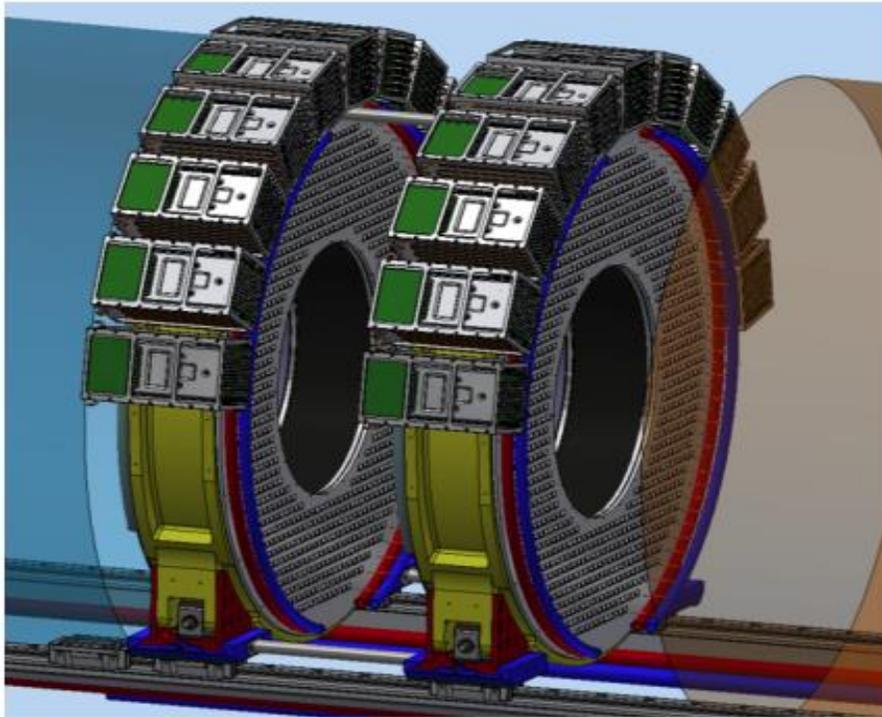


Рисунок 1 – ЭМ калориметр эксперимента Mu2e^[1]

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

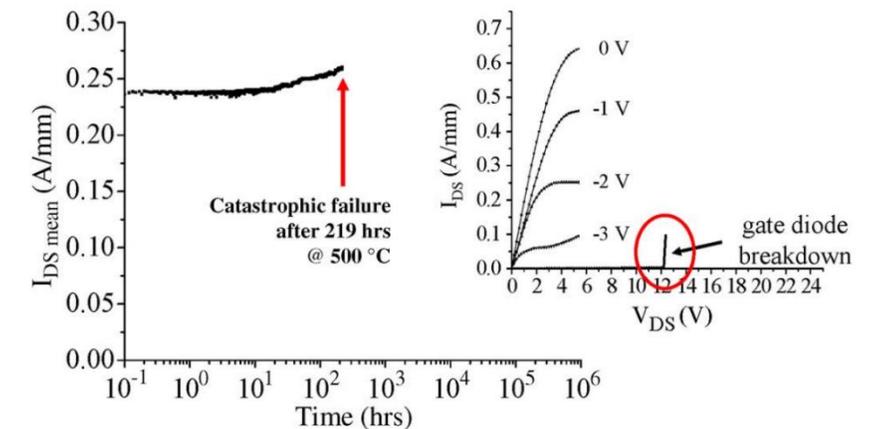
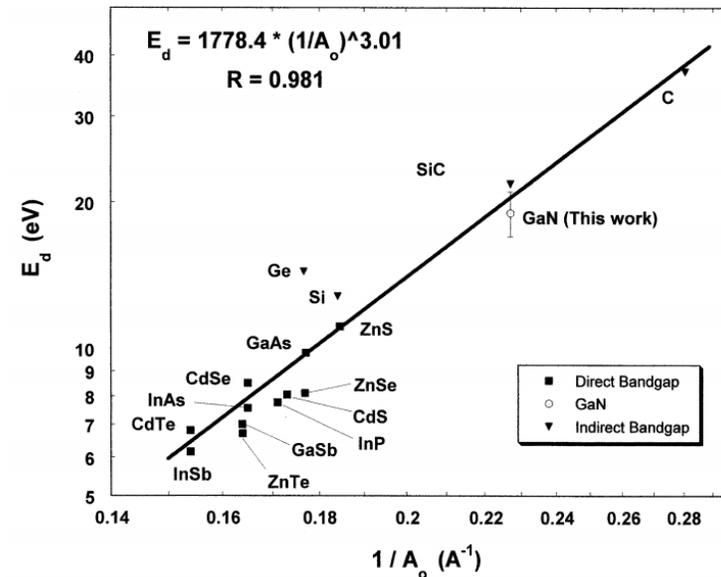


Рисунок 2 – Пороговая энергия смещения атомов для GaN и цикл отказа транзистора AlGaN/GaN при температуре эксплуатации от 300 до 500 °C^[2]

[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)

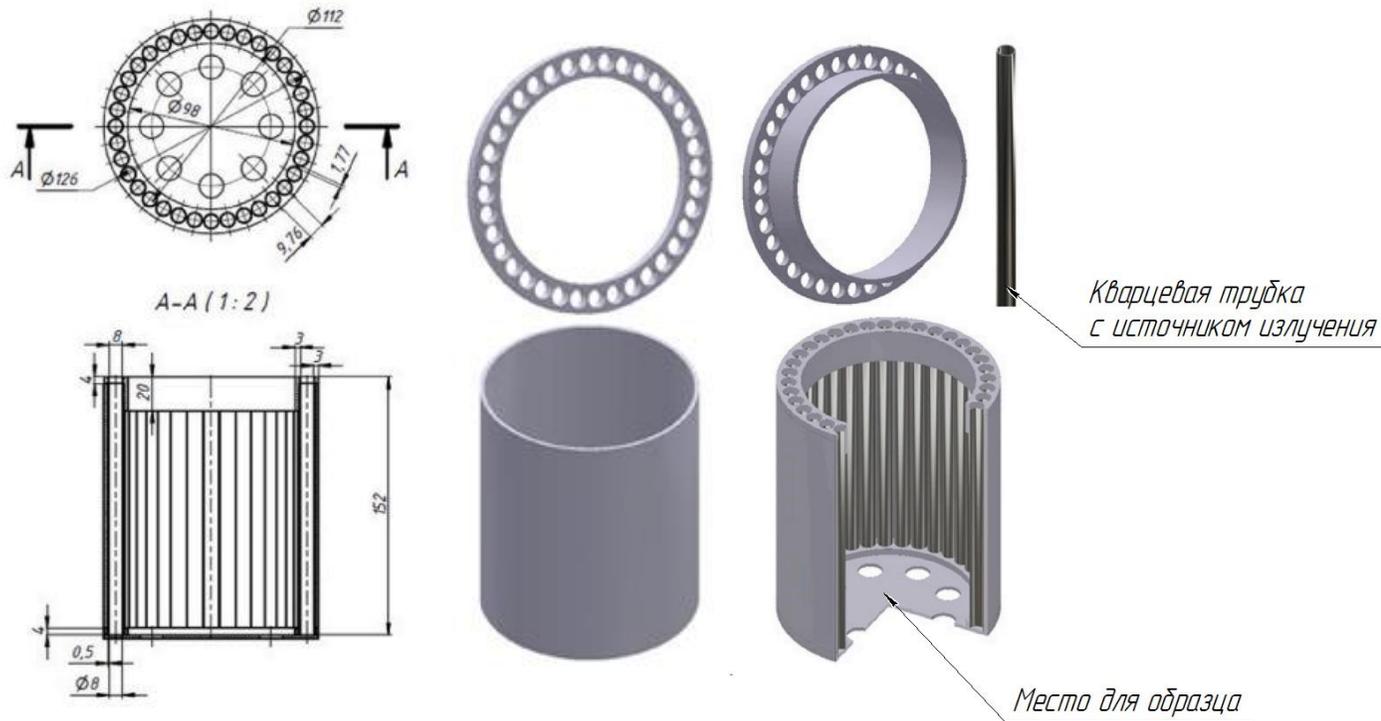


Рисунок 3 – Схематическое изображение расположения источника гамма-излучения ^{60}Co в установке “Modern Radiation Chemical Facility Gamma-25”^[3]

- 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}Co .
- Образец располагался на высоте 45 мм от уровня источника ^{60}Co .
- В зависимости от целей эксперимента материалы могут располагаться внутри камеры на высоте от 0 до 142 мм.

Поглощенная доза гамма-излучения ^{60}Co

- Эталонный образец аланин $\text{C}_3\text{H}_7\text{NO}_2$ с плотностью 1,42 г/см³
- 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

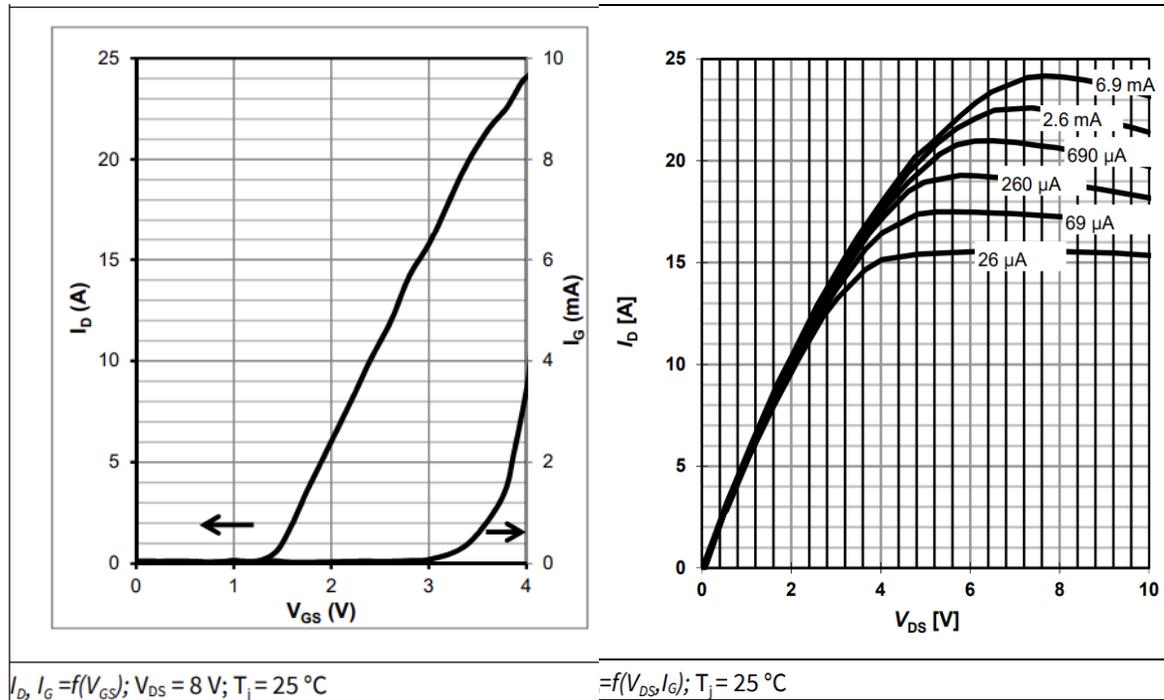
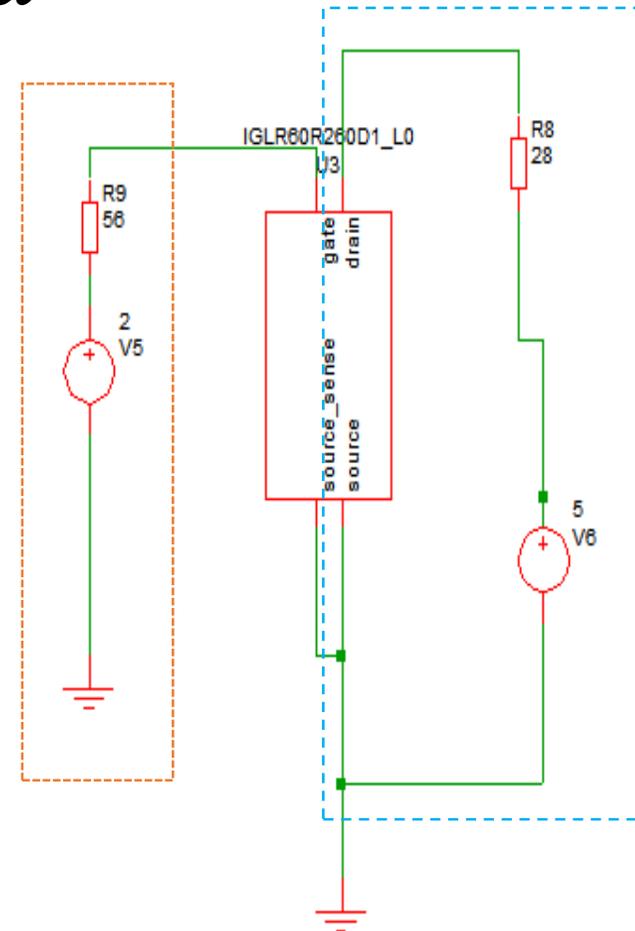


Рисунок 4 – Переходная и выходная характеристики транзистора IGLR60R260D1^[4]



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

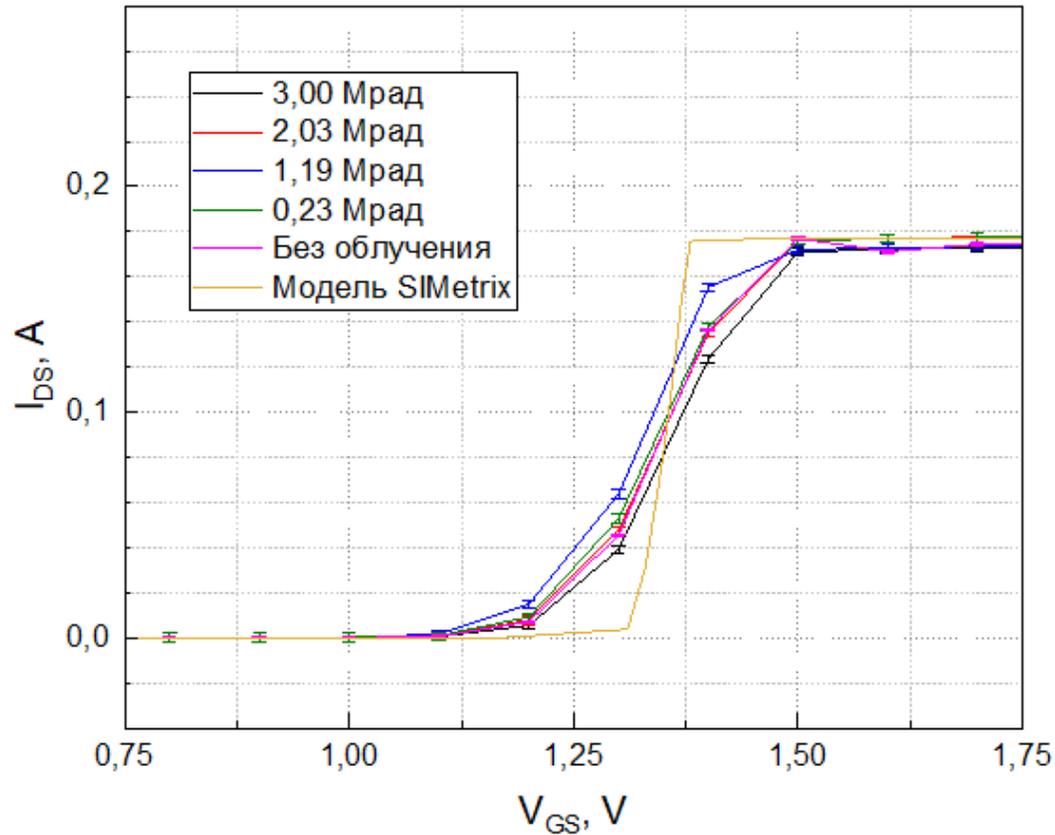


Рисунок 6 –Переходные характеристики транзистора IGLR60R260D1, $V_{\text{сток-исток}} = 5$ В

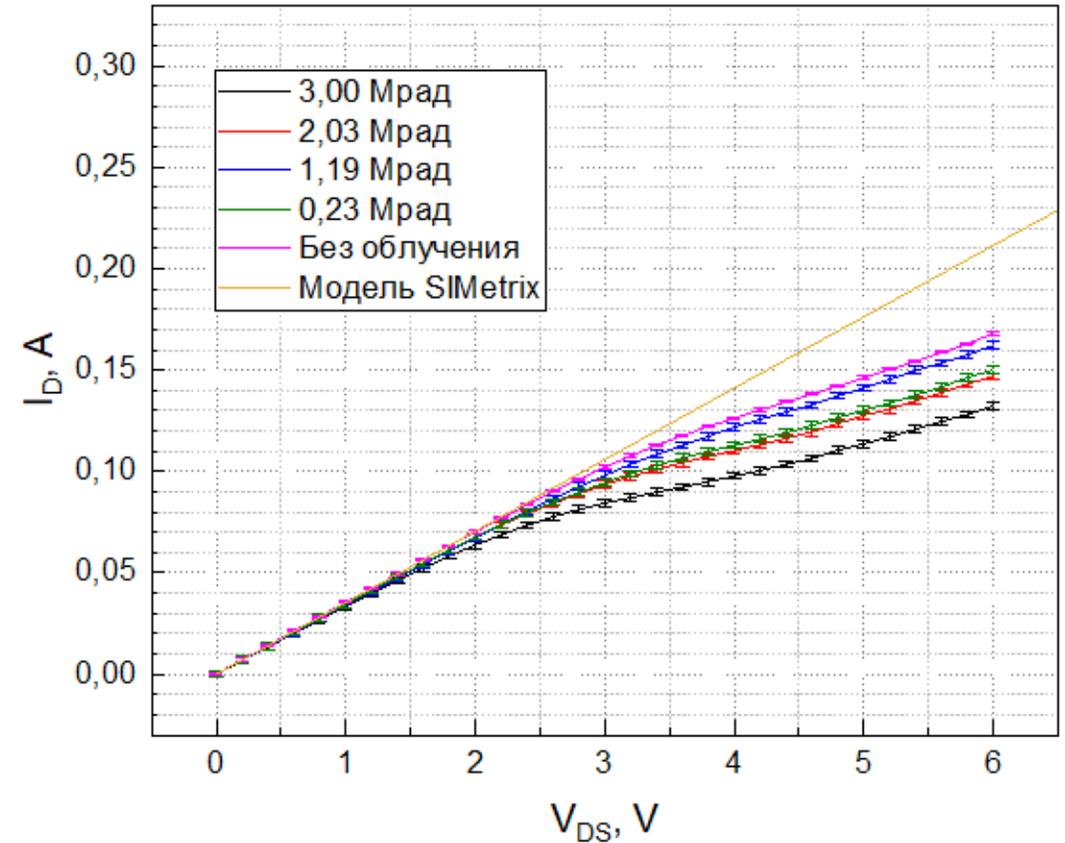


Рисунок 7 –Выходные характеристики транзистора IGLR60R260D1, $V_{\text{затвор-исток}} = 1,4$ В

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

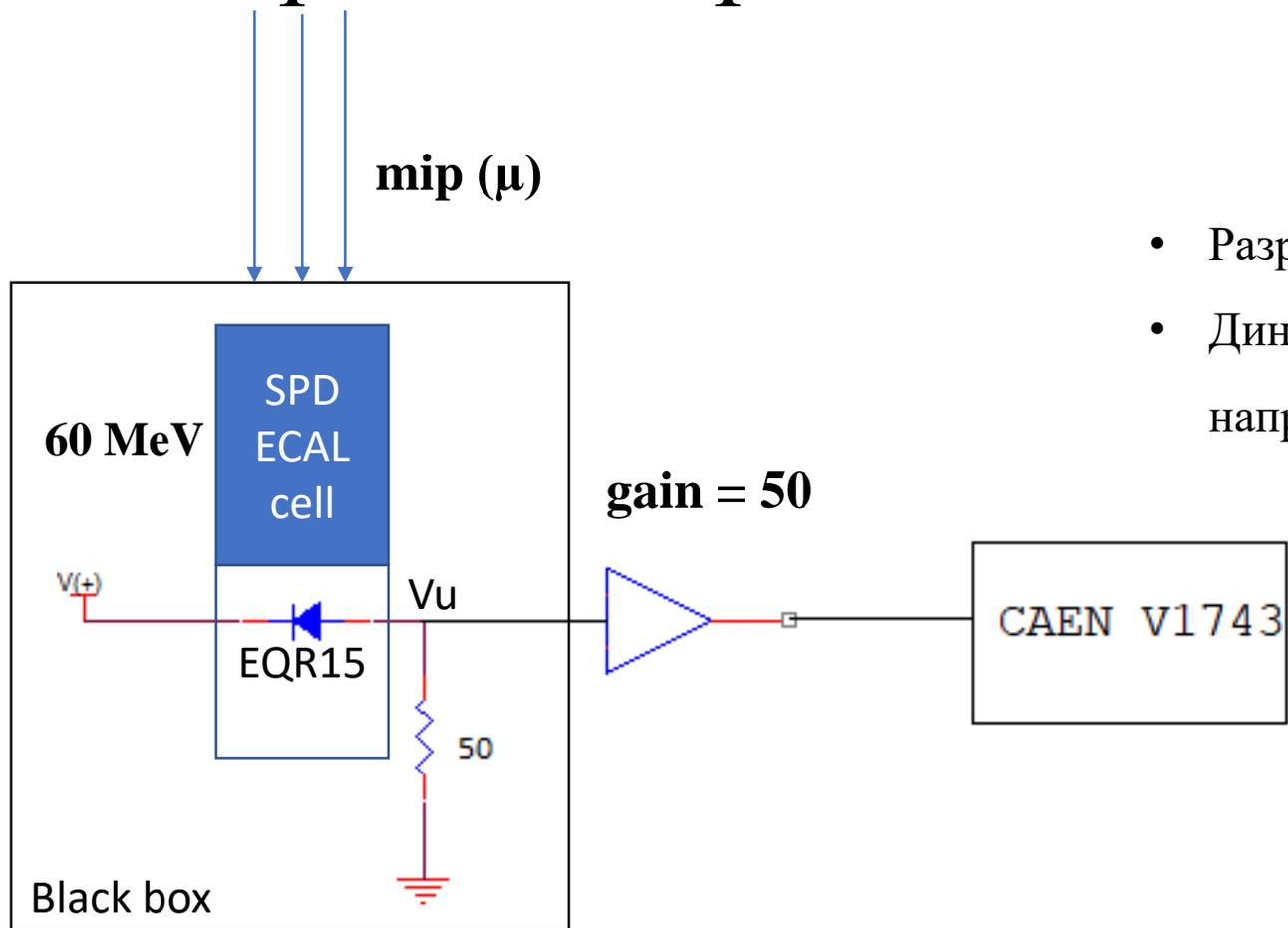


Рисунок 8 – Схема ячейки калориметра SPD

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



Рисунок 9 – Характеристики дигитайзера CAEN v.1743^[5]

[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.

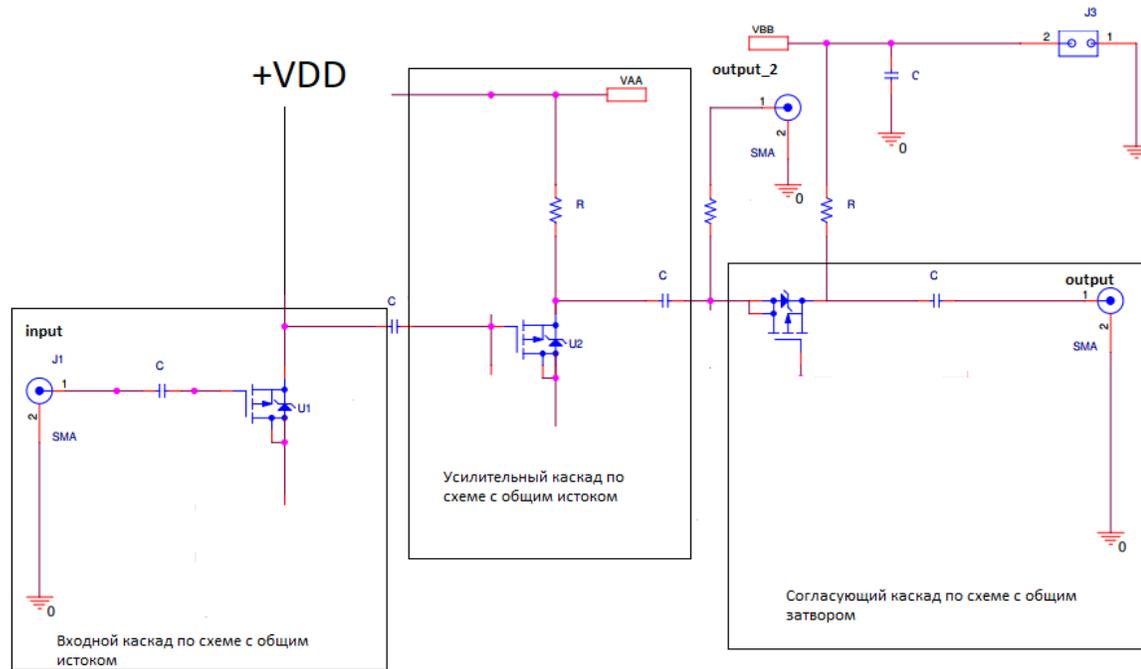


Рисунок 10 – Схема для усилителя на дискретных транзисторах GaN

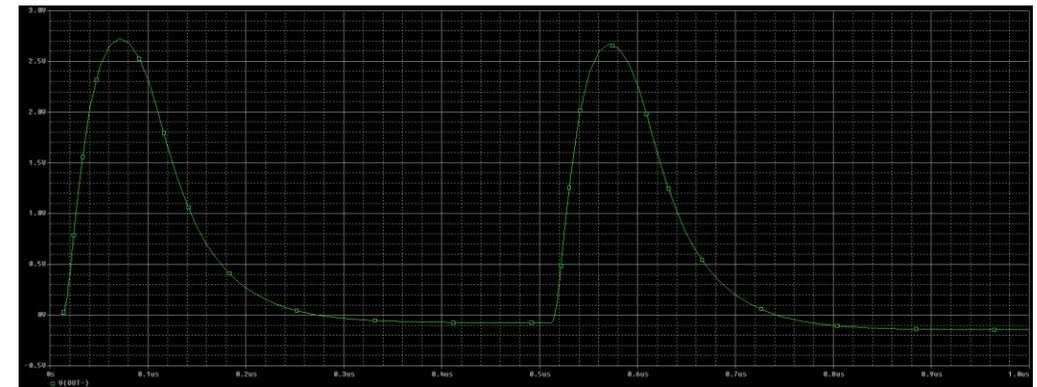
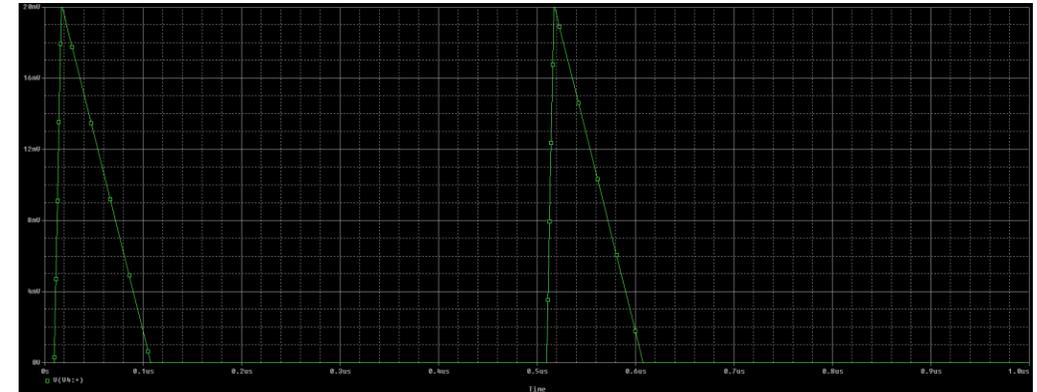


Рисунок 11 – Сигнал на входе и выходе усилителя. Напряжение на входе 20 мВ, напряжение на выходе 2,5 В

Изготовление усилителя

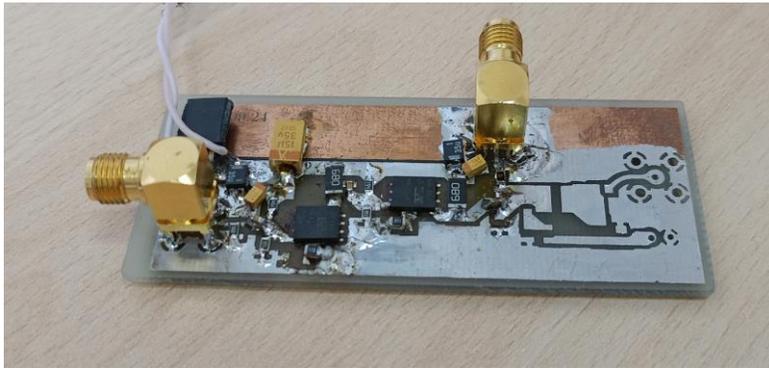
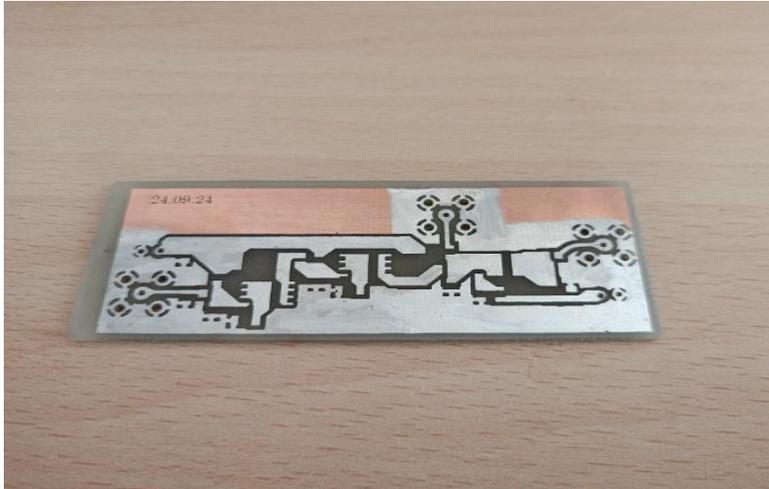


Рисунок 12 – Печатная плата для усилителя, сборка

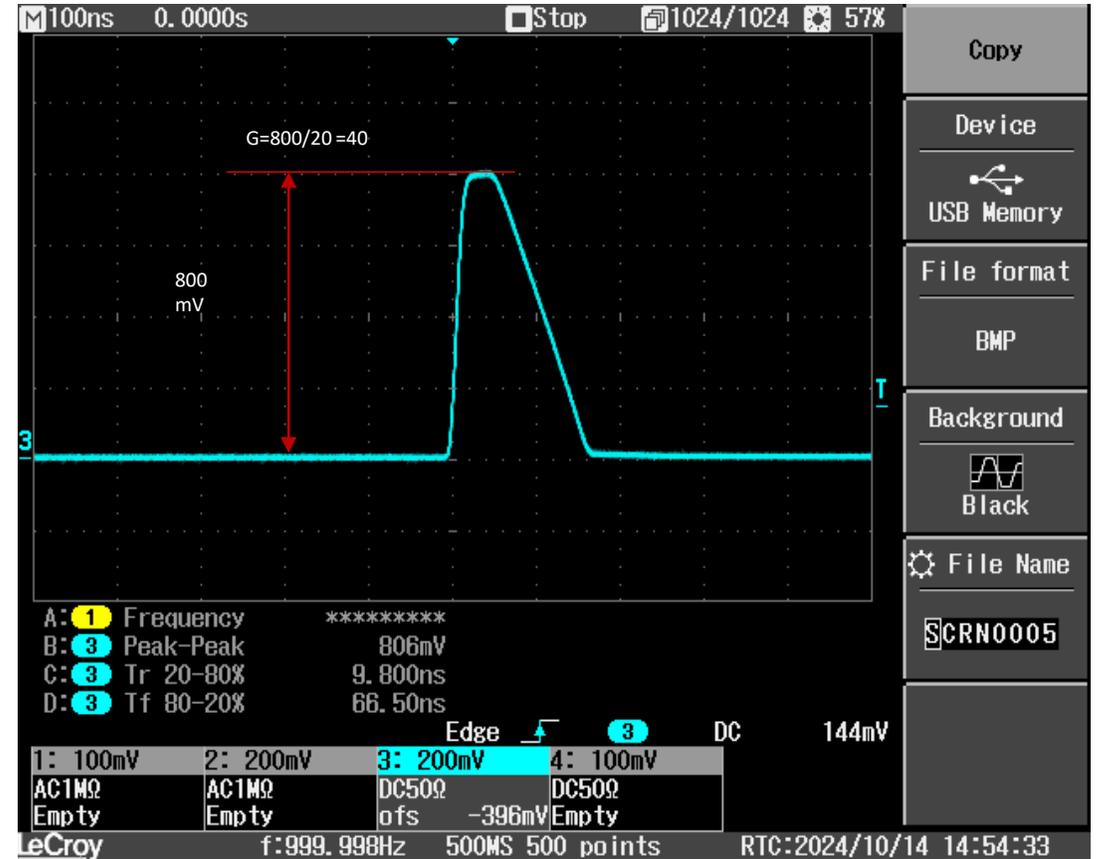


Рисунок 13 – Сигнал на выходе усилителя. Напряжение на входе 20 мВ, напряжение на выходе 800 мВ

Сравнение АЧХ и ФЧХ усилителей

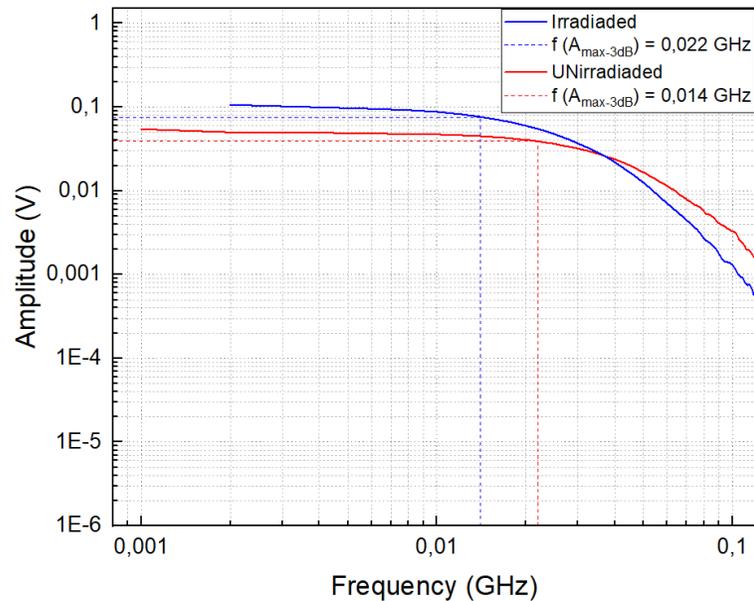


Рисунок 14 – АЧХ усилителей с необлученным и облученными транзисторами

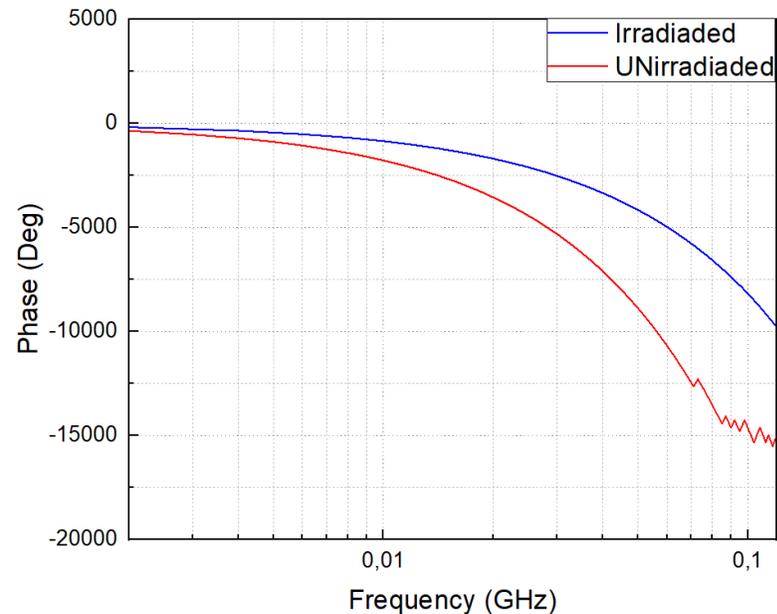


Рисунок 15 – ФЧХ усилителей с необлученным и облученными транзисторами

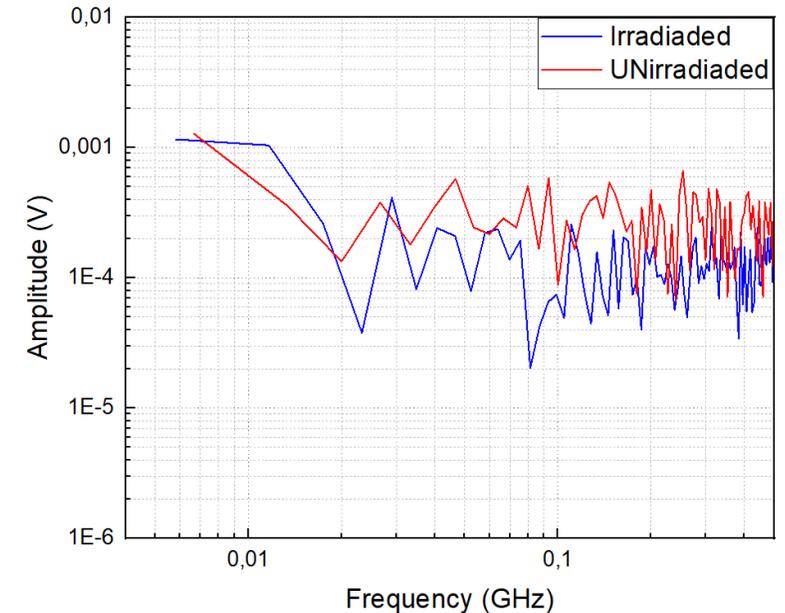


Рисунок 16 – АЧХ шума усилителей с необлученным и облученными транзисторами

Спектральная плотность шума

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

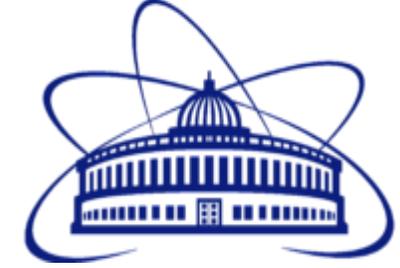
Заключение

- 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}Co
- Исследование показало достаточную радиационную стойкость при поглощенной дозе до ~ 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 AlGaN/GaN транзисторов на наличие дефектов после радиационного воздействия



Спасибо за внимание