

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТКЛИКА СЦИНТИЛЛЯЦИОННОГО ДЕТЕКТОРА НА БАЗЕ КРЕМНИЕВОГО ФОТОУМНОЖИТЕЛЯ В ИНСТРУМЕНТАРИИ GEANT4

Чумаков Д.К.¹, Флусова Д.С.², Бикметов Н.Р.², Гоголев А.С.³

¹ Томский политехнический университет, ИШФВП, аспирант гр. А2-15, e-mail: dkc1@tpu.ru

² Томский политехнический университет, ИШФВП, аспирант гр. А4-15

³ Томский политехнический университет, НОЦ ПИ, и.о. руководителя

Введение

В настоящее время традиционные вакуумные ФЭУ активно заменяют на кремниевые фотоумножители. Область применения кремневых фотоумножителей практически не ограничена. Например, существует сканер позитронно-эмиссионной томографии, совмещенной с компьютерной томографией (ПЭТ/КТ), использующий в качестве чувствительной части ВГО кристаллы и SiФЭУ в качестве фотоумножителей [1]. Преимущества кремневых фотоумножителей заключаются в их компактности, малом энергопотреблении, нечувствительности к магнитным полям. Однако применение кремниевых фотоумножителей осложняется проблемой влияния тепловых шумов на отклик фотоумножителя. На конечный отклик может влиять множество факторов, поэтому проектирование будущих детекторных сборок следует сопровождать моделированием и прогнозом отклика будущего детектора.

В текущей работе использовался кремневый фотоумножитель EQR15 11-6060D-S, созданный на основе технологии с эпитаксиальными гасящими резисторами. Постоянная времени, зависящая от емкости микроячейки и сопротивления резистора гашения, определяется только характеристиками чипа [2].

Описание алгоритма

Моделирование осуществлялось в программном пакете GEANT4 с подключенной библиотекой моделирования оптических процессов в материалах *G4OpticalPhysics*. Предварительная отработка алгоритмов расчета функции отклика и набора спектра была проведена в ПО Wolfram Mathematica. Обработка данных производилась с помощью математического пакета CERN ROOT. Экспериментальная установка для верификации модели состоит из 10 кремневых фотоумножителей размером 6x6 мм² производства NDL (модель EQR15 11-6060D-S), находящихся в оптическом контакте со сцинтилляционными кристаллами LaBr₃, помещенных в светоизолированный короб с изотопным источником ОСГИ-Р Am-241. Сигнал с выхода фотоумножителей фиксировался с помощью осциллографа Tektronix MSO4, откуда передавался в оцифрованном виде на компьютер для последующей обработки.

Моделирование отклика кремниевого фотоумножителя осуществлялось на основе функции отклика сенсора, представленной в аналитическом виде для случая регистрации единичного сцинтилляционного фотона. В инструментарии GEANT4 моделировалась регистрация γ -квантов от источника Am-241 в объеме сцинтилляционного кристалла. Для сцинтилляционных фотонов определялось время высвечивания в кристалле и время переноса от точки регистрации γ -кванта до чувствительной области кремниевого фотоумножителя с учетом процессов переотражения и поглощения фотонов в кристалле. Время высвечивания было определено экспериментально из усредненных осциллограмм для каждого детектора, после чего было использовано в качестве входных данных модели. Суммарный отклик, аналогичный экспериментальному, был получен при сложении единичных откликов от всех сцинтилляционных фотонов с учетом времени их попадания на чувствительную область фотоумножителя. Для перевода отклика из размерности тока (мкА) в размерность напряжения (мВ), амплитуда итогового отклика была умножена на величину нагрузочного сопротивления (1 кОм). В результате был смоделирован отклик кремниевого сенсора в сборке с кристаллом LaBr₃ с учетом уширения сигнала согласно параметрам отдельного детектора. Получены экспериментальные отклики от десяти сенсоров, сравнение модели и эксперимента приведены на рисунке 1. В дальнейшем был реконструирован спектр. Уширение на линии 60 кэВ от Am-241 в модели согласуется с уширением на реальном спектре. Исходя из результатов моделирования было вычислено наилучшее допустимое разрешение порядка 20% на линии 60 кэВ для каждого сенсора по отдельности. Для экспериментальной сборки кремневых ФЭУ итоговое разрешение составило 28% на линии 60 кэВ.

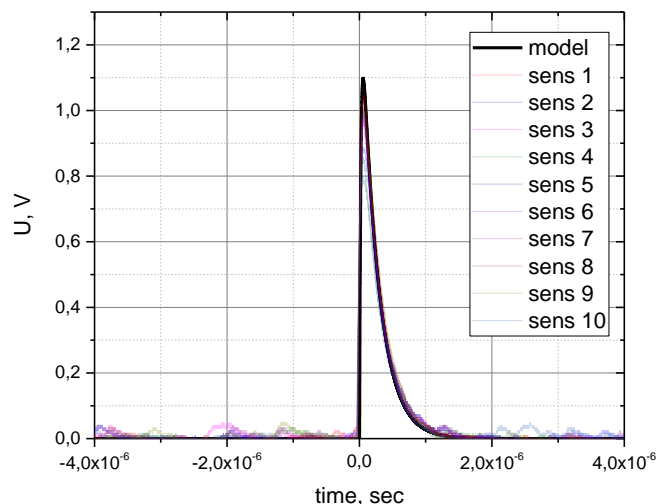


Рис. 1. Усредненный отклик для 10 сенсоров и разработанной модели при регистрации γ -квантов с энергией 60 кэВ

Заключение

Создана модель, предсказывающая отклик детектора. Модель включает в себя кристалл LaBr_3 со средним временем высвечивания порядка 25 нс, кремниевый фотоумножитель EQR15 11-6060D-S. Использование аналитической функции отклика позволило получать сигнал при регистрации ионизирующего излучения, максимально приближенный по форме и амплитуде к экспериментальному. Модель с использованием аналитической параметризации может применяться для исследования достижимого разрешения сборок из нескольких детекторов в различных конфигурациях геометрии их расположения относительно источника ионизирующего излучения, а также с учетом собственных характеристик сцинтилляционных кристаллов. Реконструирован спектр, соответствующий регистрации излучения γ -квантов с энергией 60 кэВ, смоделированный спектр согласуется с экспериментальным спектром отдельного сенсора. Разрешение единичного сенсора в модели для линии 60 кэВ составило 19,5%, в эксперименте результат 20,8%. Отклонение модели от эксперимента объясняется тем, что при моделировании учитывалась только одна, наиболее интенсивная линия из спектра Am-241. Малый вклад линий характеристического рентгеновского излучения Am-241 оказал влияние на форму спектра в области ниже 60 кэВ и вызвал уширение пика в экспериментальном спектре.

Список использованных источников

1. Turkington T. Performance of a BGO PET/CT with higher resolution PET detectors. Т. 4 / Т. Turkington, J. J. Williams, J. W. Wilson, [и др.] // Journal of Approximation Theory - JAT. – 2005. – С.1893-1894
- Т. Zhao, Progresses of silicon photomultiplier technologies with epitaxial quenching resistors: New Developments In Photodetection 2017 / R. Preston, J. Jiang [и др.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2018. – Т. 912. – С. 252-254