Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное автономное учреждение

высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ)

ОТЧЁТ О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

ПОДБОР ОПТИМАЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ КРЕМНИЕВЫХ ФЭУ ДЛЯ МАКЕТА ПЭТ НА СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ ДЕТЕКТОРАХ

Научный руководитель ассистент каф. 40

_____Ф.А.Дубинин

Выполнила

_____ Н. С. Бойко

Оглавление

1	Введен	ние	2			
2	Много	канальный анализатор Petiroc2A	3			
3	Стинциляционные детекторы					
	3.1	Сцинтиллятор GAGG(Ce)	4			
	3.2	Кремнивые фотоумножители	7			
4	Опред	еление рабочей точки	9			
	4.1	Экспериментальная установка	9			
	4.2	Параметры исследуемых Si-ФЭУ	11			
	4.3	Метод расчета рабочей точки	12			
5	Заклю	рчение	18			
Спис	сок исп	ользованных источников	19			

1 Введение

В данной работе были определены рабочие точки 32 Si-ФЭУ макета ПЭТ на базе платы PETIROC2A. Это является одной из основных подготовительных задач перед сборкой макета. Поскольку для различных датчиков этот парамает может заметно отличаться, существует необходимость тестировать их для нахождения индивидуального напряжения смещения, при котором разрешение будет наилушим. Определение рабочей точки, помогает правильно выставить энергитический порог сигнала для того, чтобы не терять полезные события, в случае слишком высокого порога, и не собирать лишние шумы, при низком. В результате, видны заметные улучшения разрешения итогового изображения и повышение скорости набора данных.

Наилучшая разрешающая способность достигается путем повышения напряжения смещения на Si-ФЭУ, так как вместе с усилением ростет эффективность регистрации фотонов. Однако, вместе с этим, увеличивается показатель шумов и значительный вклад начинают вносить оптическая связь и послеимпульсы. В определенный момент датчик приходит в насыщение, то есть из-за ограниченного колличества ячеек зависимость падающих электронов от задетектированных может стать не линейной.

Выше перечисленные параметры, а также некоторые конструкивные особенности сцинтилляционных детекторов и геомерия макета в целом, вносят вклад в определение рабочего напряжения. В будушем планируется внести соответствующие поправки в собранные данные.

2 Многоканальный анализатор Petiroc2A

Petiroc 2A - это 32-канальный интерфейсный ASIC (application-specific integrated circuit или интегральная схема специального назначения), предназначенный для считывания показаний кремниевых фотоумножителей (SIPM) для измерения времени полета частиц. Petiroc 2A сочетает в себе очень быстрый триггер с низким уровнем дрожания и точные измерения заряда и времени. Концепция ASIC заключается в объединении двух измерительных линий, которые не будут мешать друг другу, для измерения как времени первого падающего фотона, так и интегрального заряда всего кристалла. Регулировка высокого напряжения SiPM возможна с помощью многоканального входного ЦАП. Это позволяет точно регулировать коэффициент усиления SiPM и уровень темного шума на системном уровне для коррекции неравномерности SIPM.

Потребляемая мощность составляет 6 MBт/канал, без учета буферов, используемых для вывода сигналов. Основное применение Petiroc 2A - измерение времени полета частиц при сканировании животных, но его также можно использовать для любого применения, требующего как точного временного разрешения, так и точного измерения энергии.

Вместе с платой представлено программное обеспечение, позволяющее регулировать многие параметры, для подстройки каждого канала. Есть возможность подстройки общих для всех каналов временных и зарядовых порогов триггеров и зарядового формирователя. Возможна автоматическая подстройка индивидуальных порогов. Программа позволяет визуализировать зарядовый и временной спектры снимаемого с Si-ФЭУ сигнала с каждого канала по отдельности, также есть возможность визуализировать все каналы одновременно, при этом отражаются совпадения. Есть возможность анализировать совпадения в двух выбранных каналах. Если есть метка "попадание" при одном и том же сборе данных, программное обеспечение сравнит их хронометраж и отображает результаты в виде гистограммы.

Однако, плата не дает возможности подстройки индивидуальных напряжений на Si-ФЭУ, что является достаточно важным асектом работы оборудования в режиме наилучшего разрешения. Выставление индивидуальных порогов позволяет снимать данные времени точнее для нормальной

3

работы схемы совпадений.

3 Стинциляционные детекторы

3.1 Сцинтиллятор GAGG(Ce)

Гадолиниво-алюминиево-галлиевый гранат (Gd₃Al₂Ga₃O₁₂ или GAGG) является материалом с высокой плотностью и высоким коэффициентом ослабления излучения. При легировании церием (Ce) кристалл обеспечивает сцинтилляционные характеристики, способные составить конкренцию как традиционным сцинтилляционным кристаллам (NaI(Tl), CsI(Tl)), так и с усовершенствованным силикантам, легированным церием (например, LYSO(Ce)), и галогенидам лантана, легированным церием (например, LaCl₃(Ce)). Такие выводы можно сделать на основе данных, представленных в таблице 1. В частности, поскольку GAGG(Ce) имеет относительно высокую плотность, он может быть привлекательным вариантом для тех применений обнаружения гамма - излучения, где эффективность детектирования является критическим фактором, как, например, ПЭТ, объединенная с магнитно-резонансным томографом (ПЭТ/МРТ).

В нашем случае при выборе сцинтилятора важнейшими параметрами являются: большая плотность, высокий световыход и малое время высвечивания. Для кванта с энергией E, сечение взаимодействия k с атомом, имеющим зарядовое число Z, пропорционально:

$$k = \frac{Z^n}{E^{3,5}} \quad , \tag{1}$$

где п лежит в интервале между 4 и 5. При увеличении плотности кристалла кванты эффективнее теряют энергию в материале в силу прямой зависимости этих величин. Обратив внимание на эту характеристику в таблице, делаем вывод, что LYSO(Ce) и GAGG(Ce) обладают самой высокой плотностью среди представленных.

Время высвечивания или затухания сцинтиллятора должно быть как можно меньшим для обеспечения высокой скорости счета. Особенно критичным этот параметр становится при регистрации больших потоков частиц в медицине и физике высоких энергий. Исследователи обратили свое внимание на редкоземельные ионы, отличительной особенностью которых является наличие быстрых разрешенных оптических переходов с 5d-состояния

	$\operatorname{CsI}(\operatorname{Tl})$	LYSO(Ce)	$LaCl_3(Ce)$	NaI(Tl)	GAGG(Ce)
Плотность (Γ/cM^2)	4.51	7.2	3.85	3.67	6.63
Эффективный Z _{eff} (атомный номер	й 54)	65	59.5	50	54.4
Длина вол- ны max поглощения (нм)	550	420	350	415	520
Время вы- свечивания (нс)	1,050	40	28	230	87(90%)255(10%)
Энергитическ разрешение 662 кэВ (проц.)	oe 7	7	_	6,5	5
Световыход (фото- ны/кэВ)	54	32	49	38	50
Гигроско- пичность	Слабая	_	+	+	_
Собственная радиоактив- ность	_	+	-	_	_

Таблица 1: Сравнительные характеристики распространенных сцинтилляционных кристаллов. Данные взяты из источников [1—4]

иона редкоземельного элемента на 4f-оболочку. Экспериментальным путем было установлено, что сцинтилляторами с приемлемым временем затухания и достаточно высоким световым выходом, являются кристаллы с примесями церия (25 - 30 нс) и празеодима (15 - 25 нс). Еще более быстрыми сцинтилляторами являются материалы, активированные ионами неодима, однако световой выход таких сцинтилляторов крайне мал, что связано с неэффективными механизмами передачи энергии к ионам неодима, поэтому сейчас такие сцинтилляторы практически не применяются. В первом приближении, вспышка света затухает по экспоненциальному закону:

$$I = I_0 e^{-t/\tau} \quad , \tag{2}$$

где I_0 - амплитуда светового импульса, τ - время затухания вспышки сцинтиллятора. Оптимальная концентрация церия в материале порядка нескольких процентов, так как при увеличении концентрации активатора происходит тушение люминесценции и, следовательно, уменьшение светового выхода. Поэтому необходим компромисс между концентрацией активатора и желаемым временем затухания. LYSO(Ce), LaCl₃(Ce) и GAGG имеют наименьшее значение времени высвечивания.

Световой выход связан с числом электрон-дырочных пар, образующихся в кристалле при поглощении ионизирующего излучения и обратно пропорционален ширине запрещенной зоны материала:

$$LY \simeq \frac{1}{\beta E_g}$$
 . (3)

В этом выражении β - константа, которая принимает значение от 2 до 3 и βE_g имеет смысл средней энергии, которая необходима для образования одной формализованной электрон-дырочной пары в кристалле с запрещенной зоной E_g , а E_g - ширина запрещенной зоны. Он определяется числом электрон-дырочных пар n_{eh} , которые создаются в ионизационном треке, после попадания частицы высокой энергии E_{γ} в сцинтиллятор. Наибольшим выходом будут обладать материалы с малой шириной запрещенной зоны. Но это также повлияет на величину амплитуды выходного сигнала. В статье [5] сравниваются различные сцинтиляторы для одного и того же детектора, и отмечается важность верного подбора материала. Немаловажным ограничивающим фактором является гигроскопичность материала - способность некоторых веществ поглощать водяные пары из воздуха. Все сцинтилляторы на основе йодидов, хлоридов и бромидов гигроскопичны. При контакте с воздухом они поглощают из него водяные пары, что приводит к их деградации или полному разрушению. Поэтому такие материалы должны сразу после выращивания в специальных боксах герметично упаковываться в контейнеры. Подробнее о характеристиках и физике работы сцинтиляторов в источнике [6].

В итоге, GAGG не только обладает оптимальными характеристиками для корректной работы томографа, но и интересен для изучения, так как это относительно новый кристалл.

3.2 Кремнивые фотоумножители

Si-ФЭУ представляют собой матрицу полупроводниковых лавинных фотодиодов (ЛФД, SPAD) работающих в гейгеровском режиме. Пример принципиальной схемы Si-ФЭУ представлен на рисунке 1, у разных про-изводителей схемы могут отличаться. В схеме резистивный элемент нужен для пассивного гашения лавины.



Рисунок 1 – Упрощенная принципиальная схема SiPM (Sensl), взятая из технической документации [7]

Для увеличения динамического диапазона, а также эффективности регистрации фотонов, схемы ЛФД, соединенные параллельно, объединены в массив.

ЛФД представляет собой полупроводниковый диод, подключенный в режиме сильного обратного смещения, выше напряжения пробоя. Электрон, рожденный в результате фотоэффекта попадает в зону проводимости, за счет большой разности потенциалов приобретает дополнительную кинетическую энергию. Фотоэлектрон, сталкиваясь с электронами валентной зоны, рождает лавину. Усиление линейно зависит от величины приложенного напряжения. Ёмкость прибора, которая зависит от площади полупроводника и его толщины, накладывает ограничение на время срабатывания, то есть на скорость счета.

Одним из основных параметров Si-ФЭУ единогласно считается эффективность регистрации фотонов (Photon Detection Efficiency - PDE). Эта величина отражает чувствительность датчика, или же отношение числа частиц, зарегистрированных за время измерения, к числу частиц, попавших в детектор за это же время, и определяется как

$$PDE(\lambda, T, U) = QE(\lambda)\mathcal{E}_a P_G(\lambda, T, U)$$
(4)

где QE - кванотовая эффекивность чувствительной площади фотодетектора, \mathcal{E}_g - геометрическая эффективность, равная отношению чувствительной площади к полной площади Si-ФЭУ, $P_G(\lambda, T, U)$ - вероятность того, что образовавшийся фотоэлектрон вызовет пробой, значение которой возрастает с увеличением перенапряжения и температуры.



Рисунок 2 – Зависимость PDE от длины волны и напряжения смещения. Взято из техничекиой документации [7]

4 Определение рабочей точки

4.1 Экспериментальная установка

Для дальнейшей калибровки Si-ФЭУ необходимо определить их рабочую точку. Она представляет собой оптимальное значение напряжение смещения, при котором достигается наивысшая разрешающая способность датчика. Этот параметр зависит от PDE, которая растет при увеличении напряжении, и соотношения сигнал/шум. При слишком высоком напряжении повышается вклад темнового счета диода.

Производитель в технической документации указывает среднее значение напряжения рабочий точки, однако существует необходимость тестировать каждый Si-ФЭУ отдельно, так как, на практике, у разных диодов одной серии они могут значительно отличаться.

Метод определения оптимальной величины напряжения основан на определении разрешающей способности Si-ФЭУ при различных напряжениях. Усилитель, дигитайзер и LED драйвер производства фирмы CAEN в схеме осуществляют подстройку, сбор и оцифровку сигнала. Эта установка позволяет тестировать Si-ФЭУ при разных значениях напряжения, усиления и интенсивности светового потока. Датчик помещается в светоизолированную емкость. Заблаговременно проверяется подключение в верном обратном напряжении смещения, после чего установка собирается целиком и накрывается черной плотной тканью для лучшей изоляции. На рисунке 3 представленна схема экспериментальной установки.



Рисунок 3 – Схема экспериментальной установки

На Si-ФЭУ подавалось напряжение от источника питания (ИП), измерения проводились в пределах от 25,5 В до 30 В. LED источник фотонов подключон к триггерному входу дигитайзера. Сигнал с Si-ФЭУ идет на вход усилителя (PSAU, Power Supply and Amplification Unit), и на нулевой канал (CH_0) дигитайзера. Усилитель и дигитайзер подключены к персональному компьютеру (ПК), где возможны как автоматическая, так и ручная настройки параметров оборудования. На ПК установлена программа по сбору и анализу данных. В нашем эксперименте усиление составило 40 дБ.

Сигнал запуска подается на триггерный вход на передней панели, он также может генерироваться внутри благодаря возможности порогового самозапуска. Более подробную информацию об оборудовании в источнике [8].

На рисунке 4 показан внешний вид программного обеспечения, сигнал и собранный спектр. Спектр представляет собой график зависимости количества вхождений от Номера канала АЦП(аналого-цифрового преобразователя).



Рисунок 4 – Сигнал Si-ФЭУ и полученный спектр

Импульс типичной треугольной формы с крутым фронтом и более пологим спадом. Длительность переднего фронта определяется основными процессами в детекторе, длительность спада - величиной RC выходной цепи. Скорость нарастания переднего фронта зависит от времени высвечивания сцинтиллятора, пока интенсивности света будет достаточно для рождения пары электрон-дырка, передний фронт будет нарастать. С LED, используемым в работе, скорость нарастания мала, так как установлен быстрый светодиод, у которого минимальное время высвечивания. При стремлении величины сопротивления резистора в цепи к бесконечности сигнал будет нарастать тоже бесконечно по экспоненциальному закону. Амплитуда импульса напряжения на выходе зависит от величины RC-нагрузки.

Можно заметить на рисунке, что перед импульсом и за ним присутствуют еще два меньшей амплитуды. Это шумы, о которых подробно разобрано в статье [9], об этом говорит, во-первых, их малая амплитуда, а вовторых, то что они не попадают в gate (на рисунке)

График, после соответствующей калибровки, можно интерпретировать, как энергетический спектр, так как номер канала АЦП зависит от количества поглощенных фотонов, а количество вхождений - вероятность. Такой режим работы Si-ФЭУ - однофотонный режим счета. Если профитировать график по вершинам пиков, то получим распределение Пуассона. При увеличении количества событий, ошибка растет как квадратный корень.

Расстояние между соседними пиками соответствует среднему усилению одного пикселя. Ширина 0-го пика определяется шумами электроники, увеличение ширины 1-го пика по отношению к 0-му определяется технологическим разбросом усиления ячеек, который является чисто случайным процессом. Так как ячеек достаточно много, то распределение усилений и, соответственно, нулевого и последующих пиков подчиняется распределению Гаусса.

Отметим, что при различных значениях напряжения, подаваемого на Si-ФЭУ, статистика в правых пиках будет расти. Это обосновано увеличением вероятности регистрации фотона в p-n-переходе.

4.2 Параметры исследуемых Si-ФЭУ

На рисунке 5 изображен Si-ФЭУ производства Sensl серии fc-30035, исследуемый в данной работе.

Датчики низкой освещенности серии C от Sensl (на сегодняшний день производятся компанией Onsemi) отличаются лучшим в отрасли наименьшим значением темнового счета в сочетании с высоким PDE. Основные характеристики представленны в таблице 2.



Рисунок 5 – Si-ФЭУ (производства Sensl серии fc-30035)

Таблица 2: Основные параметры исследуемых Si-ФЭУ, указанные производителем в технической документации [7]

Размер элемен- та	Размер ячейки	Параметр	Min.	Typ.	Max	Ед. измере- ния
3 mm	35μ	Напряжение пробоя (V_{br})	24.2		24.7	В
		Пиковая длина волны (λ_p)		420		НМ
		Эффективность регисрации фо- тонов (PDE)		$31(_{V_{br}+2.5V})$		%
		Усиление		$3 * 10^{6}$		
		Скорость тем- нового счета (DCR)		300	860	кГц

Выбор пал именно на датчики фирмы Sensl (сейчас Onsemi), так как на момент закупки значение напряжения пробоя было самое низкое на рынке. Если сравнивать с другими поколениями, С-серия выделяется минимальным значением темнового счета.

4.3 Метод расчета рабочей точки

Рабочую точку находим, рассчитав величину разрешения для различных значений напряжения. В первую очередь, после сборки установки, были получены спектры для значений напряжения от 25,5 до 30 B, с шагом 0,5 B. Типичные спектры представленны на рисунке 6.

Заметим, что с увеличением напряжения форма пиков становиться все меньше похожей на распределение Гаусса: с левой стороны пика подьем гораздо круче, чем справа. Это связвно с послеимпульсами (afterpulsing) Si-ФЭУ, которые наряду с кросс-током (cross-talk) является основным источником шумов в датчике, расчетом влияния которых занимаются исследовательские группы [10; 11]. Послеимпульсы обусловлены теми носителями заряда в лавинном процессе, которые задерживаются в ловушках или дефектах полупроводникового материала и затем высобождаются с постоянной времени задержки типично 200 - 300 нс в зависимости от температуры, что сопровождается образованием нового лавинного процесса.



Рисунок 6 – Спектры, полученные в результате измерений

В результате фитирования гауссом нулевого и первого пиков были по-

лучены значения математического ожидания и сигмы. На основе этих значений были рассчитаны значения R (разрешающая способность) по формуле

$$R = \frac{\Delta_{pp}}{\sigma_{gain}} \quad , \tag{5}$$

где

$$\sigma_{gain} = (\sigma_1^2 - \sigma_0^2)^{1/2} \quad , \tag{6}$$

 Δ_{pp} - расстояние между пиками (нулевым и первым).

Однако, в силу наличия дополнительных шумов оборудования, создаваемых внешними источниками, влияние которых пока что не удалось подавить, было принято решение заменить в формулах (5) и (6) значения первого пика на значения третьего. Это допустимо в нашем случае, так как, в первую очередь, значение сигмы третьего пика всегда будет больше нулевого, так как с увеличением порядкового номера пика, его среднеквадратичное отклонение растет.

Графики зависимости разрешающей способности от напряжения смещения для различных Si-ФЭУ в случае расчета с первым пиком представлен на рисунке 7 а, в случае выбора третьего пика - на рисунке 7 б. Обратим внимание на то, что в случае расчетов с третьим пиком, экспериментальные значения наиболее близки к апроксимирующей параболе. Точки экстремума этих двух функций близки по значению, для оценки такая точность достаточна.



Рисунок 7 – Зависимость разрешающей способности от напряжения обратного смещения Si-ФЭУ в случае выбора значеий для первого пика (а) и третьего пика (б)

Оптимальное значение смещения соответствует максимальному разрешению на графике и используется в качестве рабочей точки. Можно заметить, что рабочая точка отличается у разных Si-ФЭУ, что требует подстраивать оптимальные значения напряжения для каждого детектора индивидуально. Однако, анализатор Petiroc2A позволяет подстраивать только пороги триггеров.



Рисунок 8 – Зависимость разрешающей способности от напряжения обратного смещения для двух разных Si-ФЭУ

На рисунке 8 приведены в качестве наглядного примера полученные

распределения в результате вычислений по формуле (5), где

$$\sigma_{gain} = (\sigma_3^2 - \sigma_0^2)^{1/2} \quad , \tag{7}$$

зависимости разрешающей способности от величины напряжения для двух разных Si-ФЭУ. Апроксимация производилась полиномом второй степени.

Рабочие точки были определены для всех 32 Si-ФЭУ. На рисунке 9 представлен результирующий график рабочих точек. Также на нем показаны абсолютные значения напряжений при отклонении от рабочего напряжения на 10 %. Поскольку нет возможности подавать на каждый Si-ФЭУ индивидуальное напряжение, то оптимальним решением является установка некого среднего значения напряжения на все датчики.



Рисунок 9 – Черным показаны рабочие точки для каждого кремнеевого фотоумножителя. Красным и зеленым - отклонения на 10% от наилучшего разрешения в большую и меньшую стороны значений напряжения соответственно. Синим построен линейный фит для определения среднего значения напряжения.

Видно, что при отклонении от оптимального напряжения по выстав-

ленному, в связи со статистическим разбросом, разрешение измениться в пределах десятой доли от максимального значения. Как итог, из расчетов, общее значение напряжения для всех 32 Si-ФЭУ равно 27,8 \pm 0,07 B.

5 Заключение

В результате научно-исследовательской работы были найдены рабочие точки для 32 Si-ФЭУ для сцинтиляционных детекторов в макете ПЭТ и их общее рабочее напряжение для получения наилучшей разрешающей способности, которое составило 27,80 \pm 0,07 B, с учетом статистического разброса.

Подбор наилучшего разрешения позволяет установить порог как можно ближе к сигнальному пику, в связи с чем повысится как скорость сбора данных, так и разрешение изображений, получаемых в результате томографии. Это позволит повысить качество медицинского обслуживания и облегчит работу по постановлению диагноза.

Далее планируется настройка платы PETIROC2A и нахождение оптимального режима работы для получения данных наилучшего качества, а также визуализация плучаемых изображений. Внесение поправок в измерения рабочих точек в связи с причинами, описаными ранее.

Список используемых источников

- 1. Crystals S.-G. Physical properties of common inorganic scintillators // Saint-Gobain Crystals. 2007.
- The digital silicon photomultiplier Principle of operation and intrinsic detector performance / T. Frach [и др.] // 2009 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record (NSS/MIC). — 2009. — C. 1959—1965.
- Jeong M., Hammig M. Development of hand-held coded-aperture gamma ray imaging system based on GAGG(Ce) scintillator coupled with SiPM array // Nuclear Engineering and Technology. — 2020. — T. 52, № 11. — C. 2572—2580.
- 4. Comparison between Pixelated Scintillators: CsI(Tl), LaCl 3(Ce) and LYSO(Ce) when coupled to a Silicon Photomultipliers Array / M. Jeong [и др.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2018. T. 893. C. 75—83.
- 5. Response of the GAGG (Ce) scintillator to charged particles compared with the CsI (Tl) scintillator / T. Furuno [и др.] // Journal of Instrumentation. 2021. T. 16, № 10. P10012.
- 6. Шендрик Р. Введение в физику сцинтилляторов-1. 2013.
- 7. Sensors C.-S. S. Silicon Photomultipliers (SiPM), Low-Noise, Blue-Sensitive // On Semiconductor. 2020.
- Background removal procedure based on SNIP algorithm for gamma ray spectroscopy with the CAEN Educational Kit / M. Caccia [и др.] // Viareggio, Italy, Oct. — 2017.

- Acerbi F., Gundacker S. Understanding and simulating SiPMs // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2019. — T. 926. — C. 16—35.
- 10. Afterpulsing effects in SPAD-based photon-counting communication system / C. Wang [и др.] // Optics Communications. 2019. Т. 443. С. 202—210.
- 11. *Акимов Ю. К.* Фотонные методы регистрации излучений. Объед. ин-т ядерных исслед., 2014.