

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ» (НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ, НГУ)

Факультет: ФИЗИЧЕСКИЙ

Кафедра: ФИЗИКИ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

Направление подготовки: 03.03.02 ФИЗИКА

Образовательная программа: БАКАЛАВРИАТ

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

Кабанника Ивана Артемовича

Тема работы: Разработка прототипа счетчика калориметра для Супер Чарм-тау фабрики с отдельным каналом для измерения времени на основе кремниевого фотоумножителя

«К защите допущена»

Заведующий кафедрой

д.ф.-м.н.

зав. лаб. ИЯФ СО РАН

Научный руководитель

к.ф.-м.н.

с.н.с. ИЯФ СО РАН

Логашенко И. Б./ _____
(подпись, МП)

Епифанов Д. А./ _____
(подпись, МП)

«_____» _____ 2022 г.

«_____» _____ 2022 г.

Дата защиты: «_____» _____ 2022 г.

Новосибирск — 2022 г.

Содержание

Введение	2
1 Принцип работы кФЭУ	5
1.1 Кремниевые фотодетекторы на p-n-переходе	5
1.2 Устройство кФЭУ	6
1.3 Основные характеристики кФЭУ	10
2 Измерение основных характеристик кФЭУ	12
2.1 Темновой ток	12
2.2 Относительная вероятность генерации лавины	19
2.3 Измерения гасящего сопротивления	22
3 Счётчик на основе кристалла чистого CsI и кФЭУ	24
3.1 Спектрометрический тракт	24
3.2 Счётчик с одним кФЭУ	26
3.3 Измерение временного разрешения, счётчик с двумя кФЭУ	27
Заключение	31
Список использованных источников	31

Введение

В настоящее время обсуждается проект Супер Чарм-тау фабрики с высокой светимостью $10^{35} \text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$ [1]. В рамках проекта планируется разработка универсального магнитного детектора, важной подсистемой которого является электромагнитный калориметр, который построен на счётчиках на основе сцинтилляционных кристаллов чистого CsI. Калориметр предназначен для измерения энергий и координат γ -квантов, для идентификации заряженных частиц, а также для выработки сигнала для триггера детектора. Для преобразования вспышки сцинтилляционного света в электрический сигнал в счётчиках используются фотодетекторы, в настоящее время это или вакуумные фотоэлектронные умножители (ФЭУ) или полупроводниковые детекторы: pin-фотодиоды, лавинные фотодиоды (ЛФД), кремниевые фотоэлектронные умножители (кФЭУ). Например, в калориметрах детекторов ИЯФ СО РАН используются ФЭУ (КЕДР [2], СНД [3]) и pin-фотодиоды (КМД-3 [4]).

Вакуумные ФЭУ имеют большие коэффициенты усиления, но чувствительны к магнитному полю и требуют большого напряжения для своей работы. С другой стороны, фотодиоды не чувствительны к магнитному полю, но имеют сравнительно малое внутреннее усиление (для ЛФД порядка 10^2) или не имеют его вовсе (как pin-фотодиоды), что налагает ограничения на минимальное число регистрируемых фотонов, когда величина сигнала становится больше электронных шумов в спектрометрическом тракте счётчика.

Для регистрации одиночных фотонов было предложено использовать ЛФД при напряжении выше пробойного с последовательно подключенным гасящим резистором (в режиме гейгеровского разряда) [5]. При одиночном срабатывании ЛФД происходит лавинный пробой с большим током. Повторный пробой возможен только после спада лавины, которая может быть вызвана как фотоном, так и темновым срабатыванием, поэтому данная схема не может использоваться для надёжной регистрации фотонов.

Чтобы увеличить число регистрируемых фотонов был предложен кФЭУ, представляющий из себя структуру на основе матрицы ячеек p-n-переходов, эффективно обеспечивающую схему из многих лавинных фотодиодов с гасящим резистором соединенных параллельно, что увеличивает количество регистрируемых фотонов до чисел порядка количества ячеек-ЛФД. Выдаваемый каждой ячейкой сигнал одинаков, выходной сигнал суммируется и пропорционален сигналу с одной ячейки. У такого прибора существует ряд характеристик [6], к основным из них относятся напряжение пробоя, темновой счёт или темновой ток (число тепловых срабатываний ячеек в единицу времени или соответствующий этому числу ток), коэффициент усиления, гасящее сопротивление, ёмкость ячейки, время развития лавины, эффективность регистрации фотона, динамический диапазон (количество ячеек) и другие. Коэффициент усиления в данном случае зависит от накапливаемого ёмкостью ячейки заряда: $g = C_1 \cdot (U - U_{breakdown})/|e|$, где $U - U_{breakdown} > 0$ - перенапряжение, C_1 - ёмкость ячейки, e - заряд электрона. Время восстановления определяется как характерное время восстановления напряжения на ячейке и $\tau_q = R_q \cdot C_1$, (где R_q - сопротивление гашения) и составляет десятки наносекунд. Время развития лавины значительно меньше и именно разброс срабатывания одиночных ячеек определяет временное разрешение кФЭУ. Линейность отклика кФЭУ на засветку ограничена числом ячеек, при засветке с интенсивностью, большей или порядка числа ячеек за время восстановления, сигнал теряет пропорциональность числу фотоэлектронов (эффект насыщения). Требуемые для достижения насыщения интенсивности засветки сравнительно малы (порядка $1\text{нВт}/\text{мм}^2$), поэтому применимость кФЭУ для подсчёта фотонов ограничена малыми засветками.

В настоящей работе исследуется применимость кФЭУ в качестве регистрирующего элемента отдельной подсистемы счётчика калориметра измеряющей время. В рамках работы были проделаны следующие исследования:

- Измерение основных характеристик кФЭУ различных моделей и производителей
- Сборка счётчика на основе кристалла чистого CsI и кФЭУ, измерение световых выхода счётчика
- Измерение временного разрешения счётчика с двумя кФЭУ

1 Принцип работы кФЭУ

1.1 Кремниевые фотодетекторы на р-n-переходе

Для начала рассмотрим рin-фотодиоды (Рис. 1.1). При поглощении фотона за счёт фотоэффекта в обедненной области рin-фотодиода рождается электрон-дырочная пара, носители зарядов дрейфуют под действием собственного поля обедненной области, усиленного обратным смещением, к соответствующим областям (электрон в область n-типа, дырка в область р-типа) с последующей рекомбинацией. Важно отметить, что электрон-дырочная пара также может возникнуть из-за температурной флуктуации, что обуславливает проходящий через рin-фотодиод темновой ток даже без засветки.

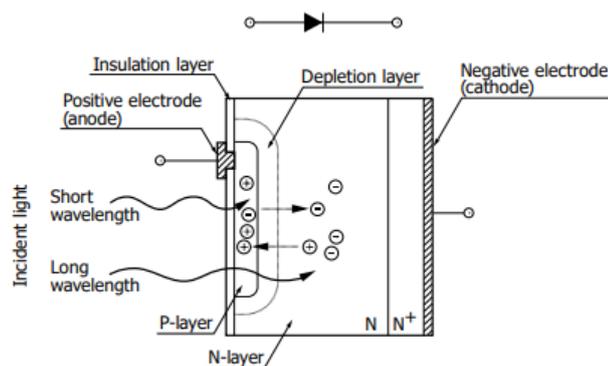


Рисунок 1.1: Структура кремниевого рin-фотодиода.

Коэффициент внутреннего усиления у рin-диода равен 1. Несмотря на высокую квантовую эффективность в пике спектральной чувствительности рin-фотодиоды, для регистрации малых вспышек (меньших 10^3 фотонов) непригодны из-за перекрытия сигнала электронными шумами применяемых в таких

случаях ЗЧПУ.

Для получения сигнала с большей амплитудой на одну электрон-дырочную пару были разработаны фотодиоды с внутренним усилением (Рис. 1.2), лавинные фотодиоды. Для усиления используется эффект ударной ионизации, также, в отличие от pin-диодов, ЛФД имеет меньший по размерам обедненный слой в котором локализуется высокое электрическое поле.

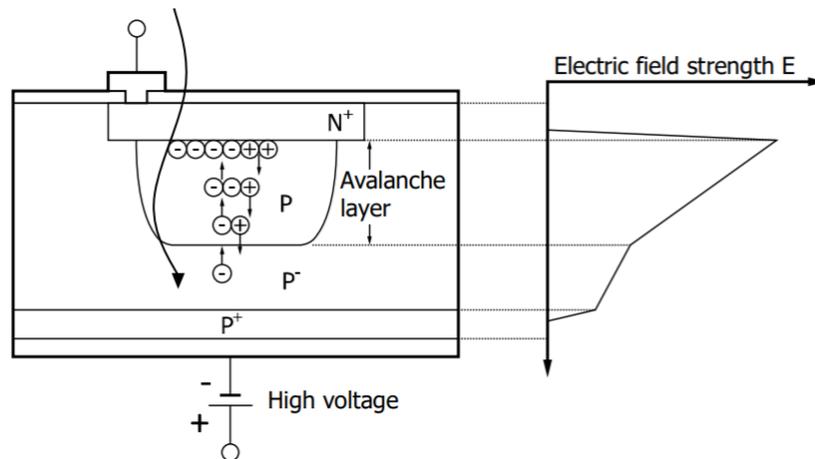


Рисунок 1.2: Структура лавинного фотодиода.

ЛФД состоит из четырех слоев, сильно легированные N^+ - и P^+ -слои, менее легированный P-слой и слабо легированный P^- -слой, в котором происходит генерация электрон-дырочных пар. Под действием электрического поля электрон дрейфует в область с высоким электрическим полем, где приобретает достаточный импульс для ударной ионизации, порождает лавину тем самым обеспечивая внутреннее усиление.

ЛФД эксплуатируется при коэффициенте усиления до 100 потому что при больших коэффициентах усиления увеличивается частота микропробоев ЛФД.

1.2 Устройство кФЭУ

При добавлении к ЛФД последовательного резистора (называемого *гасящим*) ЛФД может работать при напряжении, превышающем пробойное, в ре-

жиме гейгеровского пробоя. Превышение напряжения относительно пробойного (называемое *перенапряжением*) должно быть таково, что при генерации одной электрон-дырочной пары через ЛФД начинает течь ток, который ограничивается гасящим резистором и после возникновения лавинного пробоя напряжение на ЛФД падает до значения ниже пробойного. Получившаяся конструкция позволяет достигать больших значений коэффициента усиления, но регистрировать может лишь один фотон (или тепловой пробой). Для регистрации большего числа фотонов было предложено использовать матрицу из таких конструкций соединенных параллельно (эффективная схема на Рис. 1.3, (а)), тогда срабатывания отдельных ячеек будут независимы друг от друга, что позволит регистрировать фотоны с большим (порядка $10^5 - 10^6$) коэффициентом усиления.

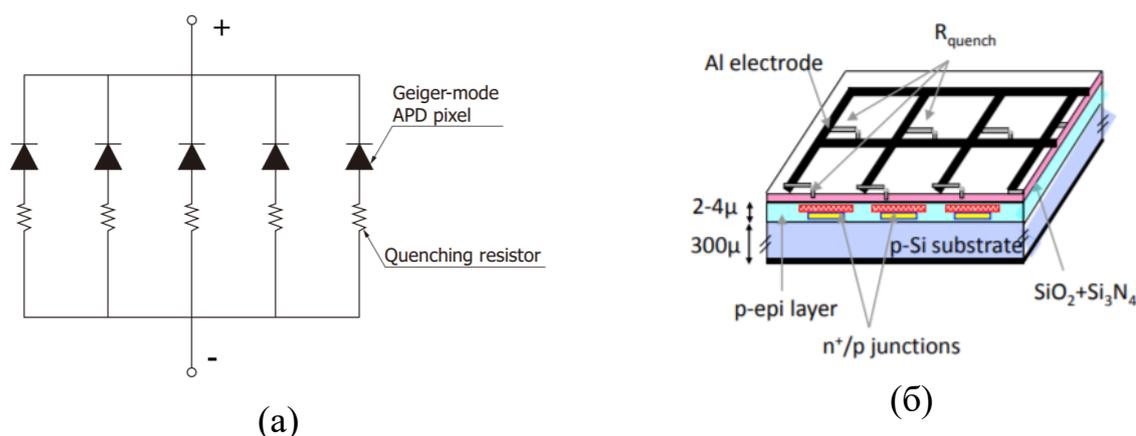


Рисунок 1.3: (а) - эквивалентная схема, (б) - структура кФЭУ.

Для реализации схемы с Рис. 1.3, (а) было предложено сделать матрицу p-n-переходов на общей подложке, иными словами разделить составной N^+ -P-слой (вблизи поверхности контакта слоёв N^+ и P находится обедненная область с высоким электрическим полем) на изолированные друг от друга ячейки (Рис. 1.3, (б)), тогда как слои P^- -и P^+ - общие. У каждой ячейки как упоминалось ранее есть резистор, ограничивающий ток гейгеровского разряда в ячейке. Сигнал каждой ячейки имеет фиксированную амплитуду (при фиксированном перенапряжении) и длительность, он не зависит от количества носителей вызвавших

срабатывание в одной ячейке (одновременное попадание двух и более фотонов в одну ячейку вызывает одно срабатывание), общий выходной сигнал со всего кФЭУ равен сумме сигналов со всех ячеек.

Для получения формы сигнала с одной ячейки кФЭУ может быть использована эквивалентная схема [7] изображенная на Рис. 1.4.

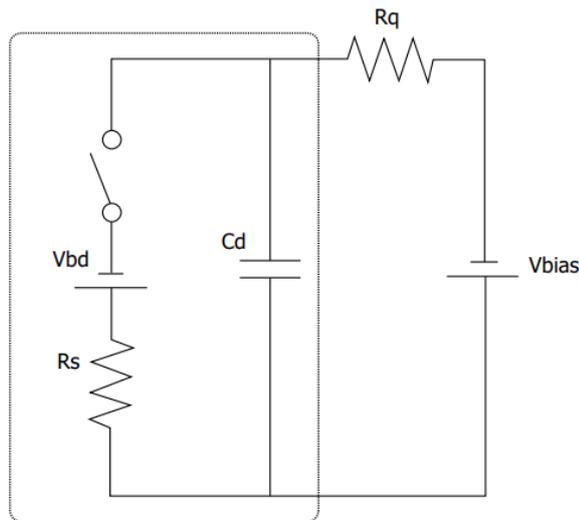


Рисунок 1.4: Эквивалентная схема одной ячейки кФЭУ.

Где C_d - ёмкость ячейки (порядка 0.1 пФ), V_{bd} - напряжение пробоя, V_{bias} - подаваемое обратное смещение, R_q - сопротивление гашения (порядка 10^5 - 10^6 Ом), R_s - эффективное сопротивление ячейки во время лавинного пробоя (значительно меньше R_q , порядка 10^2 - 10^3 Ом). Изначально напряжение на C_d равно V_{bias} , ключ разомкнут. Обозначим напряжение на C_d как V_d , ток как I_d . Когда в обедненном слое рассматриваемой ячейки появляется электрон-дырочная пара и образуется лавина, ключ замыкается и C_d разряжается через эффективное сопротивление R_s (за время $\tau_1 = R_s \cdot C_d$ порядка нескольких наносекунд экспоненциально нарастает лавинный ток), тогда общий ток равен $I_d = (V_d - V_{bd})/R_s + (V_{bias} - V_d)/R_q$. Первое слагаемое - ток, соответствующий разрядке конденсатора через R_s , второе - зарядка конденсатора через R_q . Пока ток зарядки меньше тока разрядки происходит развитие лавины. Разрядка идет до тех пор, пока токи не выровняются, токи выравниваются когда напряжение на

C_d падает настолько, что напряжение на R_q достигает значения $V_{bias} - V_{bd}$. Это становится возможным, так как эффективное сопротивление R_s существенно возрастает за время τ_1 . Если выравнивание происходит за время τ_1 , то через R_q протекает следующий импульс тока:

$$I_q(t < \tau_1) = \frac{V_{bias} - V_{bd}}{R_q} (1 - e^{-t/\tau_1}). \quad (1.1)$$

Тогда лавина доходит до максимального тока $I_0 \approx (V_{bias} - V_{bd})/R_q$, ключ размыкается и ёмкость снова заряжается до V_{bias} за время $\tau_2 \approx R_q \cdot C_d$ (от нескольких десятков до сотен нс) так что ток на R_q спадает как $I_0 \cdot e^{-t/\tau_2}$. Таким образом получаем ожидаемую форму сигнала:

$$I_q(t) \approx I_0(e^{-t/\tau_2} - e^{-t/\tau_1}), \quad (1.2)$$

которая изображена на Рис. 1.5.

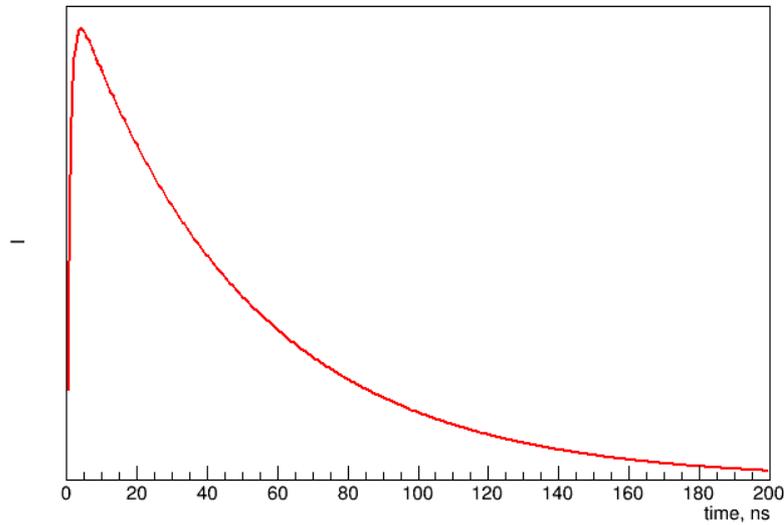


Рисунок 1.5: Ожидаемая форма сигнала, $\tau_1 = 1$ нс, $\tau_2 = 50$ нс.

Амплитуда сигнала срабатывания одной ячейки, как показано выше, зависит от значения перенапряжения.

1.3 Основные характеристики кФЭУ

Напряжение пробоя кФЭУ V_{bd} растет с температурой (аналогично ЛФД), поэтому обычно используется не значение рабочего напряжения V_{bias} , а значение перенапряжения $\delta V = V_{bias} - V_{breakdown}$.

Кремниевые ФЭУ имеют два специфических типа шумовых помех: эффект кратного срабатывания (crosstalk) и вторичные сигналы (afterpulse). Оба эффекта связаны с возникновением вторичных лавин. Эффект кратного срабатывания заключается в том, что один фотон после попадания в ячейку может вызывать срабатывание соседних ячеек. Вторичные импульсы наблюдаются как следующие за основным импульсом пики похожей формы, но с меньшей амплитудой. Обе характеристики учитываются как вероятности: кратного срабатывания δ_{ct} , вторичных сигналов δ_{ap} .

Темновой ток или темновой счёт - при рабочем перенапряжении и в условиях отсутствия засветки, имеет место тепловая генерация свободных носителей, которые могут породить гейгеровский разряд и вызвать срабатывания. Значение темнового счёта обычно составляет (0.1 - 1.0) МГц / мм². При измерении непосредственно тока измеряется средний, суммирующийся из отдельных темновых импульсов, темновой ток. При условии малости вклада кратных срабатываний и вторичных сигналов он выражается следующим образом:

$$I_{dark} = \nu_{dark}(T) \cdot g \cdot e, \quad (1.3)$$

где I_{dark} - темновой ток, $\nu_{dark}(T)$ - темновой счёт, g - коэффициент усиления, e - заряд электрона. При понижении температуры темновой счёт падает.

Коэффициент усиления, g - определяется как количество порождаемых в разряде одной ячейкой носителей заряда,

$$g = C_1 \cdot (V_{bias} - V_{bd}) / |e|, \quad (1.4)$$

где C_1 - ёмкость одной ячейки. Ёмкость определяется площадью ячейки и размерами области пространственного заряда, по порядку величины составляет около 0.1 - 1 пФ, при перенапряжениях 2 - 5 вольт усиление составляет $10^6 - 10^7$.

Эффективность регистрации фотонов, (PDE) - вероятность зарегистрировать падающий на кФЭУ фотон. Если $\langle N_{\text{фотонов}} \rangle$ - среднее количество фотонов в вспышке, $\langle N_{\text{сраб.}} \rangle$ - среднее число сработавших за время вспышки ячеек и если $\langle N_{\text{сраб.}} \rangle \ll N_{\text{ячеек}}$ то PDE определяется как

$$PDE = \langle N_{\text{сраб.}} \rangle / \langle N_{\text{фотонов}} \rangle, \quad (1.5)$$

Также эффективность выражается как:

$$PDE = F \cdot QE(\lambda) \cdot A_p(\lambda, U_{op}, T) \cdot (1 + \delta_{ct}) \cdot (1 + \delta_{ap}), \quad (1.6)$$

где F - геометрическая эффективность, отношение площади фоточувствительной поверхности, ко всей площади поверхности, QE - квантовая эффективность, вероятность рождения электрон-дырочной пары при поглощении фотона, A_p - вероятность генерации лавины.

Динамический диапазон кФЭУ ограничен числом ячеек. Пропорциональность выходного сигнала интенсивности засветки сохраняется, пока вероятность попадания в ячейку одного фотона мала, в таком случае динамический диапазон кФЭУ равен числу ячеек, при больших интенсивностях происходит насыщение сигнала и пропорциональность теряется.

2 Измерение основных характеристик кФЭУ

ЭУ

Для измерений были выбраны три различных кФЭУ одинакового размера ($3 \times 3 \text{ мм}^2$): Hamamatsu MPPC S10931-100P, SensL MicroFC-30035-SMT и Hamamatsu MPPC S14160-3050HS.

2.1 Темновой ток

В данной работе для измерения рабочих характеристик кФЭУ и поиска рабочей точки использовался следующий подход.

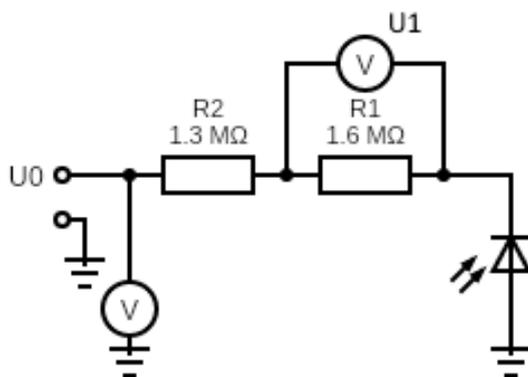


Рисунок 2.1: Схема измерения измерения тока в кФЭУ.

Для всех измерений использовалась схема подачи и контроля напряжения, изображенная на Рис. 2.1. Номиналы подобраны таким образом, чтобы измерять малые токи (если темновой счёт порядка 1 МГц, коэффициент усиления 10^6 , то из формулы приведенной в 1.3 темновой ток получается порядка 0.1 мкА). Так как номинал R_1 сопоставим с внутренним сопротивлением вольтметра r ($\approx 10 \text{ M}\Omega$) то эффективное сопротивление системы вольтметр-

резистор $R1_{eff} = R1 \cdot r / (R1 + r)$. Чтобы учесть данный эффект, при пере-
мычке вместо кФЭУ, была получена зависимость напряжения на $R1_{eff}$, $U1$ от
подаваемого $U0$, откуда фитированием извлекался коэффициент деления $\alpha =$
 $1 + R2 / R1_{eff}$. Тогда при известном сопротивлении $R2$, $R1_{eff} = R2 / (\alpha - 1)$. Для
определения рабочей точки по напряжению (напряжение пробоя, поведение ко-
эффициента усиления при различных перенапряжениях, область приемлемых
перенапряжений) измерялась зависимость темнового тока от подаваемого на-
пряжения. Измерения проводились для нескольких температур (20, 25, 30, 40
°C) чтобы выяснить температурные зависимости напряжения пробоя и сопут-
ствующих величин (коэффициент усиления, темновой счёт).

На Рис. 2.2 приведена зависимость темнового тока от подаваемого на кФЭУ
напряжения для МРРС S10931-100P.

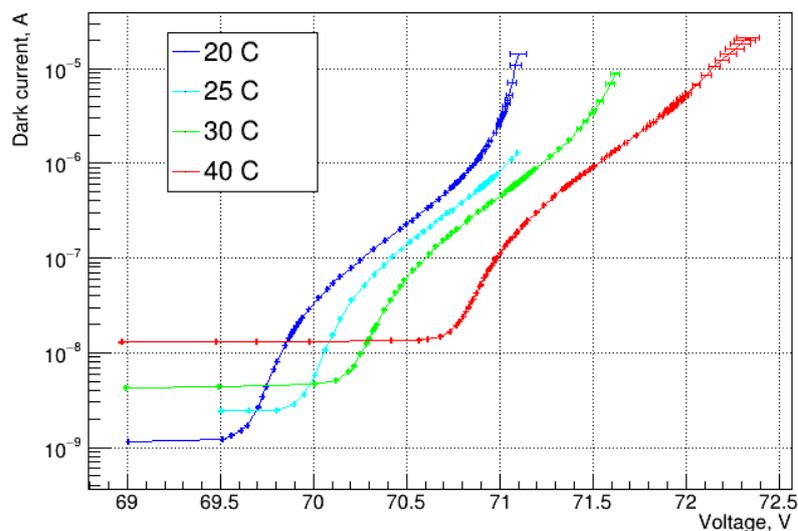


Рисунок 2.2: Зависимость темнового тока от напряжения для МРРС S10931-100P.

Напряжение пробоя определялось как напряжение, при котором касатель-
ные к кривой вольт-амперной характеристики в логарифмическом масштабе до
пробоя и после пробоя пересекаются, зависимость напряжения пробоя от тем-
пературы приведена на Рис. 2.3.

Рабочая область определяется как область напряжений после пробоя и до

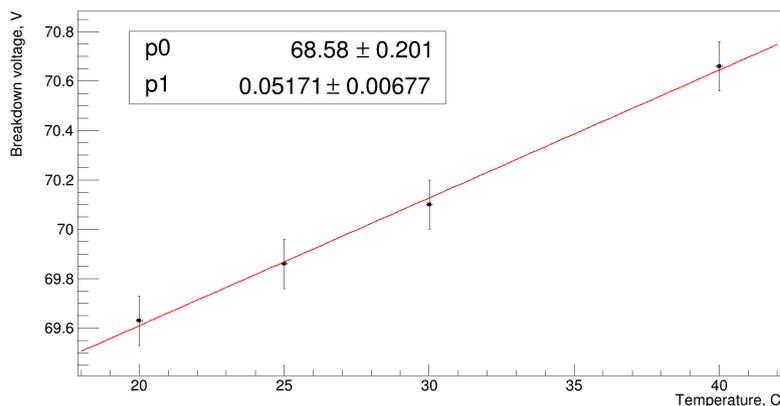


Рисунок 2.3: Зависимость напряжения пробоя MPPC S10931-100P от температуры, $dU_{bd}/dT = (51.7 \pm 6.8) \text{ мВ}/^\circ\text{C}$.

нарушения линейности (в логарифмическом масштабе) кривой темнового тока, изменение знака второй производной. Как можно видеть, ширина рабочей области составляет порядка 1 В. При напряжениях, выходящих за пределы рабочей области, начинают доминировать шумовые эффекты кратного срабатывания (срабатывают кластеры ячеек) и вторичных сигналов, обеспечивая больший ток и делая невозможным выделение полезного сигнала. Также видно, что допробойные значения темновых токов сильно зависят от температуры.

Результаты измерения темнового тока для MicroFC-30035-SMT приведены на Рис. 2.4.

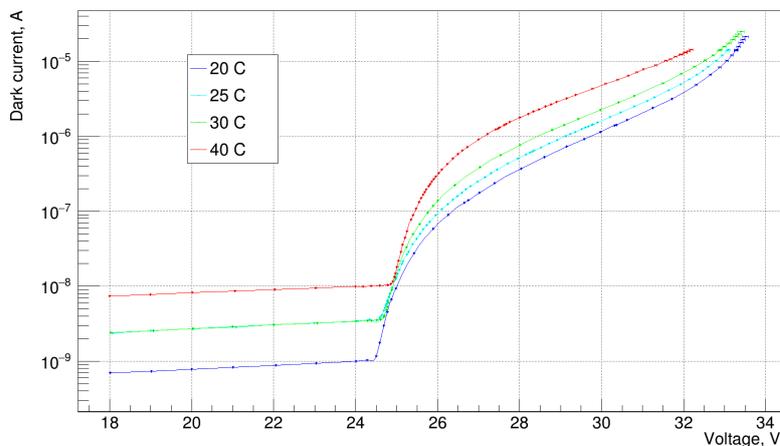


Рисунок 2.4: Зависимость темнового тока от напряжения для MicroFC-30035-SMT.

Как видно ширина рабочей области у данного кФЭУ значительно больше, около 6 В. При больших чем в рабочей области перенапряжениях можно видеть то же самое изменение знака второй производной, объясненное ранее. Напряжение пробоя от температуры растет меньше чем в предыдущем случае, как видно на Рис. 2.5.

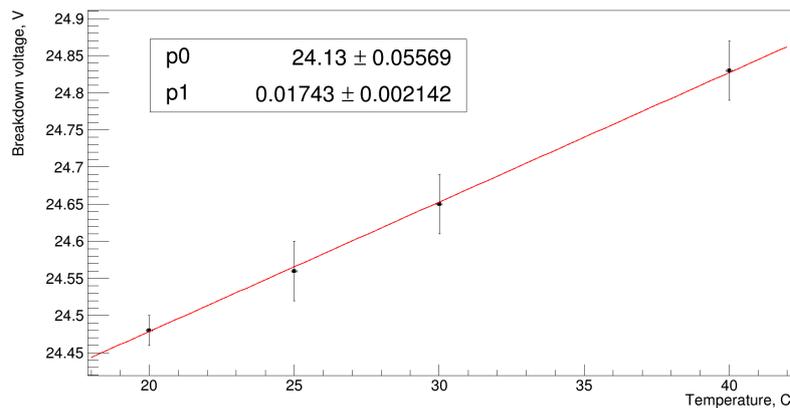


Рисунок 2.5: Зависимость напряжения пробоя для MicroFC-30035-SMT от температуры, $dU_{bd}/dT = (17.4 \pm 2.1) \text{ mV}/^\circ\text{C}$.

Зависимость темнового тока для MPPC S14160-3050HS приведена на Рис. 2.6.

Соответствующее напряжение пробоя от температуры указано на Рис. 2.7.

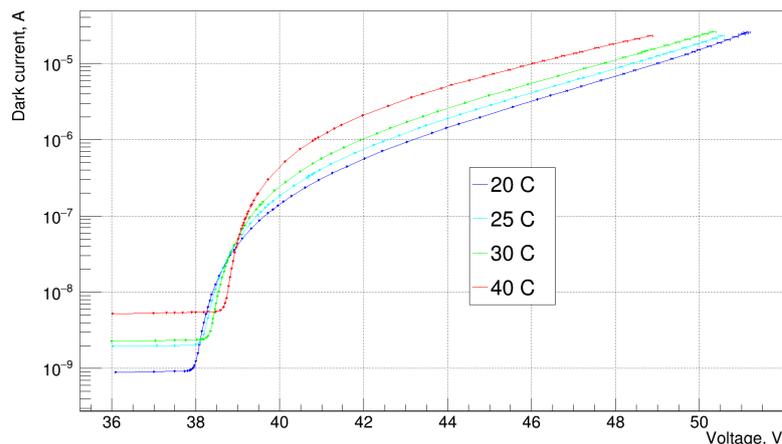


Рисунок 2.6: Зависимость темнового тока от напряжения для MPPC S14160-3050HS.

Для данного кФЭУ можно видеть, что несмотря на более сильную зависимость напряжения пробоя от температуры рабочая область перенапряжений

больше чем у двух предыдущих, около 11 В.

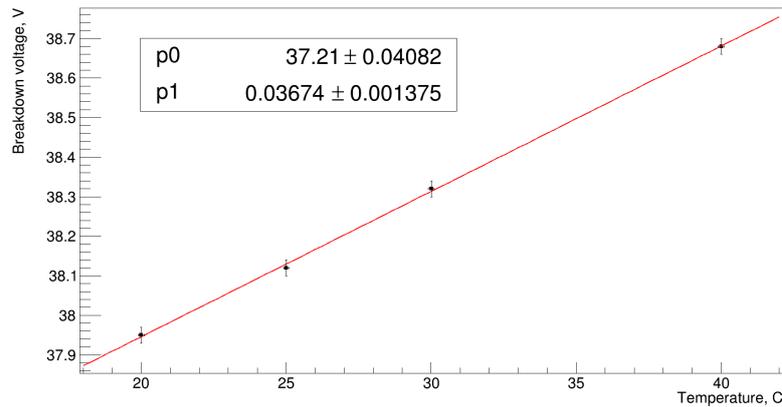


Рисунок 2.7: Зависимость напряжения пробоя для MPPC S14160-3050HS от температуры, $dU_{bd}/dT = (36.7 \pm 1.4) \text{ мВ/}^\circ\text{C}$.

Используя полученные данные о темновом токе и зная из паспорта ёмкость одного пиксела C_1 , с помощью формул 1.4 и 1.3 можно получить зависимость темнового счёта от температуры при фиксированном коэффициенте усиления. Для MPPC S10931-100P на Рис. 2.8, изображена зависимость темнового счёта от температуры для различных коэффициентов усиления. Аналогичные зави-

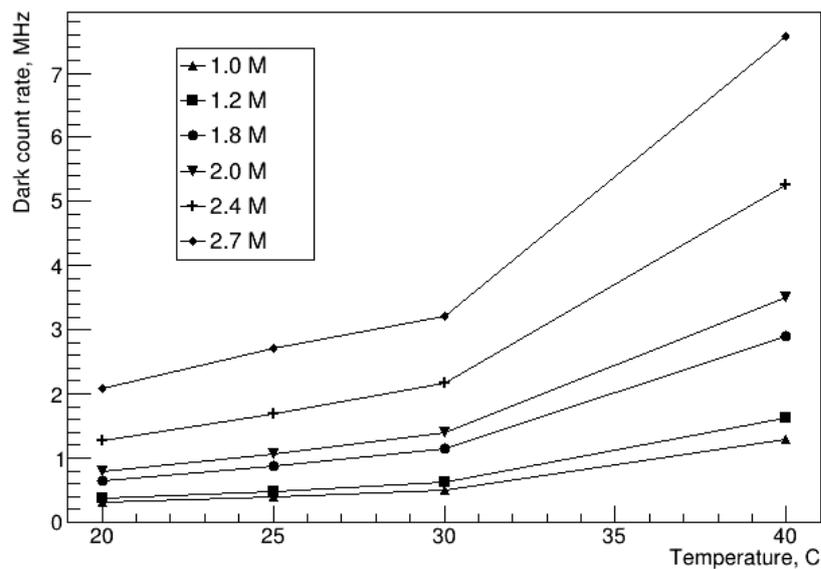


Рисунок 2.8: Темновой счёт от температуры при различных коэффициентах усиления, MPPC S10931-100P.

симости для двух других кФЭУ, MicroFC-30035-SMT и MPPC S14160-3050HS

представлены на Рис. 2.9 и Рис. 2.10, видно, что темновой счёт у этих кФЭУ значительно меньше чем у MPPC S10931-100P.

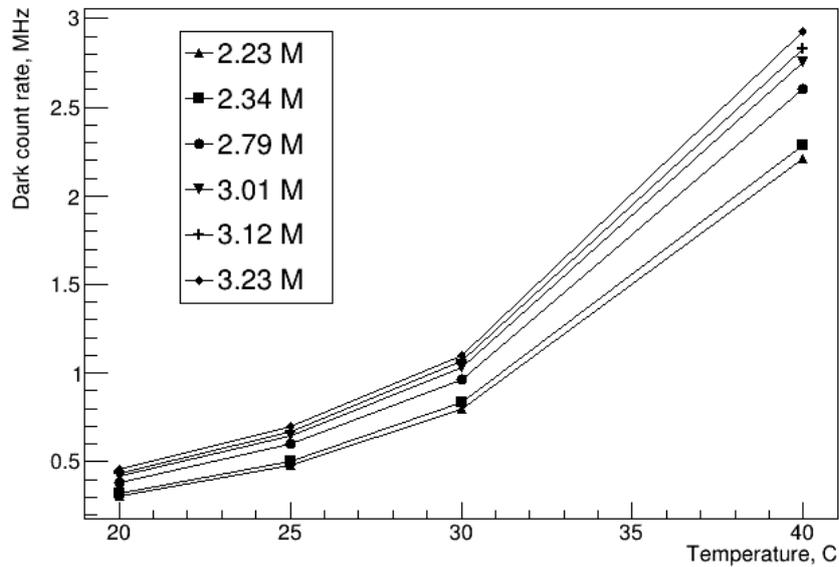


Рисунок 2.9: Темновой счёт от температуры при различных коэффициентах усиления, MicroFC-30035-SMT.

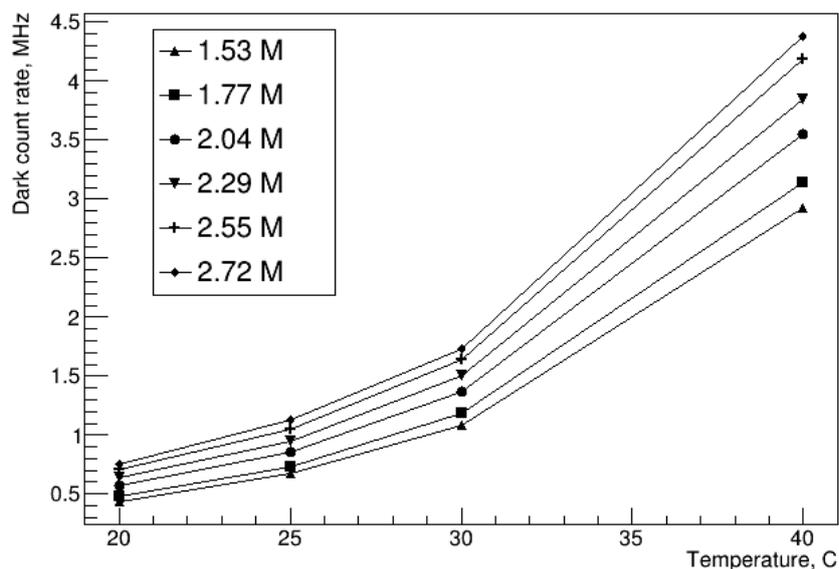
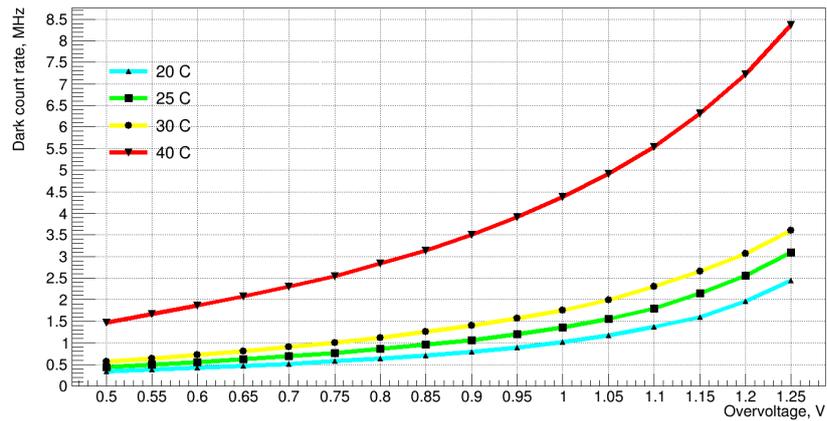
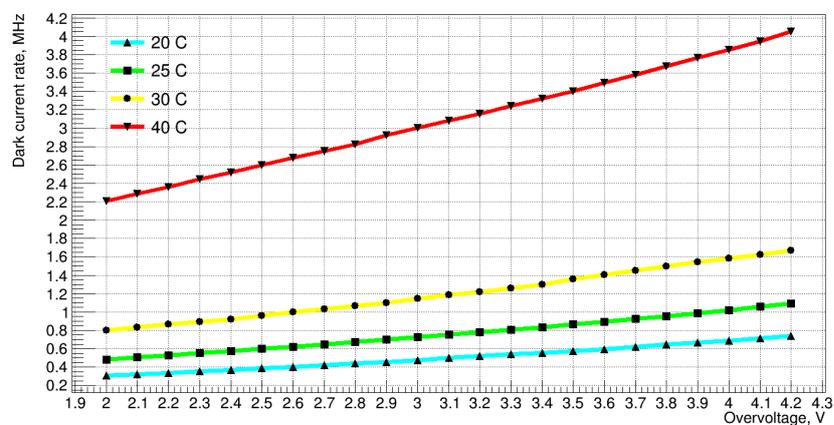


Рисунок 2.10: Темновой счёт от температуры при различных коэффициентах усиления, MPPC S14160-3050HS.

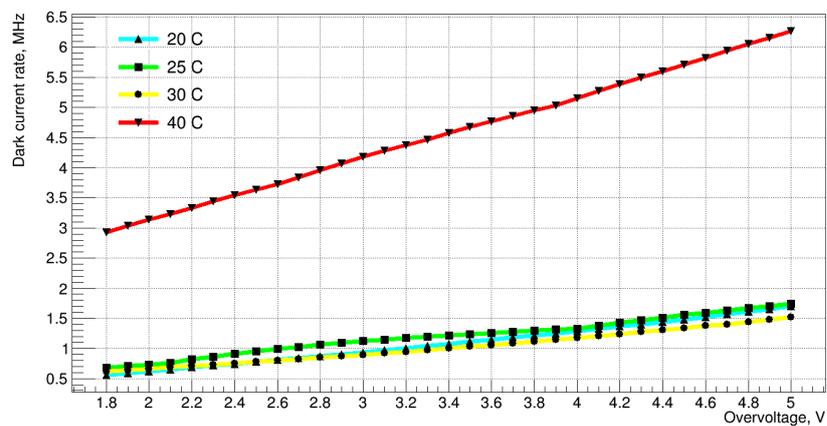
Из аналогичных вычислений также были получены зависимости темнового счёта от перенапряжения при фиксированной температуре, Рис. 2.11.



а)



б)



в)

Рисунок 2.11: Темновой счёт от перенапряжения при различных температурах, а) MPPC S10931-100P; б) MicroFC-30035-SMT; в) MPPC S14160-3050HS.

Как можно видеть, при больших перенапряжениях зависимость перестает быть линейной, что обусловлено усилением кратного учета и вторичных сигналов. По полученным данным можно определить для каждого из кФЭУ рабо-

чую точку по напряжению, по известному темновому току или коэффициенту усиления.

2.2 Относительная вероятность генерации лавины

Полное измерение эффективности регистрации фотонов довольно трудоёмкая задача (требуется контроль интенсивности засветки) и в полной мере в данной работе не производилась. В формуле 1.6, геометрическая F и квантовая QE эффективности не зависят от перенапряжения, а вероятность рождения лавины A_p зависит. Эта величина была измерена в рамках данной работы, похожие измерения производились в работе [8].

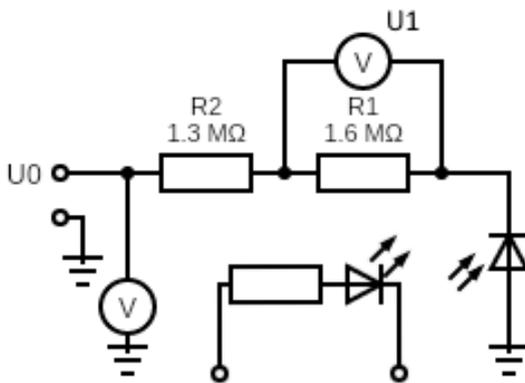


Рисунок 2.12: Схема измерения измерения тока в кФЭУ с засветкой.

В документации на кФЭУ часто приводится кривая эффективности регистрации от длины волны для конкретного перенапряжения. Измеренные в данной работе зависимости относительной вероятности рождения лавины от перенапряжения позволяют пересчитывать эффективность для других перенапряжений. При добавлении к существующей схеме 2.1 фиксированной засветки получим схему указанную на Рис. 2.12. Далее предполагается, что температура кФЭУ фикси-

рована. Полный ток протекающий в такой системе состоит из темнового тока и тока засветки: $I_{tot} = I_{light} + I_{dark}$, где $I_{light} = \nu(\lambda) \cdot PDE(\lambda, \delta V) \cdot C_1 \cdot \delta V$, где $\nu(\lambda)$ - количество фотонов засветки попадающих на фотоприемную поверхность. Тогда зная общий $I_{tot,0}$ и темновой $I_{dark,0}$ токи при некотором перенапряжении δV_0 и некоторой фиксированной засветке для других перенапряжений

при той же засветке можно получить следующую относительную величину:

$$\frac{PDE(\lambda, \delta V)}{PDE(\lambda, \delta V_0)} = \frac{I_{tot} - I_{dark}}{I_{tot,0} - I_{dark,0}} \cdot \frac{\delta V_0}{\delta V}, \quad (2.1)$$

С другой стороны, используя соотношение 1.6 для PDE через другие параметры кФЭУ видим, что из множителей PDE сокращаются геометрический фактор и квантовая эффективность, то есть отношение эффективностей регистрации при фиксированной длине волны равно отношению вероятностей породить лавину:

$$\frac{PDE(\lambda, \delta V)}{PDE(\lambda, \delta V_0)} = \frac{A_p(\lambda, \delta V)}{A_p(\lambda, \delta V_0)}, \quad (2.2)$$

Для проведения данных измерений в установке на Рис. 2.12 в качестве источника засветки использовались светодиоды четырех различных диапазонов длин волн с пиковым значением в точках 627 нм, 587 нм, 502 нм, 400 нм. Для МРРС S10931-100P результаты измерения представлены на Рис. 2.13.

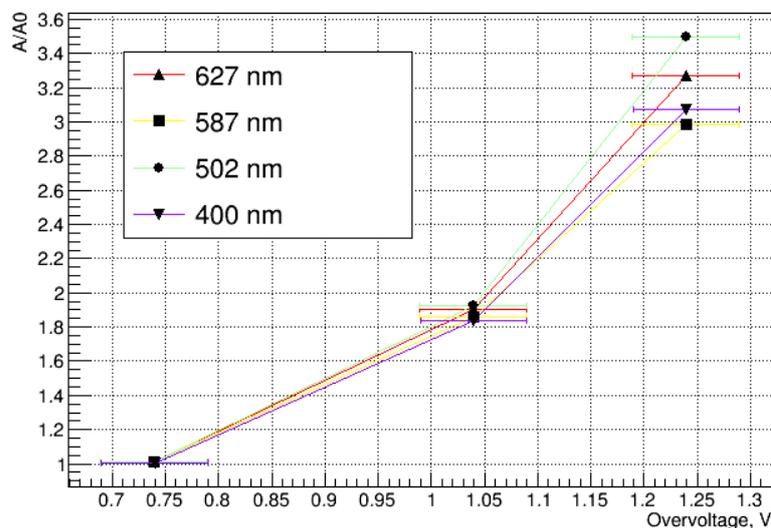
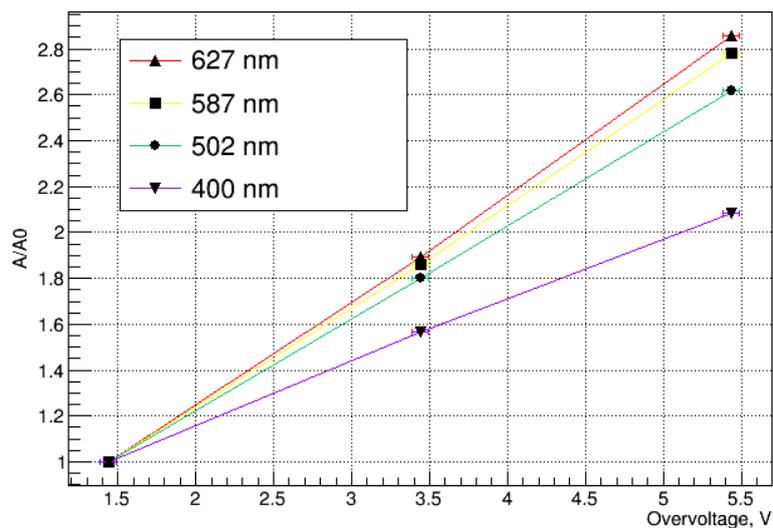


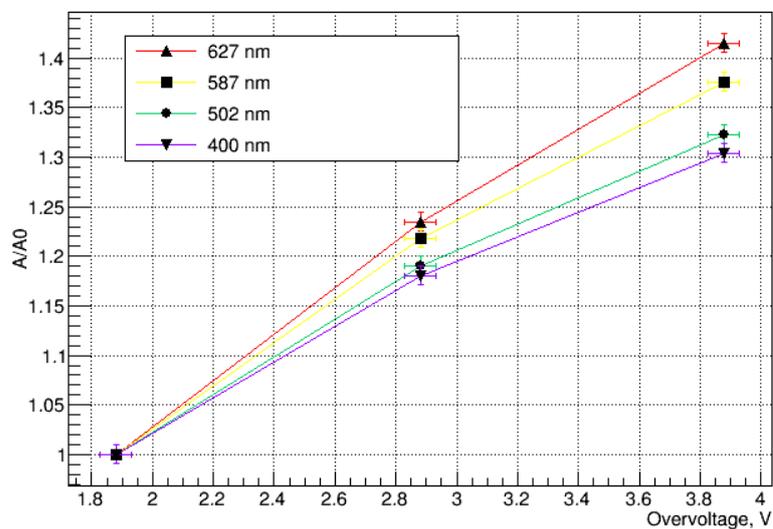
Рисунок 2.13: Относительная вероятность рождения лавины от перенапряжения МРРС S10931-100P.

Видно, что относительная вероятность слабо зависит от длины волны поступающей засветки, уменьшение относительной вероятности при уменьшении

длины волны может быть объяснено тем, что для более коротких длин волн длина поглощения света в кремнии меньше и соответственно такие фотоны поглощаясь вне области с высоким электрическим полем с меньшей вероятностью генерируют электрон-дырочную пару. Аналогичный результат можно наблюдать для двух других кФЭУ на Рис. 2.14.



а)



б)

Рисунок 2.14: Относительная вероятность рождения лавины от перенапряжения а) MicroFC-30035-SMT б) MPPC S14160-3050HS.

2.3 Измерения гасящего сопротивления

Для вычисления длительности сигнала с кФЭУ измерялось гасящее сопротивление. Для этого кФЭУ на схеме изображенной на Рис. 2.1 подключался не в обратном, а в прямом смещении. Таким образом были получены вольт-

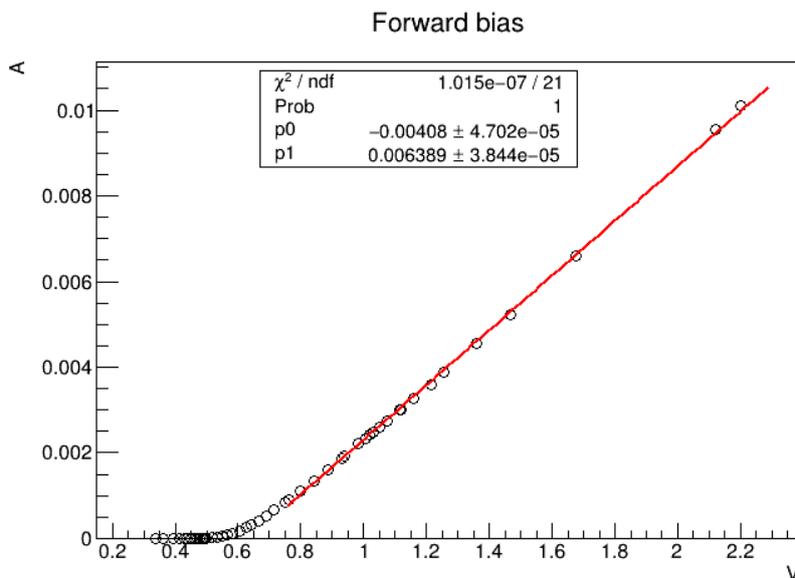


Рисунок 2.15: Вольт-амперная характеристика МРРС S10931-100Р при прямом смещении.

амперные характеристики прямого смещения аналогичные представленной на Рис. 2.15 характеристики для МРРС S10931-100Р. В Таблице 2.1 представлены общее гасящее сопротивление (ОГС) - непосредственно измеренное сопротивление всего кФЭУ, число ячеек и среднее гасящее сопротивление ячейки (ГСЯ) - произведение общего гасящего сопротивления на количество ячеек.

Таблица 2.1: Гасящее сопротивление

кФЭУ	ОГС, Ом	$N_{\text{яч}}$	ГСЯ, кОм
МРРС S10931-100Р	156.1 ± 1.9	900	140.5 ± 1.7
MicroFC-30035-SMT	87.4 ± 1.4	4774	417.0 ± 6.4
МРРС S14160-3050HS	126.1 ± 0.8	3531	445.3 ± 2.8

Для каждого кФЭУ исходя из указанной в документации к нему полной ёмкости C_0 была рассчитана средняя ёмкость одной ячейки $C_1 = C_0 / N_{\text{ячеек}}$, после

чего посредством измеренных сопротивлений гашения были получены характерные времена гашения лавин (Таблица 2.2).

Таблица 2.2: Время гашения

кФЭУ	C_0 , пФ	C_1 , фФ	τ_2 , нс
MPPC S10931-100P	320	355.5	49.9
MicroFC-30035-SMT	500	178.0	74.2
MPPC S14160-3050HS	850	141.6	63.1

3 Счётчик на основе кристалла чистого CsI и кФЭУ

3.1 Спектрометрический тракт

Для наблюдения сигнала использовался усилитель, схема которого изображена на Рис. 3.1, коэффициент усиления $K = 10$. Чтобы зарегистрировать сигнал усилитель нужно знать какие искажения может вносить усилитель. Как упоми-

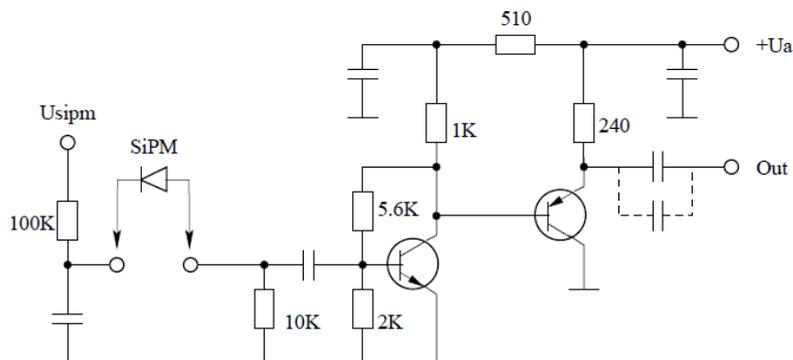


Рисунок 3.1: Схема подключения кФЭУ для оцифровки сигнала.

налось в 1.3 форма сигнала с кФЭУ имеет следующий вид:

$$I(t) = I_0 \cdot (e^{-t/\tau_2} - e^{-t/\tau_1}), \quad (3.1)$$

где τ_2 - время гашения лавины (порядка 50 нс), τ_1 - время образования лавины (порядка 1 нс). Здесь кФЭУ можно считать источником тока. Интегрирующий фильтр (100 кОм, 0.1 мкФ) и дифференцирующий фильтр на входе усилителя искажают исходную форму сигнала. Также данный усилитель инвертирует

сигнал, поэтому в дальнейшем если говорится о росте или спаде сигнала, то имеется в виду рост или спад его неинвертированной формы.

Выходной сигнал с усилителя поступал на АЦП CAEN V1742B [9] и оцифровывался. В данном АЦП используется чип DRS4, поступающий сигнал постоянно записывается в аналоговый циклический буфер (матрица из конденсаторов). При прерывании или срабатывании порога запись останавливается и содержимое буфера оцифровывается в течении времени около 100 мкс. Триггер может выставляться как по пороговому значению, так и по срабатыванию другого канала. Для регистрации сигнала V1742B имеет четыре режима по частоте считывания: 5, 2.5, 1.0, 0.75 ГС/с. В данной работе использовались частоты 5 и 2.5 ГС/с. Для обращения к модулю АЦП использовалось программное обеспечение [10]. Были получены формы темновых одноэлектронных сигналов для трех кФЭУ с одинаковым коэффициентом усиления $M = 2.5 \cdot 10^6$, Рис. 3.2.

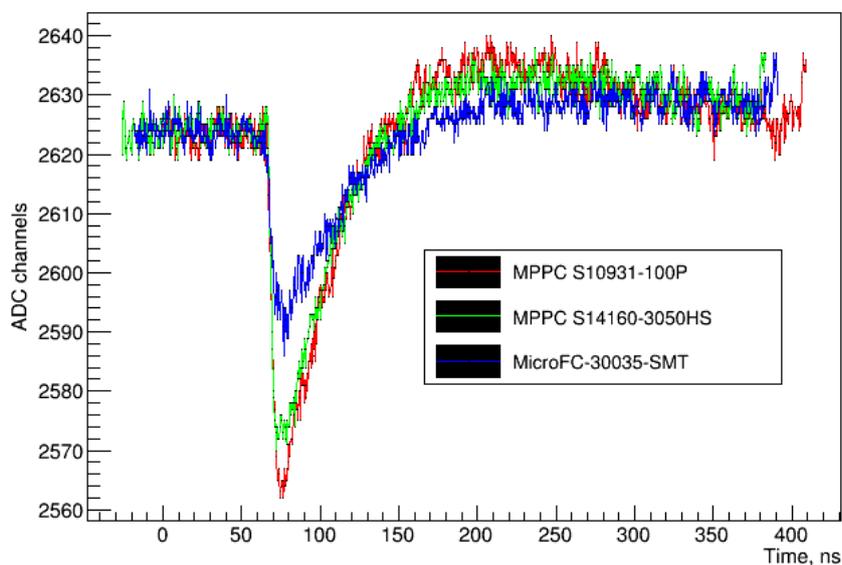


Рисунок 3.2: Одноэлектронные срабатывания для различных кФЭУ.

Можно видеть, что хвост сигнала падает ниже чем досигнальная нулевая линия, что обусловлено упомянутыми ранее искажениями сигнала. Как было измерено, времена нарастания полученных сигналов находятся в диапазоне от 5 до 7 нс, что обусловлено конечными временными характеристиками транзи-

сторгов усилителя.

Для дальнейших измерений использовался только MPPC S14160-3050HS из-за сравнительно малого темнового счёта и высокой фотоэлектронной эффективности. На кФЭУ подавалось перенапряжение $\delta V = 2.7$ В, соответствующее коэффициенту усиления $2.5 \cdot 10^6$. При таком коэффициенте усиления амплитуда сигнала одноэлектронного срабатывания для этого кФЭУ, как было измерено, около 50 каналов АЦП.

3.2 Счётчик с одним кФЭУ

Был собран счётчик на основе кристалла чистого CsI (приблизительные размеры $6 \times 6 \times 30$ см³), на одном из торцов кристалла был закреплен кФЭУ, для увеличения светосбора использовалась оптическая смазка BC-630, с коэффициентом преломления $n = 1.465$. Кристалл обёрнут слоем тефлона для увеличения светосбора и помещён в алюминизированный лавсан проводящей стороной внутрь для электромагнитной экранировки и изоляции от внешнего света. Провода с кФЭУ выводились на плату с усилителем откуда сигнал поступал на АЦП. С помощью данного счётчика регистрировались космические мюоны, наиболее вероятное энерговыделение в кристалле с такими размерами составляет приблизительно 33 МэВ и соответствует пику в амплитудном распределении сигналов. На АЦП был поставлен триггер по порогу, порог срабатывания соответствовал четырем фотоэлектронам. Полученный спектр изображен на Рис. 3.3.

Так как амплитуда одноэлектронного срабатывания соответствует ≈ 50 делений АЦП (или примерно 12 мВ), тогда имеем, что число фотоэлектронов в пике по амплитудам 30.5 ± 0.8 . Тогда световыход ϕ равен (0.92 ± 0.02) ф. э./МэВ.

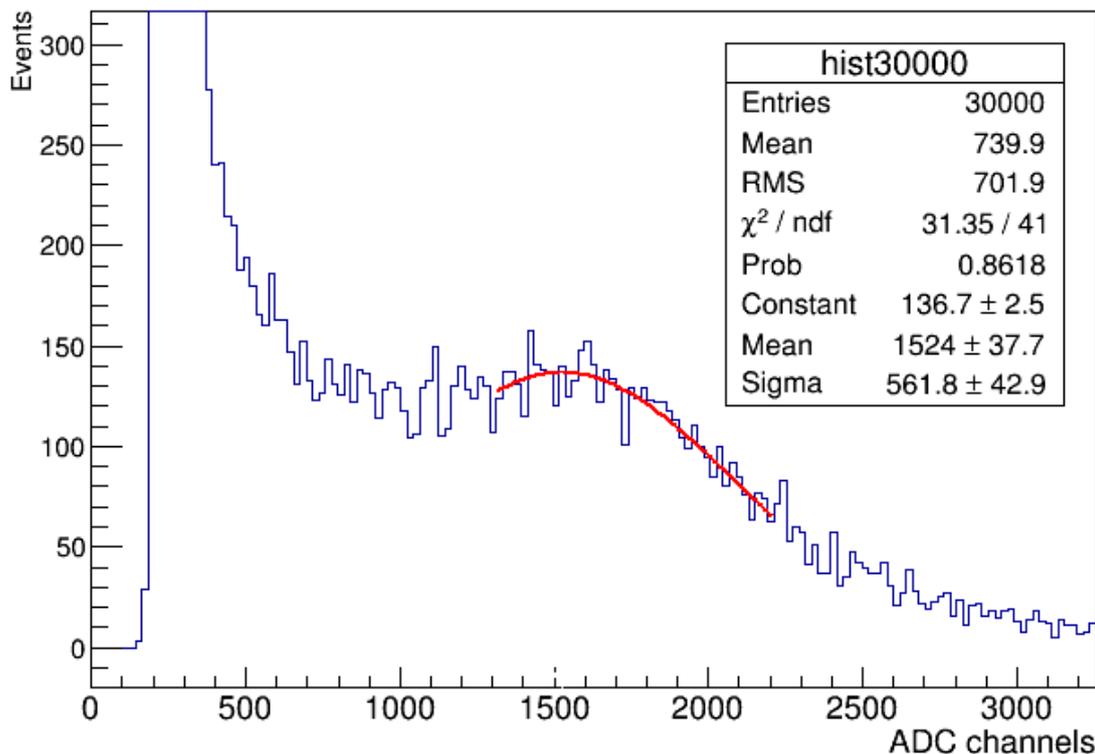


Рисунок 3.3: Спектр космических мюонов.

3.3 Измерение временного разрешения, счётчик с двумя кФЭУ

На торец кристалла было установлено два кФЭУ на небольшом отдалении друг от друга. Для измерения временного разрешения срабатывание одного кФЭУ по пороговому значению использовалось в качестве триггера для считывания сигнала с обоих кФЭУ. Считывание производилось при частоте регистрации 5 ГС/с, то есть одно деление по времени составляет 200 пс. Из полученных данных было построено распределение по разности времен начал зарегистрированных от одного триггера сигналов, Рис. 3.4.

Можно видеть, что помимо центрального пика, описывающегося гауссовым распределением, есть несколько небольших пиков в подложке, обусловленных наводками и длинной компонентой (1000 нс) света кристалла чистого CsI. Раз-

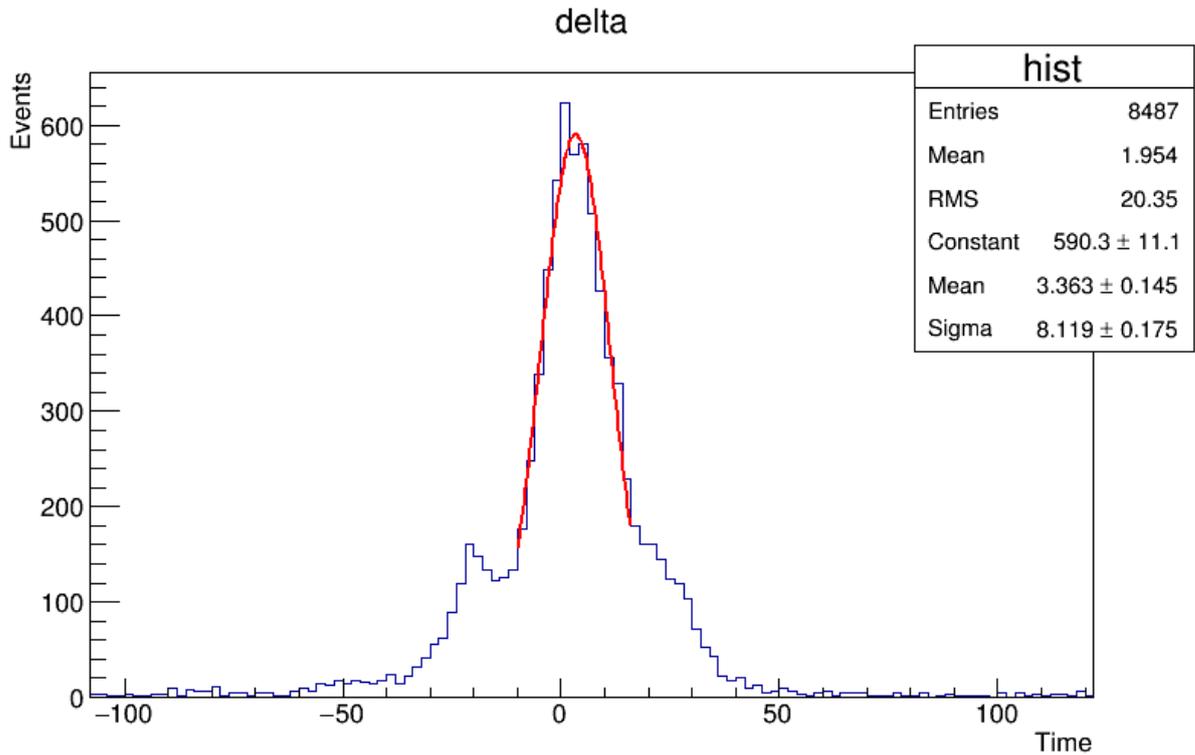


Рисунок 3.4: Распределение разностей времен начала сигналов, одно деление временной шкалы составляет 200 пс.

брос центрального пика составляет около 8 делений, что соответствует временному разбросу в 1.6 нс. Так как измерение производилось с двух независимых кФЭУ, то если временное разрешение счётчика для каждого из них δ_0 то общее разрешение разности времён двух кФЭУ есть $\delta_1 = \delta_0 \cdot \sqrt{2} = 1.6$ нс таким образом $\delta_0 = 1.1$ нс.

Далее отбирались сигналы с амплитудой N_0 равной 30 ± 6 фотоэлектронов (измеренный ранее пик в спектре космических мюонов) и рассматривалось распределение разностей их времен соответствующих различным порогам. Так как общая длительность вспышки, соответствующая короткой компоненте времени света кристалла чистого CsI, приблизительно равна $\tau = 30$ нс, то в среднем за время T приходит N_T фотонов:

$$N_T = N_0 \cdot \int_0^T e^{-t/\tau} dt = N_0 \cdot (1 - e^{-T/\tau}). \quad (3.2)$$

Если $N_T \ll N_0$ то $N_T \approx N_0 \cdot T/\tau$, тогда N_T в среднем прибывает за время $T = \tau \cdot N_T/N_0$, если флуктуация N_T составляет $\sqrt{N_T}$ то флуктуация времени T , $\delta_{0,T} = \tau/\sqrt{N_0} \cdot \sqrt{N_T/N_0}$, что верно для $N_T \ll N_0$ и соответственно $T \ll \tau$. Более общий расчёт даёт следующий результат:

$$\delta_{0,T} = \frac{\tau}{\sqrt{N_0}} \sqrt{\frac{x}{1-x}}, \quad (3.3)$$

где $x = N_T/N_0$. Для двух кФЭУ разрешение соответственно: $\delta_{1,T} = \sqrt{2} \cdot \delta_{0,T}$. Зависимость временного разрешения двух кФЭУ, $\delta_{1,T}$ от x показана на Рис. 3.5.

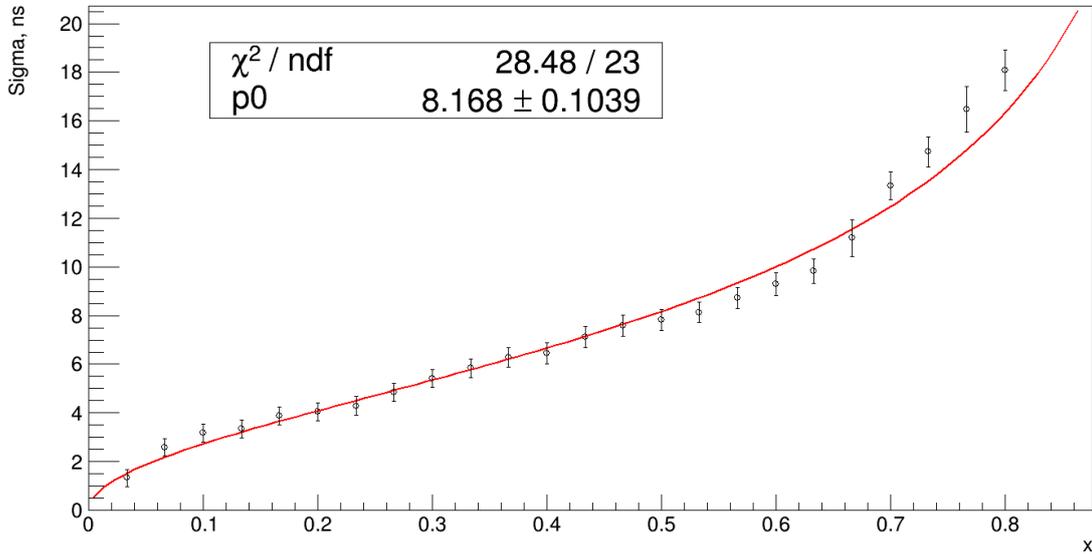


Рисунок 3.5: Зависимость временного разброса от относительного порога.

Коэффициент $\sqrt{2} \cdot \tau / \sqrt{N_0}$ с учётом погрешности N_0 равен (7.7 ± 0.7) нс. Что согласуется со значением данного коэффициента, полученного фитированием временного разрешения: (8.2 ± 0.1) нс.

Зная световыход, получим выражение для временного разрешения от энергии для одноэлектронного порога для одного кФЭУ:

$$\tau/N_0 = \tau/\phi E \approx 32.6/E(\text{МэВ}) \text{ нс}. \quad (3.4)$$

Собственное разрешение кФЭУ ≈ 50 пс. При данной конструкции счётчика та-

кое разрешение должно достигаться при энерговыделении 0.65 ГэВ. При меньших энергиях временное разрешения счётчика с кФЭУ ограничено конечным временем высвечивания сцинтилляционного света (с компонентами 30 нс и 1000 нс) в кристалле чистого CsI.

Заключение

В данной работе были измерены основные характеристики для трех кФЭУ различных производителей:

- напряжение пробоя в зависимости от температуры
- темновой ток в зависимости от обратного смещения и температуры
- относительная вероятность образования лавины от перенапряжения и длины волны засветки
- сопротивление гашения
- на основе измерений был выбран подходящий кФЭУ, MPPC S14160-3050HS, для использования в счётчике

Был собран счётчик на основе кристалла чистого CsI с использованием кФЭУ. Для счётчика был измерен световой выход (0.92 ± 0.02) ф. э./МэВ. Далее был собран счётчик с двумя кФЭУ, на котором было измерено временное разрешение. Временное разрешение счётчика с кФЭУ Hamamatsu MPPC S14160-3050HS для энерговыделения вплоть до 650 МэВ определяется конечным временем высвечивания в сцинтилляционном свете (30 нс) в кристалле чистого CsI и небольшим световым выходом, для одноэлектронного порога оно составило 32.6 нс/Е[МэВ].

Благодарности

Выражаю благодарность Б. И. Сикачу за разработку ПО для V1742B

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- [1] Bondar A. E. Project of a Super Charm-Tau factory at the Budker Institute of Nuclear Physics in Novosibirsk // *Physics of Atomic Nuclei*. — 2013. — сентябрь. — Vol. 76, no. 9. — P. 1072–1085. — URL: <https://doi.org/10.1134/S1063778813090032>.
- [2] Experience with CsI(Na) crystals for calorimetry / V.M Aulchenko, B.O Baibusinov, E.M Baldin et al. // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. — 1996. — Vol. 379, no. 3. — P. 502–504. — Proceedings of the Sixth International Conference on Instrumentation for Experiments at e⁺e⁻ Colliders. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0168900296005621>.
- [3] Upgrade of the SND electromagnetic calorimeter / M.N. Achasov, A.G. Bogdanchikov, V.P. Druzhinin et al. // *Journal of Instrumentation*. — 2020. — jun. — Vol. 15, no. 06. — P. C06011–C06011. — URL: <https://doi.org/10.1088/1748-0221/15/06/c06011>.
- [4] Электромагнитный калориметр на основе сцинтилляционных кристаллов CsI для детектора КМД-3 / В. М. Аульченко [и др.]. - Новосибирск : Ин-т ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, 2008. - 45, [1] с. : ил., табл.; 20 см. - (Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН / Российская акад. наук, Сибирское отд-ние; ИЯФ 2008-39).

- [5] Musienko Yu. V. ADVANCES IN AVALANCHE PHOTODIODES // Innovative Detectors for Supercolliders. — 2004.
- [6] Characterization and simulation of the response of Multi-Pixel Photon Counters to low light levels / A. Vacheret, G.J. Barker, M. Dziewiecki et al. // [Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment](#). — 2011. — Vol. 656, no. 1. — P. 69–83. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900211014513>.
- [7] A. Ghassemi K. Sato K. Kobayashi. — MPPC, 2021. — Jun.
- [8] Characterization of three high efficiency and blue sensitive silicon photomultipliers / A. Nepomuk Otte, Distefano Garcia, Thanh Phuc Nguyen, Dhruv Purushotham // [Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Section A: Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment](#). — 2017. — Vol. 846. — P. 106–125.
- [9] User Manual UM4279 V1742/VX1742 32+2 Channel 12bit 5 GS/s Switched Capacitor Digitizer Rev. 8 - February 05th, 2020.
- [10] VMEpp [Электронный ресурс]. — URL: <https://github.com/LRDPRDX/VMEpp/tree/V1742B>. — [Дата обращения: 05.06.2022].