

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ».

Физический факультет  
Кафедра общей физики  
Иванов Даниил Русланович

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Сбор данных с кремниевых фотоэлектронных умножителей при помощи  
ВЦП DIRICH**

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №19311

**Научный руководитель:**

к. ф.-м. н. А.Ю. Барняков  
Оценка научного руководителя

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

**Преподаватель практикума**

Оценка преподавателя практикума

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

**Куратор практикума:**

к.т.н. В.Т. Астрелин  
Итоговая оценка

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

Новосибирск 2020

## **Аннотация**

Целью данной работы является проверка возможности сбора данных с кремниевого фотоумножителя, при помощи время-цифрового преобразователя DiRich. Для этого были измерены скорость счета при отсутствии засветки для разных напряжений смещения, подаваемых на КФЭУ, и определён время прихода сигнала относительно синхроимпульса лазера. На основании полученных данных построены зависимость “темновой” скорости счета от напряжения смещения и распределение времени над порогом сигнала при наличии засветки. Произведена численная оценка среднего количества зарегистрированных фотонов в событии, которая показала, что использование DiRich с КФЭУ без применения промежуточного усилителя неэффективно.

Ключевые слова: кремниевый фотоумножитель, фотонный детектор, DiRich, время-цифровой преобразователь.

## 1. Введение

Кремниевые фотоумножители (КФЭУ) являются новыми фотонными детекторами. Их потенциал активно изучается многими научными лабораториями, работающими в разных областях, таких как физика высоких энергий, ядерной физике, калориметрии и астрофизике.

Основными преимуществами КФЭУ перед ФЭУ являются малые размеры, нечувствительность к внешнему магнитному полю и гораздо меньшее требуемое напряжение (десятки вольт). Такие характеристики, как эффективность детектирования фотонов и коэффициент усиления, у кремниевых и традиционных фотоумножителей сопоставимы. Несмотря на всё это у КФЭУ есть и недостатки по сравнению с ФЭУ: низкая радиационная стойкость и высокие шумы (от сотен килогерц до мегагерц на квадратный миллиметр) — они зависят температуры (при изменении температуры на 10 градусов шумы изменяются примерно вдвое — как увеличиваются при возрастании температуры, так и уменьшаются при снижении температуры).

В данный момент сразу несколько крупных научных групп изучают возможность внедрения кремниевых фотоумножителей в уже построенные и только проектируемые установки. Одной из таких установок должна стать Супер Чарм-Тау фабрика в Новосибирске, предлагаемый ИЯФ СО РАН мега-проект по физике высоких энергий. Учитывая специфику работы на пучке, фотонный детектор должен быть устойчив к воздействию внешнего магнитного поля (порядка 1 Тл), поэтому КФЭУ является привлекательным вариантом для использования в этой установке, как и в принципе во многих других ускорителях: PANDA (FAIR, Германия), Belle II (КЕК, Япония), ALICE (ЦЕРН, Швейцария). Главной проблемой на пути практической реализации является сложность сбора и обработки получаемых с КФЭУ сигналов из-за высокого уровня собственных шумов прибора.

В ИЯФ создан и испытывается прототип детектора черенковских колец на основе фокусирующего аэрогеля, в котором используются МаФЭУ

(мультианодный фотоумножитель) Hamamatsu и усилители-дискриминаторы со встроенным время-цифровым преобразователем (ВЦП) DiRich производства GSI, Германия. Было предложено заменить ФЭУ на КФЭУ. Целью данной работы является сбор данных с кремниевых фотоэлектронных умножителей при помощи имеющейся электроники, чтобы определить насколько эффективно использовать её с КФЭУ.

## **2. Кремниевый фотоумножитель**

КФЭУ — это матрица параллельно соединенных микроячеек (или пикселей), состоящая из лавинных фотодиодов (ЛФД) и гасящего резистора, соединенных последовательно. Фотодиод работает при напряжении на несколько вольт больше напряжения пробоя (в так называемом Гейгеровском режиме, рис.1). ЛФД работающий в Гейгеровском режиме показывает лишь наличие фотонов, падающих на него без информации о их количестве (рис. 2) [1]. Учитывая то, что все фотодиоды соединены параллельно, сигнал с фотоумножителя является суммой сигналов со всех ЛФД.

После “загорания” (срабатывания) ячейки, то есть после поглощения ею фотона, начинается лавинное умножение, которое вызывает фототок через пиксель. Из-за этого происходит падение напряжения на гасящем резисторе, что, в свою очередь, уменьшает напряжение на диоде до значения ниже напряжения пробоя, тем самым предотвращая дальнейшее распространения лавины (рис.1). После того, как фототок сведен на нет, напряжение на фотодиоде восстанавливается до номинального напряжения смещения. Время, требуемое для этого, называется временем восстановления. Следовательно, КФЭУ можно использовать, если средняя частота срабатываний на каждый пиксель меньше обратного от времени восстановления.

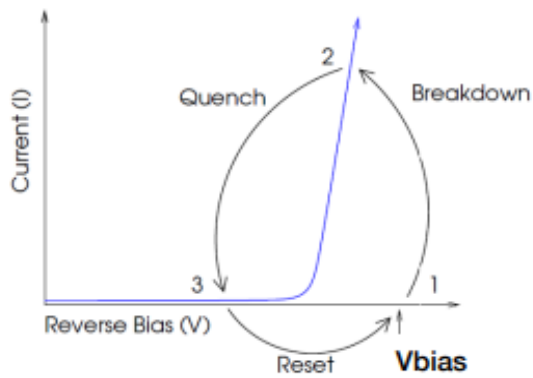


Рис.1 Работа ЛФД в Гейгеровском режиме

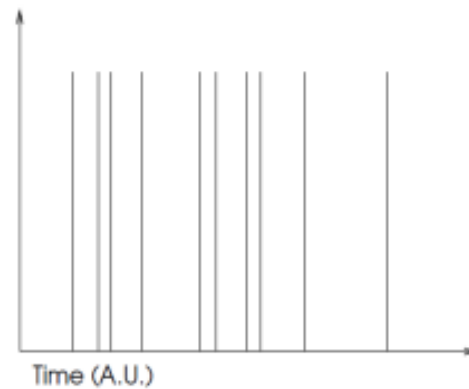


Рис. 2 Сигнал ЛФД, работающего в Гейгеровском режиме

Основными источниками погрешности, помимо высокой частоты темновых срабатываний, являются перекрёстные помехи и послеимпульс. Перекрёстные помехи появляются, когда от одного фотона загораются сразу несколько пикселей. То есть при пробое, происходящем после падения фотона на пиксель, образуются фотоны, некоторые из которых обладают достаточной энергией и находятся в подходящем положении, чтобы достичь соседних пикселей и зажечь их. Считается, что послеимпульс происходит, если электроны, образующиеся в лавине, захватываются и выпускаются снова после некоторой задержки, которая может длиться от наносекунд до нескольких микросекунд [2].

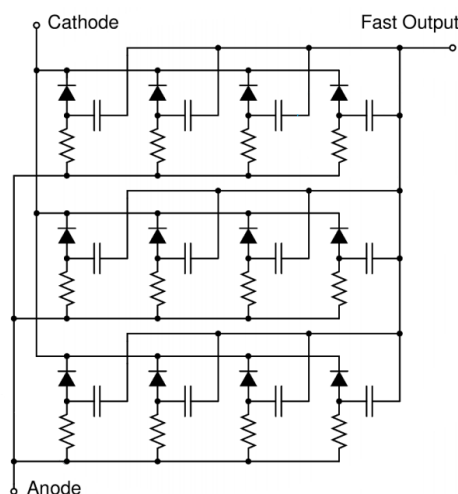


Рис. 3 Структура кремниевого фотоумножителя

### 3. DiRich

DiRich является время-цифровым преобразователем (ВЦП или TDC), то есть устройством, распознающим события и выдающее цифровое представление времени полученного события. Измерение времени происходит, когда величина сигнала больше определённого порога, который можно изменять. Точность измерения времени у DiRich равна 20 пс. Высокая точность оправдана необходимостью определения количества фотонов в событии. Это можно сделать с помощью времени над порогом (Time over Threshold — ToT, то есть длительность измерения времени сигнала). С помощью ToT можно восстановить амплитуду сигнала и, следовательно, количество упавших фотонов на сенсор (при условии, что вероятность попадания более одного фотона на один пиксель пренебрежимо мала).

Несмотря на то, что точность DiRich равна 20 пс, есть так называемое “мёртвое время” (dead-time на рис. 4) после каждого события на ВЦП (для DiRich “мёртвое время” равно 15 нс), в течение которого он не способен “правильно” обработать следующее событие. Из-за этого задний фронт сигнала может быть не зафиксирован. Поэтому используется задержка маршрутизации (routing delay на рис. 4), то есть сигнал специально задерживается до тех пор, пока ВЦП снова сможет зарегистрировать задний фронт. Для DiRich это задержка равна 30 нс [3].

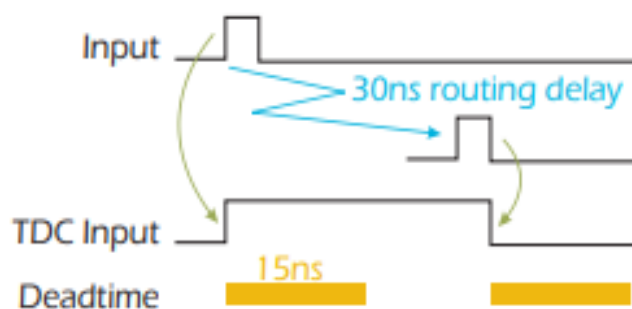


Рис. 4 Схема приёма сигнала

#### 4. Экспериментальная установка

Для эксперимента использовался КФЭУ 16-ти канальный массив ARRAYJ-300XX-16P-PCB производства SensL. Каждый пиксел данного КФЭУ обладает двумя видами выходов: быстрый (Fast Output на рис. 5) и стандартный (Standard Output на рис. 5) [4]. С быстрого выхода считывание происходит напрямую с фотоумножителя. Для чтения со стандартного выхода используется дополнительный подключенный последовательно резистор ( $R = 50$  Ом, рис. 5). Для наилучшего временного разрешения быстрого выхода используется дополнительная ёмкость ( $C = 10$  нФ, рис. 5).

В эксперименте данные снимались с двух пикселей (пиксель 2 и пиксель 3), выходы (со второго пикселя были распаяны быстрый и медленный выход, с третьего – только медленный) которых были распаяны на макетной плате, включённой в DiRich (Приложение рис. 1). Напряжение смещение, подаваемое на КФЭУ во время эксперимента, равнялось 28 В ( $V_{bias}$  на рис. 5). В качестве источника света использовался пикосекундный лазер Pilas производства NKT Photonics. Параметры импульса, подаваемого с лазера: длительность импульса 49 пс, частота 5 кГц, длина волны 409 нм. Величину засветки регулировали оптоволоконным аттенюатором, чтобы уровень шума, создаваемого лазером, не менялся.

В опыте также был использован МаФЭУ Hamamatsu H12700. Данные с него использовали как эталонные, так как квантовая эффективность, по данным производителей, у МаФЭУ и КФЭУ близка (~30% и 47%, соответственно), то есть для оценки числа фотоэлектронов с КФЭУ можно использовать МаФЭУ, и изначально плата DiRich была разработана для работы именно с этим фотоумножителем.

Лазер, КФЭУ и МаФЭУ, включённые в плату DiRich, и сама плата DiRich находятся в светозащищённом ящике для того, чтобы исключить паразитную засветку КФЭУ. DiRich подключён к плате TRV3 (Приложение рис. 2). Эта же плата производит запуск ВЦП по синхроимпульсу, полученному от лазера, с

точностью до 5 нс. TRB3 подключена к компьютеру по Ethernet кабелю. С компьютера выставляется порог для DiRich, и на компьютер происходит запись результатов.

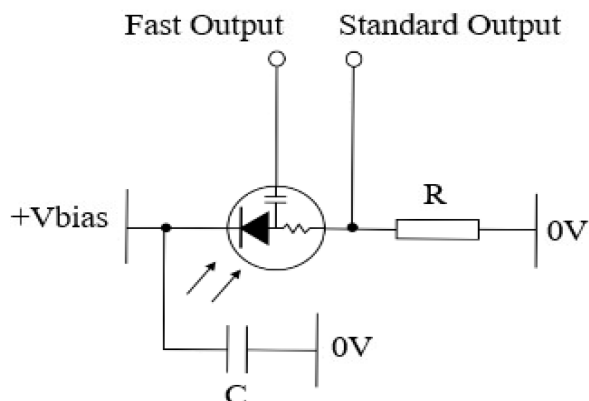


Рис. 5 Схема вывода данных с КФЭУ.

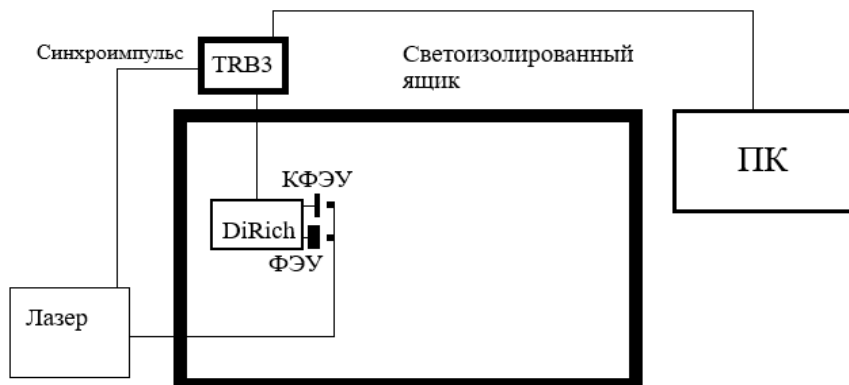


Рис. 6 Экспериментальная установка

## 5. Методика измерений

Вначале были проведены измерения, где порог дискриминатора настраивался так, что при подключенном КФЭУ и напряжении смещения 10 В (это сильно меньше напряжения пробоя, т.е. нет срабатываний с КФЭУ) не регистрировалось срабатываний с КФЭУ, таким образом устанавливался минимально возможный для работы порог дискриминатора. Так были просканированы зависимость “темновой” скорости счета (при отсутствии засветки) от напряжения смещения, подаваемого на КФЭУ.

Далее измеряли время прихода сигнал от КФЭУ и МаФЭУ при наличии засветки. При этом уровень засветки подбирали так, чтобы МаФЭУ срабатывал



не на каждый импульс (иначе оценить число фотоэлектронов не получится). При этом напряжение смещения равнялось 28 В на КФЭУ. Сканирование проводилось поочерёдно: сначала лазер направлялся в ФЭУ, а потом при тех же значениях лазер направлялся в пиксели КФЭУ, подключенные к DiRich.

## 6. Результаты

При измерении “темновой” скорости счёта (то есть без засветки) при разном напряжении смещения, подаваемого на КФЭУ, видно, что шумы с фотоумножителя малы. Более того, они меньше заявленных производителем: в данном эксперименте частота “темнового” счёта через стандартный выход при напряжении 30 В, что равняется +6 В сверх напряжения пробоя (24,2–24,7 В), равняется 20 кГц, производитель в свою очередь указывает 1350 кГц (150 кГц на мм<sup>2</sup>, площадь КФЭУ равна 9 мм<sup>2</sup>) [5]. При увеличении напряжения смещения шумы растут (Приложения рис. 3).

При измерении с засветкой времени срабатываний выяснилось, что отклик на световую вспышку у фотоумножителя Hamamatsu равняется ≈50% (отклик равняется количеству вспышек света, поделённое на количество срабатываний DiRich), у КФЭУ отклик равняется ≈4%. Также стало ясно, что с быстрого выхода сигнала почти не было (Приложение рис. 4-5).

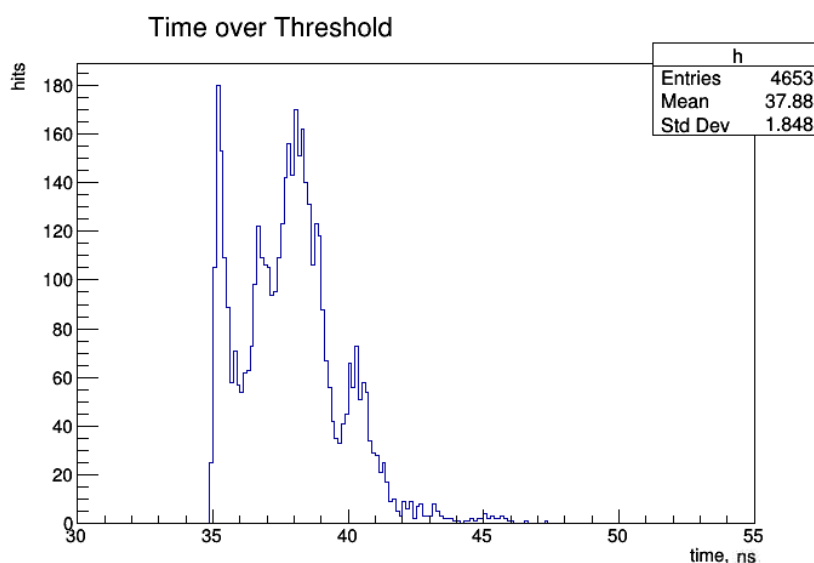


Рис. 7 Распределение времени над порогом для стандартного выхода пикселя 2 КФЭУ

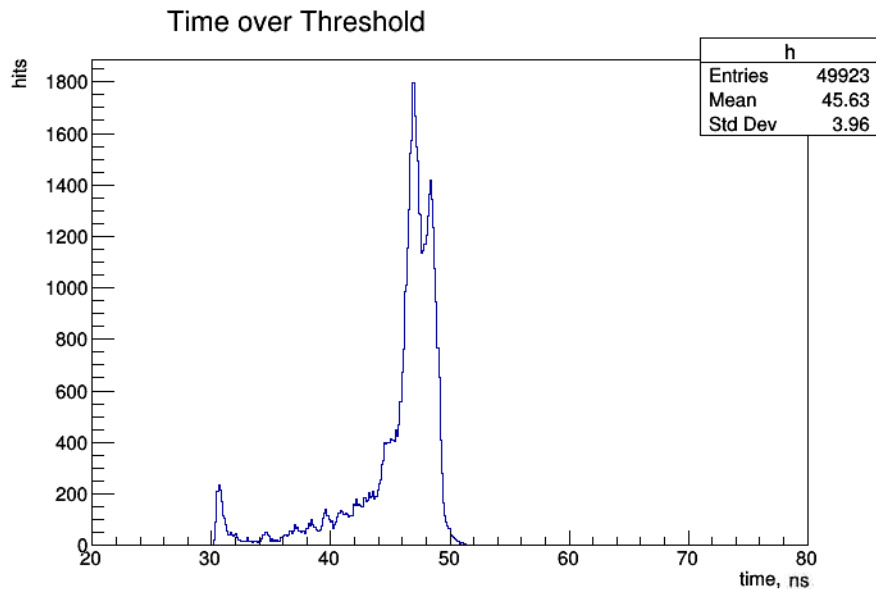


Рис. 8 Распределение времени над порогом для МаФЭУ

Измерения, отражённые на рисунках 7 и 8, были сделаны в одинаковых условиях при одинаковой засветке при помощи КФЭУ и МаФЭУ соответственно. На этих рисунках показано распределение времени над порогом, то есть времени, когда сигнал с фотоумножителя больше установленного порога на DiRich.

Предполагается, что пики, соответствующие зарегистрированным фотонам, на распределении времени над порогом подчиняются распределению Пуассона. Следовательно, это распределение описывается следующей формулой:

$$P(n, \mu) = \mu^n \cdot e^{-\mu} \div n!, (1)$$

где  $\mu$  – среднее число зарегистрированных фотоэлектронов возникших в результате фотоэффекта,  $P(n, \mu)$  – вероятность того, что образуется  $n$  фотоэлектронов. И значит среднее число фотоэлектронов определяется так:

$$\mu = -\ln P(0, \mu), (2)$$

где  $P(0, \mu)$  – вероятность отсутствия фотоэлектронов.  $P(0, \mu)$  определяется, как отношение событий, в которых не было фотоэлектронов, к общему числу событий (запусков лазера). Из формулы (2) можно рассчитать среднее число зарегистрированных МаФЭУ фотоэлектронов:  $\mu = 0,62$ .

## 7. Обсуждение результатов

Учитывая то, что среднее число зарегистрированных МаФЭУ фотоэлектронов равнялось  $\mu = 0,62$  и квантовую эффективность МаФЭУ, среднее число фотонов в засветке равнялось  $N = 2,1$ . Следовательно, среднее число зарегистрированных КФЭУ фотоэлектронов должно равняться  $\mu = 1$ . Но если посчитать среднее число зарегистрированных фотоэлектронов для кремниевого фотоумножителя, то получится  $\mu = 0,04$ . То есть ожидаемая величина в 25 раз больше полученной. Это объясняется тем, что большая часть фотоэлектронов не регистрируется.

Стоит отметить, что на графике распределения времени над порогом для МаФЭУ (рис. 8) отчётливо видны пики. Каждому пику на рисунке 8 соответствует определённое количество фотоэлектронов (каждому следующему на один фотон больше, чем предыдущему). Это значит, что в эксперименте наблюдался сигнал с амплитудой от нескольких фотонов, причиной которого была засветка от лазера.

## 8. Вывод

В ходе эксперимента выяснилось, что, используя КФЭУ и ВЦП DiRich, невозможно регистрировать одноэлектронные события. Но так как для прототипа детектора черенковских колец важна именно точность регистрации одноэлектронных событий, потому что вероятность попадания нескольких фотонов на одну ячейку КФЭУ в аэрогелевом детекторе черенковских колец детектора мала. Следовательно, для применения данного типа фотоумножителя необходимо выполнить что-то из следующего: использовать ВЦП с большим усилением сигнала, либо добавлять предусилители сигнала, либо существенно понизить уровень шумов электроники.

## Приложение

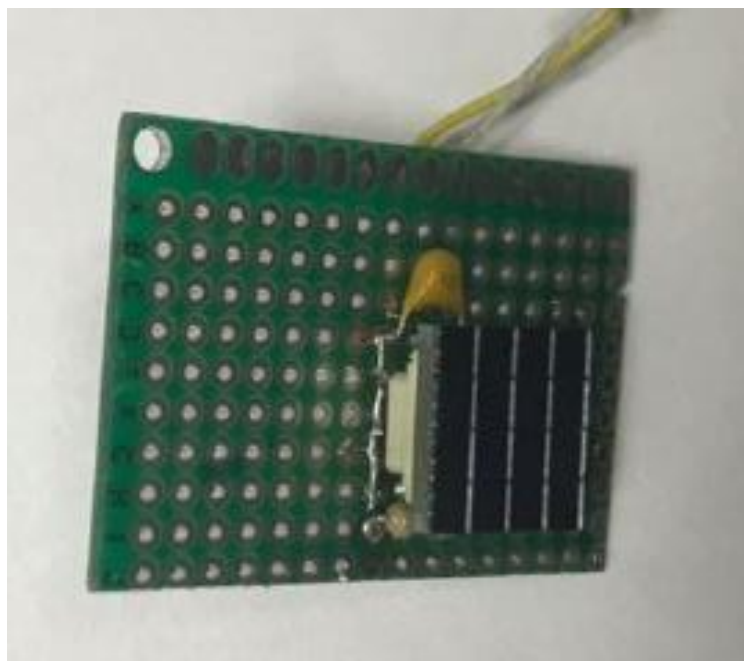


Рис. 1 КФЭУ на макетной плате

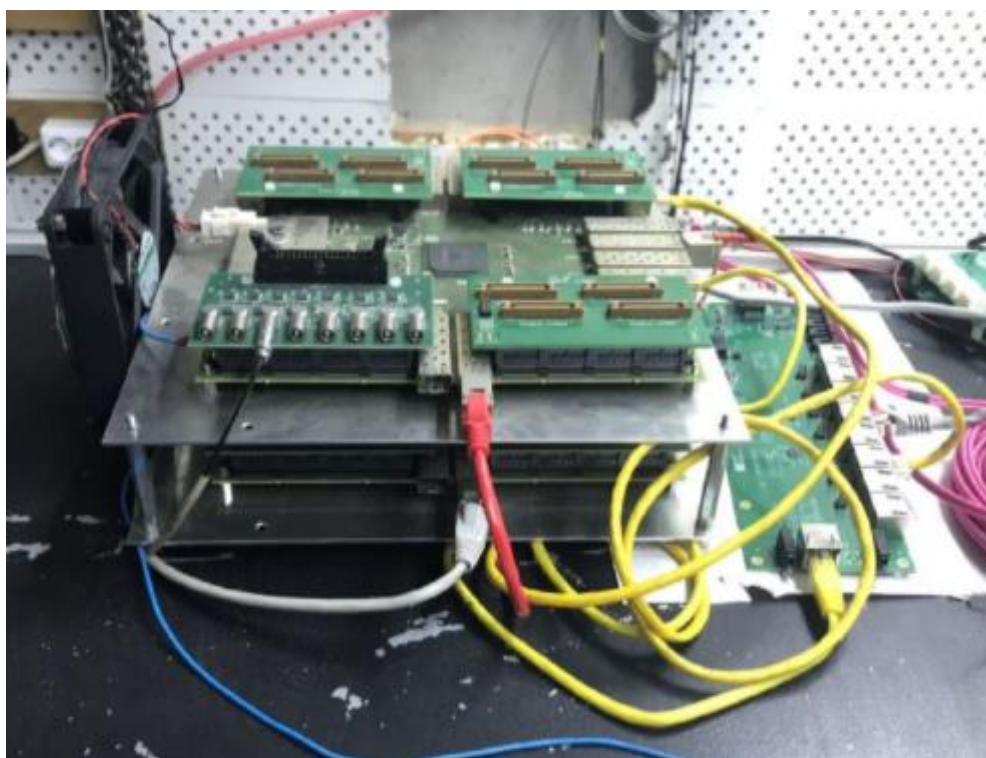


Рис. 2 TRB3 плата

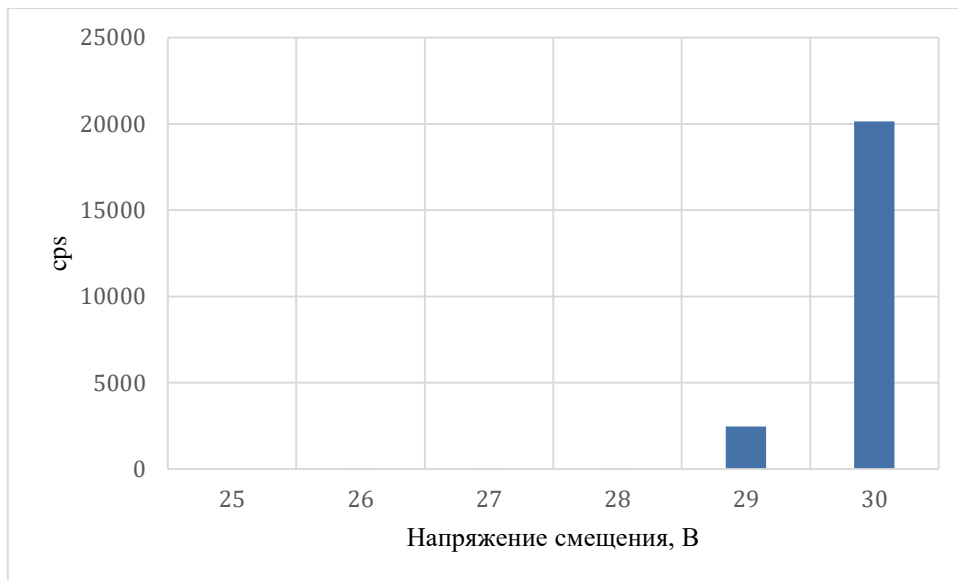


Рис 3 Зависимость количества срабатываний в секунду от напряжения смещения при отсутствии засветки с стандартного выхода КФЭУ

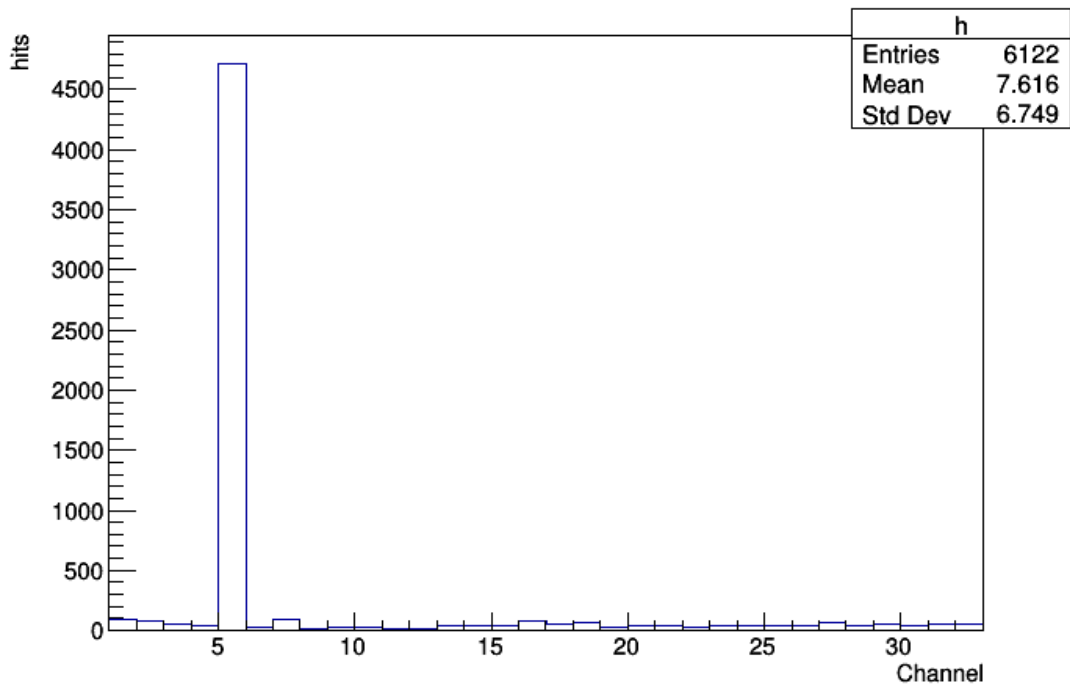


Рис. 4 Количество попаданий в каждый канал для пикселя 2 КФЭУ

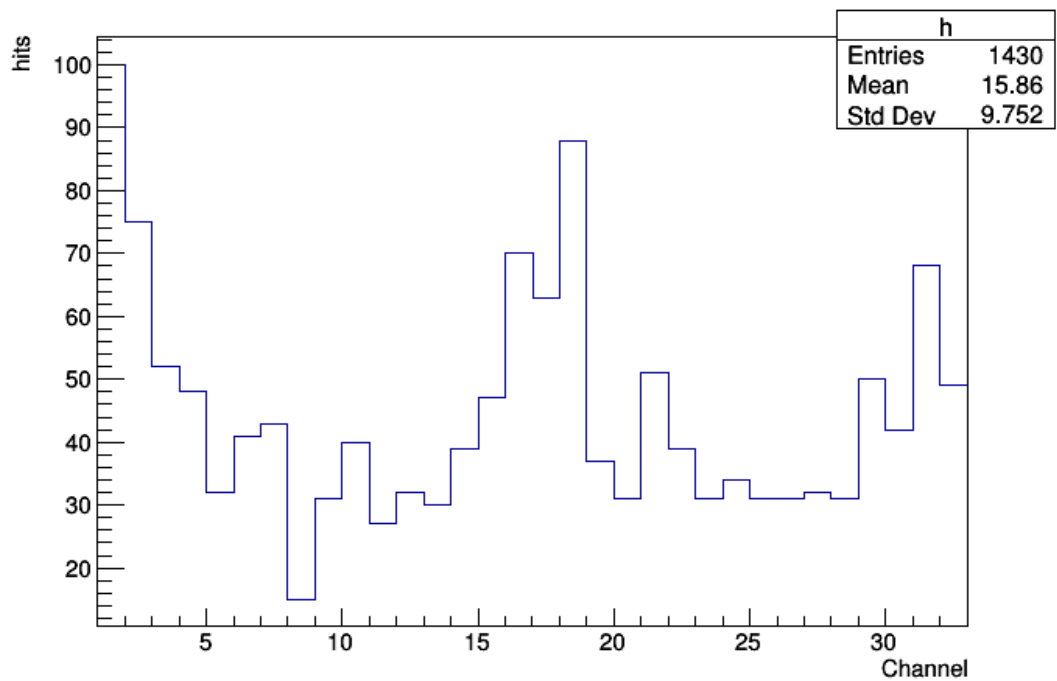


Рис. 5 Количество попаданий в каждый канал для пикселя 3 КФЭУ

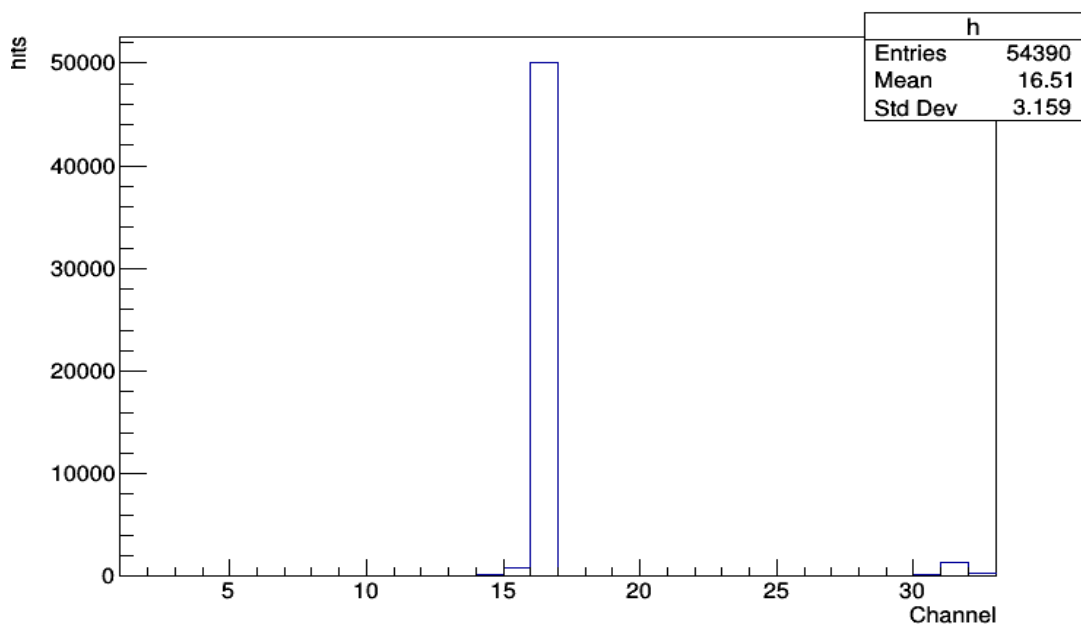


Рис. 6 Количество попаданий в каждый канал МаФЭУ

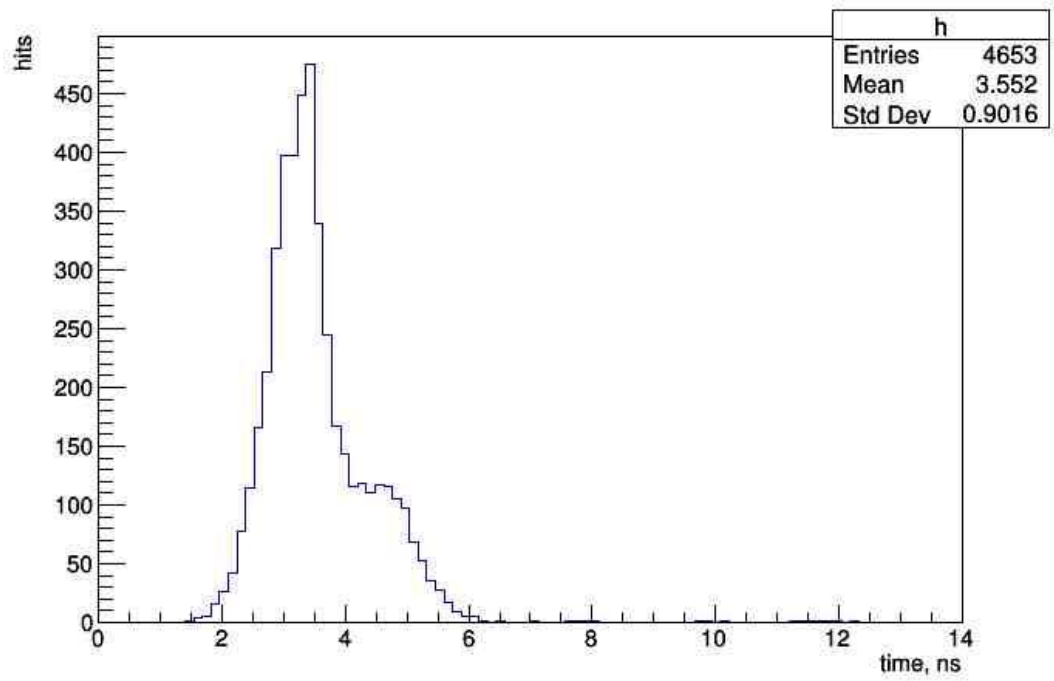


Рис. 8 Распределение времени прихода сигнала с КФЭУ

## Литература

1. SensL An Introduction to the Silicon Photomultiplier // 2017. Rev. 6.0
2. Patrick Eckert, Hans-Christian Schultz-Coulon, Wei Shen, Rainer Stamen, Alexander Tadday, Characterisation studies of silicon photomultipliers, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment // Volume 620, Issues 2–3, 2010, Pages 217-226, ISSN 0168-9002, URL <https://doi.org/10.1016/j.nima.2010.03.169>.
3. Jan Michel et al. Electronics for the RICH detectors of the HADES and CBM experiments // 2016. URL <https://jpspc29.x-matter.uni-frankfurt.de/trbweb/uploads/RichPosterTwepp2016.pdf>
4. SensL ArrayJ User Manual // 2018. Rev. 2.0 URL <https://sensl.com/downloads/ds/UM-ArrayTSV.pdf>
5. SensL J-Series High PDE and Timing Resolution, TSV Package Datasheet // 2017. Rev. 3.1 URL <https://www.sensl.com/downloads/ds/DS-MicroJseries.pdf>