

Лабораторная работа №1

Изучение принципов работы сцинтилляционных детекторов импульсного ионизирующего излучения на примере ССДИ8М-01

Цель работы: приобретение навыков работы со сцинтилляционными детекторами в лабораторных условиях и исследование основных характеристик детектора сцинтилляционного типа ССДИ8М.

Оборудование: Детектор сцинтилляционный ССДИ8М-01, блок лазерного диода, киловольтметр электростатический С196, блок питания высоковольтный СБПК20, генератор импульсов AFG-2021, осциллограф цифровой TDS-2024, комплект кабелей питания и съема сигнала.

ВВЕДЕНИЕ

Сцинтилляционный метод, применявшийся в начале 20 века (визуальный счет вспышек от α -частиц в спинтарископе с экраном из сцинтиллятора ZnS), был одним из первых методов регистрации радиоактивного излучения. Спинтарископ быстро уступил место газоразрядным счетчикам и ионизационным камерам. Однако внедрение высокочувствительных фотоумножителей (ФЭУ) и применение более совершенных сцинтилляторов привели к тому, что сцинтилляционная методика регистрации радиоактивного излучения заняла одно из ведущих мест. Детекторы, разработанные на основе сцинтилляторов и ФЭУ, являются в настоящее время основным инструментом в экспериментальной физике, физике элементарных частиц и атомного ядра.

В общем случае сцинтилляционный детектор состоит из сцинтиллятора, в котором ионизирующие частицы вызывают световые вспышки – люминесценции, ФЭУ, преобразующего световую вспышку в импульс электрического тока, и электронной системы, усиливающей и регистрирующей эти электрические импульсы.

Малое временное разрешение позволяет использовать сцинтилляционные детекторы при высоких скоростях счета и проводить измерения коротких наносекундных сигналов (и даже субнаносекундных для некоторых типов детекторов). Благодаря этому свойству стали возможны прямые измерения времени

жизни короткоживущих возбужденных состояний ядер, позитронов и мезонов. Сцинтилляционный детектор может быть не только счетным прибором, регистрирующим число частиц, но и спектрометром – прибором для измерения энергии, поскольку амплитуда импульса на выходе ФЭУ однозначно связана с величиной энергии, потерянной частицей в сцинтилляторе. Еще одним из применений сцинтилляционных детекторов является регистрация формы импульсов ионизирующего излучения (ИИ) с сохранением линейности измерений в широком диапазоне.

В данной работе проводится ознакомление с принципами работы детектора сцинтилляционного ССДИ8М-01 [1] (далее в тексте – "детектор"), и его основных частей: сцинтиллятора и ФЭУ, а также проводится исследование его основных характеристик: максимального импульсного линейного тока и временного разрешения. Детектор ССДИ8М-01 предназначен для регистрации импульсных потоков гамма- и нейтронного излучений путем преобразования их в электрический аналог.

Быстрые заряженные частицы, двигаясь в сцинтилляторе, теряют свою энергию на ионизацию и возбуждение атомов среды. Возбуждение атомов снимается в основном путем испускания квантов света с характерной для данного вещества частотой. Обычно световое излучение поглощается в среде, имеющей ограниченную прозрачность к собственному излучению (т.е. спектр излучения совпадает со спектром поглощения). Слабое перекрытие между полосами поглощения и испускания обеспечивает хорошую прозрачность сцинтиллятора к собственному излучению, что дает возможность выхода световых фотонов за пределы сцинтиллятора и их дальнейшую регистрацию. Для многих широко распространенных пластмассовых сцинтилляторов максимум спектра эмиссии составляет порядка 420 нм [2]. Световая вспышка сцинтиллятора регистрируется при помощи ФЭУ, область спектральной чувствительности которого, по возможности, должна совпадать со спектром частот, излучаемых сцинтиллятором.

ФЭУ – это фотоприбор с многократным усилением, основанным на явлении вторичной эмиссии. ФЭУ состоит из фотокатода, фокусирующего устройства, нескольких эмиттеров (динодов) и анода. Все элементы ФЭУ помещены в баллон (корпус), откачанный до высокого вакуума (10^{-5} – 10^{-6} торр). В детекторе ССДИ8М-

01 используется ФЭУ СНФТ5, имеющий сурьмяно-цезиевый фотокатод, активированный кислородом, и нанесенный в виде тонкого полупрозрачного слоя на внутреннюю сторону торцевой стенки стеклянного баллона. Для подачи напряжения на диоды используется делитель, состоящий из комплекта сопротивлений и конденсаторов (шунтирующие конденсаторы используются для обеспечения линейности шкалы детектора при регистрации импульсов большой амплитуды и длительности). На делитель подается напряжение от высоковольтного источника питания.

Световые кванты, падающие на фотокатод, вызывают фотоэффект. Возникшие при этом фотоэлектроны попадают в электрическое поле, ускоряются и фокусируются на первом диоде. При ударах электронов о диод происходит вторичная эмиссия. Электроны, выбитые из первого диода, ускоряются в следующем межэлектродном промежутке и, попадая на второй диод, в свою очередь вызывают вторичную эмиссию с него и т.д. Таким образом, число электронов от диода к диоду лавинообразно нарастает. Электроны с последнего диода собираются на аноде ФЭУ. Если σ - коэффициент вторичной эмиссии на каждом диоде, то коэффициент усиления ФЭУ рассчитывается по формуле [3]:

$$K = q \cdot \sigma^n \quad (1)$$

где q - множитель (меньше единицы), учитывающий неполное соби́рание электронов с фотокатода на первый диод; n - число диодов. Для ФЭУ типа СНФТ5 в рабочем режиме коэффициент усиления составляет $K = 2,5 \times 10^4 \div 5,0 \times 10^5$.

Поскольку коэффициент вторичной эмиссии не зависит от числа падающих электронов, то ФЭУ представляет собой линейный прибор, т.е. заряд, приносимый лавиной на анод, пропорционален числу первичных фотоэлектронов, собираемых с фотокатода, и, следовательно, пропорционален интенсивности световой вспышки, попавшей на катод. В случае, когда импульсы тока на выходе ФЭУ достаточно велики, линейность может нарушаться за счет искажения поля пространственным зарядом в области анода и последних эмиттеров, а также за счет изменения потенциалов последних эмиттеров и анода. Оба фактора вызывают дефокусировку электронных пучков и тем самым нарушают линейность выхода ФЭУ. Максимальный импульсный линейный ток ФЭУ типа СНФТ5, используемого в детекторе ССДИ8М-01, составляет не менее 2,5 А.

Время пролета электронов испытывает значительные отклонения от его среднего значения вследствие разброса начальных скоростей электронов по величине и по направлению, а также вследствие различия в длинах их траекторий (из-за недостаточной фокусировки). Поэтому даже от мгновенной световой вспышки в сцинтилляторе (δ -функция) на аноде ФЭУ будет возникать импульс, растянутый до $10^{-9} \div 10^{-8}$ с, иначе говоря, ФЭУ обладает конечным временным разрешением. Ширина на полувысоте импульсной характеристики ФЭУ типа СНФТ5 составляет менее 5 нс. При работе с органическими сцинтилляторами временное разрешение ФЭУ может оказаться сравнимым по величине со временем высвечивания сцинтиллятора, и его необходимо учитывать при определении временной разрешающей способности сцинтилляционного детектора.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Напряжение высоковольтного питания детектора ССДИ8М-01 равно минус (3300 ± 30) В. Максимальная чувствительность детектора ССДИ8М-01 к гамма-квантам радиоизотопа ^{60}Co с средней энергией 1,25 МэВ составляет $1,0 \times 10^{-12}$ А \times с \times см²/квант. Регулировка чувствительности детектора осуществляется установкой нейтральных стеклянных светофильтров между сцинтиллятором и ФЭУ. Общий вид детектора ССДИ8М-01 приведён на рисунке 1.

Детектор состоит из пластмассового сцинтиллятора поз. 2 диаметром 50 и высотой 100 мм, зафиксированного в изоляционном стакане поз. 4 из прессматериала АГ4, который вставлен в стакан поз. 3 из стали. Для обеспечения фиксированного положения сцинтиллятора по отношению к фотокатоду ФЭУ на образующей изолированного стакана поз. 4 сделан паз, который фиксируется в соответствующем выступе стакана поз. 3, стакан в свою очередь имеет в нижней части выступ, который вставляется в паз на изоляторе поз. 5. В верхней части стакана имеется крышка поз. 1. Цилиндрическая поверхность стакана поз. 3 окрашена частично в голубовато-серый, частично - в светло-дымчатый цвета, линия перехода одного цвета в другой отмечает середину сцинтиллятора. На крышке стакана поз. 1 нанесена крестообразная метка красного цвета, обозначающая центр оси сцинтиллятора. Стакан соединен с корпусом детектора поз. 8 посредством

прижимной шайбы поз. 6. Сцинтиллятор своей торцевой поверхностью прижат к окну ФЭУ поз. 7, находящемуся в корпусе детектора.

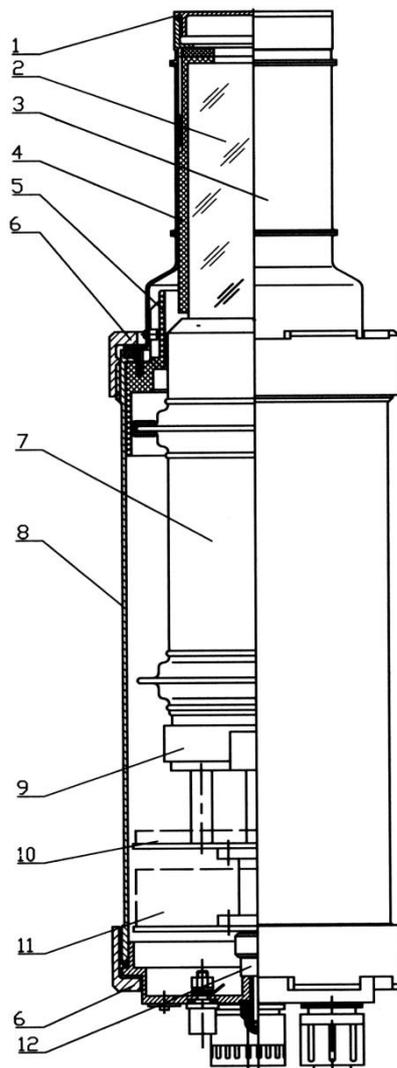


Рисунок 1 – Общий вид детектора ССДИ8М-01

Питание ФЭУ осуществляется от высоковольтного делителя, состоящего из резистивной части, смонтированной на верхней плате поз. 10, и емкостной части поз. 11. Регулировка чувствительности детектора обеспечивается с помощью нейтральных светофильтров, которые устанавливаются между сцинтиллятором и окном ФЭУ в изоляторе поз. 5. Чтобы обеспечить прижим сцинтиллятора к окну ФЭУ без светофильтров или при их установке, а также демпфировать возможные удары по детектору, при выполнении измерений используется пружинный амортизатор поз. 12. В местах сочленения деталей корпуса установлены резиновые прокладки, обеспечивающие пыле- и влагозащищенность детектора.

Внешний вид интерфейсной панели детектора ССДИ8М-01 приведен на рисунке 2.

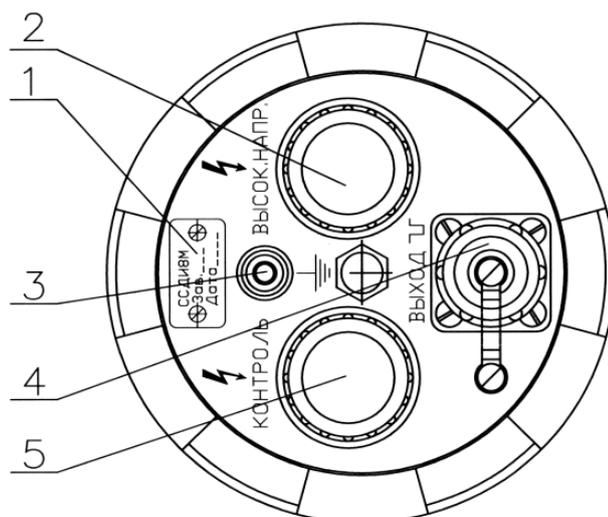


Рисунок 2 – Внешний вид интерфейсной панели детектора ССДИ8М-01

На нижней панели детектора ССДИ8М-01 расположены следующие элементы:

- два высоковольтных разъема питания и контроля напряжения питания делителя поз. 2 и поз. 5, разъемы обозначены ВЫСОК. НАПР. и КОНТРОЛЬ соответственно, рядом с разъемами изображены знаки ⚡ красного цвета;
- высокочастотный разъем типа СР-75-166ФВ поз. 4, обозначенный "ВЫХОД \square " для снятия выходного импульса тока;
- клемма заземления детектора, обозначенная знаком " \perp " поз. 3;
- шильдик поз. 1.

Схема подключения лабораторного стенда представлена на рисунке 3.

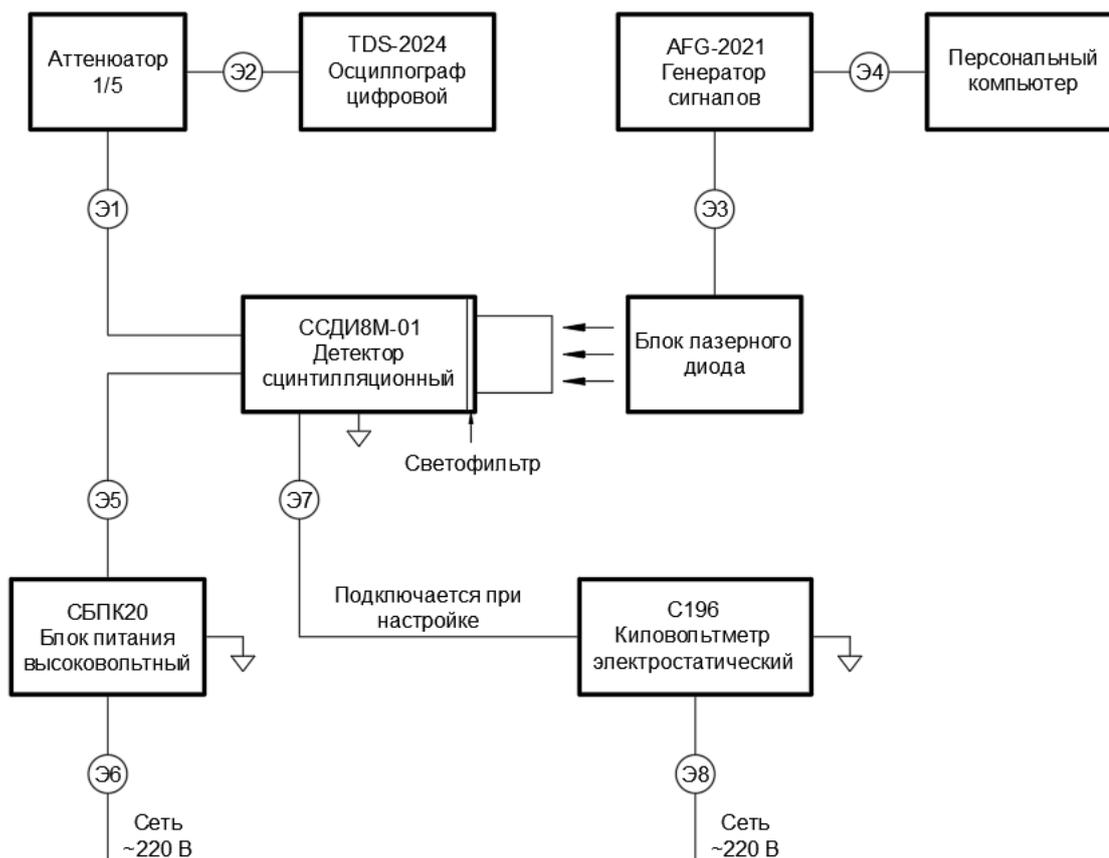


Рисунок 3 – Схема лабораторного стенда для изучения характеристик сцинтилляционного детектора ССДИ8М-01

Высоковольтное напряжение питания подается с блока питания СБПК20 на разъем ВЫСОК. НАПР. интерфейсной панели сцинтилляционного детектора ССДИ8М-01. Для контроля напряжения к выходу КОНТРОЛЬ подключен электростатический киловольтметр С-196. Для имитации световых вспышек, происходящих в сцинтилляторе при регистрации частиц, используется блок лазерного диода, установленный в специальном переходнике на месте глухой крышки (см. рисунок 1, поз. 1) с торцевой стороны корпуса детектора. Параметры светового импульса задает подключенный к диоду генератор сигналов произвольной формы типа АFG-2021. Использование диода и генератора дает возможность обеспечить фиксированную яркость и профиль световой вспышки. Аналоговый сигнал с анода ФЭУ через согласующий аттенюатор поступает на вход цифрового осциллографа TDS-2024. На входе устанавливается согласующее сопротивление 75 Ом.

ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ

Номинальное высоковольтное напряжение питания детектора ССДИ8М превышает 1000 В – опасно для жизни. Поражение электрическим током может возникнуть: при нарушении изоляции высоковольтного кабеля питания детектора, при прикосновении к гнезду разъема "ВЫХОД \sqcup ", к корпусу детектора в случае, если он не заземлен и на него произошел пробой высокого напряжения.

Перед включением детектора соединить клемму " \perp " с шиной заземления, убедиться в отсутствии повреждений высоковольтного кабеля питания. Величина сопротивления заземления должна быть не более 15 Ом.

Подключение или отключение сигнальных кабелей и высоковольтного кабеля питания должно производиться только при отключенном высоковольтном напряжении питания детектора. Запрещается разбирать детектор при включенном высоковольтном напряжении питания.

Категорически запрещается проводить сборку измерительной схемы, подключение кабелей питания и сигнальных кабелей, установку световых фильтров, т.е. любые действия с детектором при включенном высоковольтном напряжении питания.

Для работы с детектором допускаются лица, прошедшие инструктаж по технике безопасности при работе с напряжением свыше 1000 В.

ЗАДАНИЯ

1. *Измерить максимальный импульсный линейный ток детектора ССДИ8М-01*
1. Установить блок лазерного диода на детектор ССДИ8М-01 (если не установлен):
 - 1.1. Отвернуть прижимную шайбу (рисунок 1). Приподнять стакан и, придерживая сцинтиллятор, установить на входное окно ФЭУ свето-фильтр № 1.
 - 1.2. Установить стакан и сцинтиллятор на место, затянуть прижимную шайбу.
 - 1.3. Отвернуть от стакана крышку и установить на её место лазерный диод.
2. Собрать схему измерений в соответствии с рисунком 3.
3. Включить высоковольтный источник питания СБПК20 при помощи тумблера СЕТЬ на правой стороне лицевой панели прибора (выходное напряжение отрицательной полярности), постепенно вращая ручки регулировки напряжения

вправо установить величину выходного напряжения ~ 3000 В. Контроль напряжения осуществлять по показаниям индикатора блока питания (верхняя шкала) и контрольного киловольтметра С-196. Дать детектору прогреться во включенном состоянии в течение 10 минут.

4. Включить осциллограф. Установить следующие параметры осциллографа:

- масштаб шкалы напряжения – 5 В/ дел;
- временная развертка – 500 нс/ дел;
- режим запуска от входного сигнала по используемому каналу;
- начало развертки -1500 нс (8 клеток из 10);
- запуск по возрастающему фронту сигнала;
- уровень запуска – минус 5 В;

Множитель пробника должен быть $\times 1$, входное сопротивление канала 1 МОм, ограничение полосы пропускания отключено. При установке уровня нулевой линии, учитывайте, что сигнал детектора имеет отрицательную полярность.

5. Измерение максимального импульсного линейного тока детектора ССДИ8М-01 проводить путем засветки сцинтиллятора пилообразным импульсом лазерного диода длительностью ~ 10 мкс и амплитудой от 4 до 6 В. Для формирования пилообразного импульса на генераторе электрических импульсов типа Tektronix AFG-2021:

- включить генератор;
- нажать кнопку RAMP на панели генератора;
- выбрать RAMP PARAMETER MENU, установить SYMMETRY 100%;
- выбрать FREQUENCY/ PERIOD/ PHASE MENU, выбрать PERIOD, ввести с цифровой клавиатуры на панели генератора значение 10 мкс;
- в том же PHASE MENU установить значение PHASE 190°;
- выбрать RUN MODE MENU, выбрать RUN MODE, выбрать BURST, выбрать 1-CYCLE;
- в том же меню перейти на вторую страницу, выбрать SOURCE, выбрать INTERNAL, выбрать TRIGGER INTERVAL и установить значение 1 с;
- выбрать OUTPUT MENU, выбрать LOAD IMPEDANCE, выбрать LOAD и ввести значение 68 Ом;

- выбрать AMPLITUDE/ LEVEL MENU, выбрать LOW LEVEL и установить значение 0 В;
 - в том же меню выбрать HIGH LEVEL и установить значение 4,5 В.
6. Нажав кнопку ON/OFF на панели генератора, наблюдать на экране осциллографа выходной импульс тока с исследуемого детектора. Меняя амплитуду напряжения на генераторе, подобрать интенсивность излучения лазерного диода таким образом, чтобы на осциллограмме выходного импульса тока детектора ССДИ8М-01 было заметно отклонение фронта от прямой линии, как это показано на рисунке 4.

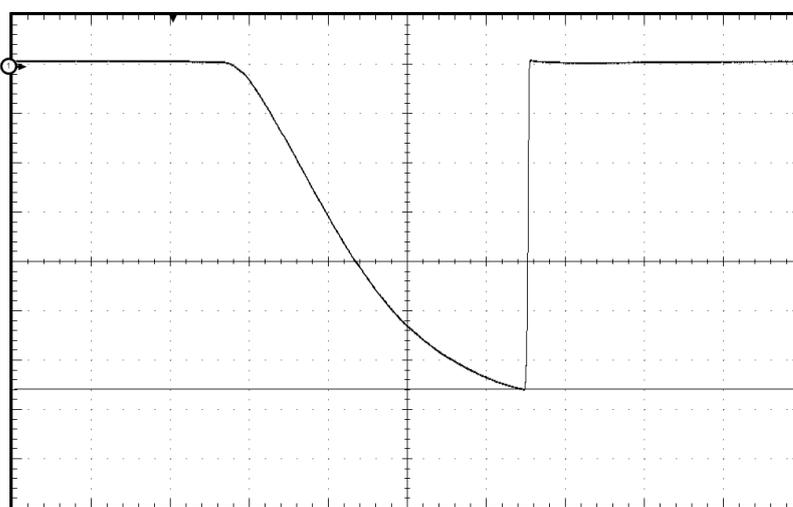


Рисунок 4 – Осциллограмма выходного импульса тока детектора ССДИ8М-01 в нелинейном режиме (эффект пространственного заряда) при использовании лазерного диода

7. Включить ПК, на рабочем столе запустить программу Tektronix Open Choice Desktop. Если осциллограф не обнаружен автоматически, в настройках SELECT INSTRUMENT выбрать USB ...XXX... (появится название подключенного устройства TDS-2024C). Записать изображение с экрана осциллографа в файл на ПК в формате .bmp.

Перейти во вкладку WAVEFORM DATA, выбрать SELECT CHANNELS, выбрать CH1 (используемый канал осциллографа). Нажать GET DATA, нажать SAVE AS и сохранить зарегистрированную информацию в формате .csv для последующей обработки.

8. Отключить подачу сигналов на ФЭУ с лазерного диода, нажав кнопку ON/OFF на панели генератора.

2. Измерить временное разрешение детектора ССДИ8М-01

9. Удалить аттенюатор.

10. Установить следующие параметры осциллографа:

- масштаб шкалы напряжения – 20 мВ/ дел;
- временная развертка – 10 нс/ дел;
- уровень запуска – минус 50 мВ.

11. Наблюдать на экране осциллографа выходные импульсы тока исследуемого детектора при регистрации ливней космических частиц, отрегулировать порог пуска осциллографа, таким образом, чтобы выходные импульсы регистрировались с интервалом ~ 10 с/импульс. При необходимости допускается поднять напряжение на ФЭУ до 3,3 кВ с помощью ручки плавной регулировки выходного напряжения на панели СБПК20. Типичная форма осциллограммы выходного импульса тока детектора ССДИ8М-01 при воздействии на него ливней космических частиц показана на рисунке 5;

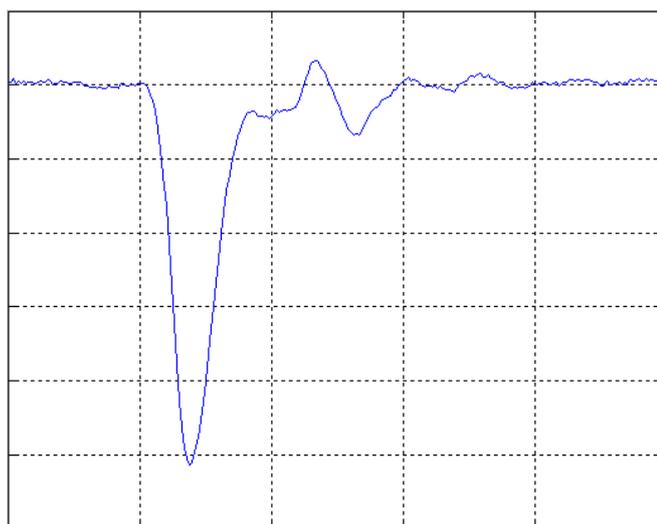


Рисунок 5 – Осциллограмма выходного импульса тока детектора ССДИ8М-01 при воздействии на него ливней космических частиц

12. Записать осциллограмму в память ПК в форматах .bmp и .csv.

13. Выключить высоковольтное питание детектора ССДИ38 путем вращения ручек регулировки выходного напряжения СБПК20 до упора влево.

14. Выключить СБПК20 при помощи тумблера СЕТЬ.
15. Выключить осциллограф.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

1. Пример обработки зарегистрированных сигналов приведен для пакета Matlab. Обработка может проводиться с помощью любого математического приложения, а также графически. Первый столбец в сохраненных файлах в формате .csv – это интервал времени между записями, второй – значения напряжений.
2. Открыть осциллограмму отклика детектора при воздействии лазерного излучения. Написать программу для определения величины тока (с учетом используемой нагрузки и коэффициента аттенюации) при отклонении линейного характера нарастания выходного напряжения детектора на величину 15 %. Определенная таким образом величина соответствует максимальному импульсному линейному току детектора ССДИ8М-01. **Пример программы для нахождения максимального импульсного линейного тока детектора типа ССДИ8М записан в прилагаемом файле «lin_tok.m».**
3. Написать программу для определения ширины на полувысоте зарегистрированного импульса выходного тока детектора при воздействии ливней космических частиц. Найденная таким образом величина соответствует временному разрешению детектора ССДИ8М. **Пример программы для нахождения временного разрешения детектора типа ССДИ8М записан в прилагаемом файле «time_res.m».**

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Объясните механизм возникновения сцинтилляционной вспышки.
2. Как устроен сцинтилляционный детектор?
3. Для регистрации каких типов ионизирующего излучения предназначен сцинтилляционный детектор?
4. Может ли сцинтилляционный детектор использоваться для регистрации импульсного рентгеновского излучения (РИ)?

5. Можно ли с помощью детектора ССДИ8М-01 зарегистрировать частицу альфа-излучения?
6. Какие основные преимущества имеют пластмассовые сцинтилляторы в сравнении с неорганическими кристаллическими?
7. Каковы причины нарушения линейности выходного импульса тока детектора?
8. Каково характерное время высвечивание пластмассового сцинтиллятора?
9. На каких эффектах основан принцип действия ФЭУ?
10. Почему пластмассовый сцинтиллятор иногда называют органическим?

ЛИТЕРАТУРА

1. ССДИ8МРЭ, ФГУП "ВНИИА"
2. Щендрик Р.Ю. и Раджабов Е.А. // Введение в физику сцинтилляторов - 2: учеб. пособие, Иркутск: ИГУ, 2014
3. Альбиков Э.А., Веретенников А.И. и Козлов О.В. // Детекторы импульсного ионизирующего излучения, Москва: Атомиздат, 1978