

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

Физический факультет

Кафедра общей физики

Урманов Роман Вадимович

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Подготовка экспериментального стенда на основе PIN-фотодиода для измерения
удельного фотовыхода тонких плёнок сцинтилляционного кристалла CsI(Tl)**

Практикум электричества и магнетизма, 2 курс, группа № 18307

Научный руководитель:

м. н. с. Разуваев Г. П.

Оценка научного руководителя

_____20__г.
«_____»_____

Преподаватель практикума:

ассистент Краснопевцев С. Е.

Оценка преподавателя практикума

_____20__г.
«_____»_____

Куратор практикума:

к. ф.-м. н. Астрелин В. Т.

Итоговая оценка

_____20__г.
«_____»_____

Новосибирск, 2019 г.

Аннотация

Целью работы являлась подготовка стенда для измерения фотовыхода тонкой плёнки сцинтилляционного кристалла CsI(Tl). Была собрана экспериментальная установка, состоящая из PIN-фотодиода, зарядочувствительного предусилителя, усилителя-формирователя и осциллографа и проведены измерения шумов в электронном тракте в зависимости от электрической ёмкости на входе предусилителя и времени формирования усилителя-формирователя, на основе чего были подобраны оптимальные для проведения эксперимента параметры установки. Далее была проведена калибровка измеряемого сигнала. В результате на измерении фотовыхода кристалла CsI(Tl) была продемонстрирована работоспособность разработанного стенда.

Ключевые слова: PIN-фотодиод, зарядочувствительный предусилитель, усилитель-формирователь, сцинтилляционный кристалл.

Работа выполнена в лаборатории №3-3 ИЯФ СО РАН.

Содержание

1. Введение	4
2. Теоретическая часть	4
3. Экспериментальная часть	10
4. Заключение	16
5. Список литературы.....	16
6. Приложение	17
1. Таблицы экспериментальных значений.....	17
2. Графики гауссова распределения амплитуды сигнала в пике полного поглощения.....	18

1. Введение

С развитием современного эксперимента, предметом исследования которого является физика элементарных частиц, возникла потребность в генерации мюонных потоков с высокой степенью свободы в настройке параметров пучка [1, стр. 12]. В настоящее время для этой цели в Японском центре ускорительных исследований J-PARC строится выделенная линия для пучка поверхностных мюонов [2]. Для настройки и контроля параметров пучка предложено использовать монитор поперечного профиля пучка на основе тонкой плёнки (5 мкм) сцинтиллятора CsI(Tl) с оптически-электронным съёмом информации [3]. В рамках подготовки монитора требуется измерить удельный фотовыход сцинтилляционной плёнки, для чего необходимо подготовить измерительный стенд.

Для регистрации фотонов используется PIN-фотодиод, к которому приложено обратное напряжение смещения. Сигнал с фотодиода через зарядочувствительный предусилитель (далее ЗЧПУ) поступает на усилитель-формирователь (далее УФ), после чего происходит его оцифровка.

В задачи данной курсовой работы входит: сборка экспериментального стенда, измерение шумов электронного тракта, анализ их зависимости от электрической ёмкости на входе ЗЧПУ, калибровка сигнала и демонстрация работоспособности установки на примере измерения фотовыхода сцинтилляционного кристалла (далее СК) CsI(Tl).

2. Теоретическая часть

Кремниевый PIN-фотодиод является полупроводниковым устройством, широко используемым в качестве датчика ионизирующего излучения. Особенность его конструкции в том, что рабочий объём диода состоит из двух тонких слоёв кремния p- и n- типов, между которыми находится толстый слой чистого кремния.

При такой конфигурации обеднённая зона фотодиода может занимать практически весь объём чистого кремния при соответствующих запирающих напряжениях.

Экспериментальный интерес представляет явление фотоэффекта в диоде: фотон, энергия которого больше ширины запрещённой зоны кремния, при попадании в рабочую зону фотодиода выбивает электрон, передавая ему практически всю свою энергию. Электрон начинает движение в кристаллической решётке кремния, взаимодействуя кулоновским образом с окружающими электронами и ядрами. В результате этого взаимодействия оружающие электроны приобретают энергию и переходят из валентной зоны в зону проводимости с образованием электрон-дырочных пар. Если подать на фотодиод запирающее напряжение, то образовавшиеся электрон-дырочные пары вызовут ток в цепи, который мы сможем зарегистрировать и измерить. В случае работы с СК в фотодиод попадают фотоны, испускаемые СК в ходе ионизации от внешнего излучения.

Сцинтилляционные, т. е. излучающие свет при ионизации, кристаллы являются популярным средством регистрации элементарных частиц. Ширина запрещённой зоны в СК составляет от 3 до 10 эВ [4, стр. 123]. Валентная зона в них заполнена полностью, в то время как зона проводимости обычно пуста. При взаимодействии с ионизирующим излучением электрон СК покидает валентную зону и начинает двигаться по кристаллической решётке в зоне проводимости. В таком состоянии электрон способен, посредством кулоновского взаимодействия, образовать с дыркой, находящейся в валентной зоне, квази-частицу, называемую экситоном, представляющую собой мигрирующее в кристалле электронное возбуждение, не связанное с переносом электрического заряда и массы. В процессе миграции экситон может рекомбинировать, что приведет к излучению фотона с энергией, чуть меньшей, чем ширина запрещённой зоны [4, стр. 124].

В условиях комнатной температуры на образование электрон-дырочной пары посредством ионизации в кремниевом фотодиоде в среднем затрачивается 3,62 эВ [4, стр. 119]. Таким образом фотовыход СК можно определить как:

$$L = \frac{W_0}{3,62\text{эВ} \cdot \eta \cdot QE} \frac{V_{CsI(Tl)}}{V_0} \frac{1}{W_{CsI(Tl)}} , \quad (1)$$

где V_0 – амплитудное напряжение при полном поглощении фотона радиоактивного источника с известной энергией излучения (калибровочного источника), измеряемое для калибровки сигнала в единицах образовавшихся в фотодиоде электрон-дырочных пар на милливольт, $V_{CsI(Tl)}$ – амплитудное напряжение при фотоэффекте, полученное в ходе эксперимента с СК CsI(Tl), W_0 – энергия радиоактивного излучения калибровочного источника, $W_{CsI(Tl)}$ – энергия излучения, ионизирующего СК CsI(Tl), QE – квантовая эффективность фотодиода, являющаяся отношением среднего количества образующихся в фотодиоде электрон-дырочных пар к количеству поглощённых им фотонов, η – коэффициент светосбора, учитывающий, что на рабочую поверхность фотодиода попадает не 100% излучаемых СК фотонов.

Квантовая эффективность кремниевого фотодиода рассчитывается по формуле [5, стр. 6];

$$QE = \frac{1240 \cdot S}{\lambda} \cdot 100\% , \quad (2)$$

где S – чувствительность фотодиода в А/Вт, λ – средняя длина волны поглощаемого им излучения в нм.

Коэффициент светосбора можно оценить, пользуясь следующей формулой [4, стр. 127]:

$$\eta = \frac{1}{1 + \kappa/\xi} , \quad (3)$$

где κ – коэффициент поглощения диффузного отражения покрытия кристалла, ξ – отношение площади поверхности СК, с которой происходит излучение, например, со стороны, не обёрнутой полотном с высоким коэффициентом диффузного отражения, к площади его полной поверхности.

Стоит отметить, что измеряемые при регистрации сцинтилляционного излучения величины очень малы. Фотовыход СК CsI(Tl) составляет 54 фотона /кэВ [6, стр. 1]. Для оценки образующегося в рабочем объёме фотодиода заряда при попадании в СК фотона используемого в эксперименте источника радиоактивного излучения Cs-137 с энергией 662 кэВ положим коэффициент светосбора и квантовую эффективность равными 0,8 и 80% соответственно. Тогда, перемножая энергию падающего фотона с коэффициентами фотовыхода, светосбора и квантовой эффективности, мы получим, что при полном поглощении следует ожидать образования приблизительно 22878 электрон-дырочных пар, что, примерно, соответствует выходу с фотодиода заряда 3,7 фКл. В предположении, что время, необходимое для попадания такого заряда в цепь из рабочего объёма фотодиода, имеет порядок микросекунд, мы получим, что регистрируемый на выходе детектора ток имеет порядок наноампер. Для исследований подобных сигналов применяют электронные тракты, состоящие из ЗЧПУ и УФ. Задачей ЗЧПУ является первичное интегрирование сигнала, поступающего с детектора, и преобразование его в напряжение, амплитуда которого пропорциональна поступившему на вход предусилителя заряду. УФ предназначены для фильтрации высоких и низких частот и вторичного усиления сигнала.

При проведении подобных экспериментов необходимо ясное представление о вкладе шумов электронного тракта в измеряемый сигнал. В целях количественного расчёта источники шума можно моделировать комбинациями идеальных элементов цепи и “шумовых” источников тока и напряжения. ЗЧПУ и УФ можно представить как последовательность интегрирующих и дифференцирующих цепочек разной конфигурации, основанных на операционных усилителях [4, стр. 407]. Такой подход позволит получить более точные результаты, но при этом приведёт к достаточно громоздким вычислениям. На практике основной вклад в шумы совершают начальные элементы цепи, когда измеряемый сигнал

ещё достаточно мал. С учётом этого можно проводить расчёт только для шумов, накапливаемых в ёмкости фотодиода.

PIN-фотодиод можно эквивалентно представить плоским конденсатором, расстояние между пластинами которого зависит от запирающего напряжения как [4, стр.115]:

$$d = \sqrt{2\varepsilon(V + V_j)\mu\rho} \quad , \quad (4)$$

где V – внешнее запирающее напряжение на фотодиоде, V_j – контактная разность потенциалов, возникающая на границе рп-перехода, ε – диэлектрическая проницаемость материала фотодиода, μ – подвижность основных носителей зарядов в зоне с малым количеством примесей, ρ – удельное сопротивление материала.

Значение спектральной плотности дробового шума ёмкости определяется следующей формулой [4, стр.410]:

$$\frac{dI_n^2}{df} = i_{nc}^2 = 2eI_d \quad ,$$

где i_{nc} – спектральная плотность тока дробового шума ёмкости, e – элементарный заряд, I_d – ток смещения в ёмкости, I_n – шумовой ток ёмкости, f – частота сигнала, подаваемого на ёмкость.

На рис. 1 представлена цепь для приближённого расчёта шумов цепи для регистрации сигналов с фотодиода.

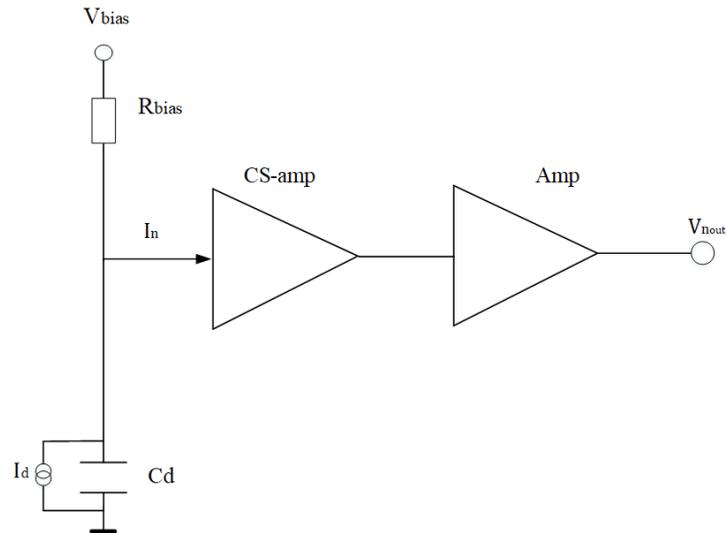


Рис. 1. Эквивалентная схема для приближённого расчёта шумов в цепи детектора ионизирующего излучения: V_{bias} – внешнее запирающее напряжение; R_{bias} – входное сопротивление внешнего источника; C_d – ёмкость фотодиода; I_d – эквивалентный шумовой источник тока; I_n – шумовой ток на входе ЗЧПУ; V_{nout} – шумовое напряжение на выходе цепи; CS-amp – ЗЧПУ; Amp – УФ

Эквивалентный шумовой заряд, т. е. такой заряд, при подаче которого на вход отношение мощности чистого сигнала к мощности шумов будет равно единице, цепи можно оценить как [4, стр. 412]:

$$Q_n^2 \approx i_{nc}^2 F_i T_s \quad , \quad (5)$$

где T_s – некоторое характеристическое время цепи, например, временной интервал между началом подъёма и достижением максимума сигналом на выходе УФ, F_i – численный коэффициент, зависящий от параметров УФ и рассчитываемый по формуле [4, стр. 412]:

$$F_i = \frac{1}{2T_s} \int_{-\infty}^{+\infty} [W(t)]^2 dt \quad , \quad (6)$$

где $W(t)$ – импульсная переходная функция УФ, т. е. функциональная зависимость сигнала на выходе УФ от времени при входном сигнале, имеющем вид дельта-функции Дирака.

3. Экспериментальная часть

Для регистрации излучения СК CsI(Tl) была собрана следующая цепь:

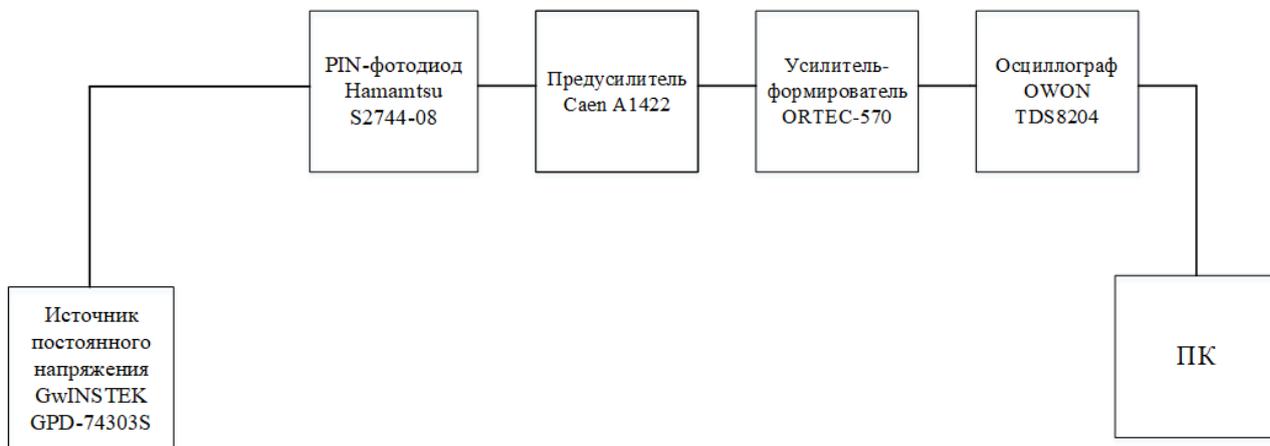


Рис. 2. Блок-схема цепи для регистрации γ -излучения СК CsI(Tl)

Её упрощённая эквивалентная схема представлена ниже:

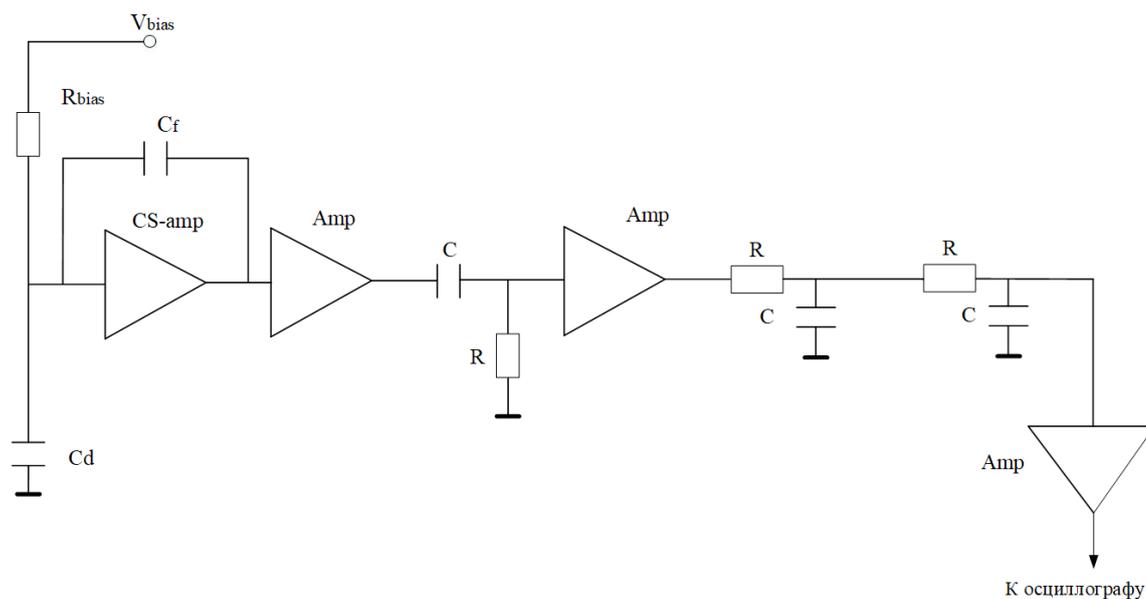


Рис. 3. Эквивалентная схема цепи для регистрации γ -излучения кристалла CsI(Tl): CS-amp – ЗЧПУ Caen A1422; Cd – PIN-фотодиод Hamamatsu S2744-08; Cf – ёмкость обратной связи; Amp – усилительный каскад УФ ORTEC – 570; V_{bias} – источник внешнего запирающего напряжения; R_{bias} – входное сопротивление внешнего источника

Предварительно была произведена оценка шумов в цепи. Это позволило составить представление о точности проводимого эксперимента и предотвратить невозможность корректного измерения сигнала в связи с неправильно

подобранным оборудованием. Эквивалентный шумовой заряд при времени формирования 6 мкс и запирающем напряжении 60 В, согласно формуле (5), составил, примерно, 85 аКл. При расчёте было учтено, что преобразование Лапласа импульсной переходной функции используемого УФ имеет вид, указанный в [7, стр. 3], при количестве интегрирующих каскадов равном двум, откуда коэффициент F_i по формуле (6) составляет 0,57 для времени формирования 6 мкс, средний темновой ток фотодиода при запирающем напряжении 70 В равен 3 нА [8, стр. 1]. В качестве характеристического времени T_s был выбран интервал между началом подъёма и достижением максимума сигналом на выходе УФ, составляющим для времени формирования 6 мкс 13,2 мкс. [7, стр. 4]. С учётом того, что при попадании в СК фотона используемого в эксперименте источника радиоактивного излучения Cs-137 с энергией 662 кэВ в рабочем объёме фотодиода ожидается образование заряда порядка фемтокулон, был сделан вывод о приемлимости погрешности, вносимой в измерения электронным трактом.

Фотодиод с ЗЧПУ были помещены в металлический ящик, изолированный от видимого света плотной тканью, с целью предотвращения зашумления сигнала внешним излучением. Провода к остальной части цепи были проведены через отверстия в ящике.

С целью нахождения оптимальных параметров системы для регистрации излучения кристалла были проведены измерения зависимости стандартного отклонения в измерениях от времени формирования сигнала УФ, от ёмкости на входе ЗЧПУ, измеренной экспериментально с помощью мультиметра (далее – образцовой ёмкости), и от ёмкости фотодиода при разных значениях запирающего напряжения для двух времён формирования. В ходе всех измерений на тестовый вход ЗЧПУ подавался прямоугольный сигнал частотой 1 кГц, скважностью 50% и амплитудой 40 мВ с генератора сигналов специальной формы GwINSTEK AFG-72125. Выбор параметров сигнала специальной формы определялся необходимостью смоделировать попадание фотона в рабочую зону фотодиода. Для

обработки данных и определения погрешностей использовался пакет объектно-ориентированных программ и библиотек ROOT [9]. Все полученные экспериментально значения и соответствующие погрешности, рассчитанные как стандартные отклонения от этих значений, можно найти в разделе “Приложение”. Результаты проведённых измерений представлены на графиках ниже:

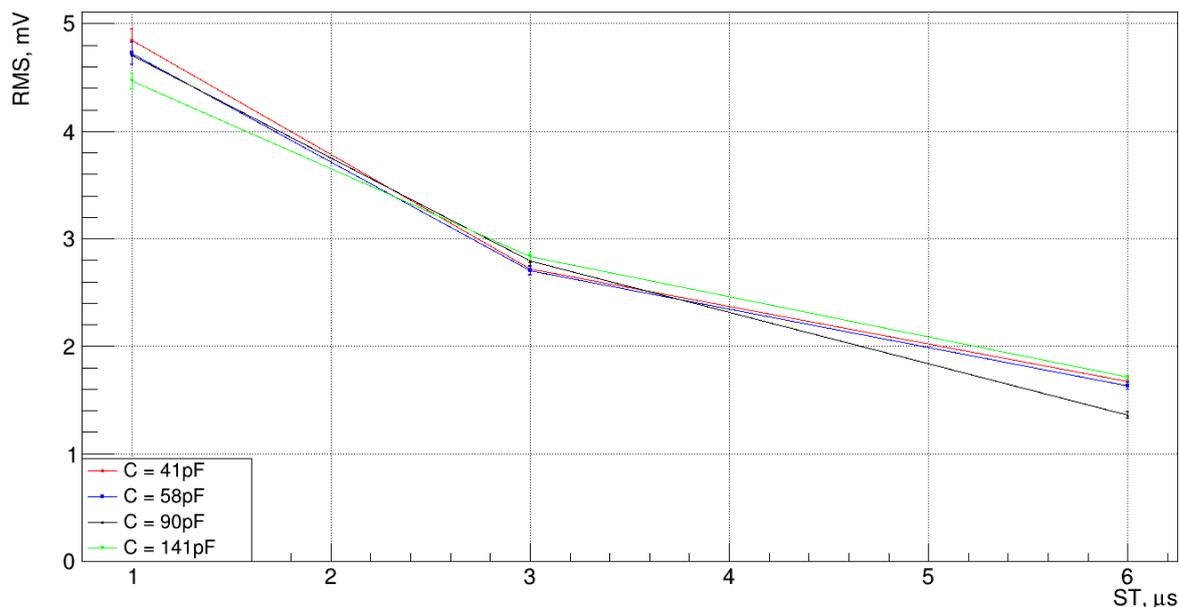


Рис. 4. Зависимость стандартного отклонения сигнала в зависимости от времени формирования при различных значениях образцовой ёмкости на входе ЗЧПУ. Экспериментальные точки соединены прямыми линиями для наглядности

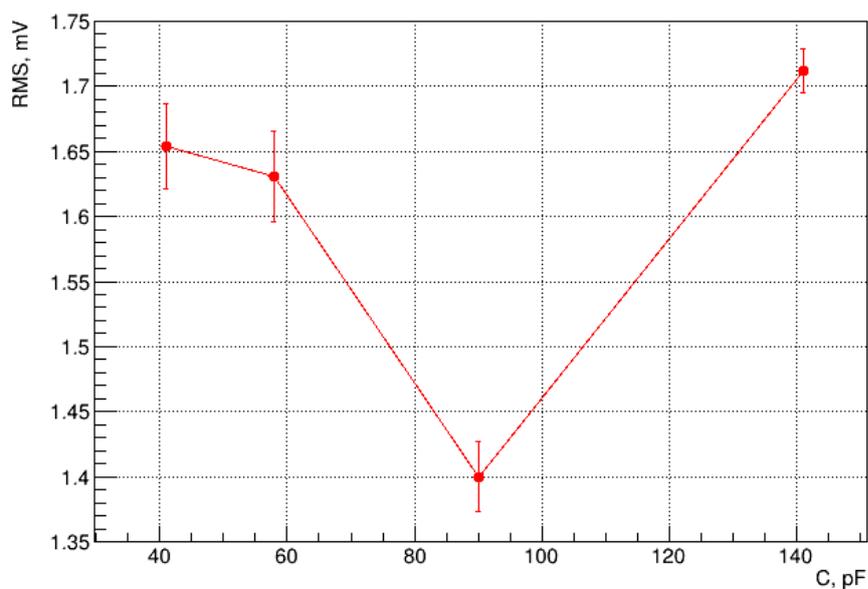


Рис. 5. Зависимость стандартного отклонения сигнала в зависимости от величины образцовой ёмкости на входе ЗЧПУ для времени формирования бмкс. Экспериментальные точки соединены прямыми линиями для наглядности

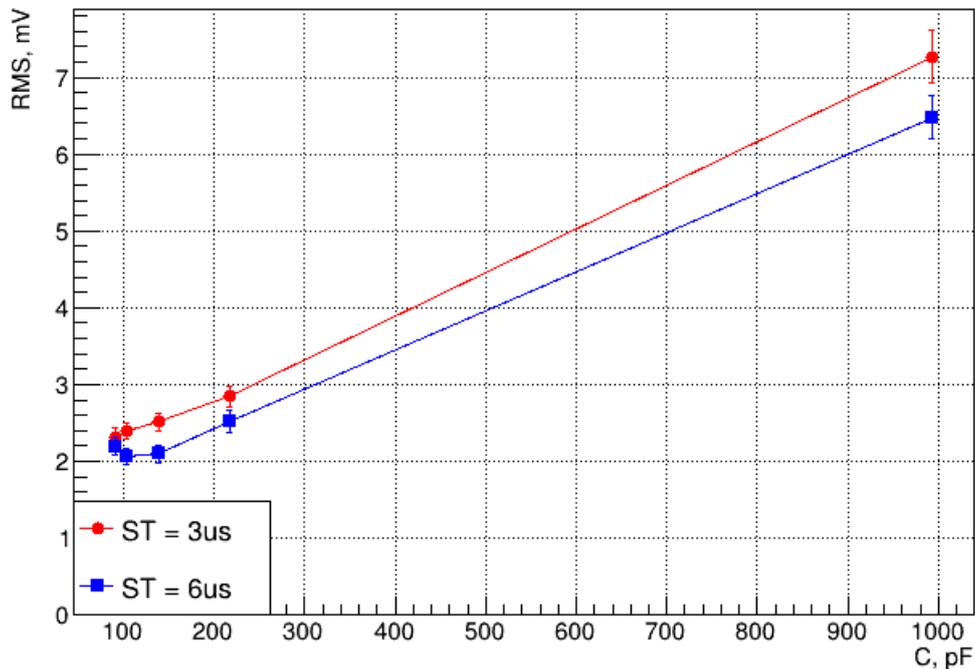


Рис. 6. Зависимость стандартного отклонения сигнала в зависимости от величины ёмкости фотодиода на входе ЗЧПУ при различных временах формирования. Указанные ошибки увеличены визуально в три раза. Экспериментальные точки соединены прямыми линиями для наглядности

При проведении последнего измерения фотодиод рассматривался в модели плоского конденсатора, расстояние между пластинами которого вычисляется по формуле (4). При расчёте было учтено, что $\rho = 5 \cdot 10^3$ см [4, стр. 116], $\mu = 0,8 \cdot 10^3$ см/(В · с) [10, стр. 349], $\epsilon = 1$ пФ/см [4, стр. 115]. При анализе полученных данных для стандартного отклонения сигнала было принято решение о выборе для калибровки цепи и непосредственно эксперимента с СК CsI(Tl) следующих параметров цепи: $V_{bias} = 60$ В, время формирования $ST = 6$ мкс.

Была проведена калибровка цепи источником Am-241 с энергией излучения 59,5 кэВ. Это позволило сопоставить величину регистрируемого сигнала и количество образующихся в фотодиоде электрон-дырочных пар. Полученные данные представлены на следующей гистограмме:

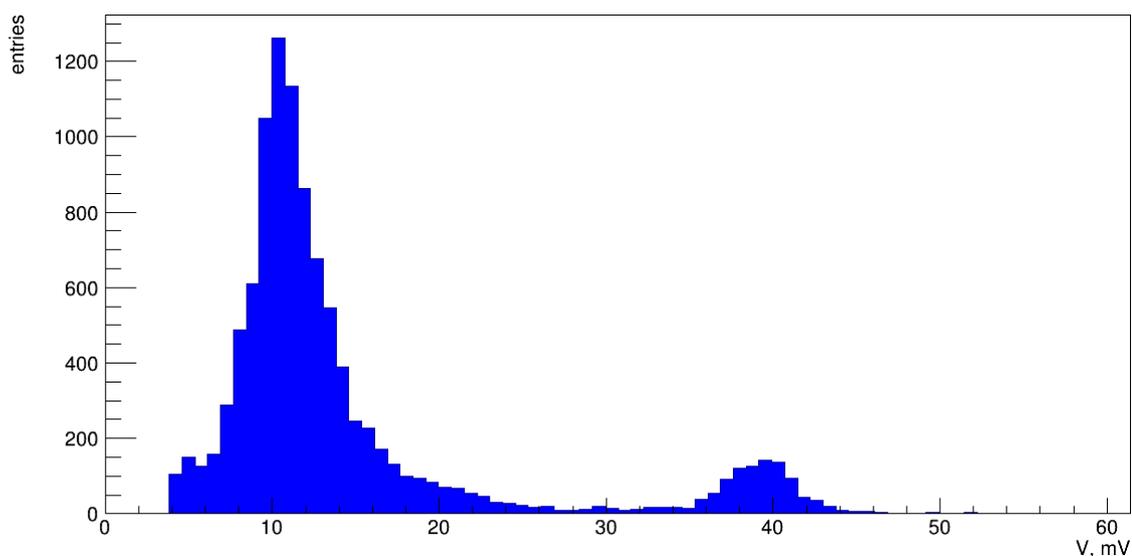


Рис. 7. Спектр радиоактивного источника Am-241

Пик событий, отвечающий напряжению $39,35 \pm 2,16$ мВ, соответствует полному поглощению фотона. Положение пика было определено по положению максимума функции Гаусса на интервале от 34 до 46 мВ. Выбор интервала обоснован шириной пика полного поглощения. Погрешность была определена как стандартное отклонение напряжения от этого максимума, рассчитанное на том же интервале. Соответствующий график функции гаусса можно найти в “Приложении”. С учётом того, что на образование электрон-дырочной пары, в среднем, требуется 3,62 эВ, был сделан вывод, что количество образующихся при полном поглощении фотона Am-241 электрон-дырочных пар примерно равно 16435.

СК CsI(Tl) был обёрнут политетрафторэтиленом так, чтобы его единственная открытая сторона совпадала по геометрическим размерам с площадью рабочей поверхности фотодиода. Выбор материала обоснован необходимостью обеспечить как можно больший коэффициент диффузного отражения в системе с минимальными потерями на поглощение. Это позволило улучшить коэффициент светосбора. СК был помещён на рабочую зону фотодиода открытой стороной, предварительно смазанной оптической силиконовой смазкой ВС-630 для уменьшения разницы между показателями преломления

сред, а, следовательно, увеличения коэффициента светосбора за счёт увеличения угла полного внутреннего отражения, после чего плотно закреплён. Рядом был расположен радиоактивный источник Cs-137 с энергией излучения 662 кэВ, облучавший СК фотонами. Полученные в ходе регистрации сигнала с фотодиода результаты измерений представлены на следующей гистограмме:

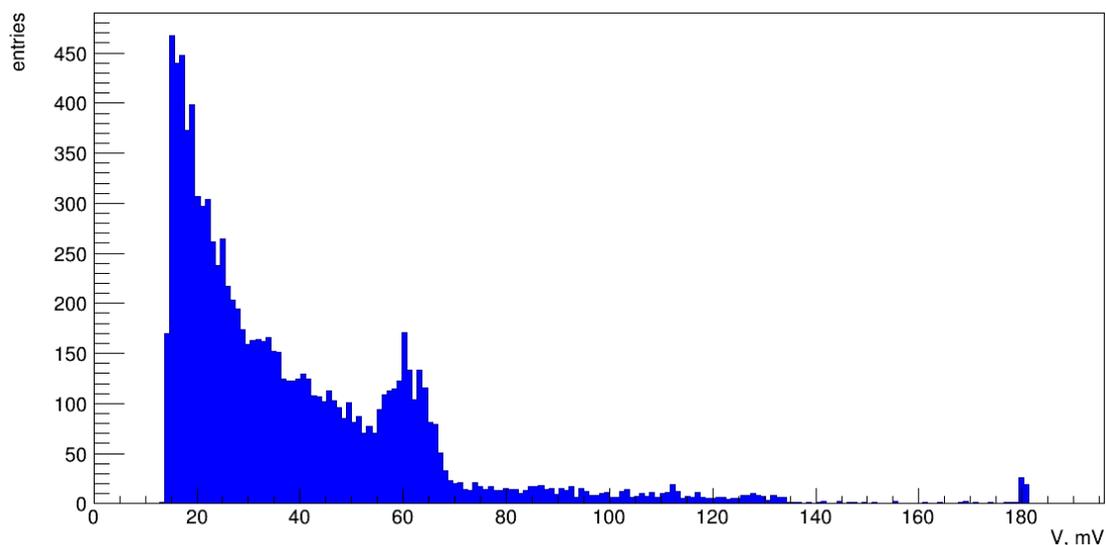


Рис. 8. Спектр кристалла CsI(Tl)

Коэффициент светосбора СК в созданных условиях был оценён по формуле (3) как 0,86. При расчёте было учтено, что площадь открытой поверхности кристалла была равна 2 см^2 , полной поверхности – 16 см^2 . Коэффициент поглощения диффузного отражения был оценён как 0,02 [11, стр. 1]. Излучаемый при ионизации СК CsI(Tl) свет имеет длину волны от 320 нм до, примерно, 750 нм [4, стр. 125], причём максимум эмиссионного спектра достигается при длине волны 550 нм [12, стр. 462]. Это означает, что СК испускает фотоны в преимущественно оптическом спектре. Чувствительность фотодиода S для поглощаемого излучения со средней длиной волны 540 нм, равна 0,36 А/Вт [8, стр. 1], следовательно его квантовая эффективность, согласно формуле (2), равняется примерно 81%. Пик, соответствующий полному поглощению, расположен в точке $60,84 \pm 3,75 \text{ мВ}$. Численные значения были получены аналогично значениям для спектра Am-241. Соответствующий график функции Гаусса можно найти в “Приложении”. Следовательно, согласно формуле (1),

фотовыход СК CsI(Tl) равен 56646 ± 7190 фотонов на 1 МэВ, что совпадает с табличными значениями [6, стр. 1] с точностью до погрешности. Стоит отметить, что из-за присутствовавших в СК несовершенств таких, как неровности на рабочей поверхности и его неполная прозрачность, стандартное отклонение итогового измерения получилось больше, чем предполагалось оно будет. На гистограмме это проявляется в менее выраженном пике полного поглощения.

4. Заключение

На основе полученных результатов был сделан вывод о том, что разработанная установка пригодна для измерения фотовыхода СК. Также были выявлены оптимальные для измерений параметры установки: запирающее напряжение на PIN-фотодиоде и время формирования сигнала УФ, составившие 60 В и 6 мкс соответственно. Стоит отметить, что при необходимости точность получаемых измерений можно увеличить, укоротив провода, использованные для соединений в цепи, подобрав оптическую смазку, коэффициент преломления которой ближе к коэффициенту преломления СК CsI(Tl) и тщательнее экранировав установку.

5. Список литературы

1. Higemoto W. *et al.* Materials and life science experimental facility at the Japan proton accelerator research complex IV: The Muon facility // Quantum Beam Science. – 2017. – Т. 1. – №. 1. – С. 11.
2. Kawamura N. *et al.* New concept for a large-acceptance general-purpose muon beamline // Progress of Theoretical and Experimental Physics. – 2018. – Т. 2018. – №. 11. – С. 113G01.
3. Razuvaev G. *et al.* Development of the CsI (Tl) Muon Beam Profile Monitor for the Muon $g-2$ /EDM Experiment at J-PARC // EPJ Web of Conferences. – EDP Sciences, 2019. – Т. 212. – С. 01008.

4. Grupen C., Shwartz B. Particle detectors. – N.Y.:Cambridge university press, 2008, 651 с.
5. Hamamtsu Si Photodiodes handbook. – Hamamtsu:Hamamtsu Photonics K.K.. - 2011, 26 с.
6. Saint Gobain CsI(Tl), CsI(Na) Cesium Iodide Scintillation Material data sheet. – Paris:Saint Gobain Ceramics & Plastics, Inc.. – 2017, 2 с.
7. Model 570 Spectroscopy Amplifier Operating and Service Manual. – Advanced Measurement Technology, Inc. a/k/a ORTEC®. – 2002, 20 с.
8. Hamamtsu S2744 Si PIN photodiode manual. – Hamamtsu:Hamamtsu Photonics K.K.. – 2011, 4 с.
9. Brun R. *et al.* The ROOT Users Guide. – CERN, <http://root.cern.ch>. – 2003.
10. Кикоин И. К. Таблицы физических величин. – М.:Атомиздат. – 1976, 1006 с.
11. Pichler B. J. *et al.* Production of a diffuse very high reflectivity material for light collection in nuclear detectors. – Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2000. 3 с.
12. Patrignani C. *et al.* Review of particle physics // Chin. Phys. – 2016. – Т. 40. – С. 100001., 1808 с.

6. Приложение

1. Таблицы экспериментальных значений

Таблица 1. Зависимость стандартного отклонения сигнала от времени его формирования для различных значений образцовой ёмкости на входе предусилителя

ST, μ s	RMS, mV			
	C = 41pF	C = 58pF	C = 90 pF	C = 141pF
1	4,827 \pm 0,106	4,725 \pm 0,102	4,747 \pm 0,100	4,568 \pm 0,074
3	2,703 \pm 0,055	2,705 \pm 0,042	2,836 \pm 0,045	2,835 \pm 0,032
6	1,654 \pm 0,033	1,631 \pm 0,035	1,400 \pm 0,027	1,712 \pm 0,017

Таблица 2. Зависимость стандартного отклонения сигнала от значения образцовой ёмкости на входе предусилителя

C, pF	RMS, mV
41	1,654±0,033
58	1,631±0,035
90	1,400±0,027
141	1,712±0,017

Таблица 3. Зависимость стандартного отклонения сигнала от значения ёмкости PIN-фотодиода на входе предусилителя

C, pF	RMS, mV	
	ST = 3µs	ST = 6µs
993,807	7,266±0,115	6,479±0,093
216,866	2,842±0,048	2,517±0,046
139,160	2,513±0,038	2,094±0,036
104,179	2,400±0,034	2,058±0,036
90,346	2,310±0,041	2,190±0,039

2. Графики гауссова распределения амплитуды сигнала в пике полного поглощения

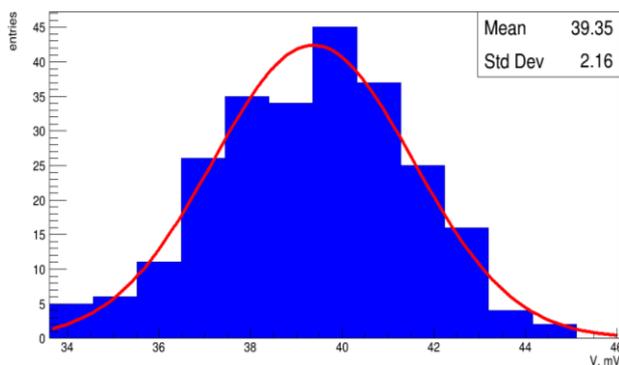


Рис. 9. Гауссово распределение сигнала в пике полного поглощения для эксперимента с Am-241

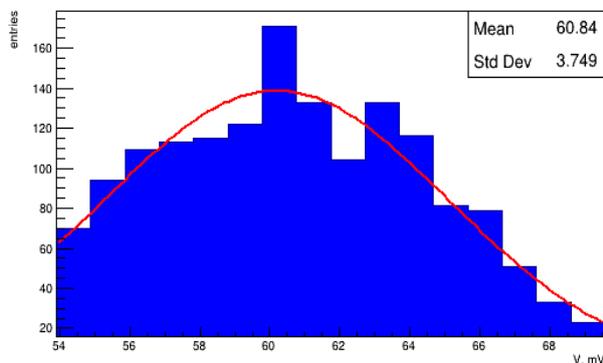


Рис. 10. Гауссово распределение сигнала в пике полного поглощения для эксперимента с CsI(Tl)