

УДК 539.16.08+004.42

**ЛАБОРАТОРНАЯ УСТАНОВКА НА БАЗЕ ПЛАТФОРМЫ ARDUINO
ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК СЧЕТЧИКА ГЕЙГЕРА-МЮЛЛЕРА**

КАЧАН С.М.^{1,2}, МИНГАЛЕЕВ С.Ф.³.

¹*Белорусский национальный технический университет
(Минск, Республика Беларусь)*

²*Белорусский государственный университет (Минск, Республика Беларусь)*

³*VPI Development Center
(Минск, Республика Беларусь)*

Аннотация. Разработана и апробирована лабораторная установка, позволяющая студентам проводить прямые эксперименты для изучения основных характеристик газоразрядных детекторов (зависимость счетной характеристики от напряжения, мертвое и разрешающее время, эффективность регистрации бета-частиц и гамма-квантов, и т.п.). Кроме того, установка позволяет эффективно (в ручном и автоматическом режимах) проверять выполнение основных статистических и физических закономерностей при регистрации ядерных излучений.

Ключевые слова: счетчик Гейгера-Мюллера, счетная характеристика, мертвое время, эффективность детектора, Arduino.

**LABORATORY SETUP BASED ON THE ARDUINO PLATFORM FOR STUDYING THE
CHARACTERISTICS OF THE GEIGER-MÜLLER COUNTER**

SVETLANA.M. KACHAN^{1,2}, SERGEI.F. MINGALEEV³

¹*Belarusian National Technical University (Minsk, Belarus)*

²*Belarusian State University
(Minsk, Republic of Belarus)*

³*VPI Development Center
(Minsk, Republic of Belarus)*

Abstract. We developed a laboratory setup that allows students to perform direct experiments for studying the main characteristics of Geiger-Muller counters (such as plateau length, deadtime and resolving time, registration efficiency for beta-particles and gamma-quants, and the like). Besides, this setup enables efficient verification (both, in manual and automatic modes) of the basic statistical and physical patterns in the registration of nuclear radiation.

Keywords: Geiger–Müller counter, plateau curve, dead time, efficiency, Arduino.

Введение

Подготовка специалистов для атомной отрасли требует формирования четких и глубоких представлений о методах регистрации ионизирующего излучения, их особенностях, достоинствах и недостатках, а также о характеристиках детекторов различного типа. Ассортимент предлагаемой как отечественными, так и зарубежными предприятиями измерительной техники в сфере ядерного и радиационного контроля постоянно расширяется. Однако предлагаемая приборная база ориентирована на удобство операторов при промышленном использовании и выдает информацию, прошедшую многоступенчатую обработку. В подавляющем большинстве реализаций такая техника отсекает возможность доступа к прямо измеряемым детектором величинам и не предполагает возможности настройки пользователем базовых параметров установки, что делает ее непригодной для ряда задач, возникающих в процессе обучения будущих специалистов.

В данной работе мы представляем разработку в виде учебной лабораторной установки, в которой в качестве детектора ионизирующего излучения используется счетчик Гейгера-Мюллера. Возникающий в момент регистрации импульс тока поступает через усилитель одновременно на вход осциллографа для отображения его временной развертки, и на вход микроконтроллера для автоматизированной обработки сигнала. Прямой доступ к управлению режимами работы счетчика, реализованный с помощью платформы Arduino, позволяет обучаемому не только извлечь из эксперимента основные характеристики данного газоразрядного детектора (счетная характеристика, мертвое время, эффективность регистрации бета-частиц и гамма-квантов), но и проверить выполнение основных статистических и физических закономерностей при регистрации ядерных излучений.

Описание лабораторной установки

Блок-схема лабораторной установки изображена на рис. 1, а его внешний вид представлен на рис. 2. Прибор содержит в качестве детектора цилиндрический счетчик Гейгера-Мюллера J305, способный регистрировать гамма-излучение и жесткое бета-излучение. толщина стеклянных стенок трубки Гейгера составляет $(50 \pm 10) \cdot 10^{-2} \text{ г/см}^2$. Длина трубки $l = 88 \text{ мм}$, диаметр трубки $d = 10 \text{ мм}$. Катод выполнен напылением оксида олова на внутренние стенки трубки. Необходимое для работы счетчика высокое напряжение U (от 230 до 600 В) создается от источника постоянного напряжения 5 В с помощью модуля RadiationD-v1.1 (CAJOE). В этом же модуле происходит преобразование импульса тока, полученного на счетчике, в импульс низкого напряжения амплитудой около 4.4 В. Далее этот импульс напряжения подается на вход микроконтроллера модуля Arduino Pro Micro. Микроконтроллер организует регистрацию импульсов на заданном времени измерения и отображение полученных данных совместно с параметрами настроек прибора на жидкокристаллическом дисплее. Высокое рабочее напряжение U на счетчике регулируется вращением ручки потенциометра. Время измерения t задается вращением энкодера. Значения напряжения и времени измерения отображаются на ЖК экране.

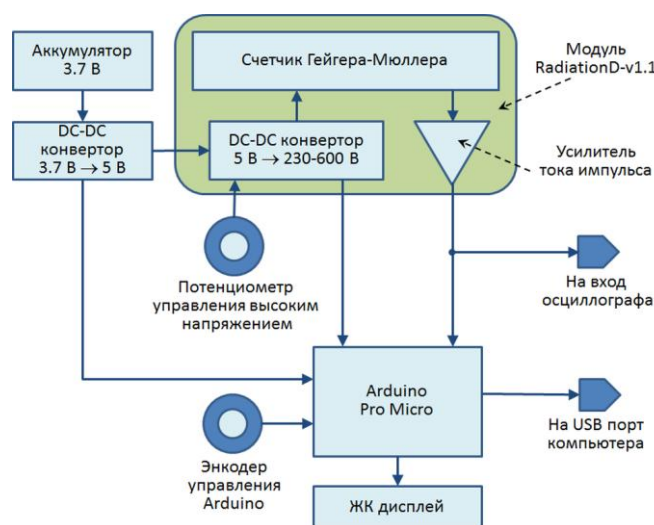


Рис. 1. Блок-схема лабораторной установки

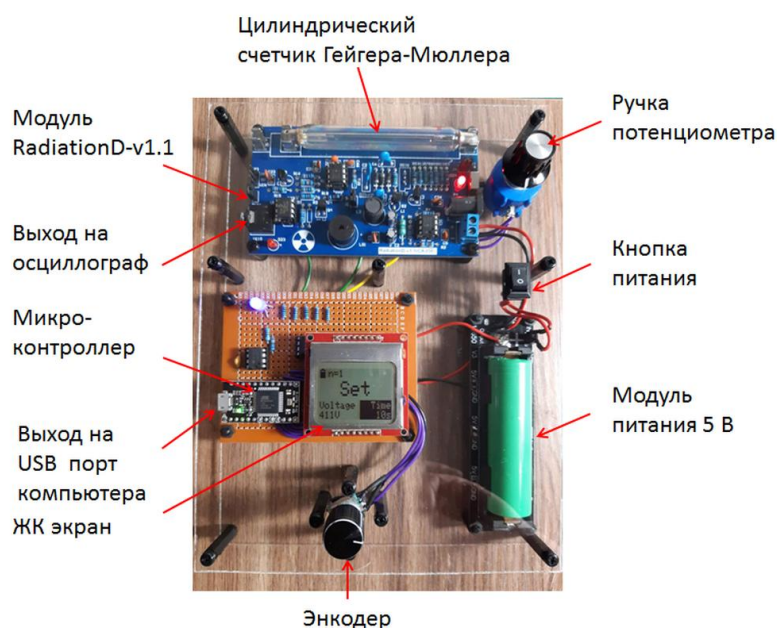


Рис. 2. Внешний вид лабораторной установки

Лабораторная установка позволяет передавать обработанные данные на компьютер по USB интерфейсу, а также отображать развертку сигнала со счетчика Гейгера на экране осциллографа.

Лабораторные задачи установки

Первоочередной задачей, которую можно решить именно с помощью данной лабораторной установки, является изучение характеристик счетчика Гейгера-Мюллера.

Снятие счетной характеристики предполагает измерение зависимости скорости счета n от источника с постоянной интенсивностью от напряжения U , подаваемого на трубку.

На рис. 3 показана типичная счетная характеристика, измеренная с помощью предлагаемой лабораторной установки. Она демонстрирует первоначально быстрый рост числа импульсов при превышении критического напряжения (около 350 В), что обусловлено зависимостью числа импульсов от числа образованных пар ионов, полученных в результате первичной ионизации и последующего газового усиления. Эта часть счетной характеристики попадает в так называемую область «ограниченной пропорциональности». Дальнейшее увеличение напряжения переводит счетчик в режим Гейгера, где отсутствует пропорциональность между первичной ионизацией, вызванной ионизирующей частицей, и амплитудой импульса – независимо от энергии частицы величина импульса остается постоянной (в нашем случае 4.4 В на выходе с усилителя тока импульсов). В режиме Гейгера счетная характеристика имеет вид плато с небольшим уклоном. Ширину плато для используемого счетчика J305 можно оценить в 125 В. Последующее увеличение напряжения на счетчике (в данном случае свыше 475 В) приводит к появлению непрерывного разряда и быстрому росту скорости счета.

Построение счетной характеристики дает возможность обоснованного выбора рабочего напряжения детектора – рабочее напряжение на трубке выбирается на середине плато, что дает значение 400-425 В. Таким образом, дальнейшее изучение характеристик детектора проводится при заданном рабочем напряжении 400 В.

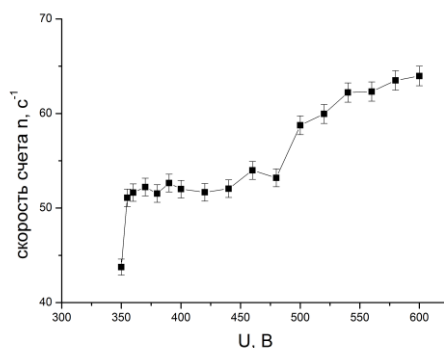


Рис. 3. Счетная характеристика счетчика Гейгера-Мюллера

Определение временных характеристик счетчика (мертвое время, разрешающее время и время восстановления). Мертвое время τ задает временной интервал, в течение которого показания детектора искажаются за счет наложений, т.е. попадание в детектор второй частицы вслед за первой, инициировавшей процесс регистрации, остается для счетчика незамеченным. Определение мертвого времени счетчика – это задача, которую с помощью нашей установки можно решать как методом прямых измерений (по форме регистрируемого импульса), так и косвенным методом, описанным в [1] (основанным на измерении скорости счета от эталонных источников малой и большой активности).

Вопрос оценки мертвого времени счетчика Гейгера-Мюллера и установления его зависимости от параметров трубки, электронной схемы, рабочего напряжения и др. до сих пор вызывает живые дискуссии [2].

Наблюдаемые с помощью лабораторной установки и осциллографа формы импульсов (см. рис. 4) позволяют установить, что мертвое время, в течение которого попадание второй частицы никак не отражается на процессе регистрации первой (форма импульса в течение этого

времени неизменна), для счетчика J305 составляет $\tau \sim 150$ мкс. Разрешающее время, соответствующее минимальному временному интервалу между импульсами, которые могут быть зарегистрированы отдельно, составляет $\tau_p \sim 210$ мкс. Разность между этими временами определяет время восстановления системы ~ 60 мкс. Как видно из рис. 4в и 4г, попадание второй частицы в счетчик в интервале времени восстановления приводит к уширению и частичному разделению импульса.

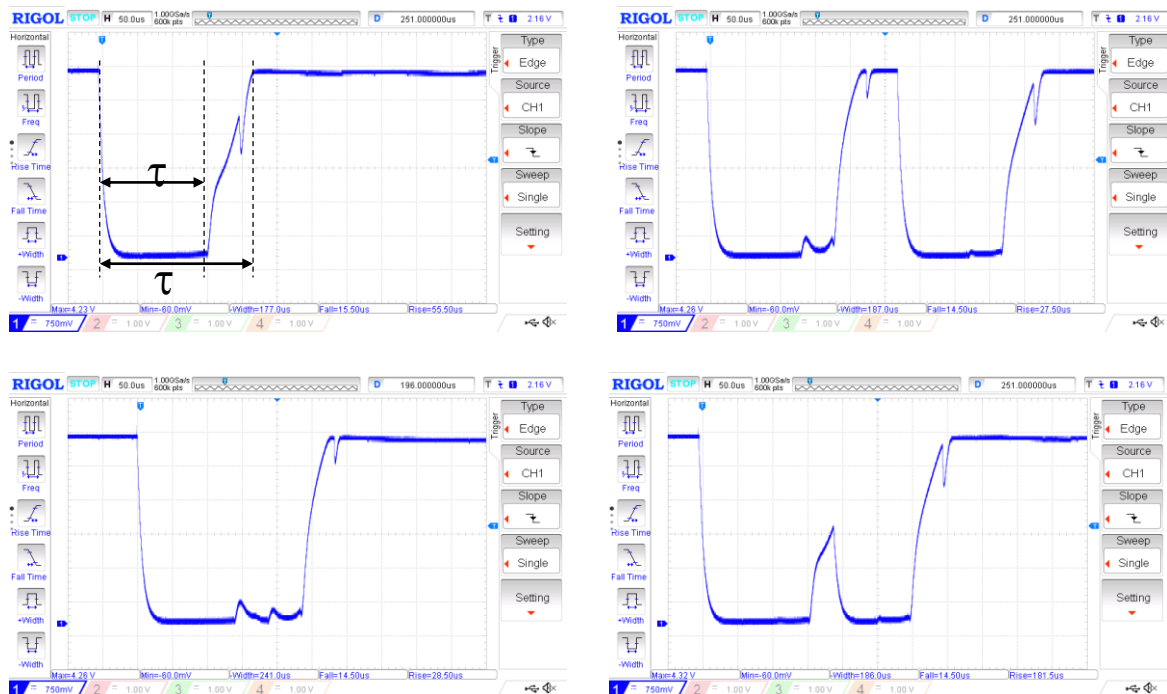


Рис. 4. Временная развертка импульсов напряжения на счетчике Гейгера-Мюллера при регистрации частиц (рабочее напряжение счетчика 400 В, скорость развертки сигнала на осциллографе 50 мкс/дел, масштаб по вертикали 750 мВ/дел):

а – отдельный импульс; б – два последовательных отдельных импульса; в, г – двойные импульсы, зарегистрированные в результате наложения сигналов от двух последовательно попавших в детектор частиц в интервале разрешающего времени детектора

Необходимо отметить, что наблюдаемая форма одиночного импульса (см. рис. 4а) отличается от классической формы с экспоненциальным нарастанием. В нашем случае заметны искажения в конце импульса, обусловленные, по всей видимости, недостатками схемы высоковольтного питания (маломощной и недостаточно устойчивой во время прохождения импульса).

Определение эффективности регистрации счетчика. Эффективность регистрации счетчика ε вводится как отношение числа зарегистрированных импульсов к числу падающих на счетчик частиц за время измерения. Она сильно зависит как от параметров самого счетчика, так и от вида ионизирующих частиц.

Цилиндрический счетчик J305 способен регистрировать бета-излучение, энергия которого достаточна для проникновения через стенки трубки (длина пробега электронов больше толщины стенок). Чтобы определить ε для электронов требуется эталонный бета-источник (активность которого известна) с достаточно большой граничной энергией E_β без сопутствующего гамма-излучения (например, Sr-90).

Также J305 регистрирует гамма-кванты за счет их взаимодействия с материалами трубки, что приводит к возникновению вторичных электронов, попадающих внутрь трубки. Чтобы определить ε для гамма-квантов требуется эталонный бета-источник с малой граничной энергией E_β и сопутствующим гамма-излучением с достаточно высокой энергией (например,

Со-60). Тогда, если закрыть излучающую поверхность такого источника алюминиевым фильтром толщиной ~ 3 мм, поток бета-излучения будет полностью поглощен, а поток гамма-квантов практически не ослабится в металле с низкой плотностью.

Разместив источник напротив счетчика на расстоянии r , превышающем его длину l , и проведя измерения счета за время экспозиции t с источником ($N_{u+\phi}$), а потом без него (N_{ϕ}), можно рассчитать эффективность регистрации по формуле:

$$\varepsilon = \frac{N_{рег}}{N_{над}} \cdot 100\% = \frac{N_{u+\phi} - N_{\phi}}{A \cdot t \cdot \eta \cdot \Omega} \cdot 100\% ,$$

где A – активность источника на текущий момент; η - вероятность испускания частицы на один распад; Ω - относительный телесный угол приема детектора. В первом приближении можно принять $\Omega = \frac{S}{r^2} \cdot \frac{1}{4\pi}$, где $S = d \cdot l$ - площадь центрального сечения детектора с диаметром стеклянной трубки d и ее длиной l .

Оценка указанным методом эффективности регистрации счетчиком J305 бета- и гамма-излучения дала значения 47% и 0.6%, соответственно, что совпадает с ожиданиями.

Заключение

Представленная нами лабораторная установка позволяет проводить целый комплекс новых лабораторных работ по изучению основных характеристик счетчиков Гейгера-Мюллера и уже хорошо зарекомендовала себя на практике. Однако, опыт её использования выявил и недостатки в схемотехнике, которые мы планируем исправить в следующей версии установки. Во-первых, схема DC-DC преобразователя 5В в регулируемое высокое напряжение (230В – 600В), используемого в модуле RadiationD-v1.1, оказалась слишком маломощной, что приводит к нестабильности напряжения, подаваемого на счетчик Гейгера-Мюллера при регистрации мощных потоков α -излучения (использование которых необходимо для сокращения времени проведения лабораторных работ и для регистрации мёртвого времени косвенным методом). Во-вторых, скорость АЦП в микроконтроллере ATmega32U4, используемого в Arduino Pro Micro, недостаточна для автоматизации регистрации и анализа формы импульсов без использования внешнего осциллографа – ожидается, что переход на микроконтроллер из серии STM32 позволит решить эту проблему и расширить спектр возможных приложений данной установки.

Список литературы

1. Практикум по ядерной физике. Под ред. Сергеева В.О. Санкт-Петербургский государственный университет. - СПб., 2006. - 184 с.
2. Almutairi B., Alam S., Goodwin, C.S., Usman S., Akyurek T.. Simultaneous experimental evaluation of pulse shape and deadtime phenomenon of GM detector. Scientific Reports. 2021; 11 (1) 3320.