

необлученная часть алмаза находится под действием сжимающих напряжений, распределение которых носит сложный характер.

### *Литература*

1. Вавилов В. С. Возможности и ограничения ионной имплантации в алмаз и их сопоставление с другими методами введения электрически активных примесей // Успехи физических наук. 1994. Т. 164. № 4. С. 429 – 433.

2. 3. Raman scattering in diamond irradiated with high-energy xenon ions / N.M.Kazuchits, O.V.Korolik, M.S.Rusetsky, V.N.Kazuchits, N.S.Kirilkinb, V.A.Skuratov // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. 2020. Т. 472. С. 19 – 23.

УДК 539.16.08+004.42

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ВРЕМЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ СЧЕТЧИКА ГЕЙГЕРА-МЮЛЛЕРА НА БАЗЕ ПЛАТФОРМЫ ARDUINO**

Качан С.М.<sup>1</sup>, Мингалеев С.Ф.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

<sup>2</sup>VPI Development Center, Минск, Беларусь

Счетчик Гейгера-Мюллера (ГМ) является одним из самых распространенных типов детекторов ионизирующего излучения благодаря простоте конструкционного исполнения и невысокой стоимости. Однако к числу недостатков такого типа детекторов следует в первую очередь отнести большое разрешающее время  $\tau$ , т.е. минимальный промежуток времени, которым должны быть разделены пролёты частиц через счетчик для того, чтобы они были зарегистрированы отдельно.

Этот интервал времени для счетчика ГМ составляет от нескольких микросекунд до нескольких миллисекунд, и формируется из двух составляющих: (I) мертвое время самого детектора, известное как собственное мертвое время, и (II)

коллективное мертвое время, возникающее в результате работы схемы обработки импульсов. Важность точного определения разрешающего времени обусловлена существенными искажениями при подсчетах числа зарегистрированных импульсов от высокоактивных источников и необходимостью соответствующей коррекции их числа.

В данной работе мы предлагаем способ исследования разрешающего времени, а также его отдельных составляющих на базе разработанной нами учебной лабораторной установки, в которой в качестве детектора ионизирующего излучения используется счетчик Гейгера-Мюллера. Прямой доступ к управлению режимами работы счетчика, реализованный с помощью платформы Arduino, позволяет определять временные характеристики газоразрядного детектора не только в результате обработки экспериментальных данных по скорости счета, но и путем непосредственного наблюдения временной развертки импульса на экране осциллографа.

Внешний вид лабораторной установки представлен на рис.1. Прибор содержит в качестве детектора цилиндрический счетчик Гейгера-Мюллера J305, способный регистрировать гамма-излучение и жесткое бета-излучение.

Для безопасности использования требуемое высокое напряжение на трубке счетчика получается от литиевого аккумулятора с использованием маломощного DC-DC преобразователя напряжения. Выходное напряжение преобразователя регулируется потенциометром в пределах от 230 до 600 вольт. 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.

Для стандартных газоразрядных счетчиков с непродлевающимся мертвым временем соотношение между средней скоростью  $n$  поступления событий и средней скоростью  $m$  их регистрации определяется формулой (2.3) из [1]:

$$n = \frac{m}{1 - m\tau}$$

Это соотношение может быть использовано для экспериментальной оценки значения  $\tau$  по результатам измерения скорости регистрации событий  $m_i$  для нескольких источников (пронумерованных индексом  $i$ ) по отдельности и скорости регистрации событий  $m_\Sigma$  для всех источников вместе.

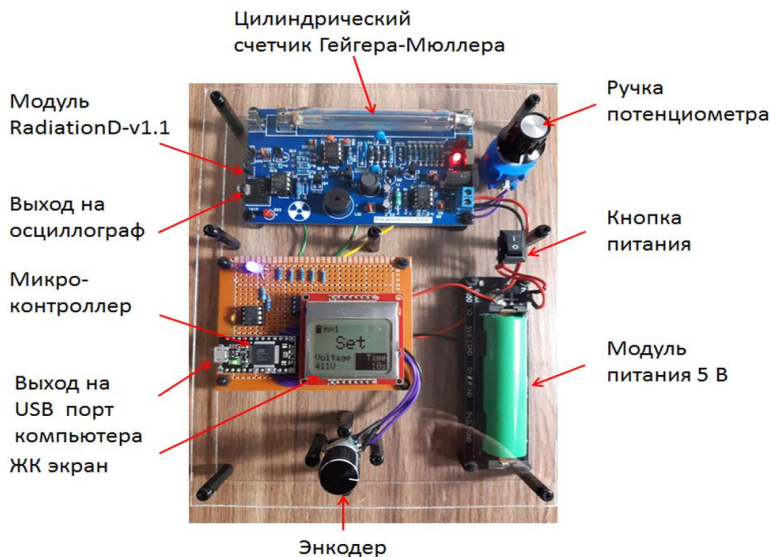


Рис. 1. Внешний вид лабораторной установки

Как показано в уравнении (2.7) в [1], с учетом того, что  $\sum_{i=1}^k n_i = n_\Sigma$ , разрешающее время системы может быть рассчитано в приближении  $m_\Sigma \cdot \tau \ll 1$  по формуле:

$$\tau \approx \frac{\sum_{i=1}^k m_i - m_\Sigma}{m_\Sigma^2 - \sum_{i=1}^k m_i^2}$$

Эта формула является сейчас общепринятой для экспериментальной оценки значения  $\tau$  - она используется как во

многих лабораторных практикумах, так и в практической работе. Однако, как мы покажем ниже, при её использовании часто нарушается условие  $m_{\Sigma} \cdot \tau \ll 1$ , которое использовалось при её выводе. На практике, это приводит к переоценке значения  $\tau$ , иногда на десятки процентов.

При этом, для ускорения проведения работы на практике обычно используются только два источника – и в этом случае уравнение  $n_1 + n_2 = n_{\Sigma}$  является простым квадратным уравнением, которое можно решить точно, без использования приближения  $m_{\Sigma} \cdot \tau \ll 1$ . Такое решение даёт нам более точное значение для разрешающего времени:

$$\tau = \frac{1}{m_{\Sigma}} \left( 1 - \sqrt{\frac{(m_{\Sigma} - m_1)(m_{\Sigma} - m_2)}{m_1 \cdot m_2}} \right)$$

Для проверки этого решения, был выполнен эксперимент с двумя бета-источниками разной мощности. Результаты серии из четырёх таких экспериментов суммированы в таблице 1. Здесь колонки  $M_1$ ,  $M_2$ , и  $M_{\Sigma}$  – это полные числа отчётов за время  $t = 10$  минут от первого источника, от второго источника, и от обоих источников сразу, соответственно. Колонки  $m_1$ ,  $m_2$ , и  $m_{\Sigma}$  – это скорости регистрации частиц от первого источника, от второго источника, и от обоих источников сразу, соответственно, после вычета скорости  $m_0$  регистрации частиц без источников (для учета вклада естественного фона). Значение  $m_0$  определялось в течении 30 минут и составило  $0,431 \text{ с}^{-1}$ . Две последние колонки дают разрешающее время системы, рассчитанное по приближенной и точной формулам, соответственно.

Таблица 1

Эксперимент	$M_1$	$M_2$	$M_{\Sigma}$	$m_1, \text{с}^{-1}$	$m_2, \text{с}^{-1}$	$m_{\Sigma}, \text{с}^{-1}$	$\tau$ , мкс прибл.	$\tau$ , мкс точное
1	318878	62270	367608	531,032	103,352	612,249	269,373	215,929
2	318884	61844	366996	531,042	102,642	611,229	277,017	220,894
3	319418	62408	367915	531,932	103,582	612,761	278,170	221,508
4	319856	62312	368508	532,662	103,422	613,749	271,508	217,194
1+2+3+4	1277036	248834	1471027	531,667	103,250	612,497	274,009	218,882

Как видим, разрешающее время системы, рассчитанное по приближенной формуле, превышает время, рассчитанное по точной формуле на ~25% или ~55 мкс, соответственно. Такое значительное различие между этими временами определяется тем, что в данном эксперименте  $m_2 \cdot \tau \approx 0,13$  хоть и существенно меньше единицы, но всё-же не является пренебрежимо малой величиной.

Интересно сравнить оба найденные времени с длительностью отдельных импульсов на осциллограммах импульсов тока, проходящих через трубку Гейгера-Мюллера при детектировании бета-частиц. На рис. 2 приведён характерный пример такой осциллограммы, снятой при тех же условиях, что и эксперименты из таблицы 1. Согласно этим данным, разрешающее время системы ~219 мкс, рассчитанное по точной формуле, очень хорошо согласуется с длительностью каждого отдельного импульса. Время же, рассчитанное по приближенной формуле, очевидным образом завышено.



Рис. 2. Осциллограмма импульсов тока, проходящих через трубку Гейгера-Мюллера при детектировании двух бета-частиц, следующих друг за другом через минимально разрешимое время

Улучшить согласие между разрешающим временем системы, рассчитанным по обеим формулам можно, проведя аналогичный

эксперимент, но для источников меньшей интенсивности (просто отодвинув оба источника на большее расстояние от счетчика). Результаты серии из четырёх таких новых экспериментов суммированы в таблице 2 (как и ранее, каждый эксперимент проводился за время  $t = 10$  минут).

Таблица 2

Эксперимент	$M_1$	$M_2$	$M_\Sigma$	$m_1, \text{с}^{-1}$	$m_2, \text{с}^{-1}$	$m_\Sigma, \text{с}^{-1}$	$\tau$ , мкс прибл.	$\tau$ , мкс точное
1	43277	10340	52367	71.6973	16.8023	86.8473	779.522	707.521
2	42906	10267	52979	71.0790	16.6807	87.8673	-45.017	-45.286
3	42772	10196	53195	70.8557	16.5623	88.2273	-325.12	-339.72
4	42596	10665	51902	70.5623	17.3440	86.0723	861.604	775.144
1+2+3+4	171551	41468	210443	71.0486	16.8473	87.2536	281.531	271.517

Как видим, в этом случае результаты каждого отдельного 10-минутного эксперимента являются совершенно ненадёжными (вплоть до получения отрицательных значений разрешающего времени) из-за недостаточной накопленной статистики отсчетов. Только суммарный 40-минутный эксперимент начинает давать адекватные (хотя еще и недостаточно точные) значения для разрешающего времени системы. При этом отличия между приближенным и точным значением теперь не превышают 4%, что согласуется с очень малым значением  $m_\Sigma \cdot \tau \approx 0,02$  для данного эксперимента.

Можно сделать вывод, что приближённая формула для разрешающего времени системы даёт хорошую точность только при использовании достаточно слабых источников, для которых выполняется условие  $m_\Sigma \cdot \tau \ll 1$ . Однако, при использовании таких слабых источников время проведения эксперимента должно составлять несколько часов для получения достаточно надёжной статистики, что препятствует проведению данного эксперимента в рамках лабораторного занятия.

Таким образом, мы предлагаем эффективный и наглядный способ изучения характеристик временного разрешения и его составляющих для счетчика Гейгера-Мюллера с использованием разработанной лабораторной установки на базе платформы Ардуино. Данный подход позволяет экспериментально оценить разрешающее время счетчика с хорошей точностью, располагая

источниками невысокой активности за время порядка нескольких десятков минут, и может быть эффективно использован в лабораторном практикуме по изучению детекторов ионизирующего излучения.

### *Литература*

1. Практикум по ядерной физике. Под редакцией В. О.Сергеева. СПбГУ, 2006.

УДК 517.968.21+517.958.71

## **АНАЛИТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА БЕСКОНЕЧНЫХ НЕПРЕРЫВНЫХ ДРОБЕЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В КОНСТРУКТИВНОЙ ТЕОРИИ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ ТЕОРИИ ПЕРЕНОСА ИЗЛУЧЕНИЯ**

Роговцов Н.Н.

Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь

В работе кратко описаны основные аналитические свойства бесконечных непрерывных дробей, которые играют ключевую роль в конструктивной теории (КТ) характеристических уравнений теории переноса излучения [1,2]. Эти дроби являются мероморфными функциями на множестве  $C \setminus ((-i\infty, -i] \cup [i, +i\infty))$ , где  $C$  - открытая комплексная плоскость. КТ и метод редукции общих соотношений инвариантности [3,4] позволяют эффективно решать сложные многомерные краевые задачи для уравнения переноса излучения. Особую роль в КТ играют аналитические свойства таких дробей [1,2]: