

ДОЗИМЕТР: ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ИНТЕРВАЛОВ ДО ПЕРВОГО СОБЫТИЯ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ СЧЕТЧИКА ГЕЙГЕРА. ОПЫТ ПРАКТИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ.

Солодкий Д.А., Федоренко В.В.

"Софт-Эксперт», 124482, г. Москва, Зеленоград, Савелкинский проезд, дом 4, офис 812.

Описывается устройство и метод измерения мощности дозы излучения радиационного поля с использованием счетчика Гейгера и базирующийся на выражении $R=K/t$, R - мощность дозы, t – среднее время до регистрации первого импульса с момента включения счетчика, K - коэффициент пропорциональности - константа, характеристика аппаратуры. Исследуются преимущества данного метода перед стандартным подсчетом импульсов (счетчик Гейгера с постоянно поданным напряжением смещения).

Счетчики Гейгера широко используются в детектировании ионизирующего γ –излучения благодаря высокой чувствительности, большой амплитуде импульса, хорошей стабильности, простоте использования и доступности. Но известные проблемы, такие как "мертвое время", эффективность регистрации, ток насыщения, перекрытие импульсов, ограниченный срок службы, выраженный в общем количестве регистрируемых разрядов (порядка $10^{10} - 10^{12}$) позволяют использовать счетчики Гейгера в режиме подсчета импульсов только в узком диапазоне измерений мощности дозы. Для используемого счетчика СБМ-21 диапазон составляет от 0.092 мкР/с до 400 мкР/с (0.0032 мЗв/ч до 12.63 мЗв/ч).

В конце 80-х годов была предложена техника (Time-to-count) [1] расчета интенсивности поля при помощи измерения времени до прихода первого импульса после подачи напряжения смещения на счетчик Гейгера.

1. Принцип измерения

Традиционная техника измерения мощности дозы – метод подсчета импульсов состоит в том, что ведется подсчет импульсов в единицу времени (n). Скорость разрядов используется как мера мощности дозы.

$$R = f(n)$$

Ограничения возникают при больших мощностях доз из-за “мертвого времени” датчика.

В силу независимости событий в неперекрывающихся временных интервалах измерений распределение длительности времени между включением счетчика и первым отсчетом такое же, как распределение времени между двумя последовательными отсчетами.

Используемый в данной работе метод измерения “Time-to-count” моментом отсчета считает время ожидания с момента включения счетчика до момента первого импульса. Измеряемая мощность дозы излучения обратно пропорциональна времени ожидания:

$$R = K/t$$

Попадание частицы в счетчик является случайным событием, поэтому единичное измерение времени ожидания не даст статистически значимое значение измеряемой интенсивности. Т.е. для получения достоверного результата измерения времени до прихода первого импульса должны быть проведены многократно и усреднены. Поэтому алгоритм работы датчика следующий:

1. После генерации импульса напряжение со счетчика снимается, и он переходит в нерабочее состояние.
2. Далее в течении времени > 2 миллисекунд ожидание завершения процесса разряда.
3. Подается рабочее напряжение на счетчик, включается таймер измеряющий время до прихода первого импульса.

2. Обоснование метода: распределение длительности интервалов между последовательными событиями [3]

Вероятность того, что за время t в счетчик находящийся в поле интенсивности n попадет k частиц описывается распределением Пуассона:

$$p_k = \frac{(nt)^k}{k!} e^{-nt}$$

Ближайший отсчет произойдет между моментами t и $t + dt$, если в течение времени t не будет ни одного отсчета, а в течение dt произойдет один отсчет.

Вероятность первого события равна e^{-nt} , второго ndt . Оба события статистически независимы, поэтому для искомой вероятности $p(t)dt$ получим:

$$p(t)dt = e^{-nt} \cdot n \cdot dt$$

Откуда плотность вероятности:

$$p(t) = n \cdot e^{-nt}$$

Среднее значение длительности интервала дается соотношением:

$$\bar{t} = \int_0^{\infty} tp(t)dt = n \int_0^{\infty} te^{-nt} dt = \frac{1}{n}$$

Т.е. мы получили обоснование того, что измеряемая интенсивность излучения обратно пропорциональна времени ожидания до прихода первого импульса.

Среднее квадратичное:

$$\bar{t}^2 = \int_0^{\infty} t^2 p(t)dt = n \int_0^{\infty} t^2 e^{-nt} dt = \frac{2}{n^2}$$

Дисперсия:

$$D_t = \bar{t}^2 - \bar{t}^2 = \frac{1}{n^2}$$

Относительная флуктуация:

$$\delta_t = \frac{\sqrt{D_t}}{\bar{t}} = 1$$

Такое значение относительной флуктуации означает, что длительность интервала между последовательными срабатываниями счетчика довольно часто отличается от своего среднего значения в несколько раз в ту или иную сторону.

Рассмотрим вопрос о “мертвом” времени нашей измерительной системы. Таймер измеряющий время до первого импульса запускается вместе с подачей напряжения на счетчик и останавливается после прихода первого импульса. В интервал времени подсчитанный таймером входит время на приведение счетчика в рабочее состояние и время реакции измерительной системы на пришедший импульс. Поэтому интересна следующая ситуация.

Выберем фиксированный момент времени, $T = 0$. Пусть после него проходит время τ , в течение которого мы не фиксируем разряды счетчика. По прошествии указанного времени τ мы способны зафиксировать приход импульса. Время прихода первого импульса $\tau_{\text{им}}$. Какова функция распределения времени $T = \tau + \tau_{\text{им}}$, между стартом таймера и моментом прихода первого импульса? События в интервале τ и после него статистически независимы. Поэтому величина $\tau_{\text{им}}$ обладает теми же свойствами, что и величина t из формул (5) – (7). Из равенства

$$T = \tau + \tau_{\text{им}}$$

в котором τ является постоянной величиной, получаем

$$\bar{T} = \tau + \frac{1}{n}$$

$$D_T = \frac{1}{n^2}$$

Таким образом для правильного измерения мощности дозы нашим прибором будет необходимо измерить его “мертвое” время, которое является постоянной величиной и не зависит от интенсивности поля в котором проводятся измерения.

3. Оценка величины длительности интервала методом Монте-Карло [7]

Рассмотрим систему измерения времени прихода первого импульса. Промежуток времени до первого импульса τ есть случайная величина, распределенная в интервале $(0, \infty)$ с плотностью

$$p(t) = n \cdot e^{-nt}$$

где n интенсивность (импульс/сек).

Для того чтобы получить значение случайной величины ξ , распределенной в интервале (a, b) с плотностью $p(x)$ нужно решить уравнение

$$\int_a^{\xi} p(x) dx = \gamma$$

относительно ξ выбрав значение γ из интервала $[0, 1]$.

Для моделирования процесса измерения времени прихода первого импульса необходимо разыграть значение τ . Формулу для розыгрыша τ легко получить из уравнения (), которое в нашем случае:

$$\int_0^{\tau} n e^{-nt} dt = \gamma$$

Вычислив интеграл, получим

$$1 - e^{-n\tau} = \gamma$$

откуда

$$\tau = -\frac{1}{n} \ln(1 - \gamma)$$

Для оценки средней длительности временного интервала до прихода первого импульса $\bar{\tau}$ необходимо выбрать N независимых значений $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_N$ этой величины и вычислить оценку

$$\bar{\tau} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \tau_i = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[-\frac{1}{n} \ln(1 - \gamma_i) \right] = \frac{1}{n} \frac{\sum_{i=1}^N (-\ln(1 - \gamma_i))}{N}$$

Если N устремить к бесконечности, то получим

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=1}^N (-\ln(1 - \gamma_i))}{N} = \int_0^1 -\ln(1 - x) dx = 1$$

Следовательно, мы получаем уже известное соотношение между длительностью интервала времени до прихода первого импульса и интенсивностью:

$$\bar{\tau} = \frac{1}{n}$$

В действительности количество независимых значений N будет конечным числом и поэтому наша оценка будет не точна. Погрешность определяется из соотношения:

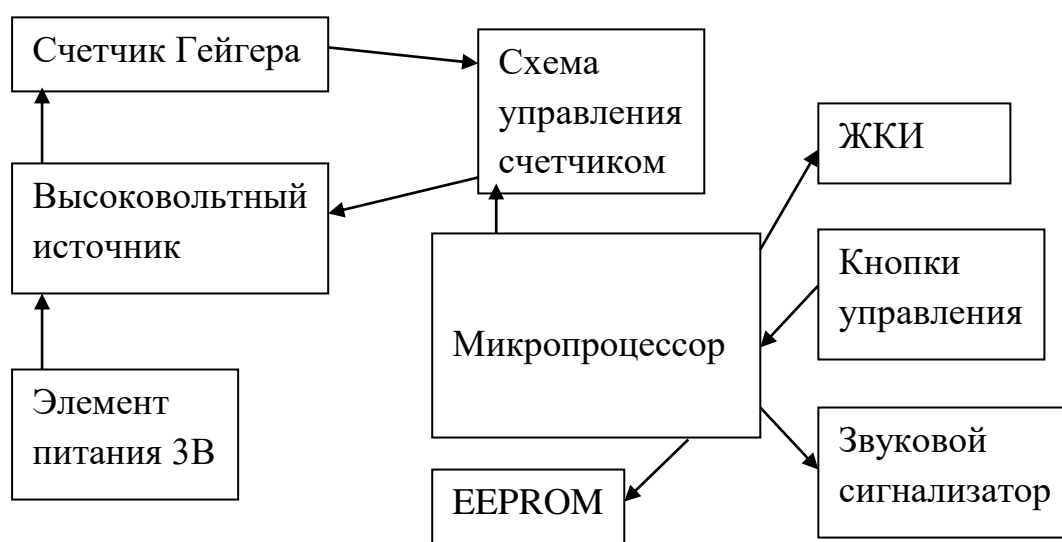
$$\left| \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \tau_i - \frac{1}{n} \right| = \left| \frac{1}{n} \left(\frac{\sum_{i=1}^N (-\ln(1 - \gamma_i))}{N} - 1 \right) \right|$$

Часто на практике значение погрешности оценивают по вероятной ошибке, которая приближенно равна $0.6745 \sqrt{\frac{D_{\tau}}{N}}$

N, кол-во значений	$\sqrt{D_{\tau}}$ стандартное отклонение	Среднее значение $\frac{\sum_{i=1}^N (-\ln(1-\gamma_i))}{N}$	Значение вероятной ошибки
100	0.9196	-0.9059	0.06
10000	0.9790	-0.9918	0.0066
1000000	0.9995	-1.0007	0.0006742
200	0.9958	-0.9946	0.0475

В приборе для расчета интенсивности излучения используется 200 измерений, и вероятная ошибка составляет около 5%.

4. Описание устройства



5. Преимущества метода

Более точный результат измерения: при использовании режима подсчета импульсов на результат расчета оказывает влияние “мертвое время” датчика и наличие перекрывающихся импульсов различной амплитуды в промежутке между “мертвым временем” и временем восстановления, что приведет к просчетам и повлияет на конечный результат. В режиме измерения интервала времени до прихода первого импульса, после фиксации импульса датчик отключается от высокого напряжения на время более 2 миллисекунд и тем самым на результат не скажутся пропуски и перекрытия импульсов.

Увеличение диапазона измерений: Измерения проводились в диапазоне от фоновых значений до мощности дозы 20 Зв/ч. При использовании стандартной схемы подсчета импульсов верхний предел для используемого датчика СБМ-21 не превышает 15 мЗв/ч.

Линейность в широком диапазоне измерений: Так как после каждого импульса датчик отключается на время необходимое для восстановления его работоспособности, то каждое последующее измерение производится в нормальных условиях, нет искажений амплитуды импульса, датчик не входит в насыщение, что обеспечивает линейность во всем диапазоне измерений.

Увеличение срока службы счетчика: Срок службы счетчика составляет порядка ($10^{10} - 10^{12}$) отсчетов это связано с ухудшениями характеристик анода, вызванных непрерывными разрядами. В режиме измерения длительности временных интервалов до прихода первого импульса измерения проводятся с паузами после прихода каждого зафиксированного импульса, рабочее время датчика короче. Таким образом общее количество импульсов, зафиксированных датчиком для подсчета мощности дозы излучения уменьшается, что ведет к увеличению срока службы датчика.

Литература.

- [1] United State Patent, patent number 4,605,859.
- [2] Wang min, Fang fang, Duan xiaojuan, Zhao xiang. DEVELOPMENT OF PERSONAL DOSIMETER BASED ON NEW MEASUREMENT METHOD. Proceedings of the 18th International Conference on Nuclear Engineering ICONE18, May 17-21, 2010, Xi'an, China.
- [3] В.И. Гольданский, А.В. Куценко, М.И. Подгорецкий. Статистика отсчетов при регистрации ядерных частиц. Государственное издательство физико-математической литературы, Москва, 1959.
- [4] В.И. Калашникова, М.С. Козодаев. Детекторы элементарных частиц. Издательство “Наука”, главная редакция физико-математической литературы, Москва, 1966.
- [5] В. Векслер, Л. Трошев, Б. Исаев. Ионизационные методы исследования излучений. Государственное издательство технико-теоретической литературы, Москва, 1949.
- [6] Методы обработки результатов наблюдений при измерениях. Труды метрологических институтов СССР. Выпуск 242 (302). ISSN 0371-957X. Ленинград 1979.
- [7] И.М. Соболев. Метод Монте-Карло. Издательство “Наука”, главная редакция физико-математической литературы, Москва, 1985.