

1. Ланин, В.Л. Электромонтажные соединения в электронике: технология, оборудование, контроль качества / В.Л. Ланин, В.А. Емельянов. – Минск: Интегралполиграф, 2013. – 406 с.
2. Интегрированные технологии микро- и наноструктурированных слоев / А.П. Достанко [и др. ] ; под ред. А.П. Достанко и В.Л. Ланина. – Минск: Бестпринт, 2013, –189 с.

УДК 621.384.2

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ СРЕДНИХ УГЛОВ РАССЕЯНИЯ БЕТА-ЧАСТИЦ В РАДИОИЗОТОПНОМ ПЛОТНОМЕРЕ

Ермакович О.Л., Лисовский Г.А., Титовицкий И.А.

Институт прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко БГУ  
Минск, Республика Беларусь

Одной из проблем при использовании радиоизотопного плотномера в составе сканирующей системы для непрерывного контроля массы квадратного метра бумажного полотна является проблема по минимизации погрешности прибора при вертикальном смещении полотна в измерительном зазоре. Указанный сдвиг вызывает нежелательное изменение сигнала детектора, которое обрабатывающая программа ошибочно воспринимает как изменение массы. Причина изменения сигнала: уширение первичного пучка бета-частиц в результате их рассеяния в контролируемом материале и, как следствие, выход части потока в малочувствительную область детектора или вовсе за его пределы. Именно рассеяние бета-частиц обуславливает чувствительность получаемой информации к геометрии измерительного тракта, что нашло подтверждение в экспериментах по измерению коэффициента поглощения бета-частиц [1].

Снижение указанной погрешности можно реализовать путем локализации рассеянного излучения в более узком телесном угле. При этом не следует забывать, что любое ограничение потока бета-частиц вызывает рост случайной составляющей  $\Delta_{сл}$  основной погрешности  $\Delta$ , вызванной статистическим характером радиоактивного распада применяемого бета-источника  $Kr-85$ . В этой связи необходимо находить оптимальное соотношение между снижением  $\Delta_{сист}$  и ростом  $\Delta_{сл}$ . Одним из способов уменьшения погрешности плотномера является коллимация излучения непосредственно перед входным окном ионизационной камеры. Однако, без детального изучения процессов рассеяния в измерительном тракте радиоизотопного плотномера, невозможно целенаправленная разработка конструкции такого коллиматора.

Цель работы – определить средние углы в пространственном распределении рассеянного излучения в калиброванных пленках мер поверхностной плотности (МПП) [2]. Также исследовать угловую зависимость отклика камеры при зондировании узким лучом бета-излучения в радиальном направлении и, как следствие, выра-

ботать техническое решение по уменьшению погрешности измерений радиоизотопного плотномера.

В качестве датчика потока бета-частиц использовался блок детектирования радиоизотопного плотномера ЛЕБ-1 с цилиндрической токовой ионизационной камерой *LND 52024*. Входное окно камеры диаметром 70 мм представляло собой стальную фольгу толщиной 25 мкм. Выходной сигнал усиливался предварительным усилителем и далее поступал на вход АЦП. Сигнал камеры (десятичный код АЦП) пропорционален суммарной энергии потока частиц, проникающих в ее рабочий объем. В качестве источника бета-излучения использовался блок излучателя плотномера с закрытым источником *BKr.P02* заполненного радионуклидом *Kr-85* активностью 10 Гбк. Средняя энергия излучаемых бета-частиц – 0,246 МэВ, максимальное значение в спектре – 0,674 МэВ. В конструкцию блока излучателя были установлены дополнительные коллиматоры, формирующие узкий поток бета-частиц с углом раствора  $\sim 12^\circ$ . Вплотную к выходному окну коллиматоров помещались МПП с номинальными значениями плотности,  $г/м^2$ : 69, 178 и 400.

Достаточно большой радиус входного окна ионизационной камеры, равный 35 мм, позволяет с помощью отверстия с радиусом 1 мм сканировать в радиальном направлении ее отклик на поток рассеянного излучения. Указанное отверстие выполнено в стальной экранирующей пластине, перекрывающей входное окно камеры и оставляющей свободной для прохождения излучения лишь малую область. Пластина сдвигалась в плоскости параллельной входному окну с шагом 1 мм с одновременной регистрацией сигнала. Далее сигнал нормировался на свое максимальное значение при  $\rho = 0$ , где  $\rho$  – расстояние, отсчитываемое от центра входного окна камеры в ее радиальном направлении. Полученная экспериментальная зависимость  $N(\theta)$  несет в себе лишь частичную информацию об угловом распределении рассеянного излучения и требует внесения корректирующих поправок, вызванных

следующими двумя обстоятельствами. Первое связано с пропускной способностью в схеме измерения и обусловлено тем, что с ростом  $\rho$  усиливается влияние стенок отверстия. Это влечет за собой появление теневой области от падающего потока и, как следствие, сокращение площади зоны “засветки” в области дна отверстия, а также телесного угла, под которым видна площадка в направлении угла  $\theta$ . С учетом сказанного был введен корректирующий коэффициент  $\xi_1(\theta)$ .

Второй фактор, который необходимо учитывать при обработке результата измерений, связан с угловой зависимостью ослабления потока материалом входного окна камеры по причине изменения эффективной толщины окна. В приближении экспоненциального закона ослабления, определялся угловой коэффициент оконного ослабления  $\xi_2(\theta)$  с учетом эмпирической формулы для массового коэффициента поглощения [3]. Разделив экспериментальные значения  $N(\theta)$  на корректирующие коэффициенты, получим функцию распределения потока рассеянной энергии бета-частиц в единичном телесном угле, описанном вокруг направления  $\theta$ .

$$f(\theta) = \frac{N(\theta)}{\xi_1(\theta) \cdot \xi_2(\theta)} \quad (1)$$

Принимая во внимания аксиальную симметрию рассеянного излучения, полный поток в полусферу равен:

$$\int_0^{2\pi} f(\theta) \cdot d\Omega = 2\pi \int_0^{\pi/2} F(\theta) \cdot d\theta \quad (2)$$

Для вероятностной трактовки функции  $F(\theta)$  необходимо (2) умножить на нормировочный коэффициент, который обратит результат интегрирования в единицу. Поскольку в нашем случае аналитический вид функции  $f(\theta)$  неизвестен, а известны лишь ее дискретные значения, то операцию интегрирования можно заменить на операцию суммирования. Запишем условие нормировки:

$$k \cdot \sum_{i=1}^n F(\theta_i) = k \cdot \sum_{i=1}^n f(\theta_i) \cdot \sin(\theta_i) = 1, \quad (3)$$

где  $n=9$  – число сканирующих шагов. Отсюда находим нормировочный коэффициент  $k$ . Тогда средний угол рассеяния определяется суммированием первых моментов дискретного распределения:

$$\theta_{cp} = \frac{1}{k} \cdot \sum_{i=1}^n \theta_i \cdot f(\theta_i) \cdot \sin(\theta_i) \quad (4)$$

Результаты вычисления средних углов рассеяния по формуле 4 приведены в таблице 1.

Таблица 1

Масса МПП, г/м <sup>2</sup>	0	69	178	400
Средний угол рассеяния $\theta_{cp}$ , градусы	<8	26,6	29,3	30,8

Следует отметить сравнительно слабое рассеяние в случае отсутствия МПП на пути пучка бета-частиц, что вызвано рассеянием в столбе воздуха с расчетной массой  $\sim 9$  г/м<sup>2</sup>. Так как при расчетах предполагается локализация рассеивателя вплотную к выходному коллиматору блока излучателя, то для воздуха они не применимы. Можно лишь оценить верхний предел угла рассеивания из следующих соображений. Геометрия коллиматора обеспечивает конус, радиус основания которого в плоскости наблюдения равен 3,8 мм, что соответствует в схеме отсчета углов  $\sim 28^\circ$ . Выход излучения за пределы этого конуса обусловлен процессами непрерывного расширения пучка за счет рассеивания в воздухе. Сигнал на уровне 0,1 соответствует углу  $\theta \sim 35^\circ$ . Разность между этими величинами соответствует углу рассеивания  $7^\circ$ . Представленные результаты по среднему углу рассеивания  $\theta_{cp}$  в пленках лавсана справедливы также для бумаги, поскольку эффективные атомные номера этих материалов близки.

Полученные экспериментальные данные требуют выполнения следующих условий при коллимации рассеянного излучения на входе ионизационной камеры:

- радиус бета-“засветки” на входном окне не должен превышать 22 мм.
- для верхнего значения предела измерений 400 г/м<sup>2</sup> коллиматор должен быть прозрачным для прохождения излучения рассеянного в угол, немного превышающий его среднее значение (30,8<sup>0</sup>) не более, чем на 3-4<sup>0</sup>.

Предложенная в работе методика позволяет оценить параметры ячейки решетчатого коллиматора в виде сот или отверстий в зависимости от диапазона измерений массы и уменьшить погрешность измерений радиоизотопного плотности. Отношение диаметра ячейки такого коллиматора к ее глубине должно обеспечивать угол со значением, превышающем  $\theta_{cp}$  на 3-4<sup>0</sup>.

1. *Vapirev E.* Variations of the absorption coefficients in experiments with beta-particles / E. Vapirev, P. Grovez, N. Klasteva, T. Jordanov // Bulgarian Journal of Physics. – 1996. – Vol. 23. – № 1/2. – P. 17-26.
2. Меры поверхностной плотности для радиоизотопных толщиномеров. Общие технические условия: ГОСТ 8.171-75. – Введ. 1977-01-01 - М.: Изд-во стандартов. – 1975. – 36 с.
3. *Mahajan C. S.* Mass attenuation coefficients of beta particles in elements / C. S. Mahajan // Science Research Reporter. – 2012. – Vol. 2. – № 2. – P. 135-141.