

УДК 539.121.6/.7.07

СРАВНЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ДЕТЕКТОРОВ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ЭЛЕМЕНТНОГО И ФАЗОВОГО АНАЛИЗА ВЕЩЕСТВА

Лобко А.С.¹, Мисевич О.В.¹, Холмецкий А.Л.²

¹Институт ядерных проблем БГУ

Минск, Республика Беларусь

²Белорусский государственный университет

Минск, Республика Беларусь

Для максимальной производительности измерений методами элементного и фазового анализа (ЭФА) вещества с использованием гамма-излучения (рентген-флуоресцентный анализ, гамма-резонансная спектроскопия, радиоизотопная плотнометрия и др.) необходима оптимизация применяемых детекторов излучения. Существующие детекторы обладают весьма различными характеристиками по быстродействию, эффективности регистрации и шумам, и результирующая производительность измерений есть нетривиальная функция этих параметров. Нами предложена методика сравнения детекторов, позволяющая выбрать детектор в большинстве вышеозначенных задач, а также проводить оптимизацию детекторов под определенную реализацию прибора.

Наиболее распространенной задачей ЭФА является определение абсолютного или относительного содержания элементов или соединений (фаз) элемента по величине отклика ε , определяемого как отношение площади A под информативным участком (в частности – линией) гамма-спектра к фону B в этом же энергетическом окне $\varepsilon=A/B$. Для малых концентраций искомого элемента (наиболее критичный случай) связь между искомой концентрацией и откликом линейна. Поэтому относительная статистическая погрешность концентрации равна относительной погрешности измерения отклика, которая с учетом свойств пуассоновских потоков может быть записана как:

$$\delta\varepsilon = \frac{2}{\varepsilon\sqrt{B}}. \quad (1)$$

Производительность измерений можно определить, как отношение числа измеренных спектров с заданной относительной погрешностью $\delta\varepsilon_{\text{зад}}$ ко времени измерения t [1]. Так как $B=I_b t$, где I_b – скорость счета выходных импульсов спектрометрического тракта, то время, необходимое для накопления спектра с заданной относительной погрешностью $\delta\varepsilon_{\text{зад}}$:

$$t = \frac{1}{\varepsilon^2 I_b} \cdot \frac{4}{(\delta\varepsilon_{\text{зад}})^2}.$$

Обратная величина

$$\frac{1}{t} = \varepsilon^2 I_b \cdot \frac{(\delta\varepsilon_{\text{зад}})^2}{4} \quad (2)$$

и есть искомая производительность измерений. При сравнении детекторов излучения достаточно оперировать коэффициентом $Q=\varepsilon^2 I_b$, стоящим в (2), который мы и будем называть производительностью измерений. Введем также понятие спектрометрической селективности детектора $S=\eta I/\eta_b I_b$, где I – скорость счета детектора в заданной геометрии измерений при некоей эталонной концентрации элемента, η и η_b – эффективности регистрации сигнала и фона соответственно. Эта величина может быть легко определена экспериментально. Тогда можно показать, что отношение производительности измерений для двух детекторов в геометрии пропускания и загрузках детекторов, далеких от предельной:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{\eta_1 I_1 S_1 [S_2 + 1]}{\eta_2 I_2 S_2 [S_1 + 1]}. \quad (3)$$

Для удобства дальнейшего анализа условно введем в рассмотрение “идеальный” детектор гамма-квантов, для которого $\eta=1$ и $S=\infty$. Тогда отношение производительностей измерений для анализируемого Q и идеального $Q_{\text{ид}}$ детекторов равно

$$\frac{Q}{Q_{\text{ид}}} = \frac{\eta S}{[S + 1]} \quad (4)$$

Соотношение (4) позволяет сделать важные выводы: 1) при величине спектрометрической селективности, заметно большей единицы, ее дальнейший рост не приводит к сколько-нибудь значительному возрастанию производительности измерений; 2) производительность измерений линейно зависит от эффективности регистрации детектора.

В случае загрузок детекторов, приближающихся к предельным:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{I_{L1} S_1^2 [S_2 + 1]^2}{I_{L2} S_2^2 [S_1 + 1]^2}, \quad (5)$$

где $I_{L1,2}$ – предельно допустимые загрузки детекторов.

Сравнение (4) и (5) показывает, что в случае предельных загрузок детекторов влияние спектрометрической селективности сказывается сильнее, чем при малых скоростях счета.

В геометрии рассеяния также может быть ис-

пользовано выражение (4), так как скорость счета для рассеянного излучения, как правило, как минимум на 2 порядка ниже интенсивности прямого излучения.

Для демонстрации результативности предложенных соотношений (3-5) сравним наиболее распространенные детекторы мягкого гамма-излучения, взяв их параметры для гамма-линии железа-57 с энергией гамма-квантов $E=14,4$ кэВ: полупроводниковые (ППД), пропорциональные и сцинтилляционные детекторы с тонкими кристаллами NaI(Tl) и YAP [2, 3]. Для ППД можно принять $\eta \approx 0,9$ и $S = \infty$, т.е. он близок к “идеальному” при малых нагрузках спектрометрического тракта. Для пропорционального счетчика $\eta \approx 0,5$ (при использовании в качестве рабочего газа аргон-ксеноновой смеси), типичные значения $S \approx 10$.

Тогда для случая малых нагрузок производительность измерений

$$Q_{\text{проп}} \approx 0,5 Q_{\text{ид}}.$$

Для сцинтилляционного NaI(Tl) детектора $\eta \approx 0,9$; $S \approx 4$. Отсюда

$$Q_{\text{NaI}} \approx 0,7 Q_{\text{ид}}.$$

Для сцинтилляционного YAP детектора $\eta \approx 0,9$, $S \approx 3$,

$$Q_{\text{YAP}} \approx 0,6 Q_{\text{ид}}.$$

Таким образом, мы заключаем, что применение сцинтилляционных детекторов оказывается более выгодным, чем пропорциональных, несмотря на лучшее энергетическое разрешение последних. Причиной этому выступает существенно нелинейная зависимость производительности измерений от спектрометрической селективности, тогда как Q является линейной функцией от эффективности регистрации гамма-излучения. С другой стороны, различие в производительности измерений при малых нагрузках детекторов невелики.

В случае предельных нагрузок детекторов, реализуемом как при применении источников излучения высокой активности, так и увеличении телесного угла регистрации гамма-квантов (так называемая “сжатая” геометрия измерений), интенсивность регистрируемых событий в рабочем энергетическом окне следует положить равной этому предельному значению I_L . В первом приближении можно принять, что для пуассоновского потока регистрируемых сигналов, $I_L \approx 0.1/\tau$, где τ - длительность выходного сигнала детектора по уровню 0.1. В этом случае доля просчетов регистрируемых сигналов составляет около 5%, и практически не вносит искажений в измеряемые спектры. Для ППД, пропорциональных и сцинтилляционных NaI(Tl) детекторов длительность выходных сигналов имеет порядок величины около 1 мкс. Предельная интегральная нагрузочная способность этих детекторов, в соот-

ветствии с приведенным выше критерием, составляет около 10^5 с^{-1} , а значение I_L (скорость счета в рабочем энергетическом окне) можно принять примерно в десять раз меньше. Таким образом, для этих детекторов получаем оценку $I_L \approx 10^4 \text{ с}^{-1}$. Для детектора YAP предельная скорость счета на порядок выше $I_L \approx 10^5 \text{ с}^{-1}$. Подставляя в (5) соответствующие численные значения, получаем:

$$\frac{Q_{\text{проп}}}{Q_{\text{ППД}}} \approx 0,8; \quad \frac{Q_{\text{NaI}}}{Q_{\text{ППД}}} \approx 0,6; \quad \frac{Q_{\text{YAP}}}{Q_{\text{ППД}}} \approx 5,6.$$

Отличие в отношениях производительности измерений по сравнению со случаем малых нагрузок рассматриваемых детекторов объясняется тем, что достижение предельных нагрузочных способностей трактов регистрации реализуется, вообще говоря, при различных геометриях измерений для каждого из детекторов. В частности, при сравнении ППД и пропорционального счетчика предполагается, что для последнего используется либо больший телесный угол регистрации, либо более активный источник из-за меньшей эффективности регистрации. Наиболее интересный вывод из последнего сравнения состоит в обосновании существенного превосходства быстродействующих детекторов над медленными конкурентами, несмотря на лучшее энергетическое разрешение последних.

Таким образом, полученные выражения позволяют выбрать наиболее подходящий детектор гамма-излучения для основных схем анализа вещества в геометрии пропускания и рассеяния. Для ряда практических реализаций рентген-флуоресцентного анализа и гамма-резонансных фазовых анализаторов соединений железа и олова подтвердились оценки производительности, сделанные по (4) и (5). Приведенный подход может быть обобщен и для других схожих прикладных задач с использованием ионизирующих излучений в качестве зондирующих пучков.

1. Comparison of the productivity of fast detectors for Mossbauer spectroscopy / A.L. Kholmetskii, M. Mashlan, O.V. Missevitch et al // Nucl. Instr. and Meth. – B124. – 1997. – P. 143-144.
2. Fedorov A., Lobko A., Missevitch O. Novel fast-acting scintillation detectors for wide energy range applications // Advanced Radiation Sources and Applications/ Ed. by H. Wiedemann. NATO Science series II, Mathematics, Physics and Chemistry. – Vol.199. – Springer. – 2006.
3. Лобко А.С., Мисевич О.В., Холмецкий А.Л. Быстродействующий детектор излучения для рентгеновских систем неразрушающего контроля и медицинской техники / Сборник материалов: 5-я Межд. научно-технич. конференция «Приборостроение-2012». – Мн.: БНТУ. – Минск. – 2012. – С. 92-93.