

порогу, определялись по 100 реализациям процесса $y_{1,k}(\tau)$.

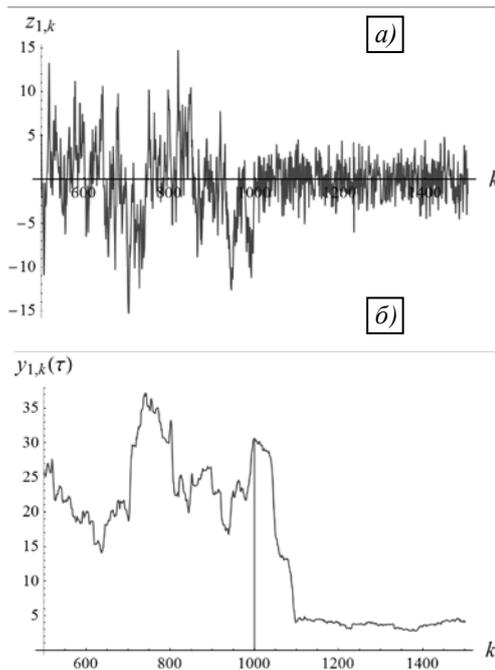


Рисунок 2 – Выход первого датчика: а) результаты измерений ($z_{1,k}$); б) математическое ожидание квадрата измерений ($y_{1,k}(\tau)$)

Заключение. Работоспособность фильтра при отказе датчика может быть достигнута путем резервирования. При этом требуется выполнение

операции обнаружения момента отказа, отключения канала отказавшего датчика и изменения алгоритма фильтрации с учетом смены условий функционирования. При статистическом подходе алгоритмы выполнения этой процедуры оказываются весьма сложными и требуют больших вычислительных затрат при реализации в реальном масштабе времени. Сокращение возможно путем перехода от статистического к детерминистскому подходу для синтеза фильтров на основе рекуррентного метода наименьших квадратов. В работе приведена методика такого синтеза и на ее основе получены уравнения фильтра и обнаружителя отказов. Структура этих уравнений получается достаточно простой для реализации и позволяет сохранять работоспособность фильтра при отказах датчиков. Решение конкретного примера демонстрирует технологию использования предложенной методики. Помимо резервирования возможно обеспечение отказоустойчивости алгоритмическим путем, что служит предметом дальнейших исследований.

1. Артемьев, В.М. Теория динамических систем со случайными изменениями структуры / В.М. Артемьев. – Минск: Высшая школа, 1979. – 160 с.
2. Казаков, И.Е. Анализ систем случайной структуры / И.Е. Казаков, В.М. Артемьев, В.А. Бухалев. – М.: Наука, 1993. – 270 с.
3. Артемьев, В.М. Рекуррентная линейная фильтрация случайных последовательностей методом наименьших квадратов с регуляризацией решения / В.М. Артемьев, А.О. Наумов, Л.Л. Кохан // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2017. – № 1. – С. 102–107

УДК 539.121.6/7.07

ГАММА-РЕЗОНАНСНЫЙ КОНЦЕНТРАТОМЕР ДИОКСИДА ОЛОВА

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

¹НИУ «Институт ядерных проблем» БГУ

²Белорусский государственный университет
Минск, Беларусь

Актуальность измерений малых концентраций диоксида олова SnO_2 (минерала касситерита) в полевых условиях возрастает по мере роста потребностей электронной промышленности во всем мире. Задача гамма-резонансной концентратометрии SnO_2 была поставлена вскоре после открытия эффекта Мессбауэра. Например, во ВНИИФТРИ (г. Менделеево, РФ) был разработан мессбауэровский анализатор касситерита КМКР, использующий резонансную ионизационную камеру для регистрации рассеянного пробой гамма-излучения. Лабораторные варианты прибора имели предел обнаружения касситерита на уровне 0,01% при времени анализа несколько минут. Однако серийное производство не было организовано из-за невоспроизводимости параметров резонансной ионизационной камеры.

Кроме того, показания КМКР существенно зависели от минерального состава проб.

Повысить точность измерений и снизить влияние состава проб на показания концентратомера удалось в приборе, рассмотренном ниже.

Зависимость величины резонансного эффекта от концентрации искомого вещества.

Для мессбауэровской концентратометрии с применением резонансного детектора нами было получено [1] соотношение, связывающее величину измеряемого резонансного эффекта

$E = [I(0) - I(\infty)] / I(\infty)$ с искомой концентрацией C :

$$\varepsilon = \frac{k C + \gamma}{(1 - k_1 C)(1 + aC)}, \quad (1)$$

где коэффициент пропорциональности k , определяющий чувствительность прибора, а также параметр k_1 слабо зависят от минерального состава проб. Кроме того, $k_1 \ll 1$, что позволяет считать зависимость линейной до концентраций порядка единиц процентов. При больших концентрациях зависимость становится нелинейной из-за влияния параметра a , который к тому же зависит от вещественного состава.

Для снижения влияния вариаций вещественного состава проб на величину a и расширения диапазона измерения концентраций оксидного олова в сторону верхних значений, нами предложен модифицированный алгоритм вычисления C . В его основе лежит учет информации о вещественном составе исследуемых образцов, содержащейся в интенсивности рассеянного ими излучения при расстройке резонанса $I(\infty)$:

$$I(\infty) \sim (1 - k_1 C). \quad (2)$$

С учетом (2) получаем новое выражение для связи резонансного эффекта с концентрацией:

$$\varepsilon = \frac{k C + \gamma}{1 - k_1 C + a'' [I(\infty) / I_0] C}, \quad (3)$$

где I_0 – известная интенсивность зондирующего излучения, а параметр a'' практически не зависит от вещественного состава исследуемого образца.

Таким образом, выражение (3) представляет собой основную аналитическую зависимость мессбауэровской концентратометрии в широком диапазоне концентраций, и было положено в основу функционирования прибора.

Выбор геометрии измерений и источника излучения.

Один из основных критериев выбора геометрии измерений – реализация достаточно больших углов рассеяния, при которых минимизируется релеевское рассеяние. С другой стороны, геометрия измерений должна обеспечивать работу с мессбауэровским источником ^{119}Sn достаточно большой площади с целью минимизации потерь излучения на самопоглощение и уширение линии испускания. Оптимальное сочетание этих особенностей реализовано в геометрии, показанной на рис. 1.

Резонансный детектор РД и источник излучения расположены на минимальном расстоянии друг от друга по одну сторону от образца, обеспечивая максимально возможный средний угол рассеяния регистрируемого гамма-излучения. Диаметр чувствительного элемента резонансного детектора – 40 мм, расстояние до пробы – 35 мм.

Свинцовый экран (СЭ) толщиной 2 мм защищает детектор от прямого излучения. Осевая симметрия геометрии измерения позволяет применить источник кольцевой формы (КИ) достаточно большой площади (внешний диаметр источника – 73 мм, внутренний – 53 мм). Начальная активность источника – 2 ГБк, а удельная

поверхностная активность составила около 10^8 Бк/см², что позволило практически полностью исключить самопоглощение излучения в источнике и увеличить срок его эксплуатации до 1,5 лет при периоде полураспада изотопа $^{119\text{m}}\text{Sn}$ 290 дней.

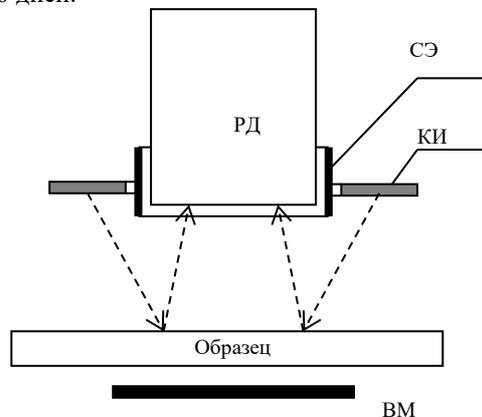


Рисунок 1. Геометрия измерений для мессбауэровской концентратометрии: СЭ – свинцовый экран; КИ – кольцевой источник; ВМ – вспомогательная мишень

Стабилизированный резонансный сцинтилляционный детектор для олова-119.

Одним из принципиальных решений, положенных в основу разработки мессбауэровского концентратометра, является использование резонансного детектора для регистрации рассеянного гамма-излучения, позволяющего повысить чувствительность измерений в $S_a f'$ раз, где f' – вероятность безотдачного излучения. Наибольшую величину абсолютной селективности S_a [2] среди известных типов резонансных детекторов для изотопа ^{119}Sn имеет резонансный сцинтилляционный детектор (РСД). Его основной элемент – тонкий органический сцинтиллятор, в котором растворено вещество конвертора. В качестве конвертора для целей мессбауэровской концентратометрии касситерита было также выбрано соединение $^{119}\text{SnO}_2$, для которого максимум резонансного поглощения совпадает с максимумом резонансного поглощения касситерита. Эффективность регистрации безотдачного излучения 23,8 кэВ составляет около 30...40%; нерезонансного излучения – менее 1%. Для преобразования световых импульсов в электрические сигналы использован ФЭУ. Работа с малыми сигналами РСД требует применения оптимизированных схем обработки сигнала. Накопленный нами опыт работы с пластическими сцинтилляторами на низких энергиях [3] позволил реализовать потенциальные преимущества РСД на практике. Абсолютная селективность РСД составила $S_a \approx 45$.

Полученное значение S_a позволяет оценить численное значение коэффициента $k \approx 250$. При этом нижний предел измерения концентрации оксидного олова имеет порядок 10^{-5} . В то же время, величина резонансного эффекта при таких концентрациях $\varepsilon \approx kC \approx 0,003$, и для реализации

потенциально высокой чувствительности измерений с помощью РСД необходимо обеспечить высокую стабильность его параметров с тем, чтобы изменения в интенсивности регистрируемого излучения в несколько долей процента были бы надежно зарегистрированы. Для этого применена комбинированная система стабилизации энергетической шкалы РСД. Система работает со световым репером в процессе измерения и проводит периодическую подстройку светового репера по радиоактивному источнику измерений. Реперные сигналы от радиоактивного источника формируются при регистрации рассеянного гамма-излучения от вспомогательной мишени (ВМ) из SnO₂ в перерывах между измерениями при удалении образца из зоны измерения (рис. 1). Такая организация системы позволяет обеспечить непрерывную стабилизацию коэффициента передачи РСД с квазиабсолютным репером с погрешностью не хуже 0,1%.

Основные технические характеристики мессбауэровского анализатора касситерита:

– диапазон измерения концентрации

SnO₂, вес. % 0,005–40;

– относительная погрешность измерений

в диапазонах:

0,005–0,01 вес. % 30–20%;

0,01–0,05 вес. % 20–5%;

0,05–0,1 вес. % 5–3%;

0,1–10 вес. % < 5%;

10–40 вес. % <10%;
 – время анализа от 5 с до 3 мин;
 – масса порошковой пробы 0,03–0,05 кг;
 – масса / габариты прибора 8 кг / 38×22×15 см;
 – питание прибора 9÷13 В DC; 6 Вт.

Результаты опытной эксплуатации приборов в полевых условиях показали их высокую надежность, хорошую воспроизводимость результатов при рекордной для физических методов анализа фазового вещества минимально определяемой концентрации оксидного олова.

1. Mossbauer concentratometry as a new analytical method / A. Kholmetskii, O. Misevich, N. Abramchuk e.a. // Nucl. Instr. and Meth. – 1994. – В94. – Р. 493–498.
2. Сравнение производительности измерений детекторов гамма-излучения для элементного и фазового анализа вещества / А. Лобко, О. Мисевич, А. Холмецкий // Приборостроение: материалы 8-й междунар. науч.-техн. конф./ Белорус. нац. техн. ун-т; редкол.: О. К. Гусев (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2015. – С. 113–114.
3. Детектирование интенсивных потоков мягкого рентгеновского излучения пластическими сцинтилляторами / А. Лобко, О. Мисевич, А. Федоров // XLII Межд. Тулиновская Конф. по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами: тезисы докладов / под ред. М.И. Панасюка. – М.: Университетская книга, 2012. – С. 57.

УДК 681

ПРОГРАММНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ АЛГОРИТМОВ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ ЦИФРОВОГО ЭЛЕКТРОМЕТРИЧЕСКОГО ЗОНДА

Колтунович Т.², Костина Г.А.¹, Пантелеев К.В.¹, Самарина А.В.¹, Свистун А.И.¹, Тявловский К.Л.¹

¹ Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

² Люблинский технический университет, Люблин, Польша

В данной работе рассмотрены алгоритмы обработки измерительных сигналов цифрового электрометрического зонда в реальном времени с использованием инструкций библиотеки цифрового сигнального процессора DSP (Digital Signal Processor) управляющего микроконтроллера.

Цифровой электрометрический зонд реализует косвенный метод измерения контактной разности потенциалов [1]. Он выполнен на базе управляющего 32-разрядного микроконтроллера семейства STM32F4 с ядром Cortex M4. Основными преимуществами микроконтроллеров данного семейства является набор инструкций DSP, а также модуль операций с плавающей точкой [2], что обеспечивает максимальную производительность и эффективность обработки измерительных сигналов. Косвенный метод измерения заключается в математическом анализе параметров компенсационной зависимости сигнала измерительного динамического конденсатора при фиксированных потенциалах компенсации.

В цифровом электрометрическом зонде полный измерительный цикл состоит из двух последовательных определений амплитуд сигналов при первом и втором фиксированных потенциалах компенсации и последующего вычисления значения контактной разности потенциалов. Вычисления выполняются путем линейной аппроксимации компенсационной зависимости. Для этого внутренний таймер управляющего микропроцессора осуществляет предварительное деление тактовой частоты до величины в 128 раз большей частоты колебаний эталонного образца. Импульсы таймера управляют считыванием записанной в памяти микроконтроллера таблицы синуса (128 точек) и одновременно записывают полученные отсчеты в буфер памяти микроконтроллера. В этом случае амплитуда измерительного сигнала определяется по четырем периодам колебания зонда, что соответствует 512 точкам.

Массив измерительных данных, для ускорения алгоритмов обработки сигнала, может быть