

УДК 539.143 + 535.33: 539.1

© А. А. Беляев, В. С. Володин, С. М. Иркаев, В. В. Панчук, В. Г. Семенов

ОСОБЕННОСТИ РЕЗОНАНСНОГО ДЕТЕКТИРОВАНИЯ В МЁССБАУЭРОВСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

Применение резонансных детекторов в мёссбауэровской спектроскопии позволяет повысить разрешающую способность и чувствительность и таким образом расширить информационный потенциал метода. В работе с целью создания эффективных резонансных детекторов проведен расчет формы спектральной линии для различных конверторов, приведены результаты экспериментальных исследований в наиболее перспективных областях применения мёссбауэровской спектроскопии.

Кл. сл.: мёссбауэровская спектроскопия, резонансный детектор, резонансное детектирование, ядерный гамма-резонанс

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время значительно возрос интерес к исследованиям наноструктурных материалов. Однако известно, что мёссбауэровские спектры наночастиц часто имеют сложную или неразрешенную сверхтонкую структуру спектра и небольшую величину резонансного поглощения. Следует отметить, что такая же картина наблюдается при исследовании металлоорганических соединений и биологических объектов, а также пост-эффектов при ядерных превращениях. Поэтому проблема увеличения разрешающей способности и чувствительности является наиболее важной задачей при исследовании таких материалов.

Известны три метода увеличения разрешающей способности: метод запаздывающих совпадений [1], метод резонансной фильтрации [2] и метод резонансного детектирования [3]. Анализ экспериментальных данных показывает, что оптимальным методом увеличения разрешающей способности с одновременным увеличением чувствительности является метод резонансного детектирования.

Преимущество резонансных детекторов над обычными ядерно-физическими детекторами заключается в том, что они обладают одновременно высокой селективностью к резонансному излучению и позволяют уменьшить экспериментально наблюдаемую ширину спектральной линии. Кроме того, в режиме эмиссии при исследованиях пост-эффектов ядерных превращений отпадает необходимость в использовании поглотителя-анализатора спектральной линии, и величина резонансного эффекта достигает нескольких сот процентов.

ПРИНЦИП РАБОТЫ

Взаимодействие падающего излучения со сре-

дой приводит к возникновению вторичных излучений различного типа; это — рассеянное γ -излучение, вторичное рентгеновское излучение, электроны конверсии и Оже-электроны. В качестве примера на рис. 1 схематично изображен процесс разрядки возбужденного состояния ядра ^{57}Fe , обусловленный возбуждением ядра мёссбауэровским излучением.

В основу работы резонансных детекторов положена регистрация вторичного излучения, преимущественно вторичных электронов. В качестве детектора вторичного излучения можно использовать любой тип ядерно-физических детекторов: например ионизационную камеру, пропорцио-

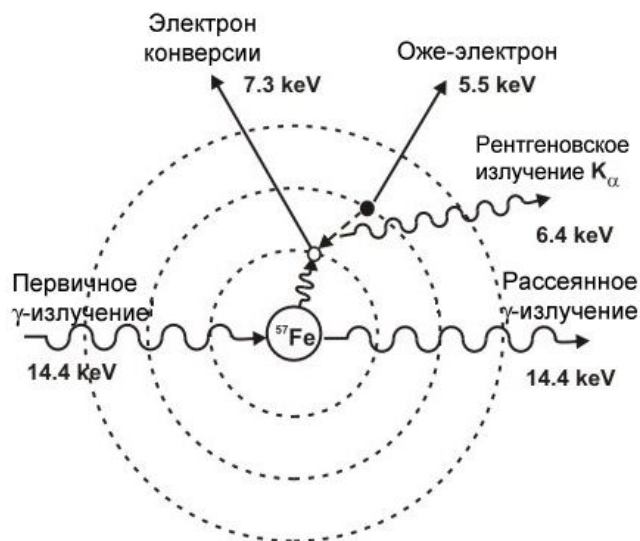


Рис. 1. Процесс разрядки возбужденного состояния ядра ^{57}Fe

нальный газовый детектор, лавинный детектор, вторичный электронный умножитель, твердотельный и воздушный сцинтилляционные детекторы и полупроводниковый детектор.

Однако, как показывают экспериментальные исследования, оптимальным является применение пропорциональных газовых детекторов. Упрощенная конструкция газового пропорционального резонансного детектора представлена на рис. 2.

Резонансное вещество (конвертор) помещается внутрь рабочего объема детектора. Для повышения эффективности регистрации мёссбауэровского излучения внутри объема детектора помещаются три конвертора, причем средний конвертор является двухсторонним. Анодом детектора является позолоченная вольфрамовая нить диаметром 20 мкм, закрепленная на изолирующих вставках на расстоянии 2 мм от поверхности конвертора.

Для регистрации вторичных электронов в интегральном режиме рабочий объем детектора заполняется газовой смесью He + 8 % CH₄. Как показывают теоретические расчеты и экспериментальные исследования, вещество конвертора должно иметь:

- ширину спектральной линии поглощения, близкую к естественной;
- большую величину фактора Лэмба—Мёссбауэра (f -фактора);
- максимальное количество резонансных атомов и, наконец,
- спектральную линию, точно совпадающую в энергетической шкале с положением спектральной линии источника. Даже небольшой изомерный сдвиг приводит к искажению формы экспериментального спектра и потере чувствительности, а большие изомерные сдвиги, значительно превосходящие естественную ширину линии, приводят к исчезновению эффекта.

Влияние изомерного сдвига источник—конвертор на форму экспериментальной спектральной линии рассчитывалось нами на основе

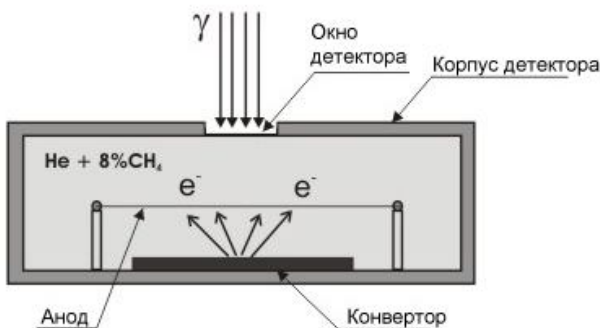


Рис. 2. Упрощенная конструкция газового резонансного детектора

рассмотрения интегралов пропускания. Определение физических параметров исследуемого вещества из мёссбауэровских спектров является типичной обратной задачей спектроскопических исследований и сводится к решению интегрального уравнения Фредгольма первого рода

$$f(y) = \int_a^b A(x, y)\varphi(x)dx. \quad (1)$$

Здесь $f(y)$ — измеряемая функция (экспериментальный спектр); $\varphi(x)$ — искомая функция, являющаяся характеристикой исследуемого образца и описывающая его реакцию на монохроматическое излучение; $A(x, y)$ — ядро интегрального уравнения, является аппаратной функцией, которая предполагается заданной.

В мёссбауэровской спектроскопии общий вид экспериментального спектра образца, измеренного в геометрии на пропускание, можно записать в виде

$$I(\nu) = I_0 \int_{-\infty}^{\infty} W_s \cdot W_a \cdot W_d dE, \quad (2)$$

где I_0 — интенсивность спектральной линии источника в резонансе; W_s — вероятность испускания источником гамма-квантов с энергией E ; W_a — вероятность прохождения гамма-квантов через поглотитель, содержащий резонансные ядра; W_d — вероятность поглощения излучения, прошедшего через исследуемый образец в обычном или резонансном детекторе; ν — относительная скорость движения образца.

В выражении (2) вероятности имеют следующий вид:

$$W_s = \frac{f_s \cdot \Gamma_s}{2\pi} \cdot \frac{1}{(E - E_0)^2 + \frac{\Gamma_s^2}{4}} + (1 - f_s),$$

$$W_a = \exp(-\mu_a(E) \cdot d_a),$$

$$W_d = \text{const } K_d,$$

где f_s — доля резонансных квантов, испускаемых источником без потери энергии на отдачу; E_0 — положение спектральной линии испускания источника; Γ_s — ширина линии источника; d_a — толщина образца; μ_a — линейный коэффициент поглощения для резонансных процессов в образце; K_d зависит от эффективности регистрации излучения, попадающего в окно детектора.

В случае нерезонансного детектирования форма спектра описывается интегралом пропускания, имеющим вид

$$I(\nu) = K_d \left(B + C \int_{-\infty}^{\infty} L(E) \exp[-\mu_a(E - \nu)d] dE \right). \quad (3)$$

$I(v)$ — интенсивность регистрируемого излучения; B — постоянная, характеризующая часть потока γ -квантов, которая была испущена источником с потерей энергии на отдачу; константа C определяется потоком резонансных γ -квантов, падающих на образец с фактором резонансного поглощения f . В таком представлении роль аппаратной функции $L(E)$ играет функция источника, имеющая форму лоренцевской кривой.

Константы B и C имеют следующий вид:

$$B = I_0 \exp(-\mu_a \cdot d_a) \cdot (1 - f), \quad C = I_0 \frac{2f}{\pi \Gamma}.$$

В выражении для B линейный коэффициент поглощения μ_a будет состоять только из нерезонансной части.

При замене детектора на резонансный интеграл пропускания (2) принимает вид

$$I(v) = K_{rd} \left(B_{rd} + C_{rd} \int_{-\infty}^{\infty} L(E) \cdot (1 - \exp[-\mu_{rd}(E) d_{rd}]) \times \exp[-\mu_a(E - v) d] dE \right). \quad (4)$$

Вместо W_d для нерезонансного детектора необходимо подставить $W_{rd} = K_{rd}(1 - \exp(-\mu_{rd}(E) \cdot d_{rd}))$, где K_{rd} — эффективность регистрации излучения, попадающего в окно резонансного детектора; d_{rd} — толщина конвертора в резонансном детекторе; μ_{rd} — линейный коэффициент поглощения конвертора для резонансных процессов.

В выражении (4) роль аппаратной функции будет играть произведение двух первых сомножителей, находящихся под знаком интеграла, каждый из которых является лоренцианом. Предположение о лоренцевской форме второго сомножителя оправдано, т. к. эффективная толщина конвертора $t_a = \mu_{0rd} d_{rd}$ мала ($t_a < 1$, а μ_{0rd} — линейный коэффициент поглощения конвертора в резонансе), поэтому в этом приближении мы можем заменить выражение во второй скобке на лоренциан с положительной амплитудой. В результате аппаратная функция будет иметь форму квадратичного лоренциана, у которого ширина на полувысоте будет равна 0.64 Г. Это аналогично тому, что источник имеет меньшую ширину линии излучения. Сразу же необходимо отметить, что в этом случае форма линии излучения будет отличаться от лоренцевской, но это можно учесть в окончательном алгоритме обработки экспериментальных спектров.

Константы B_{rd} и C_{rd} в этом случае имеют следующий вид:

$$B_{rd} = I_0 \exp(-\mu_a d_a) \cdot (1 - f) \times (1 - \exp(-\mu_{rd} \cdot d_{rd})) \cdot w_{phe};$$

$$C_{rd} = I_0 \frac{2f}{\pi \Gamma} w_{tot},$$

где весовые множители учитывают вероятность выхода фотоэлектронов w_{phe} — в отсутствие ядерного резонанса, w_{tot} — в условиях резонанса соответственно. Эти множители можно экспериментально определить, проведя сканирование излучения от источника относительно резонансного детектора. При увеличении эффективной толщины конвертора ширина аппаратной функции будет также увеличиваться.

Теоретическое описание формы мёссбауэровского спектра для системы источник—резонансный детектор будет иметь вид

$$I(v) = B_{rd} + C_{rd} \int_{-\infty}^{\infty} L(E) \cdot (1 - \exp[-\mu_{rd}(E - v) d_{rd}]) dE. \quad (5)$$

С обычным детектором теоретическая ширина линии в наблюдаемом спектре в случае бесконечно тонкого поглотителя равна 2 Г, т. е. сумме ширины линий источника и поглотителя. При регистрации резонансным детектором ширина спектральной линии составляет величину 1.43 Г. Поэтому применение резонансных детекторов дает наибольший выигрыш в тех случаях, когда линии в спектрах перекрывают друг друга и когда в спектрах линии с большой амплитудой скрывают линии с малой интенсивностью.

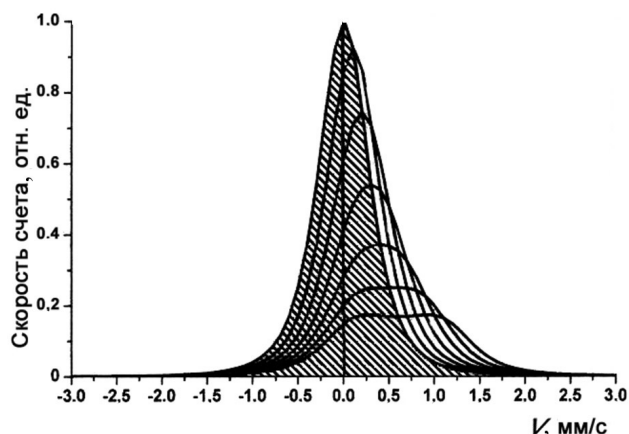


Рис. 3. Модельные мёссбауэровские спектры для различных изомерных сдвигов. Каждый спектр соответствует сдвигу на 0.2 Г

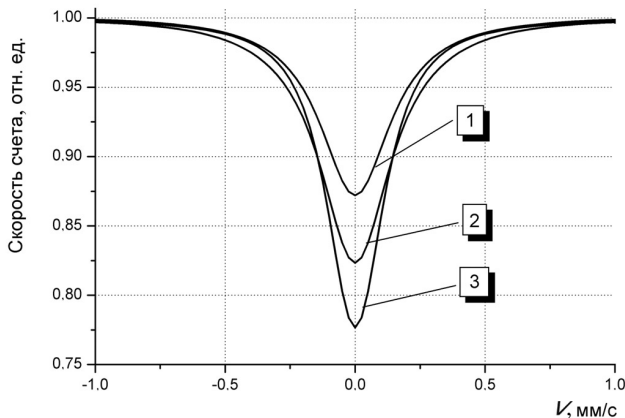


Рис. 4. Модельные мёссбауэровские спектры поглотителя, измеренные с помощью различных детекторов:

1 — пропорционального детектора; 2 — резонансного детектора с "черным поглотителем" в качестве конвертора; 3 — резонансного детектора с конвертором естественной ширины

Мы рассчитали влияние изомерного сдвига между источником и конвертором на положение и форму экспериментального спектра. Модельные мёссбауэровские спектры для различных изомерных сдвигов показаны на рис. 3 (случай нулевого изомерного сдвига выделен штриховкой). Как видно, увеличение изомерного сдвига приводит к уменьшению резонансного эффекта и изменению формы спектральной линии (каждый спектр на рисунке соответствует сдвигу на 0.2 Г). Из рисунка видно, что спектральная линия уширяется, форма линии искажается, и положение линии сдвигается. Поэтому при использовании резонансного детектора необходимо решить проблему несовпадения изомерных сдвигов источника и конвертора.

Представляет интерес случай, когда в качестве конвертора используется так называемый "черный поглотитель", который имеет ширину спектральной линии, намного превышающую естественную ширину линии. На рис. 4 представлены модельные спектры поглотителя, содержащего резонансные атомы ^{57}Fe , измеренные обычным (пропорциональным, пд) детектором, резонансными детекторами с конверторами естественной ширины и "черным поглотителем". При расчетах были приняты следующие параметры образца: ширина линии $\Gamma = 0.09$ мм/с; фактор Лэмба—Мёссбауэра 0.9; эффективная толщина 0.3. Ширина линии "черного поглотителя" принята равной 1.5 мм/с, что составляет $15 \Gamma_{\text{еств.}}$

Из рис. 4 видно, что спектр, измеренный с использованием резонансного детектора с конвертором естественной ширины, имеет большую интен-

сивность ($\varepsilon_{rd} = 22.3$ %) и меньшую ширину ($\Gamma_{rd} = 1.43 \Gamma = 0.13$ мм/с) по сравнению с резонансным детектором, у которого в качестве конвертора использован "черный поглотитель" ($\varepsilon_{чп} = 17.7$ %, $\Gamma_{чп} = \Gamma_{пд} = 2 \Gamma = 0.18$ мм/с). Заниженная величина интенсивности объясняется меньшими значениями эффективной толщины черного поглотителя при таком же содержании резонансных атомов, как и в конверторе естественной ширины. К преимуществам использования резонансного детектора с "черным поглотителем" следует отнести большую эффективность регистрации по сравнению с обычным детектором ($\varepsilon_{пд} = 12.8$ %) и отсутствием проблем, связанных с совмещением положений линий резонансного детектора и источника, которые возникают при использовании конвертора естественной ширины. Кроме того, из-за отсутствия отклонения формы линии от лоренцевской, упрощается обработка измеренного спектра по сравнению со спектрами, измеренными с использованием конвертора естественной ширины.

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ

К настоящему времени среди всех мёссбауэровских изотопов созданы эффективные резонансные детекторы только для экспериментов с изотопами ^{119}Sn и ^{151}Eu .

Для экспериментов с оловом используются конверторы CaSnO_3 и BaSnO_3 , которые имеют естественную ширину линии и величину f -фактора, равную 0.5. В экспериментах с ^{151}Eu мы можем использовать конвертор в виде соединения EuF_3 . Для наиболее распространенного изотопа ^{57}Fe поиски резонансных пар привели к синтезу двойного ферроцианида калия $\text{K}_2\text{MgFe}(\text{CN})_6$, спектральная линия которого почти полностью совпадает с линией источника $\text{Co}(\text{Cr})$ ($\delta_c = 0.3$ мм/с), однако, к сожалению, для двойного ферроцианида f -фактор имеет небольшую величину ~ 0.3 .

Наилучшие параметры для экспериментов с железом показали бы конверторы из сплавов $\text{Fe}_{50}\text{Al}_{50}$ и FeGe_2 , имеющие естественную ширину линии и f -фактор ~ 0.6 . Однако спектральные линии этих сплавов не совпадают ни с одним из применяемых источников. Компенсация изомерного сдвига линий источника и конвертора может быть проведена спектрометром с двойной системой доплеровской модуляции, что позволит значительно расширить круг изотопов, имеющих конвертированные переходы, для которых может использоваться принцип резонансного детектирования.

Схема такого спектрометра показана на рис. 5. Источник резонансного излучения помещается на доплеровский модулятор, работающий в режиме постоянной скорости DM(CV). Источнику сообщается

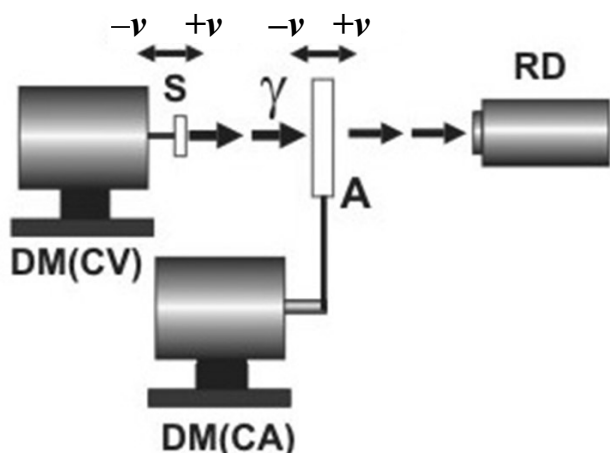


Рис. 5. Универсальный мёссбауэровский спектрометр. S — источник гамма-квантов; A — анализируемый образец (поглотитель); DM(CV) — доплеровский модулятор, работающий в режиме постоянной скорости; DM(CA) — доплеровский модулятор, работающий в режиме постоянного ускорения; RD — резонансный детектор

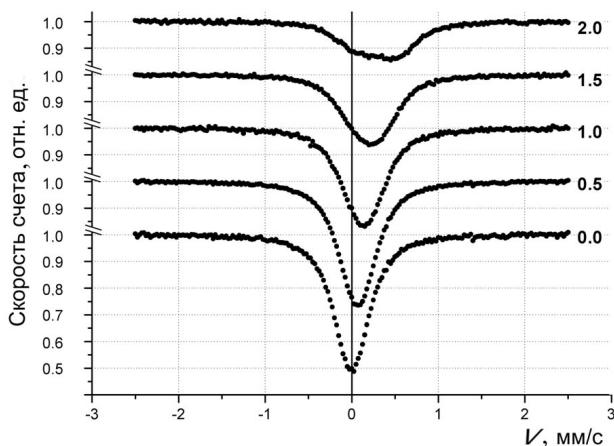


Рис. 6. Серия экспериментальных спектров, показывающая влияние различия в изомерных сдвигах на форму наблюдаемых спектров

скорость, необходимая для компенсации изомерного сдвига между источником и конвертором. Исследуемый образец A, укрепленный на доплеровский модулятор DM(CA), приводится в движение с постоянным ускорением. Период нарастания переменной скорости (от $-v$ до $+v$) равен периоду постоянной скорости, и механически не связанные

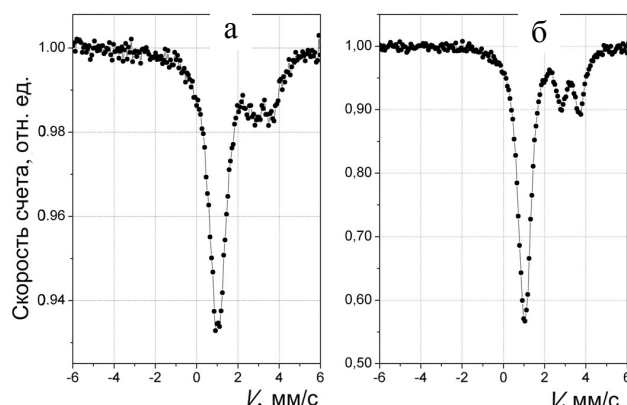


Рис. 7. Экспериментальные мёссбауэровские спектры, измеренные с обычным (а) и с резонансным (б) детекторами

друг с другом перемещения источника и исследуемого образца происходят синхронно.

Серия экспериментальных спектров, показывающая влияние различия в изомерных сдвигах на форму наблюдаемых спектров представлены на рис. 6.

Сдвиг между линиями источника и поглотителя создавался искусственно за счет дополнительного смещения линии источника относительно конвертора. При этом величина сдвига задавалась в единицах ширины линии, которая наблюдалась, когда источник и конвертор находились в точном резонансе. В этом эксперименте в качестве источника, конвертора и поглотителя использовалось соединение CaSnO_3 . Резонансным детектором служил пропорциональный детектор электронов конверсии.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ РЕЗОНАНСНЫХ ДЕТЕКТОРОВ

Эксперименты по пропусканию

Для демонстрации (рис. 7) эффекта повышения разрешения и чувствительности с применением резонансного детектора были исследованы мёссбауэровские спектры продуктов реакции образования соединения SnS , измеренные с использованием традиционной схемы (рис. 7, а) и в режиме резонансного детектирования (рис. 7, б). В традиционной схеме был использован сцинтилляционный детектор с кристаллом NaI(Tl) толщиной 1 мм, а в режиме резонансной регистрации — газовый пропорциональный детектором с конвертором в виде соединения CaSnO_3 .

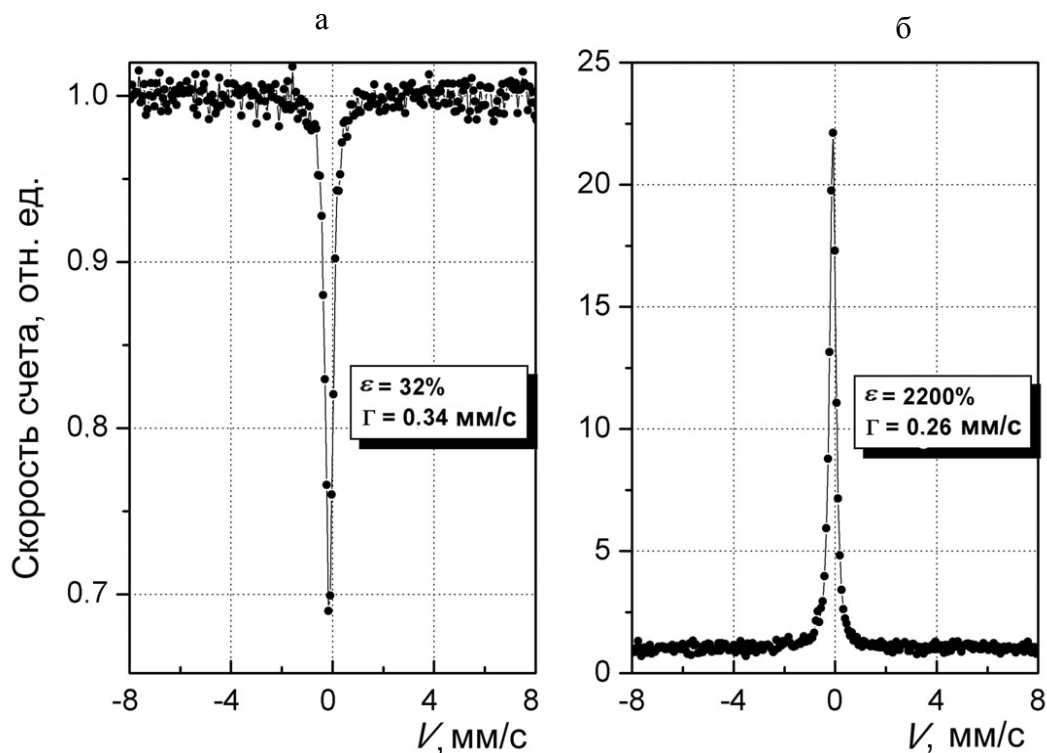


Рис. 8. Эмиссионные спектры источника ^{57}Co , измеренные в традиционной геометрии (а) и с применением резонансного детектора (б)

Анализ спектров показывает, что применение резонансного детектора позволило увеличить спектральное разрешение на 27 % и чувствительность до 10 раз, и значительно сократить время измерений.

Достоинства в применении резонансного детектирования в мёссбауэровской спектроскопии на пропускание очевидны, однако все вышесказанное относилось к случаю, когда изомерные химические сдвиги источника и конвертора в резонансном детекторе совпадают, т. е. детектор и источник находятся в точном резонансе. Если изомерные сдвиги не совпадают, то резко падает интенсивность резонанса и появляется искажение формы линий в наблюдаемом спектре.

Эмиссионные эксперименты

Следует отметить, что наиболее трудоемкими и финансово-затратными являются эксперименты на радиоактивных образцах [5]. Применение резонансных детекторов позволяет значительно сократить затраты, позволяя работать с меньшими активностями, увеличить безопасность, сократить время измерения и повысить чувствительность и разрешающую способность экспериментальных

исследований.

На рис. 8, а, приведен эмиссионный спектр источника $^{57}\text{Co}(\text{Rh})$, измеренный в традиционной геометрии, в которой в качестве анализатора использовался ферроцианид калия, обогащенный изотопом ^{57}Fe до 10 %. Рис. 8, б, демонстрирует спектр, измеренный с использованием резонансного детектора, конвертором которого служил сплав $\text{Fe}_{50}\text{Al}_{50}$. Из этих спектров видно, что при использовании резонансного детектора величина эффекта увеличилась на два порядка, а ширина спектральной линии уменьшилась примерно на 18 % по сравнению с экспериментом по традиционной схеме.

Селективно-индуцированный двойной эффект Мёссбауэра

Помимо геометрии на пропускание вторым не менее важным практическим применением резонансных детекторов является их использование в геометрии рассеяния для анализа спектрального состава рассеянного излучения. Продемонстрируем это на примере применения резонансного детектора в методе селективно-индуцированного двойного эффекта Мёссбауэра [6]. Этот метод

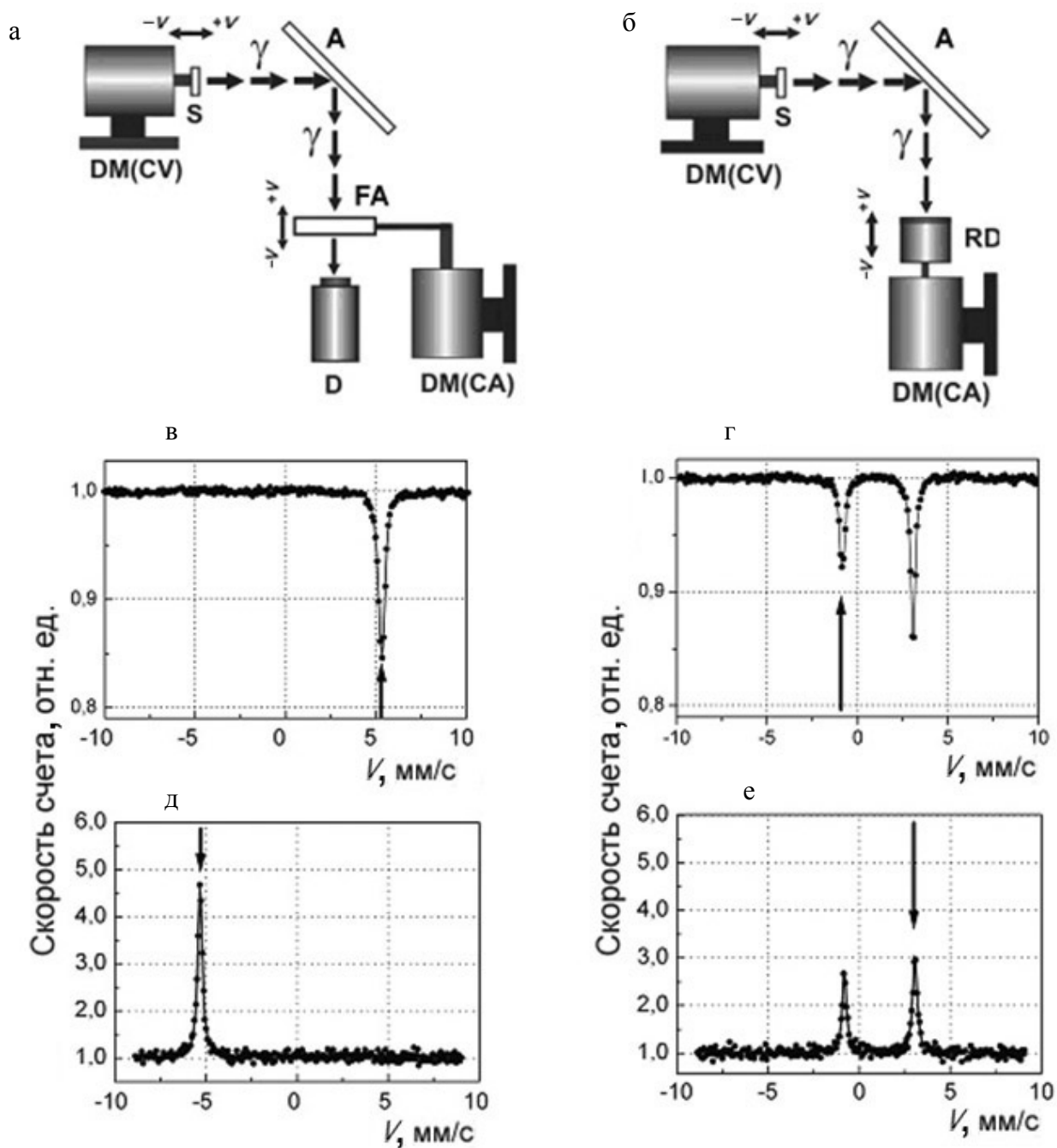


Рис. 9. Анализы спектрального состава рассеянного образцом А излучения: с помощью фильтра-анализатора RF (а) и с помощью резонансного детектора (б). Спектры излучения, рассеянного фольгой из Fe^{57} , соответствующие этим двум способам: в и д — при возбуждении шестой линии магнитной сверхтонкой структуры, г и е — при возбуждении третьей и пятой линий магнитной сверхтонкой структуры. Стрелками отмечены положения энергий возбуждения

основан на принципе комбинационного рассеяния мёссбауэровского излучения, когда на первом этапе селективно возбуждается один из подуровней сверхтонкой структуры ядра, а затем происходит

энергетический анализ рассеянного исследуемым образцом излучения с помощью резонансного фильтра-анализатора. Измеренный в этом случае спектр несет информацию о процессах, происхо-

дящих в твердом теле за время жизни ядра. Если ядро за это время успевает обменяться энергией с окружающей средой, то энергия излученного кванта будет отличаться от энергии гамма-кванта, возбуждающего ядро. Диапазон времен релаксации τ_R , которые можно исследовать, находится в области среднего времени τ жизни ядра в возбужденном состоянии (для ^{57}Fe τ составляет 10^{-8} с). Главным отличием спектрометра для таких измерений от традиционно используемых в мёссбауэровской спектроскопии на пропускание является наличие двух доплеровских модуляторов (DM1 и DM2). Источник мёссбауэровского излучения жестко закреплен на DM1 и движется с постоянной скоростью, необходимой для возбуждения вы-

бранного подуровня сверхтонкой структуры в исследуемом образце. Важно отметить, что точность настройки доплеровского модулятора на постоянную скорость и обработка им заданного закона движения должны быть не хуже 0.04 %, или 0.02 мкм/с.

Для демонстрации преимуществ применения резонансного детектирования нами были проведены измерения спектров как с применением резонансного фильтра-анализатора (ферроцианид калия, обогащенный изотопом ^{57}Fe до 10 %) (рис. 9, а), так и с резонансным детектором на основе газонаполненного детектора с конвертором из пленки $^{57}\text{FeAl}$ (рис. 9, б). Сам спектральный

Тип детектора	ε , %	$\Delta\varepsilon / \varepsilon$	J	N_∞	t , ч
Пропорциональный детектор	7	0.2	614	17200	28.0
Газовый резонансный детектор	350	0.2	35	88	2.5

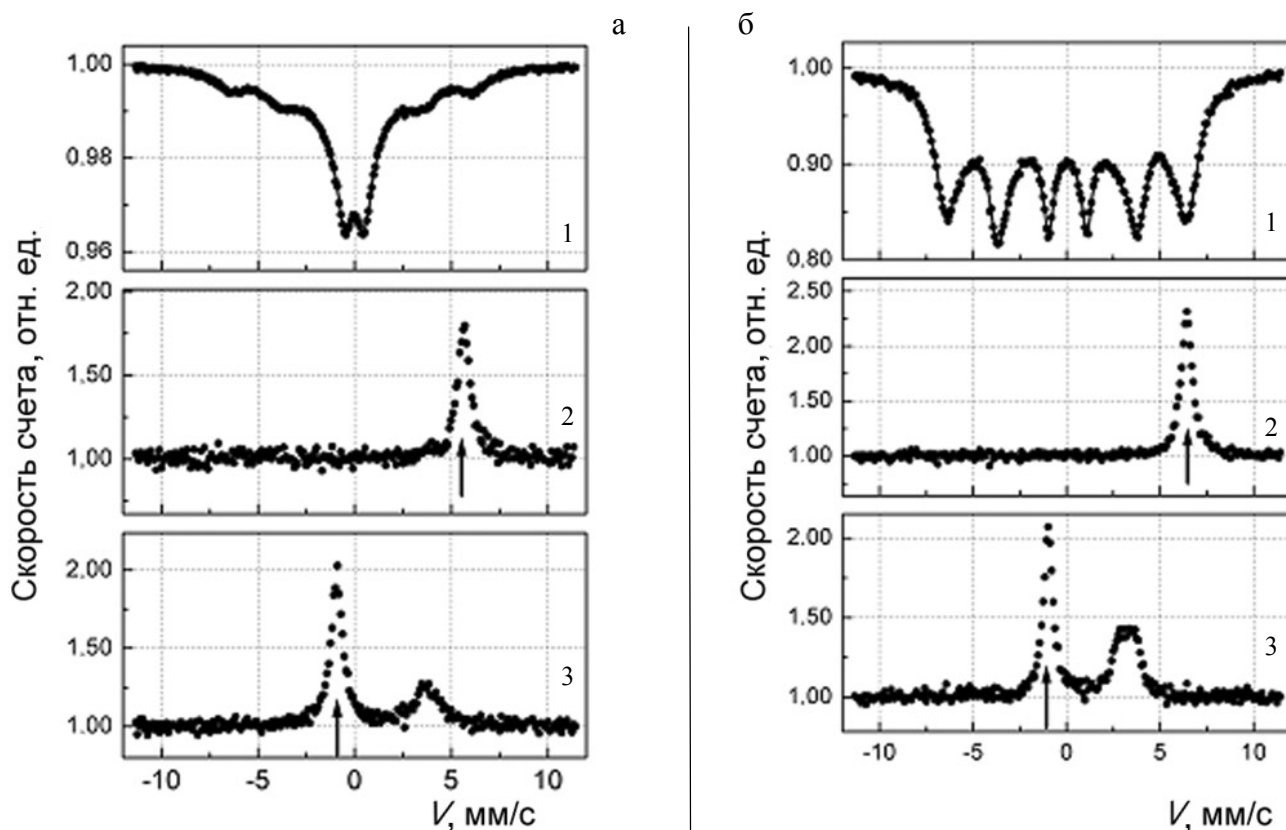


Рис. 10. Мёссбауэровские спектры образцов гематитов, замещенных алюминием. Степень замещения: 2 мол.% (а) и 8 мол.% (б). Спектры 1 измерены в геометрии пропускания; 2, 3 — в геометрии SEDM

анализ осуществляется за счет относительного движения резонансного детектора с помощью доплеровского модулятора DM2, работающего в режиме постоянного ускорения. На рис. 9, в, г, д, е, приведены экспериментальные спектры, полученные при анализе спектрального состава излучения, рассеянного фольгой из металлического железа, обогащенного изотопом ^{57}Fe , при возбуждении различных переходов.

Применение резонансного детектора позволило поднять величину наблюдаемого эффекта с 7 до 350 %, а следовательно, сократить время измерений более чем на порядок. Видно, что использование резонансного детектора позволило получить спектры очень высокого со статистической точки зрения качества. В таблице приведены результаты сравнительных измерений спектров селективного возбуждения, измеренных с фильтром-анализатором и с газовым резонансным детектором.

С помощью методики селективно-индуцированного двойного эффекта Мёссбауэра нами были проведены исследования образцов тонких пленок гетитов, обогащенных изотопом ^{57}Fe до 90 %, замещенных алюминием. Степень замещения в образцах варьировалась от 2 до 8 мол. %, что приводило к изменению формы спектра от слегка искаженного уширенного секстета до спектра, состоящего практически только из дублета. На рис. 10, а и б, приведены спектры резонансно рассеянного излучения двух образцов вместе с обычными мёссбауэровскими спектрами на пропускание. Стрелками на рисунках отмечено значение скорости доплеровского модулятора (DM1) для возбуждения определенного энергетического уровня сверхтонкой структуры. Время набора такого спектра при мощности источника 150 мКи было не более 1 суток. Достигнутой статистической точности вполне достаточно, чтобы говорить о достоверности полученных результатов.

В том случае, когда настройка осуществлялась на линию, соответствующую переходу $+1/2 \Rightarrow +3/2$, как следует из рис. 10, сопутствующих линий в спектрах не наблюдается. Из этого факта можно сделать вывод, что форма спектра данных образцов определяется лишь распределением параметров сверхтонких взаимодействий. Это подтверждают и спектры 2, 3 на рис. 10. Здесь уже излучение источника настроено в резонанс с переходом в образце $+1/2 \Rightarrow -1/2$. В соответствии с правилом отбора $\Delta m = 0, \pm 1$ для дипольного перехода уровень с $m_e = 1/2$ может распадаться на оба основных уровня с $m_g = +1/2$ и $m_g = -1/2$. Поэтому мы всегда будем наблюдать две линии, расстояние между которыми равно расщеплению основного состояния ядра для данного значения $H_{\text{эфф}}$. Однако если в образце существует расщепление $H_{\text{эфф}}$,

то будет существовать и распределение величины расщепления основного уровня ядра, что и наблюдается на спектрах 2, 3 рис. 10. При этом линия, на которую настроен источник, узкая (~ 0.35 мм/с), в то время как сателлитная линия широкая (~ 0.9 мм/с), что и подтверждает наличие распределения $H_{\text{эфф}}$. В случае релаксации наблюдалось бы уширение обеих линий. Таким образом, методика селективно-индуцированного двойного эффекта Мёссбауэра позволяет не только обнаруживать наличие релаксации сверхтонкой структуры, но и устанавливать наличие распределения $H_{\text{эфф}}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основе анализа интегралов пропускания для мёссбауэровской спектроскопии рассмотрено влияние различных параметров на результаты экспериментальных измерений.

2. Рассчитана форма спектральной линии для резонансного детектора, конвертором которого служит "черный поглотитель".

3. Экспериментально показано, что наиболее перспективными областями применения резонансных детекторов являются:

- исследования веществ, содержащих малое количество изотопов, или обладающих малой величиной f -фактора, либо имеющих сложную сверхтонкую структуру;

- эмиссионные эксперименты: в этом случае применение резонансных детекторов позволяет увеличить чувствительность на несколько порядков и значительно увеличить разрешающую способность;

- эксперименты по селективно-индуцированному двойному эффекту Мёссбауэра: они показали, что применение резонансных детекторов позволяет производить процесс измерений быстрее, чем при измерениях по традиционной методике.

4. Предложена универсальная схема мёссбауэровского спектрометра, позволяющая расширить круг изотопов, для которых может использоваться принцип резонансного детектирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Shin-ichi Uehara and Yutaka Maeda* // Ann. Rep. Res. Reactor Inst. Kyoto Univ., 1978. V. 11. P. 189–194.
2. *Andreeva M.A., Kuzmin R.N.* // Proceedings of the Conference on the Application of the Mössbauer Effect (Tihany, 69). Budapest: Akademiai Kiado, 1971. P. 77.
3. *Митрофанов К.П., Илларионова Н.В., Шпунель В.С.* // ПТЭ. 1963. Т. 3. С. 49.
4. *Baluev A.B., Rogozev B.I., Sadychev D.A., Mitia-hina V.S., Ivanov V.M.* // Applications of the

Mössbauer Effect / Ed. Yu.M. Kagan and I.S. Lyubutin. Gordon and Breach Science Publishers, 1985. V. 2. P. 737–741.

*Институт аналитического приборостроения РАН,
Санкт-Петербург*

Материал поступил в редакцию 26.06.2009.

PECULIARITIES OF RESONANCE REGISTRATION IN MÖSSBAUER SPECTROSCOPY

**A. A. Belyaev, V. S. Volodin, S. M. Irkaev,
V. V. Panchuk, V. G. Semenov**

Institute for Analytical Instrumentation RAS, Saint-Petersburg

Application of resonance counters in Mössbauer spectroscopy allows to increase resolution and sensitivity and thus to expand information potential of the method. Calculation of spectral line parameters for various converters was made, and the results of experimental investigations in the most perspective fields of Mössbauer spectroscopy are presented in the article with the aim of developing effective resonance counters.

Keywords: Mössbauer spectroscopy, nuclear gamma resonance, resonance detector