

ОБРАБОТКА МЁССБАУЭРОВСКИХ СПЕКТРОВ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ФУНКЦИИ ФОЙГТА

Г. Н. Коныгин*, О. М. Немцова, В. Е. Порсев

УДК 539.1.08;519.642.3

Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской АН,
426067, Ижевск, ул. Т. Барамзиной, 34, Россия; e-mail: gnkon@mail.ru

(Поступила 17 декабря 2018)

Предложен алгоритм математической обработки мёссбауэровских спектров твердых растворов методом регуляризации Тихонова с использованием функции Фойгта в качестве элементарной линии. На примерах обработки спектров твердых растворов $Fe_{100-x}Ge_x$ ($x = 5—25$ ат.%) и $Fe_{75}Si_{15}Al_{10}$ показано, что алгоритм позволяет получать физически обоснованное решение, существенно повышает качество обработки спектров и расширяет возможности метода мёссбауэровской спектроскопии. Показано, что функция Фойгта является удовлетворительным приближением для описания статистического ансамбля неэквивалентных локальных атомных конфигураций атомов Fe в разупорядоченных твердых растворах.

Ключевые слова: мёссбауэровская спектроскопия, функция Фойгта, локальные атомные конфигурации, твердый раствор.

An algorithm is proposed for mathematical processing of Mössbauer spectra of solid solutions by the Tikhonov regularization method using the Voigt function as an elementary line. For the cases of the spectra processing of $Fe_{100-x}Ge_x$ solid solutions ($x = 5—25$ at.%) and $Fe_{75}Si_{15}Al_{10}$, we demonstrate that the algorithm permits to obtain a physically grounded solution, significantly improves the quality of spectra processing, and expands the possibilities of the Mössbauer spectroscopy method. It is shown that the Voigt function is a satisfactory approximation for taking into account the statistical ensemble of nonequivalent local atomic configurations of Fe atoms in disordered solid solutions.

Keywords: Mossbauer spectroscopy, Voigt function, local atomic configuration, solid solution.

Введение. В соответствии с квантово-механическим описанием процессов резонансного поглощения, испускания и рассеяния гамма-квантов ядрами в твердом теле резонансная линия является функцией Лоренца. Однако существуют факторы, приводящие к формированию “интегральной формы линии”: геометрия эксперимента, аппаратное уширение, эффективная толщина поглотителя, вклад в сверхтонкие взаимодействия (СТВ) не только первой, но и других координационных сфер [1—9]. Последний фактор создает статистический ансамбль локальных атомных конфигураций, соответственно, спектр является суперпозицией достаточно большого количества смещенных относительно друг друга резонансных линий. При этом величина и знак смещения определяются как количественным распределением атомов каждого сорта в координационных сферах, так и симметрией их распределения относительно оси квантования и возможным локальным смещением относительно среднестатистического положения в сформированной кристаллографической структуре. Основной вклад в формирование спектра вносит ближайшее окружение резонансного атома (первая координационная сфера), которое зависит от концентрации элементов и определяет количество локальных максимумов на функциях распределения сверхтонкого магнитного поля $P(H)$, поскольку смещение линий сравнимо с шириной резонансной линии или превышает ее. Атомы более удаленных сфер оказывают меньшее влияние на изменение параметров СТВ, что приводит к смещению линий на вели-

PROCESSING OF MOSSBAUER SPECTRA OF SOLID SOLUTIONS USING THE VOIGT FUNCTION

G. N. Konygin*, O. M. Nemtsova, V. E. Porsev (Udmurt Federal Research Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 34 T. Baramzina Str., Izhevsk, 426067, Russia; e-mail: gnkon@mail.ru)

чину, существенно меньшую ширины резонансной линии, и к формированию широкой “интегральной” формы линии.

В эксперименте, как правило, невозможно аналитически учесть все вышеуказанные эффекты смещения и определить суперпозицию локальных линий резонансного поглощения. Поэтому для восстановления экспериментальных данных с удовлетворительной точностью используют отличную от лоренцевой “интегральную” форму линии [2—5]: модифицированную функцию Лоренца (добавку в знаменатель членов, пропорциональных $(E - E_0)^2$ и $(E - E_0)^4$); суперпозицию двух смещенных линий Лоренца; псевдофойгтову функцию (линейную комбинацию распределений Лоренца и Гаусса с весами) и т. д. Однако известно, что аппаратурное уширение выражается гауссовой функцией [4, 5]. В [6—9] показано, что для описания случайного распределения атомов в ближайшем окружении резонансного атома наиболее подходит также функция Гаусса. Тем самым в качестве элементарной линии для анализа мёссбауэровских спектров следует использовать свертку функций Лоренца и Гаусса, т. е. функцию Фойгта. Поскольку применение функции Фойгта осложняется проблемой аналитического вычисления интеграла от функции, используются различные методы приближенных вычислений: разложение в ряд, представление в комплексном виде и преобразование Фурье, аппроксимация псевдофойгтовой функцией с весовыми множителями и др. [6—9]. В рамках математически обоснованного и успешно применяемого метода регуляризации Тихонова замена функции Лоренца на свертку функций Лоренца и Гаусса не представляет никакой сложности [10]. Кроме того, замена непрерывной задачи разностным аналогом позволяет выполнять подбор ширины функции Гаусса методом коррекции параметров [11, 12]. Таким образом, метод регуляризации Тихонова с коррекцией параметров выбран нами как перспективный метод, развитие которого обеспечит корректную обработку мёссбауэровских спектров разупорядоченных твердых растворов с локальными неоднородностями.

Эксперимент. Для получения достоверных результатов при обработке мёссбауэровских спектров необходимо учесть все факторы, влияющие на форму спектральной линии, и исключить искажения, не связанные с физическими свойствами исследуемого материала. Для учета влияния геометрии эксперимента, аппаратурного уширения и эффективной толщины поглотителя (в дальнейшем — аппаратурные искажения) используется образец α -Fe с известными спектральными характеристиками, который в мёссбауэровских исследованиях является эталоном для изучения соединений, содержащих железо [1]. Форма получаемой элементарной линии для калибровочного спектра α -Fe содержит все аппаратурные особенности, связанные с измерениями. Ее использование при построении функции Фойгта в методе Тихонова позволит выделить уширение элементарной линии, обусловленное статистическим ансамблем неэквивалентных локальных атомных конфигураций атомов Fe с различающимися симметрией окружения и соответствующими ей параметрами СТВ.

Определение аппаратурного уширения. Калибровочные спектры для α -Fe получены на спектрометрах ЯГРС-4М (256 каналов, максимальное число импульсов в канале $N = 750000$) и SM2201DR (400 каналов, $N = 600000$), работающих в режиме постоянных ускорений с источником γ -излучения ^{57}Co в матрице хрома. При обработке спектров рассматривались три возможные ситуации: в качестве элементарной линии спектра задавалась линия лоренцевой формы (L) и определялась ее ширина (Γ_L); в качестве элементарной линии спектра использовалась свертка функций Лоренца (L) и Гаусса (G) и определялись ширины обеих линий (Γ_L и Γ_G); в качестве элементарной линии спектра задавалась свертка функций Лоренца и Гаусса ($L + G(V)$), в которой ширина гауссовой линии линейно зависит от скорости V (скорость движения мёссбауэровского источника излучения относительно детектора) ($\Gamma_G(V) = \Gamma_G(V_0)(1 + kV)$), где $V_0 = 0.0$ мм/с, и определялся коэффициент k , поскольку известно, что обобщенный аппаратурный шум является функцией доплеровской скорости [1, 8].

В качестве количественного критерия удовлетворительного восстановления экспериментальных данных использован критерий Пирсона χ^2 [3]. Результаты обработки приведены на рис. 1, полученные ширины линий — в табл. 1. Введение функции Гаусса для учета влияния аппаратурного искажения уменьшает ширину линии Лоренца (отличие $\approx 10\%$ для ЯГРС-4М и $\approx 4\%$ для SM2201DR). При этом доля функции Гаусса составляет ≈ 12 — 15% линии “элементарного” Лоренца. Введение зависимости ширины линии Гаусса от доплеровской скорости показывает, что для современных спектрометров типа SM2201DR этот вклад практически отсутствует ($k = 0.047$), в то время как для спектрометра ЯГРС-4М уширение линии Гаусса с увеличением скорости существенно ($k = 0.666$). Однако ширины линии Гаусса, вычисленные при максимальной скорости $V = 5.312$ мм/с, не сильно отличаются от ширин при постоянной функции Гаусса ($\Gamma_G(V) = 0.026$ мм/с, $\Gamma_G = 0.025$ мм/с и

$\Gamma_G(V) = 0.048$ мм/с, $\Gamma_G = 0.044$ мм/с), при этом введение функции Гаусса, зависящей от доплеровской скорости с подгоночным коэффициентом, существенно усложняет алгоритм и увеличивает время обработки спектров. Восстановление экспериментальных данных в рамках критерия χ^2 происходит во всех случаях ($\chi^2 < 1$, разностные спектры (рис. 1) расположены в пределах статистического разброса $\pm N^{1/2}$ с вероятностью 68 %), однако уменьшение χ^2 при введении свертки функций Лоренца и Гаусса очевидно. Таким образом, описываемое функцией Гаусса аппаратное уширение имеет место и зависит от шумовых характеристик спектрометра. При этом введение функции Гаусса сказывается в основном на изменении ширины элементарной лоренцевой линии.

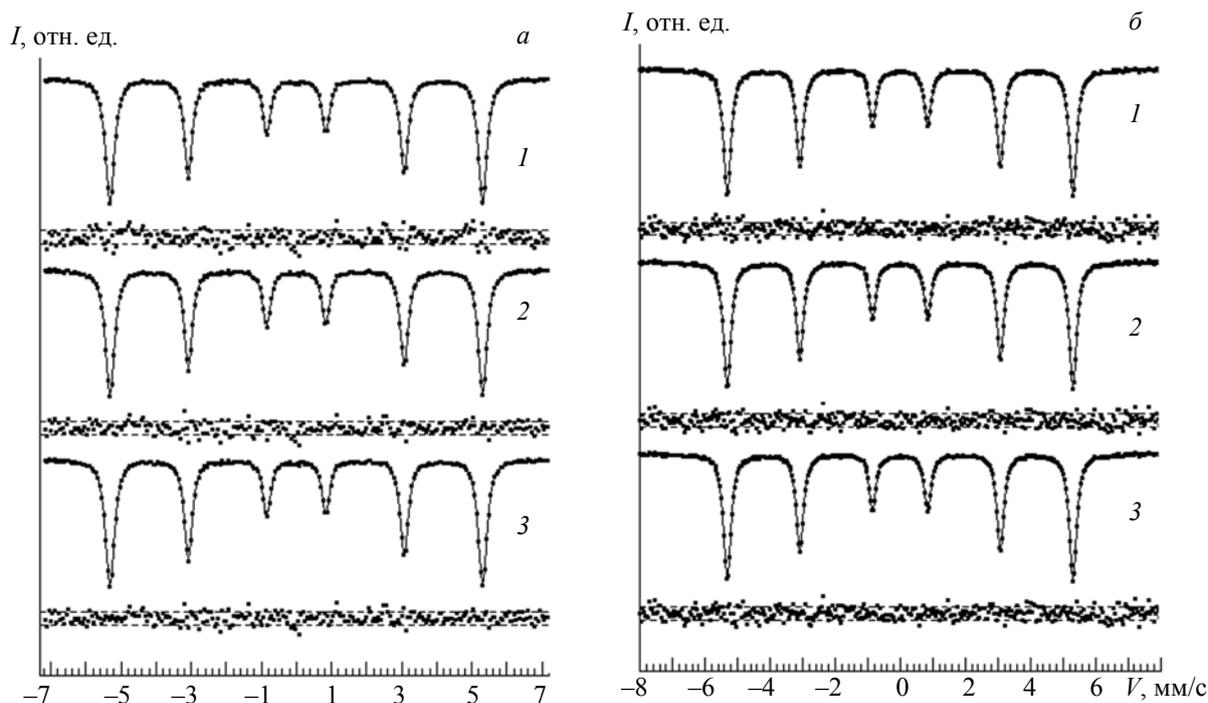


Рис. 1. Мёссбауэровские спектры α -Fe, зарегистрированные на спектрометрах ЯГРС-4М (а) и SM2201DR (б), их обработка функциями Лоренца (1), Фойгта (2), Фойгта с линейной зависимостью ширины линии Гаусса от скорости (3), и соответствующие им разностные спектры в коридоре статистической погрешности

Описание статистического ансамбля локальных атомных конфигураций распределением Гаусса. Для проверки эффективности предложенного описания элементарной спектральной линии обработан мёссбауэровский спектр разупорядоченного твердого раствора $\text{Fe}_{80}\text{Ge}_{20}$ [13], зарегистрированный на спектрометре ЯГРС-4М, и получены функции распределения сверхтонкого магнитного поля $P(H)$ (рис. 2). При использовании в качестве элементарной линии функции Лоренца с шириной калибровочного спектра или свертки функций Лоренца и Гаусса (табл. 1, колонки L и $L+G$) не удастся с удовлетворительной точностью описать экспериментальный спектр (рис. 2, а, б, $\chi^2 > 1$). На разностных спектрах отчетливо наблюдается систематическая ошибка в области внутренних линий (3-й и 4-й) мёссбауэровского спектра (общепринятая нумерация зеемановского секстета от 1 до 6 слева направо [1]). Восстановление экспериментального спектра достигается только уменьшением соотношения интенсивностей/площадей внутренних и внешних линий резонансных переходов $I_{3,4}/I_{1,6} \approx 0.8/3$, что противоречит физическим основам мёссбауэровской спектроскопии (теоретически обоснованное соотношение интенсивностей/площадей линий резонансных переходов $I_{3,4}/I_{1,6} = 1/3$ [1]). Кроме того, на соответствующих функциях распределения $P(H)$ можно наблюдать более 10 локальных максимумов, что для рассматриваемого разупорядоченного твердого раствора $\text{Fe}_{80}\text{Ge}_{20}$ противоречит количеству возможных, статистически не эквивалентных и имеющих существенно различающиеся параметры СТВ локальных атомных конфигураций атомов Fe при данной концентрации элементов [13].

Удовлетворительные результаты получены, когда в качестве элементарной линии использована свертка функций Лоренца и Гаусса и ширина функции Гаусса являлась подгоночным параметром. Полученные при разных ширинах функций (табл. 1, колонки L и $L+G$) результаты по χ^2 и виду функции распределения $P(H)$ практически не различаются (рис. 2, δ' и z'). Принципиально важно, что при этом обеспечивается строгое выполнение условия $I_{3,4}/I_{1,6} = 1/3$. Существенное отличие наблюдается в полученной ширине функции Гаусса: в одном случае $\Gamma_G = 0.135$ мм/с, в другом $\Gamma_G = 0.161$ мм/с. Это связано с различной обработкой спектров и имеет принципиальный характер.

Т а б л и ц а 1. Ширины элементарных линий (Γ , мм/с), полученные при обработке эталонного мёссбауэровского спектра α -Fe, зарегистрированного на спектрометрах ЯГРС-4М и SM2201DR

Марка прибора	L		$L+G$			$L+G(V)$			
	Γ_L	χ^2	Γ_L	Γ_G	χ^2	Γ_L	$\Gamma_G(V_0)$	k	χ^2
ЯГРС-4М	0.296	0.98	0.265	0.043	0.75	0.246	0.011	0.666	0.67
SM2201DR	0.260	0.85	0.249	0.025	0.79	0.248	0.021	0.047	0.79

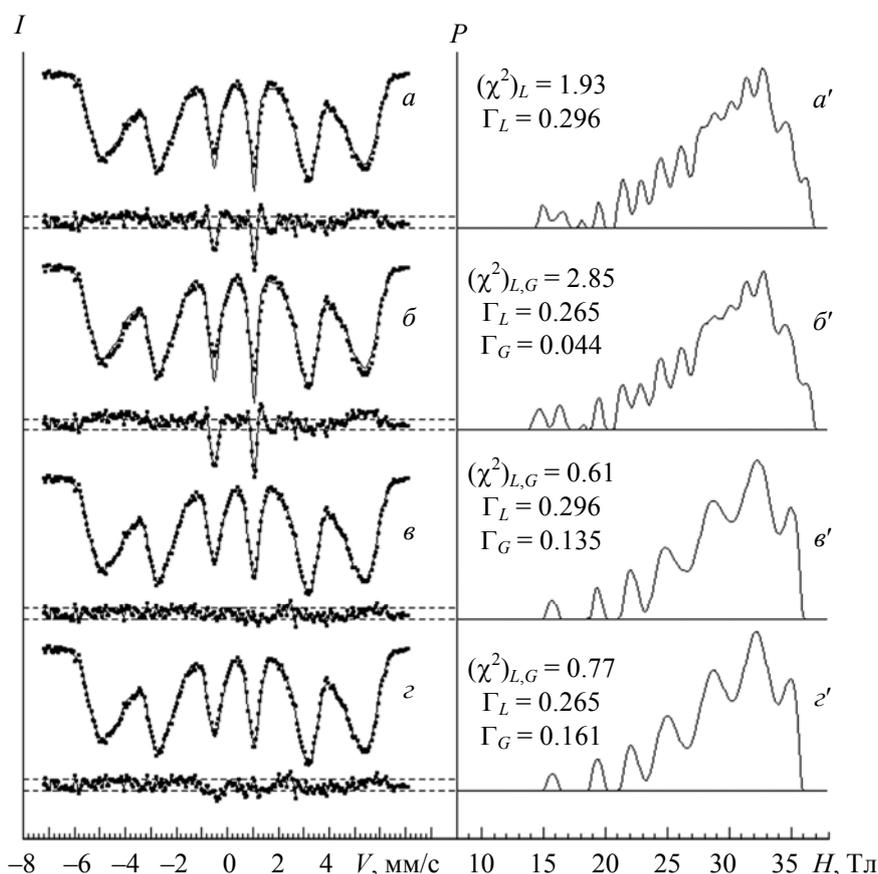


Рис. 2. Обработка экспериментального мёссбауэровского спектра разупорядоченного твердого раствора $Fe_{80}Ge_{20}$ с помощью функции Лоренца (a) и свертки функций Лоренца и Гаусса при разных ширинах (δ — z); полученные функции распределения сверхтонкого магнитного поля $P(H)$ и восстановленные по ним мёссбауэровские спектры (a' — z') с соответствующими разностными спектрами в коридоре статистической погрешности

Когда в качестве ширины линии Лоренца в свертке функций используется Γ_L из колонки L , в ней учитывается аппаратное искажение спектра, которое зависит от V и характеризует конкретный спектрометр. В свою очередь ширина линии Гаусса отвечает только за смещение элементарных резонансных линий в соответствии с количественным распределением атомов каждого сорта в координационных сферах, симметрию их распределения относительно оси квантования и локальное смещение относительно среднестатистического положения в кристаллографической структуре.

Когда используется Γ_L из колонки $L+G$, аппаратное искажение учитывается в ширине линии Гаусса, что приводит к увеличению Γ_G до 0.161 мм/с, т. е. происходит усредненное по скорости увеличение ширины линии Гаусса на величину аппаратного уширения. Это отражается на некотором не принципиальном увеличении χ^2 и малозаметном ухудшении описания внутренних линий спектра (на разностном спектре в этой области наблюдается систематическое отклонение). Полученная функция распределения $P(H)$ имеет не более семи локальных максимумов, что в рассматриваемом разупорядоченном твердом растворе $\text{Fe}_{80}\text{Ge}_{20}$ вполне соответствует статистическому ансамблю локальных атомных конфигураций с существенно различающимися параметрами СТВ [14]. Поскольку с использованием обозначенных выше элементарных спектральных линий получены удовлетворительные результаты, линейная зависимость ширины Гаусса от скорости (табл. 1, $L+G(V)$) не рассматривается ввиду усложнения алгоритма и увеличения времени обработки спектров.

Таким образом, при обработке мёссбауэровских спектров твердых растворов со статистическим набором неэквивалентных локальных атомных конфигураций целесообразно использовать функцию Фойгта как свертку функций Лоренца и Гаусса. При интерпретации полученных результатов в зависимости от выбора элементарной линии необходимо учитывать и разделять вклады от аппаратного и физического уширения.

Результаты обработки мёссбауэровских спектров твердых растворов. На примерах обработки мёссбауэровских спектров неупорядоченных твердых растворов покажем работоспособность предлагаемого алгоритма. Известно, что бинарные и квазибинарные сплавы являются классическими модельными объектами для изучения закономерностей формирования магнитных свойств в зависимости от сорта и концентрации sp -элемента, параметров и типа кристаллической решетки.

Исследованы полученные методом механического измельчения в шаровой планетарной мельнице Пульверизетте-7 в среде аргона объемно-центрированные кубические разупорядоченные пересыщенные твердые растворы $\text{Fe}_{100-x}\text{Ge}_x$ ($x = 5\text{—}25$ ат.%) [13, 14] и порошки сплава $\text{Fe}_{75}\text{Si}_{15}\text{Al}_{10}$, полученные в среде аргона и прошедшие обработку в жидких средах поверхностно-активных веществ (ПАВ): лестосил $\{[(\text{C}_6\text{H}_5)_2\text{SiO}_2]_a[\text{C}_6\text{H}_5(\text{OH})\text{SiO}]_b[(\text{CH}_3)_2\text{SiO}]_c\}_n$, $a = 0.3$, $b = 0.003$, $c = 1$, $n = 130$ (ЛЕС), додецилсульфат натрия $\text{NaC}_{12}\text{H}_{25}\text{SO}_4$ (ДНС), а также их смесь (ЛЕС+ДНС) [15]. Мёссбауэровские спектры образцов Fe-Ge зарегистрированы на спектрометре ЯГРС-4М при температуре $T = 77$ К, образцов $\text{Fe}_{75}\text{Si}_{15}\text{Al}_{10}$ — на спектрометре SM2201DR при $T = 300$ К. Математическая обработка проведена методом регуляризации Тихонова с коррекцией параметров и применением алгоритма сужения области определения параметров СТВ [12]. В качестве элементарной линии использована свертка функций Лоренца и Гаусса — функция Фойгта. Ширина функции Лоренца найдена из обработки спектра калибровочного образца α -Fe, ширина функции Гаусса являлась подгоночным параметром.

Из результатов обработки спектров сплавов Fe-Ge и $\text{Fe}_{75}\text{Si}_{15}\text{Al}_{10}$ (рис. 3 и 4) видно, что применение в качестве элементарной линии функции Лоренца однозначно не позволяет корректно обрабатывать экспериментальные данные: $(\chi^2)_L \gg 1$, на функциях распределения $P(H)$ наблюдается избыточное количество локальных максимумов и разностные спектры содержат систематическую ошибку в области внутренних линий мёссбауэровских спектров. При введении функции Гаусса проблема с восстановлением данных исчезает. Применение функции Фойгта позволяет четко выделить максимумы распределения сверхтонких магнитных полей, количество которых соответствует статистическому набору возможных, статистически не эквивалентных и одновременно имеющих существенно различающиеся параметры СТВ локальных атомных конфигураций атомов Fe в этих сплавах при заданной концентрации элементов. Это гарантирует получение достоверной информации о характеристиках локального атомного окружения и физически значимой интерпретации экспериментальных данных [13—15].

Особенно явно преимущества предлагаемого алгоритма проявляются при обработке спектров сплавов Fe-Ge. С ростом концентрации Ge от 5 до 25 ат.% увеличивается ширина гауссовой линии от 0.080 до 0.150 мм/с, что объясняется расширением статистического ансамбля локальных атомных конфигураций, каждая из которых может иметь различную симметрию окружения, включая локаль-

ное смещение атомов относительно среднестатистического положения в кристаллографической структуре, влиянием дефектов и границ [15—17]. В упорядоченном сплаве Fe₃Ge каждая из локальных атомных конфигураций эквивалентна с точки зрения как локальной и трансляционной, так и радиальной симметрии, т. е. “эффект” уширения невозможен из-за отсутствия статистического ансамбля, что и наблюдается на рис. 3, *e*, где $\Gamma_G = 0$ для мёссбауэровского спектра Fe₃Ge.

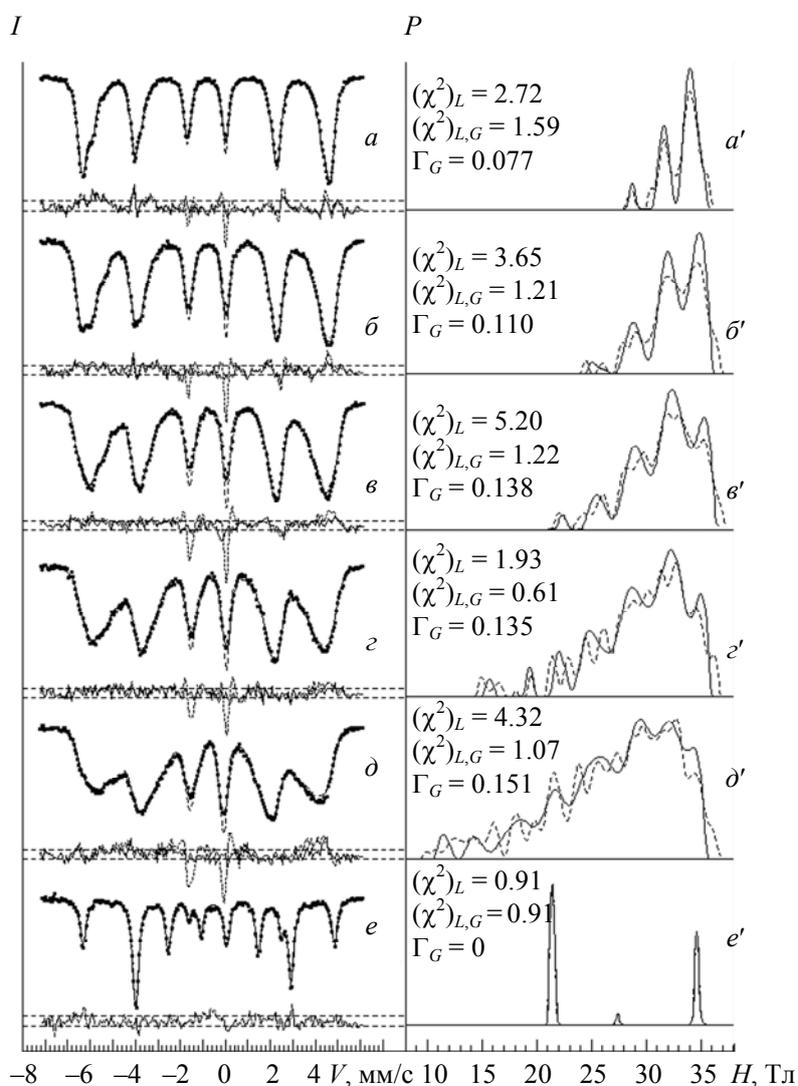


Рис. 3. Обработка мёссбауэровских спектров разупорядоченных сплавов Fe_{100-x}Ge_x: *x* = 5 (*a*), 10 (*б*), 15 (*в*), 20 (*з*) и 25 ат.% (*д*) и упорядоченного Fe₃Ge (*e*) с помощью функций Лоренца (штриховые линии) и Фойгта (сплошные); функции распределения сверхтонкого магнитного поля $P(H)$ и восстановленные по ним мёссбауэровские спектры с соответствующими разностными спектрами в коридоре статистической погрешности (*a'*—*e'*)

Менее явно преимущества предлагаемого алгоритма проявляются при обработке спектров образцов сплава Fe₇₅Si₁₅Al₁₀. Это связано как с различием элементного состава (Ge или Si, Al) и их вкладов в параметры СТВ, так и с тем, что при большем количестве компонентов формируется более широкий статистический ансамбль локальных атомных конфигураций. Измельчение исходного сплава в жидких средах также может приводить к изменению элементного состава и дополнительному расширению статистического ансамбля [18]. Тем не менее использование предлагаемого алгоритма позволяет с удовлетворительной точностью описать экспериментальные спектры и получить функции $P(H)$ со значимыми локальными максимумами распределения.

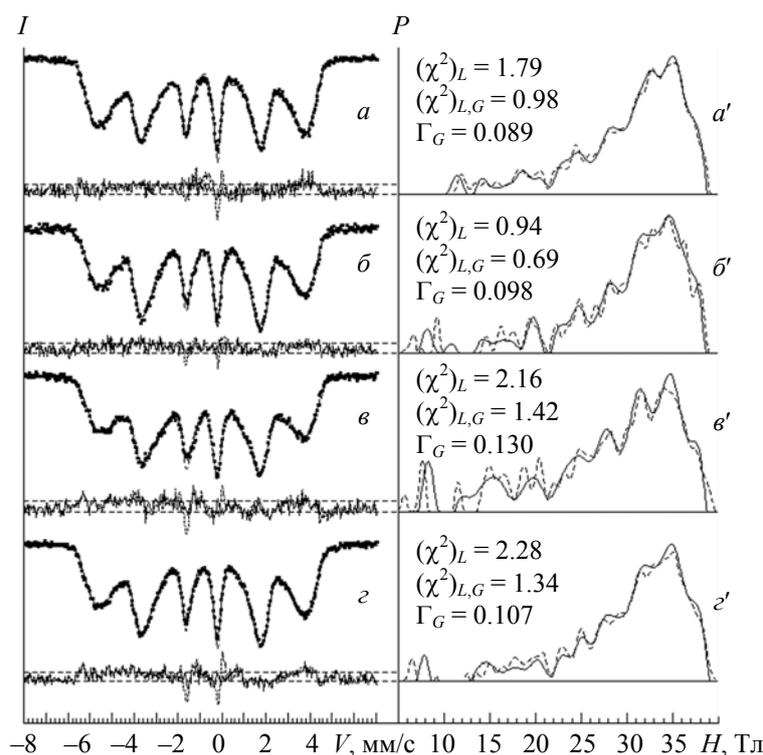


Рис. 4. Обработка мёссбауэровских спектров разупорядоченного сплава $\text{Fe}_{75}\text{Si}_{15}\text{Al}_{10}$, измельченного в аргоне (а), лестосиле (б), додецилсульфате натрия (в) и их смеси (г), с помощью функций Лоренца (штриховые линии) и Фойгта (сплошные); полученные функции распределения сверхтонкого магнитного поля $P(H)$ и восстановленные по ним мёссбауэровские спектры с соответствующими разностными спектрами в коридоре статистической погрешности (а'—г')

Заключение. Применение математической обработки мёссбауэровских спектров методом регуляризации Тихонова с использованием функции Фойгта, коррекцией параметров и алгоритмом сужения области определения параметров сверхтонкого взаимодействия существенно повышает качество обработки спектров и расширяет возможности метода мёссбауэровской спектроскопии. Во-первых, при обработке спектров твердых растворов со статистическим набором неэквивалентных локальных атомных конфигураций в качестве элементарной линии целесообразно использовать функцию Фойгта как свертку функций Лоренца и Гаусса. Аппаратурное искажение элементарной линии может быть учтено шириной как линии Лоренца, так и линии Гаусса, получаемых из обработки калибровочного спектра $\alpha\text{-Fe}$ функциями Лоренца или Фойгта. В первом случае ширина линии отражает только физическое уширение, обусловленное формированием статистического ансамбля неэквивалентных локальных атомных конфигураций с различной симметрией окружения атома Fe, во втором при интерпретации результатов необходимо разделять вклады от аппаратного и физического уширений. Предложенный алгоритм обеспечивает восстановление экспериментальных спектров в рамках критерия Пирсона. Во-вторых, получаемые функции распределения позволяют оценить параметры локальной атомной структуры и сверхтонкого взаимодействия в разупорядоченных твердых растворах и интерпретировать экспериментальные данные в рамках модели суперпозиции неэквивалентных локальных атомных конфигураций при заданной концентрации элементов и их вклада в формирование параметров сверхтонкого взаимодействия.

Работа выполнена при финансовой поддержке ФАНО (тема № АААА-А17-117022250038-7) и частично Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 16-03-01131) и Уральского отделения РАН (проект 18-10-2-21).

- [1] **В. С. Литвинов, С. Д. Каракишев, В. В. Овчинников.** Ядерная гамма-резонансная спектроскопия сплавов, Москва, Металлургия (1982)
- [2] **K. Lagares, D. G. Rancourt.** Nucl. Instrum. Method. Phys., **129**, N 2 (1997) 266—280
- [3] **В. С. Русаков.** Мессбауэровская спектроскопия локально неоднородных систем, Алматы, ОПНИИЯФНЦРК (2000)
- [4] **В. И. Петров, С. С. Мартыненко, Н. Д. Хмелевская.** Журн. прикл. спектр., **84** (2017) 936—941 [V. I. Petrov, S. S. Martynenko, N. D. Khmelevskaya. J. Appl. Spectr., **84**, N 6 (2017) 1014—1018]
- [5] **В. П. Гладков, В. И. Петров, С. С. Мартыненко, А. В. Крянев.** Ядерн. физ. инжиниринг, **3**, № 4 (2012) 349—355
- [6] **В. П. Гладков, В. А. Кашеев, А. Х. Кусков, В. И. Петров.** Журн. прикл. спектр., **71**, № 6 (2004) 668—671
- [7] **М. А. Чуев.** Докл. РАН, **438**, № 6 (2011) 747—751
- [8] **С. М. Иркаев, В. Г. Семенов, В. Е. Курочкин, Н. А. Макаров, В. В. Панчук, А. Л. Тер-Мартиросян, К. П. Чернэуцану.** Науч. приборостроение, **17**, № 2 (2007) 3—19
- [9] **А. Н. Тимошевский, С. О. Яблоновский, В. И. Еремин.** Успехи физ. мет., **12** (2011) 451—470
- [10] **А. Н. Тихонов, В. Я. Арсенин.** Методы решения некорректных задач, Москва, Наука (1986)
- [11] **E. V. Voronina, A. L. Ageev, O. M. Nemtsova, E. P. Yelsukov.** Czech. J. Phys., **47**, N 5 (1997) 547—552
- [12] **О. М. Немцова, Г. Н. Коныгин.** Журн. прикл. спектр., **85**, № 5 (2018) 830—835 [O. M. Nemtsova, G. N. Konygin. J. Appl. Spectr., **85** (2018) 931—935]
- [13] **Е. П. Елсуков, Г. Н. Коныгин, В. Е. Порсев.** Физ. мет. металловед., **105**, № 2 (2008) 152—160
- [14] **Г. Н. Коныгин, Е. П. Елсуков, В. Е. Порсев.** Физ. мет. металловед., **96**, № 3 (2003) 59—66
- [15] **В. Г. Семенов, Л. Н. Москвин, А. А. Ефремов.** Успехи химии, **75**, № 4 (2006) 354—365
- [16] **Г. А. Дорофеев, В. С. Литвинов.** Металлофизика, **4**, № 3 (1982) 38—45
- [17] **А. К. Аржников, Л. В. Добышева, Г. Н. Коныгин, Е. П. Елсуков.** ФТТ, **47**, № 11 (2005) 1981—1989
- [18] **K. Yazovskikh, S. F. Lomayeva, A. A. Shakov, G. N. Konygin, O. M. Nemtsova.** Abstr. V Int. Conf. “Fundamental Bases of Mechanochemical Technologies”, 25—28 June 2018, Novosibirsk, Russia, IPC NSU (2018) 35