

КАЗАНСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ

Кафедра физики твёрдого тела

Ф.Г. ВАГИЗОВ

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ НАВЕСКИ
ОБРАЗЦА ДЛЯ МЁССБАУЭРОВСКИХ
ИЗМЕРЕНИЙ**

Казань – 2024

УДК 543.429.3

*Принято на заседании учебно-методической комиссии Института физики
Протокол № 9 от 29 мая 2024 года*

Рецензент:

доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник КФТИ им. Е.К. Завойского ФИЦ КазНЦ РАН
Р.Н. Шахмуратов

Вагизов Ф.Г.

Определение оптимальной навески образца для мёссбауэровских измерений / Ф.Г. Вагизов. – Казань: Казанский федеральный университет, 2024. – 17 с.

Учебно-методическое пособие предназначено для студентов Института физики КФУ, приступивших к изучению основ гамма-резонансной (мёссбауэровской) спектроскопии и выполнению лабораторных работ, предусмотренных учебной программой таких курсов как: «Физические методы исследования конденсированных сред» и «Ядерно-физические методы исследования твердых тел». В пособии приводится обоснование наиболее популярного критерия оптимальной навески и аналитическое выражение для расчета соотношения сигнал/шум для мёссбауэровских спектров со сверхтонкой структурой, соответствующей монопольному электростатическому взаимодействию, квадрупольному взаимодействию ядра с градиентом электрического поля и взаимодействию магнитного момента ядра с магнитным полем на ядре. В приложении приведена таблица коэффициентов поглощения резонансного γ -излучения для наиболее часто используемых мёссбауэровских нуклидов. Данное пособие не является оригинальным и полностью основано на известных учебниках и публикациях, приведенных в разделе «Литература».

© Вагизов Ф.Г., 2024

© Казанский федеральный университет, 2024

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
Цель лабораторной работы	4
Теоретические основы метода определения оптимальной навески	4
Критерий оптимального выбора навески образца	5
Определение оптимальной навески образца	8
Выполнение лабораторной работы	10
Вопросы для самоконтроля	11
Приложение. Коэффициенты поглощения резонансного γ -излучения для наиболее часто используемых мёссбауэровских нуклидов	14
Литература	16

Введение

В геометрии пропускания мёссбауэровский спектр представляет собой зависимость числа зарегистрированных резонансных γ -квантов от скорости движения мёссбауэровского источника относительно поглотителя. Приготовление поглотителя и выбор оптимальной навески образца играют важную роль при проведении измерений на пропускание с помощью гамма-резонансной спектроскопии. Эффективная толщина резонансного поглотителя существенно влияет на качество экспериментального спектра и на время его накопления, и поэтому необходимо выбрать оптимальную навеску поглотителя (масса исследуемого соединения на единицу его площади).

Цель лабораторной работы

Целью данной лабораторной работы является ознакомление с критерием выбора оптимальной навески образца для мессбауэровских измерений на пропускание, проведение расчета оптимальной толщины поглотителя для некоторых веществ на основе приведенного в пособии метода определения оптимальной навески.

Теоретические основы метода определения оптимальной навески

Под оптимальной толщиной поглотителя d_{opt} мы будем понимать ту толщину поглотителя, которая при измерениях гамма-резонансных спектров приводит к минимальному статистическому разбросу при данной продолжительности набора экспериментального спектра, что позволяет определять спектральные параметры с лучшей точностью.

При малой толщине поглотителя образец будет содержать малое количество мессбауэровских ядер, а спектральная интенсивность резонансных линий поглощения будет слабой на большом уровне фона нерезонансных отчетов, приводя к большому статистическому разбросу экспериментальных данных и затрудняя получение точных значений сверхтонких параметров спектров. Слишком большая

толщина поглотителя приводит к уменьшению доли регистрируемых резонансных γ -фотонов по сравнению с фоновым излучением, приводя к заметной трансформации и уширению пика резонансного поглощения (из-за сильного поглощения в резонансной области детектор регистрирует преимущественно γ -кванты с энергией, соответствующей крыльям линии излучения источника). При очень большой толщине поглотителя экспериментальное наблюдение эффекта Мессбауэра может быть сильно затруднено, и даже не возможно. Поэтому, чтобы достичь условия, благоприятного для эксперимента, необходимо выбрать оптимальную навеску образца.

Во многих мессбауэровских исследованиях по изучению динамики решетки, фазовому анализу, по изучению валентности и распределению мессбауэровских ионов по неэквивалентным позициям решетки необходимо определение интенсивности поглощения парциальных спектров с большой точностью. Эти задачи требуют наличия высококачественных экспериментальных мессбауэровских спектров, что возможно только при использовании наиболее оптимальных навесок исследуемых соединений. После открытия эффекта Мессбауэра был опубликован ряд теоретических и экспериментальных работ по определению оптимальной толщины мессбауэровских поглотителей [1-3]. Однако следует заметить, что до сих пор нет универсального метода по определению оптимальной толщины из-за многообразия изучаемых объектов и отсутствия глубокого понимания всех процессов взаимодействия резонансного γ -излучения с составными элементами исследуемых соединений и структуры вещества. Поэтому выдвигаемые методы надо рассматривать как приближенные оценки оптимальной толщины d_{opt} .

Критерий оптимального выбора навески образца

Для выбора оптимальной толщины мы, прежде всего, должны выбрать физические параметры, которые могут помочь оценить, насколько та или иная толщина будет оптимальной для эксперимента. В качестве таких параметров предла-

гались использовать интенсивность [6] или площадь [7] спектральной линии. Ряд исследователей предлагали использовать критерий сигнал/шум, S/N [8-12]. В настоящее время наиболее часто используемым критерием является именно критерий сигнал/шум [8], или, другими словами, фактор качества Q (quality factor) [11], который определяется следующим выражением:

$$Q = \frac{S}{N} = \frac{I(\infty, d) - I(v_r, d)}{[(\Delta I(\infty, d))^2 + (\Delta I(v_r, d))^2]^{1/2}} = \frac{I(\infty, d) - I(v_r, d)}{[I(\infty, d) + I(v_r, d)]^{1/2}}, \quad (1)$$

где $I(\infty, d)$ и $I(v_r, d)$ – число зарегистрированных γ -квантов вне резонанса и при резонансе, соответственно (см. рис. 1), ΔI - обозначает статистическую ошибку измерения I , причем $\Delta I = \sqrt{I}$, поскольку это случайный процесс.

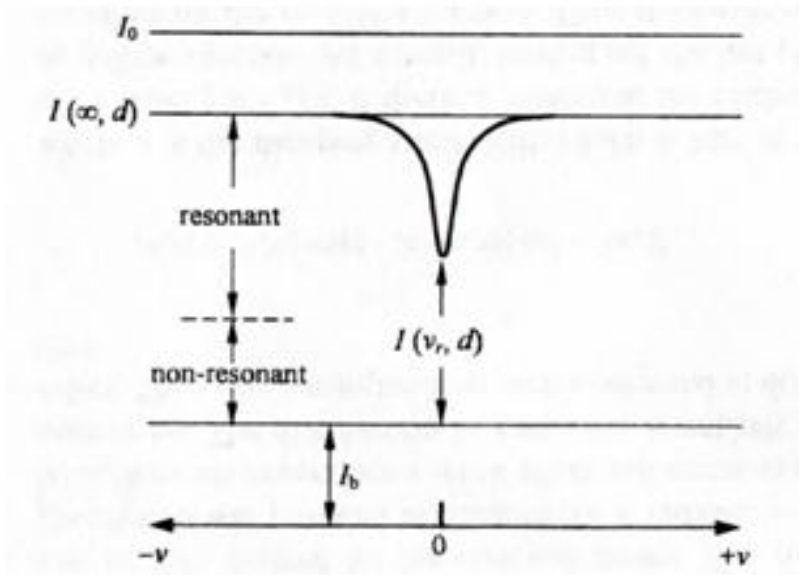


Рис. 1. Парциальные вклады в мёсбауэровский спектр на пропускание.

Для тонкого образца различие между $I(\infty, d)$ и $I(v_r, d)$ маленькое, часто меньше чем 10% от числа зарегистрированных γ -квантов вне резонанса. Тогда можно предположить, что $I(\infty, d) + I(v_r, d) \cong 2I(\infty, d)$. Следовательно, мы можем переписать выражение Q в более простом виде [9, 13]:

$$\begin{aligned}
Q &= \frac{S}{N} = \frac{I(\infty, d) - I(\nu_r, d)}{[I(\infty, d)]^{1/2}} \\
&= f_s I_0^{1/2} e^{-\mu_a d/2} [1 - e^{-\mu_r d/2} J_0(i\mu_r d / 2)], \\
&= f_s I_0^{1/2} F(\mu_a, \mu_r, d)
\end{aligned} \tag{2}$$

где I_0 – полная интенсивность падающего γ -излучения, f_s – фактор Лэмба-Мессбауэра источника, d – толщина поглотителя в единицах $\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2}$ (заметим, что $\mu_r d = t_a$ – эффективная мессбауэровская толщина), J_0 – функция Бесселя нулевого порядка, μ_a (в единицах $\text{cm}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$) – массовый коэффициент поглощения, и μ_r (тоже в единицах $\text{cm}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$) – коэффициент резонансного поглощения. Как μ_a , так и μ_r определяются следующим образом:

$$\mu_a = \sum_i p_i \mu_a^i, \tag{3}$$

$$\mu_r = r \sigma_0 f \alpha_m \frac{N_A}{A_m} n_0, \tag{4}$$

где p_i – массовая доля i -го элемента в образце, σ_0 – поперечное сечение резонансного поглощения, α_m – естественная распространенность мессбауэровского изотопа (для ^{57}Fe $\alpha_m = 0.0219$). N_A – число Авогадро, A_m – молекулярная масса (mg) вещества в 1 моле, n_0 – число мессбауэровских атомов в молекуле изучаемого соединения (например для Fe_3VO_6 это число равно $n_0 = 3$), и f – фактор Лэмба-Мессбауэра поглотителя.

Весовой коэффициент r в выражении (4) учитывает распределение интенсивностей линий в сверхтонкой структуре мессбауэровского спектра. Когда спектр поглощения представляет одиночную линию, $r = 1$. В случае наблюдения в спектре поликристаллического образца квадрупольного расщепления, когда интенсивности линий в дублете имеют равные значения и при вычислении $I(\nu_r, d)$ для одной линии в выражении (2) используется эффективная толщина $t_a/2$, следовательно, для этого случая $r = 1/2$. При наличии сверхтонкого магнитного расщепления ядерных подуровней (как например в $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ или $\alpha\text{-Fe}$), мы вычисляем

$I(v, d)$ для 3-ей или 4-ой линии, где эффект насыщения минимален. Если используется поликристаллический образец, то эффективная толщина для линий 3 и 4 будет определяться как равной $t_a/12$, поэтому в этом случае $r = 1/12$. Такое же значение можно использовать и для магнитно-упорядоченных монокристаллов.

Мы можем переписать выражение (2) таким образом:

$$Q = \frac{I(\infty, d) - I(v, d)}{I(\infty, d)} \cdot \sqrt{I(\infty, d)} = \varepsilon(v) \cdot \frac{1}{\sqrt{I(\infty, d)}}, \quad (5)$$

где $1/\sqrt{I(\infty, d)}$ – обратная величина стандартной статистической ошибки фоновых отсчетов, $I(\infty, d)$, которая часто используется в статистических измерениях случайных процессов как индекс точности, а $\varepsilon(v)$ дается следующим выражением:

$$\varepsilon(v) = \frac{I(\infty, d) - I(v, d)}{I(\infty, d)} = f_s [1 - T(v)], \quad (6)$$

где

$$T(v) = \int_{-\infty}^{+\infty} \mathfrak{Z}(E - \frac{v}{c} E_0) \cdot A(E) dE. \quad (6a)$$

$T(v)$ – интеграл прохождения (transmission integral), $\mathfrak{Z}(E - \frac{v}{c} E_0)$ – функция Лоренца.

$$\begin{aligned} A(E) &= e^{-\mu_r(E)d} = e^{-\sigma(E)t_a}, \\ \sigma(E) &= \sigma_a(E) / \sigma_0, \\ t_a &= n_a f \sigma_0 d. \end{aligned} \quad (6b)$$

Выражение (2) является общим определением отношения сигнал/шум, но из преобразованного выражения (5) лучше видна физическая сущность этого параметра. Лучший коэффициент качества Q требует лучшей комбинации двух параметров, т.е. большего эффекта и лучшей точности в измерениях.

Определение оптимальной навески образца

Предположим, что $f_s \sqrt{I_0} = c$ (постоянная), введем параметры $\mu_a d = x$ и $\mu_r \mu_a = b$, тогда выражение (2) можно записать таким образом:

$$Q(b, x) = c \cdot e^{-x/2} \left[1 - e^{-bx/2} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{(k!)^2} \left(\frac{bx}{4} \right)^{2k} \right] = cF(b, x), \quad (7)$$

где

$$F(b, x) = e^{-x/2} \left[1 - e^{-bx/2} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{(k!)^2} \left(\frac{bx}{4} \right)^{2k} \right]. \quad (8)$$

Теперь мы можем учитывать b как параметр и построить/протабулировать $F(b, x)$, (который пропорционален коэффициенту качества $Q(b, x)$) для различных значений b , как это показано на рис. 2. Для каждого b кривая $F(b, x)$ имеет максимум, и по значению $x = \mu_a d$, для которого наблюдается максимум, мы можем определить оп-

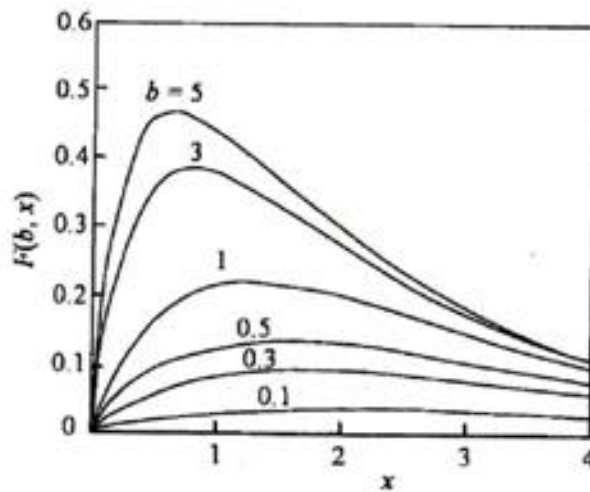


Рис. 2. Зависимость $F(b, x)$ от x при различных значениях b .

тимальное произведение $\mu_a d_{\text{опт}}$, т.е. оптимальную толщину $d_{\text{опт}} = x_{\text{max}} / \mu_a$.

Значение μ_a для исследуемого соединения можно вычислить, зная химическую формулу и коэффициенты поглощения для резонансного γ -излучения каждого составного элемента вещества. Для определения $b = \mu_r / \mu_a$ необходимо знание фактора Лэмба-Мессбауэра f_a исследуемого вещества, что для вновь исследуе-

мых соединений бывает, как правило, неизвестным, и требует экспериментальной оценки. Существуют несколько экспериментальных методов по определению фактора Лэмба-Мессбауэра [14]. Наиболее популярный из них – это использование образцов с разной навеской, что дает возможность определить f_a исследуемого вещества с довольно хорошей точностью и вычислить значение μ_r . Значения фактора Лэмба-Мессбауэра для некоторых соединений приведены в таблице.

Таблица

Значения фактора Лэмба-Мессбауэра для некоторых соединений

	Материал	f_a (295K)	Оптимальная навеска, мг/см ²
1	Fe(C ₅ H ₅) ₂	0.08	
2	Cu ₅ FeS ₄	0.77	
3	FeSO ₄ ·7H ₂ O	0.16	
4	SNP, Na ₂ [Fe(CN ₅)NO]	0.37	
5	K ₃ Fe(CN) ₆	0.10	
6	K ₄ Fe(CN) ₆ ·3H ₂ O	0.25	
7	α-Fe ₂ O ₃	0.65	
8	α-Fe	0.75	
9	FeS ₂	0.20	
10	α-FeOOH	0.50	
11	Fe ₃ O ₄	0.58	
12	SnO ₂	0.28	
13	BaSnO ₃	0.57	

Выполнение лабораторной работы – «Определение оптимальной навески образца для мёссбауэровских измерений».

1. Используя описанный выше метод, определить оптимальную навеску ($\text{мг}/\text{см}^2$) для соединения, указанного преподавателем (см. таблицу). Для расчета оптимальной навески необходимо вычислить: A_m – молекулярную массу (мг) вещества в 1 моле, n_0 – число мессбауэровских атомов в молекуле изучаемого соединения. Определить α_m – естественную распространенность мессбауэровского изотопа, коэффициент r , указывающий число линий в мёссбауэровском спектре ($r = 1$ для синглета, $r = 1/2$ для дублета, $r = 1/12$ для секстета). Для вычисления μ_a использовать коэффициенты поглощения для γ -излучения с энергией 14.4, 21.83 и 23.87 кэВ для мёссбауэровских нуклидов ^{57}Fe , ^{151}Eu и ^{119}Sn , соответственно. Эти данные приведены в Приложении 1.
2. Измерить диаметр поперечного сечения кюветы, которая будет использоваться для мёссбауэровских измерений. Определить массу образца, соответствующую оптимальной навеске для кюветы данного сечения. Растолочь образец в агатовой ступке и заполнить кювету измельченным порошком с размером частиц не более 10-50 микрон. Слегка придавливая, закрыть кювету крышкой, чтобы порошок заполнил объем кюветы в виде тонкого слоя с однородной толщиной. Проверить наличие незаполненных участков кюветы, рассматривая кювету на просвет. Закрепить подготовленный для измерений образец на держатель образца мёссбауэровского спектрометра.
3. Сравнить соотношение сигнал/шум для измерений, сделанных при оптимальной навеске и при навесках в 2 раза больше и в два раза меньше оптимального.

$$t_{\text{изм}} = \text{const.}$$

Вопросы для самоконтроля

1. Какие процессы приводят к ослаблению мессбауэровского гамма излучения при прохождении среды, содержащей резонансные ядра?
2. Вычислить коэффициент ослабления для каждого процесса и сравнить их при условии, что энергия фотонов мессбауэровского излучения равна 14.4 кэВ, а среда представляет собой фольгу металлического железа.
3. В чем недостаток использования в мессбауэровских измерениях очень тонких и очень толстых образцов?
4. Какие параметры могли быть выбраны для определения оптимальной навески образцов в мессбауэровских измерениях?
5. Какой формулой определяется критерий сигнал/шум?
6. Как определяется массовый коэффициент поглощения μ_a в многоэлементных соединениях?
7. От каких факторов зависит коэффициент резонансного поглощения μ_r ?
8. Что учитывает весовой коэффициент r ? Привести численные значения весового коэффициента r , когда ядра исследуемого соединения испытывают только монопольное электростатическое взаимодействие, только квадрупольное взаимодействие и только сверхтонкое магнитное взаимодействие.
9. Как определяется эффективная мессбауэровская толщина? Привести формулу.
10. Какую форму имеет функция $Q(b,x)$ – коэффициент качества? Привести формулу и нарисовать график.
11. Как определяется оптимальная толщина образца по графику функции $Q(b,x)$ – коэффициента качества?
12. В литературе в качестве первого шага при подготовке образца для мессбауэровских измерений на изотопе ^{57}Fe рекомендуется использовать навеску 10 мг/см² для образца с естественным содержанием изотопа ^{57}Fe . Сравнить со-

отношение сигнал/шум $Q(b,x)$ при одинаковом времени накопления мёсбауэровского спектра исследуемого вами материала/соединения для навески 10 мг/см^2 и оптимальной навески, которую вы получили на основе предложенного в пособии метода.

Коэффициенты поглощения резонансного γ -излучения для наиболее часто используемых мессбауэровских нуклидов

Absorber		γ -ray energy (keV)												
Element	Atomic mass (u)	6.0	14.41 ⁵⁷ Fe	21.53 ¹⁵¹ Eu	23.87 ¹¹⁹ Sn	25.66 ¹⁶¹ Dy	27.77 ¹²⁹ I	35.46 ¹²⁵ Te	37.15 ¹²¹ Sb	50	60	80	100	150
H	1 1.008	0.404	0.387	0.367	0.363	0.362	0.360	0.351	0.348	0.335	0.326	0.309	0.296	0.265
He	2 4.003	0.423	0.213	0.194	0.191	0.189	0.187	0.180	0.178	0.170	0.166	0.156	0.149	0.134
Li	3 6.941	0.945	0.227	0.182	0.174	0.171	0.167	0.158	0.156	0.149	0.144	0.135	0.129	0.155
Be	4 9.012	2.51	0.32	0.215	0.195	0.190	0.185	0.175	0.170	0.156	0.150	0.140	0.133	0.119
B	5 10.81	5.38	0.51	0.27	0.25	0.235	0.22	0.19	0.185	0.167	0.159	0.147	0.139	0.124
C	6 12.011	10.6	0.87	0.40	0.35	0.32	0.29	0.22	0.21	0.188	0.175	0.161	0.151	0.135
N	7 14.007	17.9	1.40	0.52	0.43	0.39	0.34	0.26	0.25	0.199	0.182	0.164	0.153	0.135
O	8 15.999	27.6	2.2	0.74	0.58	0.52	0.44	0.30	0.29	0.21	0.19	0.17	0.155	0.136
F	9 18.998	37.4	2.7	0.88	0.66	0.62	0.52	0.33	0.31	0.223	0.193	0.165	0.150	0.130
Ne	10 20.179	54.0	4.0	1.36	1.05	0.87	0.70	0.42	0.38	0.260	0.218	0.179	0.161	0.137
Na	11 22.990	69.2	5.2	1.70	1.24	1.07	0.88	0.51	0.46	0.283	0.229	0.181	0.159	0.134
Mg	12 24.305	92.4	6.8	2.20	1.64	1.18	1.12	0.64	0.56	0.329	0.258	0.195	0.169	0.139
Al	13 26.982	116	9.0	2.74	2.15	1.75	1.40	0.74	0.69	0.368	0.279	0.202	0.171	0.138
Si	14 28.086	145	12.4	3.65	2.8	2.2	1.84	0.96	0.84	0.433	0.317	0.223	0.184	0.145
P	15 30.974	172	14.2	4.15	3.2	2.8	2.2	1.08	0.95	0.49	0.35	0.23	0.19	0.143
S	16 32.06	210	17.0	5.6	4.0	3.6	2.8	1.4	1.20	0.580	0.404	0.259	0.203	0.151
Cl	17 35.453	240	20.0	6.1	4.5	3.7	2.9	1.53	1.36	0.642	0.438	0.270	0.206	0.148
Ar	18 39.948	268	21.0	7.0	5.2	4.2	3.4	1.7	1.5	0.69	0.463	0.276	0.205	0.143
K	19 39.098	326	27.0	8.8	6.2	5.3	4.6	2.2	1.8	0.857	0.565	0.326	0.236	0.159
Ca	20 40.08	383	32.5	10.5	7.7	6.5	5.0	2.5	2.4	1.00	0.649	0.364	0.257	0.168
Sc	21 44.956	407	33	11.2	8.3	7.1	5.6	2.7	2.4	1.07	0.683	0.373	0.257	0.162
Ti	22 47.90	446	42.0	12.4	9.0	7.6	6.2	3.0	2.5	1.19	0.735	0.402	0.272	0.165
V	23 50.941	493	43	14.1	10.6	8.8	6.8	3.3	2.9	1.31	0.827	0.433	0.286	0.168

Absorber		γ -ray energy (keV)												
Element	Atomic mass (u)	6.0	14.41 ⁵⁷ Fe	21.53 ¹⁵¹ Eu	23.87 ¹¹⁹ Sn	25.66 ¹⁶¹ Dy	27.77 ¹²⁹ I	35.46 ¹²⁵ Te	37.15 ¹²¹ Sb	50	60	80	100	150
Cr	24 51.996	570	48	16.8	12.2	10.4	8.0	4.0	3.4	1.52	0.948	0.486	0.315	0.179
Mn	25 54.938	75.9	53	18.4	13.4	11.3	8.5	4.6	3.9	1.67	1.04	0.523	0.334	0.184
Fe	26 55.847	87.1	64	22.0	15.5	12.4	10.0	5.0	4.4	1.92	1.19	0.59	0.37	0.196
Co	27 58.933	96.0	66	21.4	16.0	13.6	10.6	5.4	4.8	2.08	1.28	0.629	0.390	0.201
Ni	28 58.70	110	75	26.0	18.8	15.8	12.4	6.4	5.8	2.42	1.49	0.720	0.440	0.221
Cu	29 63.546	118	82	28.0	20.0	16.8	13.0	6.8	6.1	2.56	1.56	0.750	0.453	0.221
Zn	30 65.38	132	92	31	22	18.4	14.8	7.5	6.8	2.85	1.73	0.824	0.492	0.233
Ga	31 69.72	141	97	32.8	23.2	19.0	15.2	8.0	7.2	2.99	1.81	0.862	0.511	0.238
Ge	32 72.59	152	102	36.0	25.0	20.5	16.2	8.4	7.6	3.21	1.95	0.921	0.543	0.247
As	33 74.922	168	126	38.5	28.0	23.0	18.5	9.0	8.0	3.54	2.15	1.00	0.586	0.259
Se	34 78.96	180	110	40	30.5	25.5	19.5	10.2	9.0	3.78	2.29	1.07	0.616	0.268
Br	35 79.904	198	130	43	32.0	27.2	21.5	11.2	9.8	4.17	2.52	1.17	0.672	0.286
Kr	36 83.80	212	126	46	34.5	28.5	23.5	11.8	10.4	4.43	2.67	1.24	0.708	0.297
Rb	37 85.468	231	21.0	49	37	31.0	24.8	12.8	11.4	4.81	2.91	1.34	0.761	0.315
Sr	38 87.62	251	24.5	52	39.5	32.5	26.5	13.8	12.2	5.20	3.14	1.44	0.818	0.332
Y	39 88.906	274	26.0	58	42	33.5	28.8	15.0	13.2	5.66	3.41	1.56	0.887	0.354
Zr	40 91.22	296	28.0	62	44	38	31	16.2	14.4	6.11	3.70	1.70	0.951	0.374
Nb	41 92.906	323	29.5	65	46.5	40	32.5	17.5	15.6	6.68	4.04	1.85	1.04	0.404
Mo	42 95.94	343	34	69	49	42	34	18.5	16.3	7.03	4.27	1.96	1.10	0.422
Tc	43 98.906	364	35.5	75	54	44	36	19.6	17.4	7.36	4.45	2.03	1.13	0.432
Ru	44 101.07	391	37.5	13.0	60	49	40	20	18.0	7.87	4.76	2.17	1.20	0.456
Rh	45 102.906	418	38	12.5	60	51	39.5	22	19.5	8.42	5.09	2.32	1.29	0.483

Pd	46	106.4	447	43	14.0	10.6	56	42	23	20.4	8.83	5.37	2.45	1.36	0.505
Ag	47	107.868	479	44	15.5	11.4	57	45	24.5	23.8	9.44	5.75	2.64	1.46	0.539
Cd	48	112.41	501	46	16.2	12.2	10.2	47	25.6	22.4	9.81	5.95	2.72	1.51	0.552
In	49	114.82	530	49	17.0	12.8	10.4	9.0	28.4	24.8	10.5	6.35	2.87	1.58	0.577
Sn	50	118.69	563	54	18.0	13.3	11.2	9.3	28	24.0	10.8	6.60	3.00	1.65	0.594
Sb	51	121.75	579	56	18.7	14.3	12.2	10.1	27.5	25.0	11.6	6.98	3.18	1.74	0.623
Te	52	127.60	604	60	20.1	15.3	12.8	10.5	31	27.5	12.0	7.27	3.30	1.81	0.642
I	53	126.905	655	61	21.0	16.0	13.5	11.0	33	28.4	12.7	7.69	3.48	1.91	0.683
Xe	54	131.30	670	67	23.0	17.2	14.5	11.3	36	30.0	13.0	7.89	3.59	1.97	0.702
Cs	55	132.905	725	71	24.6	18.0	15.8	12.3	6.1	35.6	14.0	8.43	3.82	2.09	0.739
Ba	56	137.33	754	75	25.0	18.6	16.2	13.2	7.0	6.1	15.1	8.68	3.94	2.16	0.763
La	57	138.906	672	76	26.5	20.2	17.0	14.0	6.6	6.0	15.1	9.19	4.20	2.30	0.811
Ce	58	140.12	511	77	29	22	18.6	14.8	7.1	6.5	16.3	9.80	4.43	2.41	0.847
Pr	59	140.908	543	81	30	22.8	19.4	16.0	7.6	6.8	17.3	10.4	4.70	2.56	0.893
Nd	60	144.24	201	88	31.2	24.0	20.2	16.4	7.8	7.0	17.8	10.8	4.88	2.66	0.931
Pm	61	145	210	92	32.8	24.8	21.1	17.6	8.2	7.3	18.7	11.3	5.08	2.78	0.967
Sm	62	150.4	221	96	34.5	25.6	22.0	18.8	8.6	7.4	19.4	11.7	5.29	2.88	1.00
Eu	63	151.96	231	100	35.8	26.2	22.6	18.9	8.9	8.0	20.4	12.3	5.55	3.03	1.05
Gd	64	157.25	238	104	37	27.0	23.2	19.0	9.3	8.3	3.94	12.4	5.71	3.13	1.09
Tb	65	158.925	251	107	38	28.4	24.1	19.7	9.8	8.8	4.17	13.2	5.99	3.25	1.13
Dy	66	162.50	261	110	40	29.8	25.0	20.4	10.4	9.2	4.30	13.7	6.19	3.37	1.16
Ho	67	164.930	273	115	42	31.4	26.4	21.5	10.8	9.6	4.53	14.3	6.46	3.52	1.21
Er	68	167.26	284	120	44.5	33.0	27.8	22.6	11.2	10.0	4.72	14.9	6.73	3.67	1.26
Tm	69	168.934	299	127	45.5	34	28.9	23.3	11.8	10.6	4.92	15.6	7.02	3.81	1.32
Yb	70	173.04	310	133	47	35	29.8	24.0	12.4	11.1	5.05	16.3	7.20	3.93	1.36
Lu	71	174.97	324	139	48	36.5	31	24.8	12.8	11.5	5.27	17.0	7.54	4.10	1.41
Hf	72	178.49	336	145	49	38	32	25.6	13.2	11.9	5.46	17.7	7.86	4.28	1.45
Ta	73	180.948	346	150	51.5	39	33	26.8	13.8	12.5	5.69	18.4	8.19	4.49	1.50
W	74	183.85	364	155	54	40	34.5	28.0	14.5	13.0	5.90	19.1	8.56	4.71	1.56
Re	75	186.207	378	160	56.5	42	35	28.5	15.0	13.6	6.14	19.8	8.94	4.94	1.62

Absorber		γ -ray energy (keV)													
Element	Atomic mass (u)	6.0	14.41	21.53	23.87	25.66	27.77	35.46	37.15	50	60	80	100	150	
			⁵⁷ Fe	¹⁵¹ Eu	¹¹⁹ Sn	¹⁶¹ Dy	¹²⁹ I	¹²⁵ Te	¹²¹ Sb						
Os	76	190.2	393	165	59	44	36	29.0	15.6	14.1	6.33	3.99	8.96	4.88	1.67
Ir	77	192.22	407	172	61	45.5	38	31	16.4	14.6	6.61	4.17	9.31	5.04	1.73
Pt	78	195.09	423	178	64	47	40	33	17.0	15.2	6.82	4.29	9.51	5.09	1.74
Au	79	196.966	440	191	66.5	49.5	42	34.5	17.6	15.7	7.13	4.49	1.20	5.23	1.84
Hg	80	200.59	456	165	67	52	44	36	18.2	16.2	7.41	4.65	2.27	5.52	1.86
Tl	81	204.37	472	123	68.5	54	45	37	19.0	16.8	7.66	4.80	2.34	5.66	1.93
Pb	82	207.2	491	120	70	56	46.5	38	19.8	17.4	7.88	4.91	2.38	5.58	1.99
Bi	83	208.980	510	123	71.5	58	48	39.5	20.6	18.2	8.30	5.22	2.56	6.17	2.09
Po	84	209	531	126	73	60	49.5	41	21.2	19.0	8.63	5.42	2.65	6.40	2.19
At	85	210	556	140	76	60	52	41.5	21.7	19.8	9.03	5.68	2.77	6.68	2.29
Rn	86	222	551	60	80	59	53	42	22.2	20.6	8.95	5.64	2.74	6.59	2.26
Fr	87	223	573	62	83	60	54	44	22.8	20.8	9.34	5.86	2.86	1.66	2.34
Ra	88	226.025	591	65	87	62	55	46	23.5	21	9.61	6.05	2.93	1.71	2.41
Ac	89	227.028	613	70	89	63	58	47	24.5	22	10.0	6.29	3.05	1.77	2.50
Th	90	232.038	628	75	92	65	62	48	25.6	23	10.2	6.41	3.09	1.79	2.44
Pa	91	231.036	662	80	95	67	61	48.5	26.2	24	10.8	6.75	3.27	1.89	2.67
U	92	238.029	658	85	81	70	60	49	27	24.5	10.9	6.83	3.31	1.92	2.83
Np	93	237.048	701	90	63	72	62	51	28	25	11.4	7.14	3.46	1.99	2.82
Pu	94	239.13	717	95	63	75	63	53	29	26	11.6	7.27	3.51	2.02	2.71

Литература

1. Cohen R.L. Experimental methods in Mossbauer spectroscopy / R.L. Cohen, G.K. Wertheim // *Methods of Experimental Physics*, vol. 11. R.V. Coleman (Ed.), Academic Press. New York, 1974. - pp. 307-369.
2. Longworth G. Instrumentation for Mossbauer spectroscopy / G. Longworth // *Advances in Mossbauer Spectroscopy: Applications to Physics, Chemistry and Biology*, B.V. Thosar and P.K. Iyengar (Eds.), Elsevier. Amsterdam, 1983. - pp. 122-158.
3. Shirley D.A. Recoil-free resonant absorption in Au¹⁹⁷/ D.A. Shirley, M. Kaplan, and P. Axel // *Phys. Rev.* 1961. - V.123. - pp.816-830.
4. Margulies S. Transmission and line broadening of resonance radiation incident on a resonance absorber / S. Margulies and J.R. Ehrman // *Nucl.Instrum.Methods.* 1961. – V.12.- pp.131-137.
5. Ruby S.L. Line shape in Mossbauer spectroscopy / S.L. Ruby and J.M. Hicks // *Rev. Sci Instrum.* 1962. - V.33, - pp.27-30.
6. Shimony U. Condition for maximum single-line Mossbauer absorption / U. Shimony // *Nucl. Instrum. Methods.* 1965. – V.37.- pp.348-350.
7. Blarney P.J. The area of a single line Mossbauer absorption spectrum / P.J. Blarney // *Nucl. Instrum. Methods.* 1977. – V.142. – pp.553-557.
8. Bancroft G.M. Mossbauer Spectroscopy / G.M. Bancroft // *Mossbauer Spectroscopy: An Introduction for Inorganic Chemists and Geochemists*, Wiley-New York. 1973. - p.252.
9. Weisman I.D. Nuclear resonances in metals: nuclear magnetic resonance and Mossbauer effect / I.D. Weisman, L.J. Swartzendruber and L.H. Bennett // *Measurement of Physical Properties*, Techniques of Metal Research.Vol. 6. Part 2, E. Passaglia (Ed.), Wiley, New York. 1973. - pp. 165-504.

10. Sarma P.R. Optimization of the absorber thickness for improving the quality of a Mossbauer spectrum / P.R. Sarma, V. Prakash, and K.C. Tripathi // *Nucl. Instrum. Methods*. 1980. – V.178. – pp.167-171.
11. Long G.J. The ideal Mossbauer effect absorber thickness / G.J. Long, T.E. Cranshaw, and G. Longworth // *Mossbauer Effect Ref. Data J.* 1983. – V.6. – pp. 42-49.
12. Kumar A. Optimized thickness of diffusive Mossbauer absorbers / A. Kumar, M.R. Singh, P.R. Sarma, and K.C. Tripathi // *J. Phys. D.* 1989. – V.22. – pp.465-466.
13. Zhang F.L. Determination of the optimum thickness of an absorber in Mossbauer spectroscopy / F.L Zhang, F. Yi, Y.L Chen and B.F. Xu. // *J. Wuhan University (Natural Sci. Edition)*. 1997. – V.43. – pp.348-352 .
14. Вагизов Ф.Г. Процессы бесфононного излучения и поглощения гамма фотонов ядрами в твердых телах (теория и практика мессбауэровской спектроскопии) / Ф.Г. Вагизов, Э.К. Садыков // Учебно-методическое пособие для студентов третьего и четвертого курса, магистрантов и аспирантов Института физики. Казань. 2011, - 20 с. http://kpfu.ru/docs/F22752037/02_vagizovfactorlm.pdf