

ИССЛЕДОВАНИЕ КОГЕРЕНТНЫХ ПЕРЕХОДНЫХ ЭФФЕКТОВ МЕССБАУЭРОВСКОГО γ -ИЗЛУЧЕНИЯ ^{57}Fe

Э.Х.Реало, К.К.Ребане, М.А.Хаас, Я.Я.Йыги

При ступенчатой фазовой модуляции γ -источника $^{57}\text{Co}(\text{Pd})$ с помощью пьезопреобразователя экспериментально найдены когерентные переходные эффекты (КПЭ), выражающиеся в проявлении периодических импульсов в прошедшей через поглотитель интенсивности резонансного γ -излучения 14,4 кэВ. Импульсы характеризуются крутым фронтом (15 – 30 нс), длительностью меньше 100 нс и пиковой интенсивностью, превышающей стационарную величину резонансного эффекта. Демонстрируется применение КПЭ для исследования временной зависимости неупругого резонансного рассеяния.

Исследование когерентных переходных эффектов (КПЭ) является новым направлением мессбауэровской спектроскопии, представляющим значительный теоретический и экспериментальный интерес. Возможность наблюдения КПЭ обосновывалась теоретически и демонстрировалась впервые на резонансе 93,3 кэВ изотопа ^{67}Zn ($\tau_0 = 13,2$ мкс) ^{1, 2}. Показано, что синфазная доплеровская модуляция, вызывающая быстрое (по сравнению со временем жизни уровня τ_0) нарушение резонанса γ -источника-поглотителя, приводит к интерференционным изменениям временно-частотного состава интенсивности γ -излучения: к осцилляциям, скачкам интенсивности, к увеличенному пропусканию и др. Аналогичные явления ранее наблюдались в ЯМР ³ и лазерной спектроскопии ⁴.

Из-за высоких значений факторов Дебая – Валлера ($f \approx 0,7 - 0,8$) и короткого времени жизни ($\tau_0 = 140$ нс) мессбауэровское излучение 14,4 кэВ ^{57}Fe имеет явные преимущества перед ^{67}Zn . Возможность достижения высокого временного разрешения (ниже 5 нс) ⁵ и реализация быстрого синфазного движения источников (поглотителей) ^{6, 7} создают предпосылки для успешных экспериментов. Отметим, что возможность наблюдения КПЭ для ^{57}Fe демонстрировалась нами в ⁷ при модуляции поглотителя.

В настоящей работе мы приводим результаты по экспериментальному исследованию КПЭ для ^{57}Fe при быстрой ступенчатой модуляции γ -источника.

Основные особенности КПЭ хорошо описываются в рамках классической теории зависящего от времени пропускания модулированного по фазе мессбауэровского излучения ².

Рассмотрим случай γ -источника и резонансного поглотителя с одиночными линиями лоренцевской формы с частотами центров ω_s и ω_a и полуширинами Γ_s и Γ_a , соответственно, где ступенчатый фазовый сдвиг $\varphi(t) = \varphi_0 + a\theta(t)$ создается мгновенным механическим сдвигом источника относительно поглотителя в момент времени $t = 0$ на расстояние Δx ($a = \Delta x/\lambda$, где $2\pi\lambda$ – длина волны γ -излучения). Частотный сдвиг линий $\Delta\omega = \omega_s - \omega_a$ до и после ступеньки фазы a считаем стационарным. Если такое модулированное излучение проходит резонансный поглотитель с мессбауэровской толщиной T_M , изменятся фазовые соотношения между двумя компонентами поля, которые соответствуют пугам волн, 1) испущенным в случайные моменты времени и 2) в момент ступенчатого сдвига фазы, что приводит к проявлению импульса в прошедшей поглотитель интенсивности. Действительно, проведенный нами расчет показывает, что временно-частотная зависимость интенсивности выражается в виде

$$I(t, \Delta\omega) = 2f_s e^{-\Gamma_a t} [(1 - \cos a) \text{Re}(AB) - \sin a \text{Im}(AB)] \theta(t),$$

где

$$A = \sum_{n=0}^{\infty} J_n(\sqrt{T_M \Gamma_a t}) (-1)^n \left(\frac{4t}{T_M \Gamma_a} \right)^{n/2} [i\Delta\omega + (\Gamma_s - \Gamma_a)/2]^n,$$

$$B = \sum_{n=1}^{\infty} J_n(\sqrt{T_M \Gamma_a t}) (-1)^n \left(\frac{T_M \Gamma_a}{4t} \right)^{n/2} [i\Delta\omega + (\Gamma_s + \Gamma_a)/2]^{-n},$$

$\text{Re}(AB)$ и $\text{Im}(AB)$ — реальная и мнимая часть (A, B) , J_n — функция Бесселя первого рода порядка n , f_s — фактор Дебая — Валлера γ -источника.

Отметим, что соответствующее выражение в ² справедливо для $T_M < 4$ и $\Delta\omega = 0$, что ограничивает применение его в интересующих нас случаях толстых ($T_M \approx 8$) поглотителей ⁵⁷Fe и $\Delta\omega \neq 0$.

Из анализа полученной формулы следует, что ступенчатый сдвиг фазы сопровождается скачком в интенсивности, который при толстом поглотителе достигает значений $4f_s$ при $\Delta\omega = 0$ и $8f_s$ при $\Delta\omega \neq 0$, т. е. в 4 и 8 раз превышает стационарную величину резонансного эффекта ϵ_0 . Спад интенсивности после ступеньки приблизительно описывается экспонентой, постоянной затухания τ_n которой зависит от T_M и $\Gamma_a + \Gamma_s$. При увеличении T_M импульс становится значительно короче τ_0 . Спад импульса завершается осцилляциями, амплитуда которых увеличивается, а их максимумы смещаются в сторону $t = 0$ при росте T_M .

Эксперименты по ступенчатой фазовой модуляции проводились для комбинации γ -источника ⁵⁷Co(Pd) и поглотителя K_4 ⁵⁷Fe(CN)₆ · 3H₂O ($T_M \approx 8$), $\epsilon_0 = 0,29$. Модуляция источника осуществлялась с помощью приклеенного к нему пьезопреобразователя (диск кварца X -среза с толщиной 0,25 мм), на который подавались периодические импульсы напряжения U прямоугольной формы с крутым фронтом и спадом ($\sim 15 - 20$ нс). Сдвиг линии $\Delta\omega$ задавался медленным (~ 10 Гц) доплеровским сдвигом γ -источника.

Временная зависимость интенсивности прошедшего поглотителем пучка γ -квантов относительно фронта возбуждающего импульса регистрировалась с помощью временного мессбауэровского спектрометра с время-амплитудным конвертером ⁵. Временное разрешение аппаратуры для регистрации 14,4 кэВ составляет 4,8 нс.

Эксперимент подтверждает возможность генерации из пучка испускаемых случайно во времени γ -квантов синхронных с фронтами возбуждающего сигнала интенсивных периодических импульсов γ -излучения 14,4 кэВ ⁵⁷Fe с крутым фронтом $t_{0,1-0,9} = 20 - 30$ нс и спадом с τ_n от 35 до 100 нс (рис. 1). Интенсивность импульсов заметно увеличивается при росте амплитуды возбуждения U (рис. 1, а) и достигает $I_{\text{макс}} = 1,88$ относительно интенсивности при $t < 0$, что в этой шкале равно $2,2\epsilon_0$. Увеличение скачка интенсивности выше ϵ_0 и уменьшение длительности $\tau_n < \tau_0$ свидетельствует об обнаружении КПЭ на изотопе ⁵⁷Fe. Как и следует ожидать, общая картина изменений интенсивностей при модуляции источника и поглотителя (в работе ⁷) одинакова.

Из рис. 1 видно, что форма импульсов несколько искажена неидеальностью движения модулятора. Конечная длительность сдвига фазы и реакция пьезопреобразователя приводят к уменьшению пиковой интенсивности, увеличению эффективного τ_n по сравнению с теоретическими оценками и появлению послеимпульсов.

Отношение пиковых интенсивностей I_+/I_- , соответствующих ступенькам фазы различного знака (фронт и спад возбуждающего импульса) сильно зависит от изомерного сдвига $S \sim \Delta\omega$ (рис. 1, б) и может быть использовано при точных измерениях изомерных или температурных сдвигов. Нами получено $I_+/I_- \sim kS$, где $k = 3,95$ (мм/с)⁻¹ в области $|S| \leq 0,15$ мм/с ⁷, причем коэффициент k значительно увеличивается при уменьшении амплитуды $U \sim a$.

КПЭ γ -излучения ⁵⁷Fe могут успешно применяться при исследованиях временных зависимостей резонансного рассеяния. Действительно, временная зависимость рассеянных электронов конверсии (рис. 2), измеренная нами с помощью резонансного детектора ⁵⁷FeAl при ступенчатой фазовой модуляции γ -источника ⁵⁷Co(Pd), характерна для неупругого

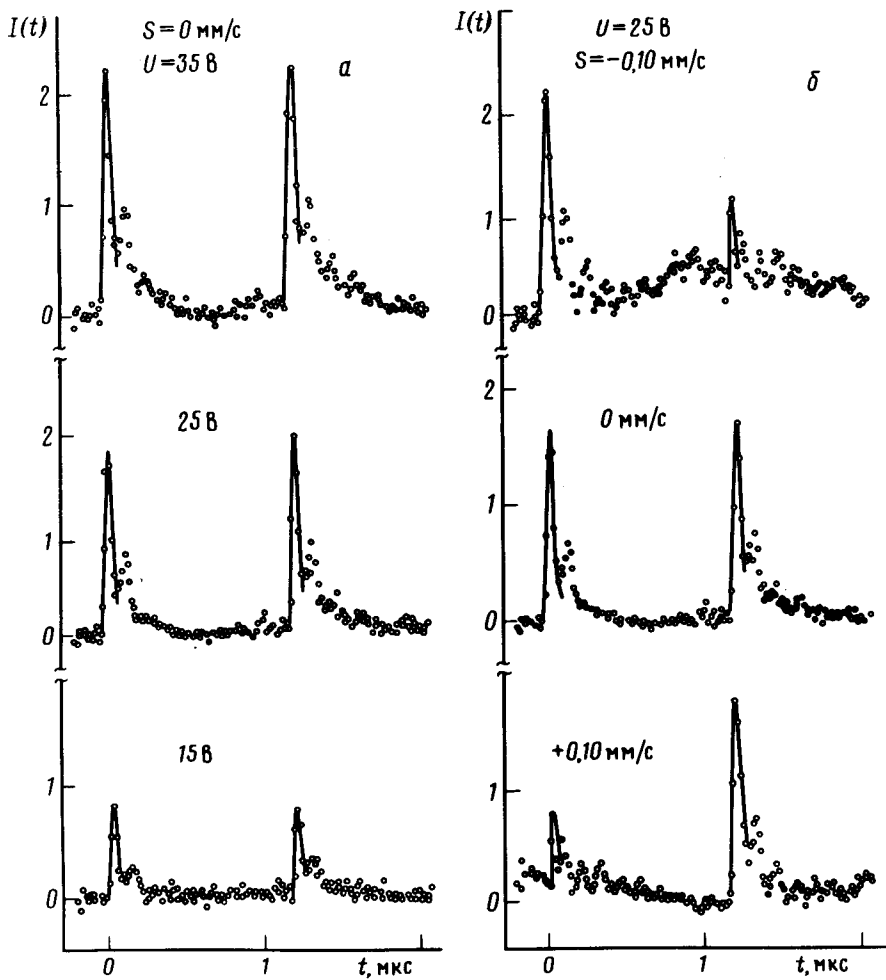


Рис. 1

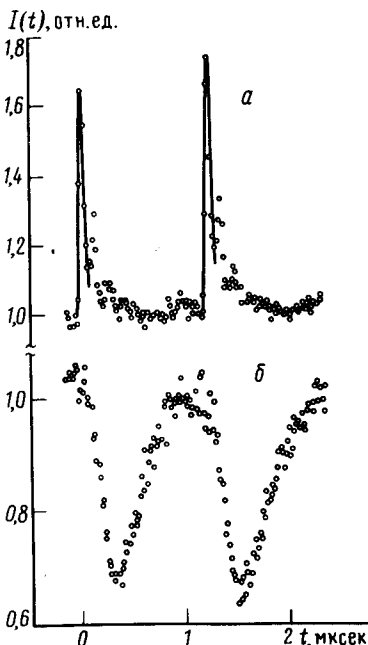


Рис. 1. Временные зависимости интенсивности прошедшего поглотитель $K_4 {}^{57}\text{Fe}(\text{CN})_6 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ($T_M \approx 8$) γ -излучения 14,4 кэВ ${}^{57}\text{Fe}$ при ступенчатой модуляции γ -источника ${}^{57}\text{Co}(\text{Pd})$: а – при различных амплитудах возбуждающих импульсов U и $S=0$, б – при различных изомерных сдвигах S и $U=25\text{В}$. Интенсивность $I(t)$ в единицах ϵ_0 .

Рис. 2. Временные зависимости интенсивности $I(t)$ при ступенчатой модуляции γ -источника ${}^{57}\text{Co}(\text{Pd})$ и $S=0$, $U=28\text{В}$: а – регистрация прошедших поглотитель $K_4 {}^{57}\text{Fe}(\text{CN})_6 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ γ -квантов сцинтилляционным детектором $\text{NaI} - \text{TI}$, б – регистрация с помощью резонансного детектора ${}^{57}\text{FeAl}$ рассеянных электронов конверсии

резонансного рассеяния. Форма кривой качественно совпадает с аналогичными, полученными при измерениях методом задержанных γ - γ -совпадений ${}^{8-10}$ и рассмотренными теоретически

в ¹¹. Высокая пиковая интенсивность, короткая длительность импульса и универсальность применения дают основанному на КПЭ методу формирования импульсов резонансного γ -излучения ⁵⁷Fe явные преимущества перед другими типами модуляторов (например, ¹²).

Авторы выражают искреннюю благодарность Р.Коху и Х.Раудсеппу за помощь при измерениях и С.И.Рейману за любезное предоставление резонансного детектора.

Литература

1. *Helistö P., Katila T., Potzel W., Riski K.* Phys. Lett., 1981, **85A**, 177.
2. *Helistö P., Ikonen E., Katila T., Riski K.* Phys. Rev. Lett., 1982, **49**, 1209.
3. *Bloembergen N., Purcell E.M., Pound R.V.* Phys. Rev., 1948, **73**, 679.
4. *Genack A.Z., Weitz D.A., Macfarlane R.M., Shelby R.M., Schenzle A.* Phys. Rev. Lett., 1980, **45**, 438.
5. *Koch R., Realo E.* Изв. АН Эст. ССР. Физ. Матем., 1979, **28**, 374.
6. *Koch R., Realo E.* Proceedings of the International Conference on the Applications of the Mössbauer Effect, Alma-Ata, 1983, (в печати).
7. *Koch R., Realo E., Rebane K., Jõgi J.* Proceedings of the International Conference on the Applications of the Mössbauer Effect. Alma-Ata, 1983 (в печати).
8. *Neuwirth W.* Z. Physik, 1966, **197**, 473.
9. *Thieberger P., Moragues J.A., Sanyal A.W.* Phys. Rev., 1968, **171**, 425.
10. *Koch R., Realo E.* Изв. АН Эст. ССР. Физ. Матем., 1981, **30**, 171.
11. *Hizhnyakov V.* Technical Report of Inst of Inst. Solid State Phys., The University of Tokyo, Ser. A, No. 860, 1977; *Ребане И.К., Туул А.Л., Хижняков В.В.* ЖЭТФ, 1979, **77**, 1302.
12. *Смирнов Г.В., Швыдько Ю.В., Реало Э.* Письма в ЖЭТФ, 1984, **39**, 33.