

- [1] Нокс Р. Теория экситонов. М., 1966. 219 с.
 [2] Urbach F. // Phys. Rev. 1953. V. 92. N 9. P. 1324.
 [3] Kurik M. V. // Phys. St. Sol. (a). 1971. V. 9. N 1. P. 9—45.
 [4] Toyozawa Y. // Progr. Theor. Phys. 1959. V. 22. N 4. P. 455.
 [5] Toyozawa Y. // Tech. Rep. ISSP. Ser. A. 1964. N 1. P. 119.
 [6] Давыдов А. С. Теория молекулярных экситонов. М., 1968. 296 с.
 [7] Агранович В. М. Теория экситонов. М., 1968. 382 с.
 [8] Ансельм А. И. Введение в теорию полупроводников. М., 1978. 615 с.
 [9] Specter H. N. // Phys. Rev. A. 1965. V. 137. N 1. P. 137.
 [10] Van Daal H. // J. Phil. Res. Repl. Suppl. 1965. V. 3. N 1. P. 82; Kanazawa K. K., Brown F. C. // Phys. Rev. A. 1964. V. 135. N 6. P. 757.
 [11] Парфеньев Р. В., Харус Г. И., Цидильковский И. М., Шалыт С. С. // УФН. 1974. Т. 112. № 1. С. 3—36.
 [12] Baer W. S., Dexter R. N. // Phys. Rev. A. 1964. V. 135. N 6. p. 1388.
 [13] Hodby J. W., Borders J. A., Brown F. C., Foner S. // Phys. Rev. Lett. 1967. V. 19. N 7. P. 1952.
 [14] Hodby J. W. // Sol. St. Comm. 1969. V. 7. N 5. P. 811.
 [15] Brown D. C. // Polarons and Excitons A. P. 1968. N 4. P. 323.
 [16] Reynolds D., Litton C. W., Collins T. G. // Phys. Rev. 1971. V. 4. N 6. P. 1868.
 [17] Сюше Ж. П. Физическая химия полупроводников. М., 1969. 224 с.

Институт физики АН УССР
Киев

Поступило в Редакцию
18 апреля 1990 г.

УДК 539.143.43

© Физика твердого тела, том 33, № 2, 1991
Solid State Physics, vol. 33, N 2, 1991

ЗАПАЗДЫВАЮЩЕЕ НУТАЦИОННОЕ ЭХО В УСЛОВИЯХ НЕРЕЗОНАНСНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ СПИНОВОЙ СИСТЕМЫ

В. С. Кузьмин, А. П. Сайко, Г. Г. Федорук

Известно, что нерезонансное импульсное возбуждение спиновой системы может являться причиной формирования одноимпульсного эха [1] и многокомпонентной структуры двухимпульсного эха [2]. Данные сигналы генерируются в условиях свободной эволюции спиновой системы с неоднородным уширением линии магнитного резонанса. В настоящей работе исследуется влияние нерезонансности возбуждения на нутационные колебания спиновой системы, происходящие во время действия возбуждающих импульсов. Наиболее интересен двухимпульсный режим, в котором изучается нутация спиновой системы, предварительное возбужденной импульсным полем (запаздывающая нутация [3]).

Пусть спиновая система подвергается воздействию переменного электромагнитного поля частоты ω , амплитуда которого

$$H_1(t) = \begin{cases} H_1, & 0 < t < t_1, \\ 0, & t_1 < t < t_1 + \tau, \\ H_1, & t_1 + \tau < t < \infty, \end{cases}$$

где t_1 — длительность первого («приготовляющего») импульса, τ — задержка между импульсами.

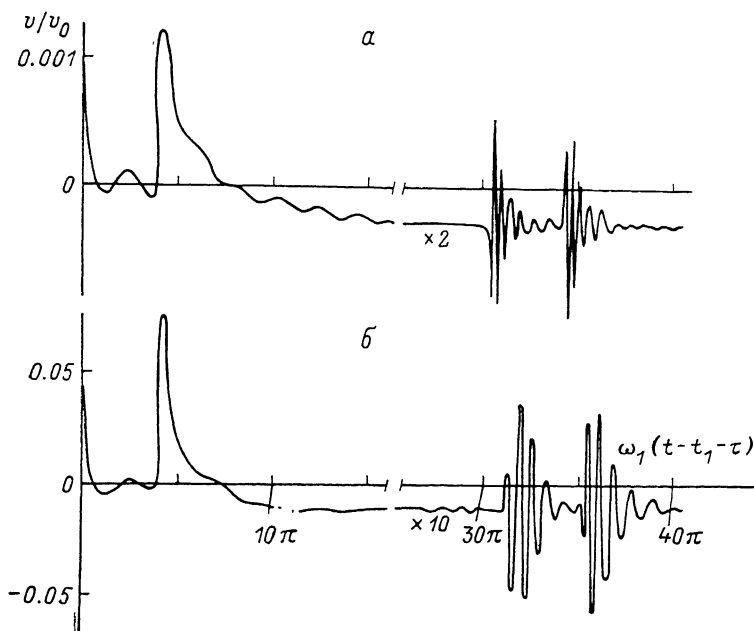
Выражение для сигнала поглощения при пренебрежении релаксацией имеет вид [3] ($t > t_1 + \tau$)

$$\nu = \nu_0 \omega_1 \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\beta} \left\{ -\frac{\Delta}{\beta} \sin \beta (t - t_1 - \tau) \left[\frac{\Delta}{\beta} (1 - \cos \beta t_1) \cos \Delta \tau + \sin \beta t_1 \sin \Delta \tau \right] + \right. \\ \left. + \cos \beta (t - t_1 - \tau) \left[-\frac{\Delta}{\beta} (1 - \cos \beta t_1) \sin \Delta \tau + \sin \beta t_1 \cos \Delta \tau \right] \right\} +$$

$$+ \left\{ \sin \beta (t - t_1 - \tau) \left[1 - \frac{\omega_1^2}{\beta^2} (1 - \cos \beta t_1) \right] \right\} g(\Delta - \delta) d\Delta, \quad (1)$$

где v_0 — разность населенностей в начальный момент времени $\delta = \omega - \omega_0$ — отстройка несущей частоты ω от центральной частоты перехода ω_0 ; $\beta = \sqrt{\Delta^2 + \omega_1^2}$; $\omega_1 = \gamma H_1$; γ — гиромагнитное отношение; Δ — разброс частот спиновых пакетов; $g(\Delta - \delta)$ — форм-фактор линии.

Интегралы в (1) были проанализированы в [3] при $\delta = 0$ для ширины линии $\sigma \gg \omega_1$. Нами предпринята попытка получения аналитического выражения (1) в случае произвольных соотношений между σ , ω_1 и δ . Если в качестве большого параметра задачи для выражения в первых



Сигналы запаздывающей нутации при нерезонансном двухимпульсном возбуждении. $\omega_1 t_1 = 4\pi$, $\omega_1 \tau = 30\pi$, $\omega_1/\sigma = 0.5$ (а) и 2 (б), $\delta/\omega_1 = 8$ (а) и 3 (б).

фигурных скобках (1) выбрать величину $\omega_1 \tau > 1$, а для выражения во вторых фигурных скобках $\omega_1(t - \alpha_i) > 1$, где $i=1, 2, 3$; $\alpha_1 = t_1 + \tau$, $\alpha_2 = \tau$, $\alpha_3 = 2t_1 + \tau$, то поведение интегралов в (1) достаточно хорошо аппроксимируется главными членами их асимптотического разложения. Используя известные методы асимптотических оценок интегралов [4], (1) можно записать в виде

$$v \simeq (2\pi)^{1/2} v_0 \omega_1 \left(\left\{ \sum_{i=1}^3 (\omega_1 \tau)^{-1/2} \psi_i(\Delta_{0i}) \sin(\omega_1 \sqrt{(t - \alpha_i)^2 - \tau^2} + \pi/4) \times \right. \right. \\ \times [g(\omega_1 \Delta_{0i} - \delta) + g(\omega_1 \Delta_{0i} + \delta)] \left. \left. + \frac{1}{2} \left(\frac{\sin y_{01}}{\omega_1(t - \alpha_1)} \right)^{1/4} (1 + \sin^2 y_{01})^{-1/2} \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \sin \left[\left(\frac{\omega_1(t - \alpha_1)}{\sin y_{01}} \right)^{1/2} + \frac{\pi}{4} \right] G(x_1) + \sum_{i=1}^2 (-2)^i F_i(y_{0i}) \mp F_3(y_{03}/4) \right\} \right), \quad (2)$$

где

$$\Delta_{0i} = \tau / \sqrt{(t - \alpha_i)^2 - \tau^2}, \quad \sin y_{0i} = [\sqrt{\omega_1^2 (t - \alpha_i)^2 + 4} - \omega_1(t - \alpha_i)] / 2,$$

$$G(x_i) = g(x_i - \delta) + g(x_i + \delta), \quad x_i = \omega_1 (\sin y_{0i} / [\omega_1(t - \alpha_i)])^{1/2},$$

$$\psi_1(\Delta_{01}) = (\Delta_{01}^3 / \sqrt{1 + \Delta_{01}^2}) (1 - \Delta_{01} / \sqrt{1 + \Delta_{01}^2}), \quad \psi_2(\Delta_{02}) = \Delta_{02}^{1/2} (1 - \Delta_{02} / \sqrt{1 + \Delta_{02}^2})^2 / 2,$$

$$\Psi_3(\Delta_{03}) = -\Delta^{1/2}/[2(1 + \Delta_{03}^2)], \quad F_i(y_{0i}) = (\omega_1(t - \alpha_i) \sin y_{0i}/(\omega_1^2(t - \alpha_i)^2 + 4))^{1/4} \times \\ \times \sin \left[\left(\frac{\omega_1(t - \alpha_i)}{\sin y_{0i}} \right)^{1/2} - y_{0i} + \frac{\pi}{4} \right] G(x_i).$$

При $t > \alpha_3$ в последнем слагаемом берется знак «+», а при $t < \alpha_3$ знак «-» и вместо $(t - \alpha_3)$ подставляется $(\alpha_3 - t)$.

Отметим, что авторы [3] пренебрегли вкладом в нутационный сигнал слагаемого в первой фигурной скобке (2), ошибочно считая, что эти интегралы равны нулю на всем временном интервале. При $\delta \neq 0$ выражение во второй скобке (2) имеет максимумы в моменты времени $t - \alpha_i = \xi = \omega_1/(\delta \sqrt{\delta^2 + \omega_1^2})$, в которые мгновенные частоты колебаний равны $\sqrt{\delta^2 + \omega_1^2}$ и $\sqrt{\delta^2 + \omega_1^2}(1 - \delta^2/(\omega_1^2 + 2\delta^2))$. В отличие от этого моменты формирования нерезонансных сигналов эха в условиях свободной эволюции спиновой системы соответствуют совпадению мгновенных частот и частоты отстройки [2].

Видно, что на фоне спада нутационных колебаний должны наблюдаться два максимума, соответствующие моментам времени $t_{01} = \alpha_1 + \xi$, $t_{03} = \alpha_3 + \xi$. Первый из них отвечает начальному выбросу нутации, формирующемуся спустя ξ после включения второго импульса, а второй запаздывает относительно его на время t_1 (см. рисунок). Данные сигналы разделяются при $t_1 > \xi$, в противном случае они сливаются в один. Именно такую ситуацию и наблюдали авторы [3], которые в своем эксперименте использовали короткий «приготавливающий» импульс.

Нутационный отклик при $t > \alpha_i + \tau$ (первая фигурная скобка (2)) имеет три максимума в моменты времени $t - \alpha_i = \sqrt{\delta^2 + \omega_1^2} \tau / \delta$. Они обусловлены резонансами, наступающими при совпадении мгновенных частот колебаний спиновых пакетов и частоты $\sqrt{\delta^2 + \omega_1^2}$. При $\omega_1 > \delta$ амплитуда максимума в момент времени t_{02} пропорциональна $(\delta/\omega_1)(\delta/\sigma)(\delta\tau)^{-1/2}$, в то время как соответствующие амплитуды в моменты t_{01} и $t_{03} \sim (\delta/\sigma) \times (\delta\tau)^{-1/2}$. Если $\omega_1 < \delta$, то амплитуда максимума в момент $t_{02} \sim (\omega_1/\delta)^4 \times (\delta/\sigma)(\delta\tau)^{-1/2}$, а в моменты t_{01} и $t_{03} \sim (\omega_1/\delta)^2(\delta/\sigma)(\delta\tau)^{-1/2}$ (см. рисунок).

Таким образом, при нерезонансном возбуждении спиновой системы в режиме двухимпульсной запаздывающей нутации формируются четыре изолированных нутационных эхо-сигнала, являющихся результатом нулевых биений между колебаниями спиновых пакетов на переменной частоте и обобщенной частоте Раби $\sqrt{\delta^2 + \omega_1^2}$.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Чекмарев В. П., Малышев В. Г. // ФТТ. 1988. Т. 30. № 5. С. 1570—1572.
- [2] Кузьмин В. С. Рутковский И. З., Сайко А. П. и др. // ЖЭТФ. 1990. Т. 97. № 3. С. 880—891.
- [3] Шумейкер Р. // Лазерная и когерентная спектроскопия. М., 1982. С. 235—459.
- [4] Найфе А. Введение в методы возмущений. М., 1984.

Институт физики твердого тела
и полупроводников АН БССР
НИИ прикладных физических проблем
им. А. Н. Севченко
Минск

Поступило в Редакцию
19 апреля 1990 г.