

## СПИНОВОЕ ЭХО, СТИМУЛИРОВАННОЕ ДВУМЯ АКУСТИЧЕСКИМИ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ИМПУЛЬСАМИ

С. А. Зельдович, А. Р. Кессель

При первом теоретическом рассмотрении эффекта спинового эха, стимулированного ультразвуковыми импульсами [1, 2], было показано, что две причины существенно уменьшают этот сигнал по сравнению с сигналом обычного (Хановского) эха [3]. Первая причина, связанная с малостью скорости звука по сравнению со скоростью света, приводит к тому, что вклад в суммарную прецессионную намагниченность от слоя толщиной в длину акустической волны ( $\lambda_{ак}$ ) оказывается равным нулю, так что эффект может дать только часть образца с размером, меньшим  $\lambda_{ак}$ . Вторая причина связана с компенсацией вкладов от частиц, находившихся до действия акустического импульса на различных спиновых уровнях зеемановского спектра. В результате этой компенсации рассматриваемый эффект оказывается пропорциональным величине ( $\xi^2 \xi = \hbar \omega_0 / kT \ll 1$ ,  $\omega_0$  — резонансная частота,  $\hbar$  — постоянная Планка,  $k$  — постоянная Больцмана,  $T$  — температура), в то время как Хановское эхо пропорционально  $\xi$ .

Возникла задача подобрать такую комбинацию импульсов, чтобы запаздывание от одного восполнялось опережением от второго и чтобы компенсация вкладов от разных уровней не превышала компенсацию в Хановском эхе. Были рассмотрены различные комбинации импульсов и выбрана оптимальная: стимулированное эхо от двух акустических и одного электромагнитного импульсов. В этой комбинации импульсов

№ комбинация	Первый импульс	Второй импульс	Третий импульс	Амплитуда спинового эха: $M_+ = M_x + iM_y$
				в единицах $M_0 = N\gamma\hbar \cdot \frac{2}{3} \frac{\hbar\omega_0}{kT}$
1	ЭМ	ак $\Delta m = \pm 2$	ак $\Delta m = \pm 2$	0
2	$\Delta m = \pm 2$ ак	ЭМ	$\Delta m = \pm 2$ ак	$-i \cos 2\alpha_1 \sin \alpha_2 \cos^2 \frac{\alpha_2}{2} \sin \alpha_3 \Phi(t - 2\tau_1 - \tau)$
3	$\Delta m = \pm 2$ ак	$\Delta m = \pm 2$ ак	ЭМ	$\frac{i}{2} \sin 2\alpha_1 \sin 2\alpha_2 \sin \alpha_3 \Phi(t - \tau - \tau_1)$
4	ЭМ	$\Delta m = \pm 1$ ак	$\Delta m = \pm 1$ ак	$\frac{i}{4} \{ \sin \alpha_1 (\sin 2\alpha_2 - \sin \alpha_2) (\sin 2\alpha_3 - \sin \alpha_3) \times$ $\times \Phi[t - 3(\tau_1 - \tau)] - \sin \alpha_1 (\cos 2\alpha_2 - \cos \alpha_2) \times$ $\times (\cos 2\alpha_3 - \cos \alpha_3) \Phi[t - 2(\tau_1 - \tau)] \}$
5	$\Delta m = \pm 1$ ак	ЭМ	$\Delta m = \pm 1$ ак	$\frac{3}{8} i \sin \alpha_1 \cdot \sin 2\alpha_2 \sin 2\alpha_3 \Phi(t - \tau - \tau_1)$
6	$\Delta m = \pm 1$ ак	$\Delta m = \pm 1$ ак	ЭМ	$\frac{i}{2} \sin \alpha_1 \sin \alpha_2 \sin \alpha_3 \Phi(t - \tau - \tau_1)$

$$\Phi(t - n\tau) = \exp \left\{ i\omega(t - n\tau) - \frac{1}{2} \sigma(t - n\tau)^2 \right\}$$

обе указанные причины малости сигналов эха отсутствуют [4], и именно при такой комбинации был обнаружен экспериментально эффект в 1972 г. [5]. Принципиальная возможность такого стимулированного эха была показана для одной комбинации импульсов [4] (см. таблицу, результат № 2). Между тем имеется 6 комбинаций, для которых можно ожидать появления эффекта такой же величины, причем в каждой из них интерес представляют два случая: в одном волновые векторы акустических импульсов параллельны, в другом — антипараллельны.

Настоящая работа посвящена расчету амплитуд и времен формирования сигналов стимулированного эха, вызванного двумя акустическими и одним электромагнитным импульсами. Рассматривается система парамагнитных частиц с эффективным спином  $S=1$ , находящаяся в постоянном магнитном поле  $H_0$  и в импульсном переменном поле  $H=2H_1 \cos(\omega t - \psi_M)$ , перпендикулярном  $H_0$ . Импульсы продольных бегущих акустических волн с волновым вектором  $k$  распространяются в направлении, параллельном оси четвертого порядка, составляющей угол  $\theta$  с направлением  $H_0$ . Для расчета амплитуд и моментов формирования спинового эха применялась методика, изложенная в работах [1, 2]. Результаты расчета приведены в виде таблицы, где  $N$  —

число парамагнитных частиц,  $\gamma$  — их гиромагнитное отношение,  $\sigma$  — разброс локальных полей, существенно превосходящий обратные времена релаксации  $1/T_1$  и  $1/T_2$ ,  $\alpha_i = at_i$  — угол поворота магнитного момента под действием  $i$ -го импульса ( $i=1, 2, 3$ ),  $t_i$  — длительности импульсов,  $t=0$ ;  $\tau$ ;  $\tau_1$  — время включения первого, второго и третьего импульсов. Величина  $a$ , определяющая поворот, в случае электромагнитного импульса равна  $a = a_m = \gamma H_1$ ; для акустического импульса, вызывающего переходы с изменением магнитного квантового числа  $\Delta m = q$  [4]  $a = a_q = \frac{3}{4} \hbar^{-1} G_{11} \epsilon_0 \sin^{|q|} (2\theta/|q|)$ ,  $q=1, 2$ , где  $G_{11}$  — константа динамической спин-фононной связи,  $\epsilon_0$  — амплитуда акустической деформации.

Функция  $\Phi(x)$  имеет резко выраженный максимум при  $x=0$  и спадает по нормальному закону со вторым моментом  $\sigma^{-2}$ . Условия  $x=0$  определяют моменты появления эха. В таблицу включены только такие комбинации, в которых акустические импульсы распространяются в одном направлении и результирующие сигналы эха которых не уменьшены указанными выше причинами.

Как известно [4], помимо создания процессирующих компонент намагниченности акустический импульс изменяет  $z$ -компоненту до величины  $M_0 \cos a_q t$ .

Таким образом, одиночный акустический импульс в различных комбинациях с двумя электромагнитными импульсами проявляет себя лишь в уменьшении амплитуды сигналов обычного Хановского эха [3] в  $\cos a_q t_i$  раз. Эти комбинации, не дающие принципиально новых результатов, не включены в таблицу. Кроме того, мы опустили члены, описывающие сигналы свободной прецессии спинов.

Все приведенные в таблице комбинации, кроме третьей, дают сигнал эха в какой-нибудь один момент времени. Для третьей комбинации в зависимости от соотношения между  $\tau_1$  и  $\tau$  может формироваться либо один, либо два сигнала эха. При  $\tau_1 \geq 3/2\tau$  возникает только один сигнал эха в момент времени  $t=3(\tau_1-\tau)$ ; при  $\tau_1 \geq 2\tau$  должно наблюдаться два сигнала эха в моменты времени  $t=2(\tau_1-\tau)$  и  $t=3(\tau_1-\tau)$ .

Расчеты показывают, что, когда акустические импульсы распространяются навстречу друг другу, сигнал стимулированного эха, сравнимый по величине с приведенными в таблице, возникает только в комбинации 4; он равен

$$M_+ = M_0 \frac{3i}{8} \sin \alpha_1 \sin 2\alpha_2 \sin 2\alpha_3 \Phi(t - \tau - \tau_1).$$

Стимулированное двумя акустическими и одним электромагнитным импульсами спиновое эхо было экспериментально обнаружено Шайреном и Казуякой [5] на ионах  $Fe^{3+}$  и  $Mn^{2+}$  в монокристалле  $MgO$ . Эти ионы находятся в  $s$ -состоянии и обладают неэквидистантным спектром [6]. В этих условиях имело смысл возбуждать переходы только между отдельными парами спиновых уровней с правилами отбора  $\Delta m = 1$ . При этом компенсация вкладов от различных спиновых уровней для переходного сигнала любой природы не может быть хуже, чем в Хановском эхо. Эффект наблюдался во всех трех возможных комбинациях импульсов (№ 4–6), причем интенсивность сигналов в соответствии с предсказаниями теории [4] совпадала с интенсивностью Хановского эха.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А. Р. Кессель. Об импульсном акустическом резонансном воздействии на ядерную спин-систему. ЖЭТФ, 1960, 39, 3, 872–877.
2. А. Р. Кессель. К теории спинового эха. ЖЭТФ, 1961, 41, 4, 1254–1257.
3. E. L. Hahn. Spin Echoes. Phys. Rev., 1950, 80, 4, 580–594.
4. А. Р. Кессель. Ядерный акустический резонанс. М., «Наука», 1969, гл. III.
5. N. S. Shiren, T. G. Kazuyaka. Ultrasonic Spin Echoes. Phys. Rev. Lett., 1972, 28, 20, 1304–1307.
6. В. Лоу. Парамагнитный резонанс в твердых телах. М., Изд-во иностр. лит., 1962.

Казанский физико-технический институт

Поступила  
31 мая 1974 г.