

## ВЛИЯНИЕ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ НАКАЧКИ НА ЯДЕРНОЕ ЭХО В ИТТРИЕВОМ ФЕРРИТЕ ГРАНАТЕ

*М.П.Петров, В.Ф.Пашин, А.П.Паугурт*

В данной работе сообщается об экспериментальном наблюдении некоторых новых эффектов, обусловленных взаимодействием ядерных магнитных моментов с параметрическими спиновыми волнами в феррите гранате иттрия.

Эксперимент заключается в следующем. Наблюдается эффект ядерного спинового эха от ядер  $Fe^{57}$  в  $Y_3Fe_5O_{12}$ . Кроме радиочастотных импульсов на частоте ЯМР на образец подается мощный СВЧ импульс (частота 9640  $MHz$  длительность 1  $\mu s$ ), превышающий порог нестабильности спиновых волн (рис. 1, а). СВЧ поле прикладывается параллельно внешнему магнитному полю. Обнаружено изменение интенсивности ( $\Delta I$ ) сигнала эха под действием СВЧ накачки.

Появление ядерного эха можно представить следующим образом [1]. После первого радиоимпульса, который поворачивает ядерную намагниченность на  $90^\circ$  относительно равновесного направления (ось  $z$ ), происходит "рассыпание" суммарного вектора ядерной намагниченности в веер из отдельных компонент, так как из-за неоднородного уширения линии ЯМР резонансные частоты для различных компонент различны. Затем после второго ( $180^\circ$ -градусного) импульса про-

исходит сворачивание веера и появление снова результирующей ядерной намагниченности, вращающейся в плоскости перпендикулярной оси  $z$ . Для того, чтобы сформировалось эхо требуется строгое выполнение фазовых соотношений для различных компонент. А именно, различие в фазах прецессии отдельных компонент, накапливающееся в интервале времени  $\tau_d$ , должно быть полностью скомпенсировано в результате движения ядерных моментов после второго импульса. Только при совпадении фаз прецессии отдельных компонент появляется сигнал эха. Поперечная ядерная релаксация обусловлена необратимой расфазировкой ядерных компонент и она является причиной уменьшения сигнала эха с увеличением времени задержки  $\tau_e$ .

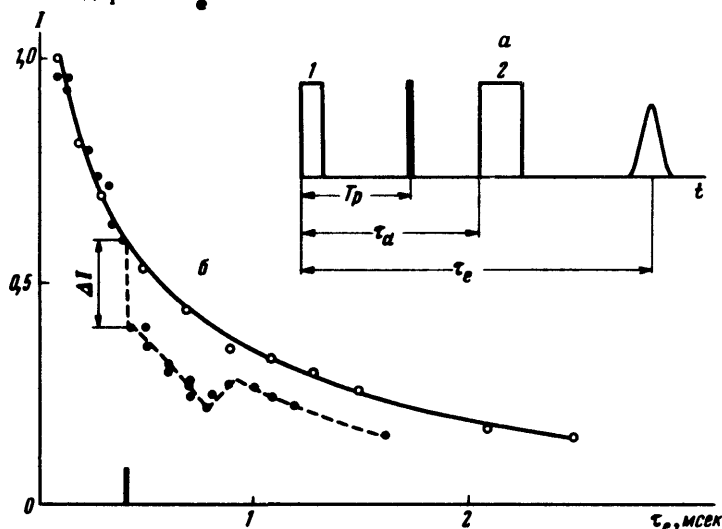


Рис. 1. *a* – временная диаграмма последовательности включения радиочастотных импульсов (№ 1 и 2), СВЧ импульса  $T_p$  и появления эха ( $\tau_e = 2\tau_d$ ); *b* – зависимость интенсивности сигнала эха в относительных единицах от времени задержки эха для ядер  $Fe^{57}$  в  $d$ -подрешетке  $Y_3Fe_5O_{12}$ ,  $T = 140^\circ K$ , внешнее поле  $H = 800$  э. Сплошная линия – в отсутствие СВЧ накачки, пунктирная линия – подан СВЧ импульс в момент  $T_p = 400$  мксек с превышением пороговой мощности на  $7 \text{ дБ}$ .

На рис. 1, *b* показана зависимость интенсивности сигнала эха от  $\tau_e$  без СВЧ импульса и при наличии импульса, который был подан на расстоянии  $T_p = 400$  мксек после импульса 1. Из рисунка видно, что при  $\tau_e \geq T_p$  интенсивность сигнала эха меньше, чем в отсутствие накачки. Изменение интенсивности ( $\Delta I$ ) на этом графике появляется тогда, когда СВЧ импульс совмещается с сигналом эха, и затем  $\Delta I$  существует при любом положении СВЧ импульса внутри интервала  $T_p \leq \tau_e$ . Кроме того наблюдается некоторая аномалия в интенсивности эха, когда СВЧ импульс совмещается с радиочастотным импульсом 2. Как видно из рис. 2 эффект имеет место тогда, когда ядерная намагниченность отклонена от своего равновесного направления. Эффект уменьшается при совмещении СВЧ импульса с серединой второго радиочастотного импульса. Напомним, что в этот момент компоненты ядерной намагниченности, дающие вклад в эхо, направлены вдоль (параллельно и антипараллельно) оси  $z$ .

Подобное поведение интенсивности сигнала эха можно объяснить если предположить, что в результате СВЧ накачки уменьшается время поперечной ядерной релаксации  $T_2$ . Наблюдаемое изменение интенсивности сигнала эха при превышении порога неустойчивости на  $5 - 10$  дБ соответствует изменению  $T_2$  от первоначального значения  $\sim 10^{-3}$  сек до величины  $T_2 \sim 10^{-5} + 10^{-6}$  сек. Можно рассчитать  $T_2$ , обусловленное параметрическими спиновыми волнами, и оказывается, что для простейшего ферромагнетика

$$\frac{1}{T_2} = \frac{\omega_0^2}{S^2} \frac{n_K^2}{N^2} \frac{1}{\gamma \Delta H_K},$$

где  $\omega_0$  — частота ЯМР,  $S$  — электронный спин,  $n_K$  — число параметрических спиновых волн с заданным волновым вектором  $K$ ,  $\gamma$  — гиромагнитное отношение для электрона,  $\Delta H_K$  — затухание параметрической спиновой волны,  $N$  — число магнитных ионов.

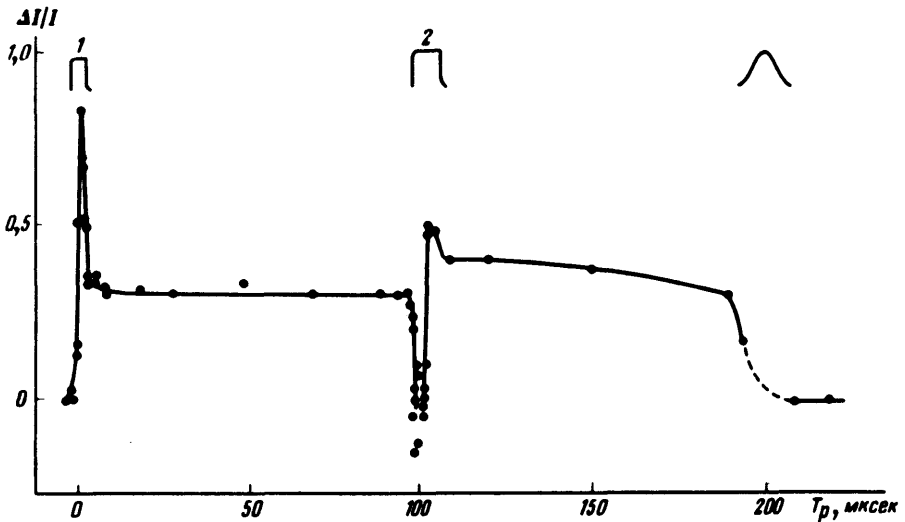


Рис. 2. Интенсивность эффекта  $\Delta I / I = (I - I') / I$  для обычного эха от положения СВЧ импульса,  $I$  — интенсивность сигнала без накачки,  $I'$  — интенсивность сигнала с накачкой.

Принимая  $\omega_0 = 2\pi 63,7 \cdot 10^6$  сек $^{-1}$ ,  $S = 5/2$ ,  $n_K/N = 10^{-2}$  и  $\Delta H_K = 0,2$  э [2], получаем  $T_2 = 1,4 \cdot 10^{-6}$  сек, что согласуется с экспериментом.

Если предложенный механизм верен, то СВЧ импульс при определенных значениях  $T_p$  не должен влиять на так называемое стимулированное эхо [1]. Стимулированное эхо возникает при подаче на образец трех радиочастотных импульсов. В простейшем случае все три импульса принимаются 90-градусными. Тогда в промежутке между вторым и третьим импульсом ядерная намагниченность имеет компоненты направленные вдоль оси  $z$ . В этот период фазовая когерентность отдельных компонент сохраняется так как поперечной релаксации нет. Следовательно, изменения интенсивности эха не должно быть, если СВЧ импульс подается внутри этого временного интервала. Этот вывод оказался

в полном соответствии с экспериментальной проверкой (рис. 3). На опыте было установлено, что интенсивность стимулированного эха практически не изменяется ( $\Delta I / I \approx 0$ ), когда СВЧ импульс расположен между вторым и третьим радиочастотными импульсами. В то же время эффект существует ( $\Delta I / I \neq 0$ ) при других значениях  $T_p$ .

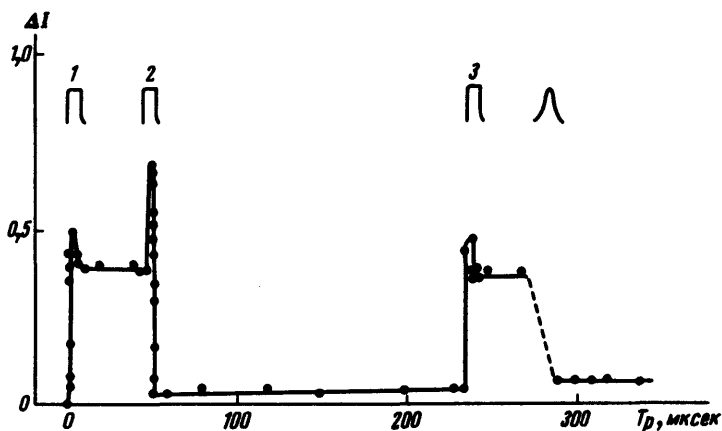


Рис. 3. Интенсивность эффекта  $\Delta I / I$  для стимулированного эха в зависимости от положения СВЧ импульса

Кроме описанных явлений исследовалась также зависимость эффекта  $\Delta I / I$  от мощности СВЧ импульса и от величины волнового вектора параметрических спиновых волн. Установлено, что  $\Delta I / I$  возрастает с увеличением мощности после достижения порога неустойчивости, а также увеличивается с уменьшением  $K$ .

Обнаруженные эффекты могут быть использованы для исследования запорогового состояния в магнитоупорядоченных кристаллах, определения параметров затухания спиновых волн, для изучения электронно-ядерных взаимодействий, для наблюдения за динамикой движения ядерной намагниченности, а также для подавления перекрестных сигналов эха в многоимпульсных экспериментах.

Авторы благодарят Г.А.Смоленского за интерес к работе и полезные обсуждения.

Институт полупроводников  
Академии наук СССР

Поступила в редакцию  
28 августа 1970 г.

#### Литература

- [1] E.L.Hahn. Phys. Rev., 80, 580, 1950.
- [2] R.C.Le Craw, E.G.Spencer. J.Phys. Soc. Japan, S., 17, 401, 1962.