

## СОЗДАНИЕ ИНВЕРСНОЙ ЗАСЕЛЕННОСТИ УРОВНЕЙ ЯДЕРНОЙ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ ТОНКОПЛЕНОЧНОГО $\text{Co}^{59}$ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ПЕРЕМАГНИЧИВАНИИ

*Н. М. Саланский, И. А. Ляпунов, В. К. Мальцев*

В работе [1] обсуждалась возможность получения инверсной заселенности уровней ядерной магнитной системы ферромагнетика при импульсном перемагничивании. Суть процессов, происходящих при этом, заключается в следующем.

В равновесном состоянии в ферромагнетике вектор ядерной намагниченности  $\mu$  антипараллелен вектору электронной намагниченности  $M$ . Если под воздействием импульсного магнитного поля электронная намагниченность изменит полярность относительно оси анизотропии за время значительно меньшее полупериода ЯМР, то  $\mu$  окажется параллельной  $M$ , и, если это неравновесное состояние будет существовать достаточно долгое время по сравнению с периодом ядерной прецессии, то на частоте ЯМР ядерная система будет обладать мазерными свойствами.

При быстром повороте  $M$  на  $180^\circ$  компонента ядерной намагниченности  $\mu_z$  определяется согласно [1]

$$\mu_z = \frac{\mu}{1 + \sigma^2} \left[ 1 + \sigma^2 \cos \pi \sqrt{1 + \frac{1}{\sigma^2}} \right], \quad (1)$$

где  $\sigma = \omega / \omega_{\text{П}}$ ;  $\omega$  – угловая скорость поворота  $M$ ,  $\omega_{\text{П}}$  – угловая скорость ядерной прецессии.

При этом относительная инверсия

$$\rho = \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{\mu_z}{\mu} \right) 100\% . \quad (2)$$

Видно, что  $\rho = 0$  при  $\mu_z = \mu$ , когда ядерная магнитная система находится в установившемся состоянии. Полная инверсия ( $\rho = 100\%$ ) будет при  $\mu_z = -\mu$  после разворота  $M$  на  $180^\circ$  за бесконечно малое время. В реальных условиях, очевидно, для обнаружения мазерных свойств ферромагнетика достаточно получить  $\rho > 50\%$  ( $\mu_z < 0$ ), когда в магнитной ядерной системе преобладает состояние с инвертированными уровнями. Удобным объектом для изучения этого эффекта являются тонкие магнитные пленки, которые могут перемагничиваться за время  $\sim 10^{-9}$  сек [2].

Данная работа посвящена экспериментальному исследованию возможности получения предсказанной инверсии ядерной спиновой системы пленочного ферромагнетика. Поликристаллические пленки  $\text{Co}^{59}$  толщиной  $2,000 \text{ \AA}$ , полученные способом вакуумного напыления на стеклянные подложки при температуре  $220^\circ \text{C}$  в магнитном поле  $70 \text{ э}$ , имели наведенную одноосную анизотропию в плоскости (поле  $H_K \approx 30 \text{ э}$ ).

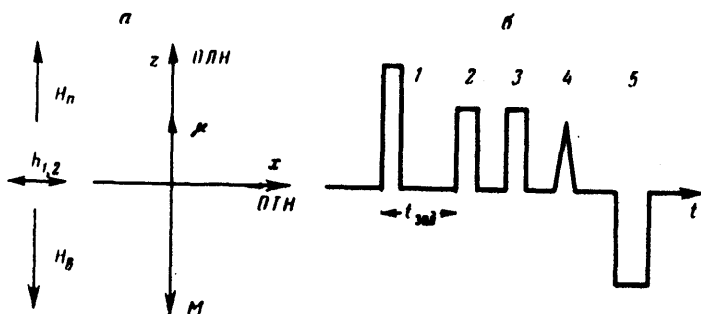


Рис. 1. а – взаимное расположение пленки и действующих на нее полей; б – временная диаграмма следования импульсов: 1. –  $H_{\Pi}$ ; 2, 3 – соответственно  $h_1$  и  $h_2$ ; 4. – сигнал спин-эхо; 5 –  $H_{\text{В}}$

Эксперимент проводился по разработанной нами методике на импульсном спектрометре ЯМР с использованием дополнительных элементов для импульсного перемагничивания исследуемых пленок. Одновременно перемагничивалась пленка и регистрировались происходящие при этом изменения амплитуды сигнала  $A_3$  спин-эхо, характеризующей степень взаимодействия ВЧ поля с компонентой  $\mu_z$ .

При импульсном наносекундном перемагничивании магнитной пленки непосредственно перед обычной программой из двух импульсов и сигнала эхо, используемой для наблюдения ЯМР методом спинового эхо Хана [3], в зависимости от скорости разворота  $M$  будет меняться  $\mu_z$  согласно (1). В соответствии с этим, при  $\mu_z = \mu$  или  $\mu_z = -\mu$ ,  $|A_3| = 1$ ; при  $\mu_z = 0$  (для  $\rho = 50\%$ )  $A_3 = 0$ . Для промежуточных значений  $\mu_z \gtrless 0$   $0 < |A_3| < 1$ .

На рис. 1, а приведено взаимное расположение оси наведенной анизотропии пленки и действующих в плоскости пленки высокочастотных ( $h_{1,2}$ ) и импульсных ( $H_{\Pi}$  и  $H_{\text{В}}$ ) магнитных полей. Справа (рис. 1, б) приведена временная диаграмма последовательности вышеуказанных полей и сигнала спин-эхо. Перед двумя радиоимпульсами на частоте  $218 \text{ МГц}$ , подаваемыми вдоль оси трудного намагничивания (ОТН) для получения сигнала спин-эхо, пленка перемагничивается вдоль оси легкого намагничивания (ОЛН) импульсным полем  $H_{\Pi}$  с наносекундным фронтом амплитудой в сотни эрстед. Для возвращения намагниченности в исходное состояние вдоль ОЛН подается возвращающий импульс обратного поля  $H_{\text{В}}$ . Частота повторения перемагничивающих импульсов  $\sim 100 \text{ мкс}$ , поэтому к моменту следующего скоростного перемагничивания электронная и ядерная спиновые системы приходят в состояние равновесия (для пленок  $\text{Co}^{59}$  время ядерной продольной релаксации  $T_1 \sim 2 + 3 \cdot 10^{-4} \text{ сек}$ ).

С ростом задержки  $t_{\text{зад}}$  между  $H_{\Pi}$  и  $h_1$ , по мере восстановления  $\mu_z$  после возмущения перемагничивающим импульсом до  $\mu$ , будет также наблюдаться восстановление  $A_3$  до  $A_3 = 1$ . Данные эксперимента для различных времен нарастания импульсного поля  $H_{\Pi}$  приведены на рис. 2. При малых скоростях перемагничивания  $A_3$  растет от величины  $0 < A_3 < 1$  до  $A_3 = 1$  (кривая 1, рис. 2). При скорости разворота  $M$ , для которой непосредственно после перемагничивания  $\mu_z = 0$ , кривая восстановления  $A_3(t_{\text{зад}})$  выходит из начала координат (кривая 2).

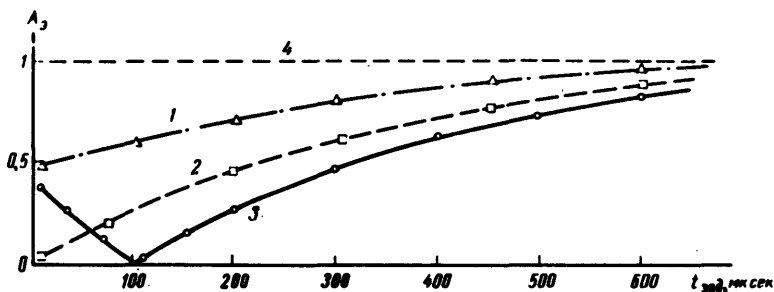


Рис. 2. Зависимость  $A_3(t_{\text{зад}})$  при различных скоростях нарастания перемагничивающего поля: 1. —  $< 0,8 \cdot 10^{11} \text{ э/сек}$ ; 2. —  $1,5 \cdot 10^{11} \text{ э/сек}$ ; 3. —  $> 3 \cdot 10^{11} \text{ э/сек}$ ; 4. — без перемагничивания ( $H_{\Pi} = 0$ )

И, наконец, при получении после перемагничивания  $\mu_z < 0$  ( $|A_3| > 0$ ); с ростом  $t_{\text{зад}}$   $A_3 \rightarrow 0$  ( $\mu_z(t) = 0$ ) и затем восстанавливается до  $A_3 = 1$  (кривая 3). Все три кривых представляют собой экспоненты ( $T_{1\Pi} = 3 \cdot 10^{-4} \text{ сек}$ ). Кривая 3 свидетельствует о том, что после перемагничивания достигалась инверсия  $\rho = 70\%$  и имела значение  $> 50\%$  в течение  $\approx 100 \text{ мксек}$ .

Таким образом экспериментально доказана возможность получения инверсной заселенности уровней ядерной магнитной системы, получен устойчивый сигнал ЯМР от инвертированной импульсным магнитным полем ядерной системы.

В заключение авторы выражают признательность В.И.Игнатченко и Ю.А.Куденко за полезные дискуссии.

Институт физики  
им. Л. В. Киренского  
Академии наук СССР  
Сибирское отделение

Поступила в редакцию  
12 мая 1971 г.

### Литература

- [ 1 ] В.А.Игнатченко, Ю.А.Куденко. Изв. АН СССР, сер. физич., 30, 933, 1966.
  - [ 2 ] W.Dietrich, W.Proebster. Elektronische Rundschau, 14, 2, 1970.  
(перевод в сб. Тонкие магнитные пленки, Киев, ГИТТЛ, 1963).
  - [ 3 ] А.Леше. Ядерная индукция, ИИЛ, 1963.
-