

## ДВУХЧАСТОТНОЕ ВОЗБУЖДЕНИЕ КВАДРУПОЛЬНОГО СПИНОВОГО ЭХО

*B.C. Гречишкин, H.E. Айнбандер*

При наблюдении квадрупольного спинового эха в случае спинов  $5/2, 7/2$  и  $9/2$  обычно радиочастотные импульсы возбуждают один из возможных переходов [1]. При этом возникает сигнал спинового эха при  $t = 2\tau$ , где  $\tau$  — интервал времени между  $90^\circ$  импульсом.

В настоящей работе описывается новое физическое явление, которое проявляется, когда радиочастотные импульсы с соответствующими частотами заполнения возбуждают одновременно несколько переходов, например,  $|\pm 1/2\rangle \rightarrow |\pm 3/2\rangle$  и  $|\pm 3/2\rangle \rightarrow |\pm 5/2\rangle$ . Для  $I = 5/2$  при парамет-

ре асимметрии градиента электрического поля  $\eta = 0$  возможно поглощение на частотах

$$\omega_1 = \frac{3}{20} \frac{eQq_{zz}}{\hbar} \quad \text{и} \quad \omega_2 = \frac{3}{10} \frac{eQq_{zz}}{\hbar},$$

где  $eQq_{zz}$  – константа квадрупольного взаимодействия.

Пусть последовательность двух импульсов с частотами заполнения  $\omega_1$  и  $\omega_2$  возбуждает два соседних перехода, связывая состояния  $|\pm 1/2\rangle$ ,  $|\pm 3/2\rangle$  и  $|\pm 5/2\rangle$ . При одночастотном возбуждении спин-системы связываются лишь два состояния.

Двухчастотное возбуждение вызывает появление в спиновой матрице [1] трех экспонент, в показатели которых входят все три собственных значения квадрупольного гамильтонiana для  $I = 5/2$  [2]. При использовании обычного формализма матрицы плотности это эквивалентно появлению дополнительных сигналов эхо, положение которых зависит от величины параметра асимметрии. В спин-эховой матрице появляются дополнительные матричные элементы, обусловленные зацеплением трех квантовых состояний.

В отличие от одночастотного метода в нашем случае оператор возмущения имеет вид:

$$H_1 = -\gamma \hbar \hat{I}_x \cdot 2H_1 (\cos \omega_1 t + \cos \omega_2 t), \quad (1)$$

где  $H_1$  – амплитуда радиочастотного поля в импульсах,  $\gamma$  – гидромагнитное отношение ядра,  $\hat{I}_x$  – оператор проекции механического момента ядра на ось X.

Такое возмущение возбуждает каскадную перекачку спинов с самого нижнего уровня на самый верхний энергетический уровень через промежуточное состояние  $|\pm 3/2\rangle$ . Именно изменение характера оператора возмущения и приводит к новому механизму возникновения сигналов спинового эха. Прежде всего, вероятность перехода  $|\pm 1/2\rangle \rightarrow |\pm 5/2\rangle$  становится отличной от нуля даже для случая  $\eta = 0$ . В обычном одночастотном методе этот переход запрещен [2].

Пара первых импульсов вызывает прецессию векторов намагничения на частотах  $\omega_1$  и  $\omega_2$ , причем прецессирующие намагниченности исчезают за время  $1/\Delta\nu$ , где  $\Delta\nu$  – ширина линии поглощения. Однако пара вторых импульсов восстанавливает намагниченность. Если в одночастотном методе это восстановление возникает лишь в момент времени  $t = 2\tau$ , то в нашем случае восстановление намагничения можно получить для  $I = 5/2$  и  $\eta = 0$  в моменты  $t = 2\tau, 3/2\tau, 3\tau, 4\tau, 5/2\tau$ , поскольку здесь мы имеем два складывающихся веера векторов. Спины, перекачка которых в данное состояние обусловлена действием второго возбуждающего поля, имеют другую начальную фазу прецессии, которая и определяет момент возникновения для них фазовой когерентности.

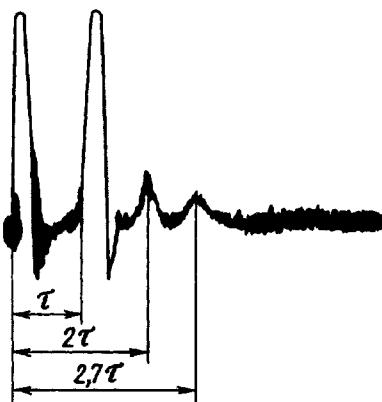
Моменты времени, в которые появляются сигналы эхо, амплитуды сигналов, их зависимость от длительности импульсов для  $I = 5/2, 7/2, 9/2$

вычислена нами в энергетическом представлении методом матрицы плотности.

Эксперимент был выполнен нами для  $SbCl_3$  ( $Sb^{123}$ ;  $I = 7/2$ ) и  $BiCl_3$  ( $Bi^{209}$ ,  $I = 9/2$ ). Образец помещался в систему двух катушек, каждая из которых возбуждалась парами импульсов от своего импульсного ВЧ-генератора. Поскольку оба генератора (частоты  $\omega_1$  и  $\omega_2$ ) запускались от одного импульсника, то возбуждение обоих переходов осуществлялось одновременно импульсами одинаковой длительности.

В  $SbCl_3$  при  $300^{\circ}K$  возбуждались переходы на частотах  $37,3$  и  $67,8 MHz$ , а в  $BiCl_3$  на частотах  $37,3$  и  $51,7 MHz$ . Для  $BiCl_3$   $\eta = 58\%$ , а в  $SbCl_3$   $\eta = 18\%$ . Детектирование производилось на частотах  $67,8$  и  $51,7 MHz$ . При включении только одного генератора наблюдались сигналы спинового эха только при  $t = 2\tau$ . После включения второго генератора и его соответствующей настройки, когда он захватывал переход  $|\pm 1/2\rangle \rightarrow |\pm 3/2\rangle$ , наблюдалось уменьшение интенсивности эха при  $t = 2\tau$ . Соответствующий выбор длительности импульсов приводил к возникновению дополнительных сигналов эха.

Поскольку в  $BiCl_3$  возбуждались переходы  $|\pm 5/2\rangle \rightarrow |\pm 7/2\rangle$  и  $|\pm 7/2\rangle \rightarrow |\pm 9/2\rangle$ , то по расчету для  $\eta = 0,58$  эхо должно наблюдаваться при  $t = 2\tau$ ;  $t = 1,7\tau$  и  $t = 2,7\tau$  для перехода  $|\pm 7/2\rangle \rightarrow |\pm 9/2\rangle$ . Действительно, были



Сигналы квадрупольного спинового ЭХО ядер  $Bi^{209}$  в поликристаллическом  $BiCl_3$  при  $300^{\circ}K$ . Двухчастотное воздействие осуществлено для переходов  $|\pm 5/2\rangle \rightarrow |\pm 7/2\rangle$  ( $37,3 MHz$ ) и  $|\pm 7/2\rangle \rightarrow |\pm 9/2\rangle$  ( $51,7 MHz$ ). Частота наблюдения  $51,7 MHz$ . Длительность импульсов 18 мксек (первый импульс) и 13 мксек (второй импульс)

обнаружены сигналы при  $t = 2\tau$  и  $t = 2,7\tau$  (см.рисунок). Изменяя  $\tau$  легко проверить, что эхо при  $t = 2,7\tau$  действительно является дополнительным. Включение второго генератора приводило к исчезновению дополнительных эх. Обнаружение сигнала эха при  $t = 1,7\tau$  затруднительно при коротких временах спин-спиновой релаксации. В  $SbCl_3$  наблюдалось дополнительное эхо при  $t = 3/2\tau$ .

Обнаруженный эффект может найти применение для исследования дефектов в кристаллах, поскольку положение дополнительных эх зависит от  $\eta$ .

В заключение авторы выражают благодарность В.Пшенникову, принявшему участие в монтаже двухчастотного генератора.

Пермский государственный университет  
проблемная лаборатория радиоспектроскопии

Поступило в редакцию  
17 сентября 1966 г.

### Литература

- [1] T.P.Das, A.K.Saha. Phys. Rev., 98, 516, 1955.
- [2] T.P.Das, E.L.Hahn. Solid State Phys., Suppl., 1, 1958.