

в этом образце не требуется существенным образом модифицировать вклад корринговской релаксации. То, что вблизи  $T_c$  не наблюдается обычное немонотонное поведение корринговской релаксации, обусловленное возникновением щели и эффектами когерентности, указывает, по-видимому, на значительное уменьшение величины щели, обусловленное контактом ЛМ с зонными электронами.

Таким образом, изменение степени орторомбичности образцов приводит к радикальным изменениям типа парамагнитных центров. Вместе с тем изменение температуры сверхпроводящего перехода наступает только при возникновении контакта ЛМ  $\text{Cu}^{2+}$  с зонными электронами.

### Л и т е р а т у р а

- [1] Алексеевский Н. Е., Нижанковский В. И., Митин А. В., Хлыбов Е. П., Гарифуллин И. А., Гарифьянов Н. Н., Кочелав Б. И., Тагиров Л. Р. Информационные материалы Рабочего совещания по проблемам высокотемпературной сверхпроводимости. Свердловск, 7—10 июля 1987, т. 1, с. 211—212.
- [2] Алексеевский Н. Е., Гарифуллин И. А., Гарифьянов Н. Н., Кочелав Б. И., Митин А. В., Нижанковский В. И., Тагиров Л. Р., Хлыбов Е. П. Письма в ЖЭТФ, 1987, т. 46, № 7, с. 292—295.
- [3] Goodenough J. V. Phys. Rev., 1955, vol. 100, N 2, p. 564—573.
- [4] Kanamori J. J. Phys. Chem. Solids, 1959, vol. 10, N 1, p. 87—98.

Казанский физико-технический  
институт им. Е. К. Завойского КФ АН СССР  
Казань

Поступило в Редакцию  
4 января 1988 г.

УДК 539.143.43

Физика твердого тела, том 30, в. 5, 1988  
Solid State Physics, vol. 30, № 5, 1988

## ОДНОИМПУЛЬСНОЕ ЭХО В СПИНОВЫХ СИСТЕМАХ

В. П. Чекмарёв, В. Г. Малышев

Одноимпульсное эхо — это отклик неоднородной спиновой системы на воздействие одиночного радиочастотного импульса, возникающий после его выключения в момент времени, примерно равный длительности импульса.

В настоящее время известно несколько моделей, претендующих на объяснение этого эффекта, наблюдающегося уже более тридцати лет в импульсных ЯМР экспериментах, а также в экспериментах по электронному и фотонному эхо [1—3]. После работ [3, 4], интерпретирующих эффект одноимпульсного эха в терминах «обращения времени» в неоднородной системе невзаимодействующих спинов, предпринимались попытки объяснить существование этого эффекта «воздействием фронтов» импульса [8], влиянием «звона» резонатора [9], осцилляциями свободной индукции, связанными с большими углами отклонения намагниченности [10, 11], неоднородностью коэффициента усиления в магнетиках [12]. Наконец, в недавних работах [7, 13] сделан вывод, что эффект одноимпульсного эха связан с искажением формы возбуждающего импульса, и при воздействии строго прямоугольного импульса одноимпульсное эхо вообще должно отсутствовать.

Сложившаяся неоднозначность в интерпретации эффекта одноимпульсного эха связана с тем, что в силу ряда математических трудностей до сих пор не существует аналитического выражения, описывающего свойства одноимпульсного эха в различных экспериментальных условиях, а неоднократно предпринимавшиеся попытки численного анализа [2, 7, 10, 14] вообще не выявили эффект одноимпульсного эха.

В настоящей работе приведены результаты расчета отклика неоднородной спиновой системы на воздействие прямоугольного радиочастотного импульса, выполненного путем непосредственного численного интегрирования решений уравнений Блоха без релаксационных слагаемых для частного случая гауссовой формы линии. Расчеты производились на ЭВМ СМ 1420 при следующих значениях параметров: длительность импульса 10 мкс, ширина гауссовой линии 1 МГц, полоса интегрирования, симметричная относительно центра линии, 10 МГц, шаг интегрирования 0.001 МГц.

Анализ полученных результатов показал, что при наличии расстройки между частотой центра линии и частотой заполнения импульса, превышающей ширину линии, помимо свободной индукции выявляется четкий сигнал одноимпульсного эха (рис. 1). Форма, длительность и постоянная спада основной части эха практически совпадают с соответствующими параметрами индукции, что непосредственно указывает на эхо-природу исследуемого одноимпульсного отклика. С другой стороны, характер из-

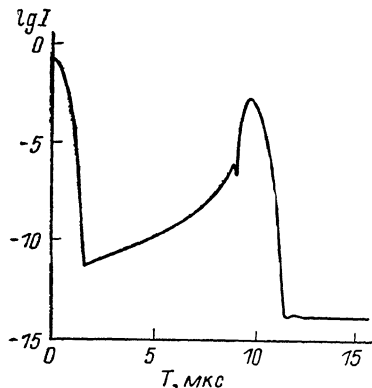


Рис. 1. Форма отклика при амплитуде импульса  $F=1$  МГц и расстройке  $D_0=5$  МГц.

Амплитуда отклика нормирована на амплитуду двухимпульсного эха при  $90-180^\circ$  импульсах.

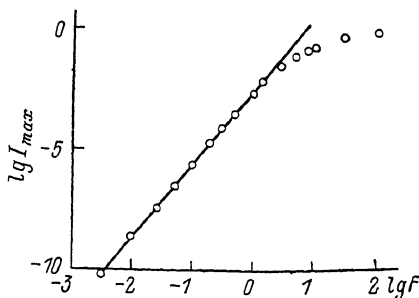


Рис. 2. Зависимость максимальной амплитуды одноимпульсного эха  $I_{\max}$  от амплитуды импульса  $F$  при расстройке  $D_0=5$  МГц.

Прямая линия соответствует зависимости (1).

менений амплитуды отклика спиновой системы в диапазоне времен  $2 \div 9$  мкс не описывается в рамках модели [3, 4].

При увеличении амплитуды импульса амплитуда эха возрастает (рис. 2), причем при  $F < 3$  МГц ( $F$  — амплитуда импульса в единицах частоты) изменение амплитуды эха  $I_{\max}$  хорошо описывается выражением [4]

$$I_{\max} = \frac{1}{4} \left( \frac{F}{D_0} \right)^3, \quad (1)$$

где  $D_0$  — расстройка между частотой центра линии и частотой заполнения возбуждающего прямоугольного импульса.

Помимо увеличения амплитуды эха, при росте величины  $F$  эхо приближается к импульсу, причем зависимость времени максимальной амплитуды эха  $T_s$  от  $F$  в широком диапазоне амплитуд импульса ( $10^{-3}$  МГц  $\leq F \leq 10^2$  МГц) хорошо описывается выражением [4]

$$T_s = \tau \frac{D_0}{\sqrt{D_0^2 + F^2}}, \quad (2)$$

где  $\tau$  — длительность, возбуждающего импульса.

Нерезонансный характер эффекта одноимпульсного эха показывает зависимость формы отклика спиновой системы от величины расстройки  $D_0$  (рис. 3). При уменьшении  $D_0$  эхо приближается к импульсу, увеличивая (при  $1.5$  МГц  $< D_0 < 4$  МГц) свою амплитуду и длительность, и сливается с сигналом индукции. При  $D_0 < 1.5$  МГц спад отклика спиновой системы

становится осциллирующим с переменным периодом осцилляций. В диапазоне наблюдения эха зависимость максимальной амплитуды эха  $I_{\max}$  и времени  $T$ , от величины расстройки  $D_0$  также хорошо описывается выражениями (1), (2).

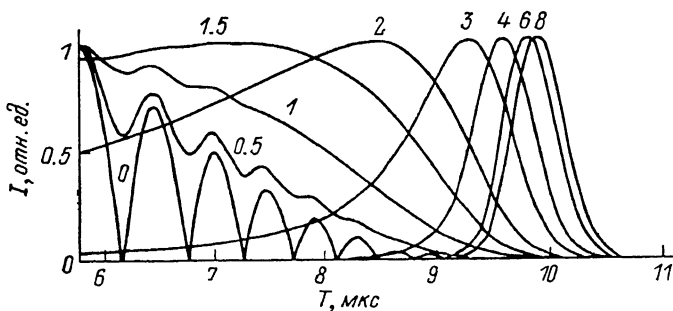


Рис. 3. Зависимость формы отклика от величины расстройки  $D_0$  при амплитуде импульса  $F=1$  МГц.

Амплитуда отклика при  $1.5 \text{ МГц} \leq D_0 \leq 8 \text{ МГц}$  нормирована на максимальную амплитуду эха, а при  $D_0 \leq 1 \text{ МГц}$  на амплитуду отклика при  $T=5.8$  мкс.

В заключение отметим, что неудачи предыдущих попыток численного анализа эффекта одноимпульсного эха [2, 7, 10, 14], по нашему мнению, связаны с неблагоприятным соотношением выбранных численных параметров и, в частности, с отсутствием расстройки между частотами центра линии и возбуждающего импульса.

Авторы благодарны В. И. Цифриновичу и П. П. Геллю за интерес к работе и стимулирование настоящих исследований.

#### Л и т е р а т у р а

- [1] Bloom A. L. Phys. Rev., 1955, vol. 98, N 4, p. 1105—1111.
- [2] Stearns M. V. AIP Conf. Proc., 1972, vol. 10, p. 1644—1646.
- [3] Чекмарев В. П., Петров М. П., Максиков А. И. Тезисы Всесоюзной конференции по физике магнитных явлений. Донецк, 1977, ИЭП АН УССР. 17 с.
- [4] Чекмарев В. П., Куркин М. И., Голощанов С. И. ЖЭТФ, 1979, т. 76, № 5, с. 1675—1684.
- [5] Мамниашвили Г. И., Чекмарев В. П. Сообщения АН ГССР, 1981, т. 103, № 2, с. 285—287.
- [6] Чекмарев В. П., Мамниашвили Г. И. ФММ, 1981, т. 51, № 4, с. 685—689.
- [7] Цифринович В. И., Мушайлов Э. С., Бакшеев Н. В. и т. д. ЖЭТФ, 1985, т. 88, № 4, с. 1481—1489.
- [8] Смоляков Б. П., Хаймович Е. П. ЖЭТФ, 1979, т. 76, в. 4, с. 1303—1308; Самарцев В. В., Сиразнев А. И. ФТТ, 1978, т. 20, в. 10, с. 3169—3171.
- [9] Мамниашвили Г. И. Автореф. канд. дис. Тбилиси, ИФ АН ГССР, 1981.
- [10] Schenzle A., Wong N. C., Brewer R. G. Phys. Rev. A, 1980, vol. 21, N 3, p. 887—895.
- [11] Kunitomo M., Endo T., Nakanishi S. Phys. Rev. A, 1982, vol. 25, N 4, p. 2235—2246.
- [12] Нургалиев Т. Х., Москалев В. В. Вестник ЛГУ, 1980, № 16, с. 45—51.
- [13] Кузьмин В. С., Яшин А. И. ФММ, 1986, т. 62, № 4, с. 683—688.
- [14] Москалев В. В., Верещагина А. П. Сб. Ядерный магнитный резонанс, 1974, Л.: Изд-во ЛГУ, № 5, с. 22—26.

Ленинградский электротехнический институт связи им. М. А. Бонч-Бруевича  
Ленинград

Поступило в Редакцию  
4 января 1988 г.