

параметра \mathcal{Z} в абсолютных единицах. Используемая методика легко может быть распространена на другие полупроводниковые материалы - германий, арсенид галлия и др.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] L e a m y Н.Д. // J. Appl. Phys. 1982. V. 53(6). P. R51-R80.
- [2] П а т р и н А.А., С е р н о в С.П., Я н ч е н к о А.М. // Электронная техника. Сер. 6, Материалы. 1984. В. 1 (186). С. 79-81.
- [3] Т а р а с и к М.И., Я к у б е н я С.Н., Я н ч е н к о А.М. // Электронная техника. Сер. 6, Материалы. 1985. В. 8 (207). С. 48-50.
- [4] Б у р а к о в А.В., Я к у б е н я С.Н., Я н ч е н к о А.М. // Приборы и техн. эксперимента. 1986. № 5. С. 226.

Поступило в Редакцию
8 февраля 1989 г.

Письма в ЖТФ, том 15, вып. 10 26 мая 1989 г.

06; 09

СТИМУЛИРОВАННОЕ УСИЛЕНИЕ СИГНАЛОВ ЯДЕРНОГО СПИНОВОГО ЭХА В МАГНЕТИКАХ

Т.М. Ш а в и ш в и л и, К.О. Х у ц и ш в и л и,
Н.П. Ф о к и н а, Г.В. Л а в р е н т ь е в

В работе [1] была осуществлена когерентная генерация РЧ сигналов предварительно инвертированными ядерными спинами, взаимодействующими с высокочастотным колебательным контуром, в катушку которого помещен парамагнитный образец. Контур обладал временем радиационного затухания T_R [2], значительно превышающим время звона T_C , но гораздо меньшим времени фазовой памяти спинов T_2 . Генерация начиналась при настройке контура на резонансную частоту ядер. В работе [3] аналогичный эксперимент также обнаруживал стимулированное РЧ излучение. Физическая причина этого явления представляется следующим образом: Известно, что прецессирующая поперечная намагниченность наводит в катушке ЭДС индукции [2]. Если же предварительно перевести систему ядерных моментов в более высокое энергетическое состояние путем создания отрицательной ядерной поляризации, то прецессирующие ядерные моменты наводят в катушке ЭДС индукции, поддерживающую прецессию поперечной намагниченности. В работах [1, 3] с ядерными спинами был связан пассивный контур (ПК), не связанный с источниками питания.

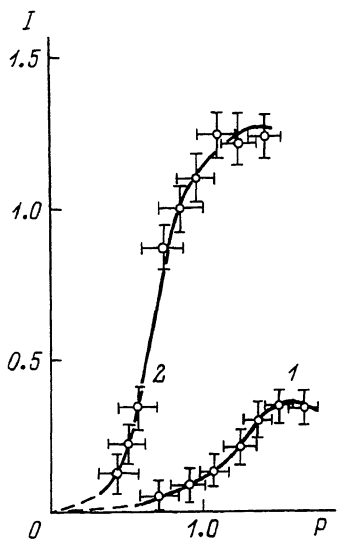


Рис. 1. Зависимость амплитуды двухимпульсного эха I от мощности возбуждающих импульсов P (в отн. единицах) для ЯМР ^{57}Fe в $\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5}\text{O}_4$ при $T = 77$ К. Кривые соответствуют 1 – отключенному ПК, 2 – включенному ПК, 2 – включенному и настроенному на частоту ЯМР ПК.

Целью данной работы является исследование влияния ПК на сигналы ядерного спинового эха в магнетиках. Как известно [4], магнетики характеризуются малым временем T_2 , однако можно показать, что T_R в них имеет величину

$$T_R = \left\{ \frac{1}{2} \gamma^2 \gamma_n Q m_0 c \right\}^{-1},$$

где γ – коэффициент усиления, γ_n – коэффициент заполнения катушки образцом, γ_n – гиромагнитное отношение ядер, Q – добротность контура, m_0 – равновесная ядерная намагниченность, c – степень обогащения магнитными ядрами, что в γ раз меньше, чем в парамагнетике с такой же равновесной намагниченностью.

Влияние ПК на параметры сигнала спинового эха исследовалось на установке, аналогичной описанной в работе [5]. Добротность активного контура, возбуждающего ядерную прецессию в образце, составляла 8–10, тогда как пассивного – 60–70. Объектом исследования являлись: 1) образцы литиевого феррита с примесями Zn , где резонанс наблюдался на обогащенных до 100% ядрах ^{57}Fe на частотах 68–74 МГц; 2) интерметаллическое соединение Co_2MnSi , ЯМР ^{59}Co на частотах 142–146 МГц. Влияние ПК исследовалось для сигналов как двухимпульсного, так и трехимпульсного эха.

Измерения показали, что при настройке ПК на частоту возбуждения, совпадающую с резонансной для исследуемых ядер, имеет место увеличение амплитуды сигналов эха (рис. 1). Обозначим через I амплитуду эха в условиях совмещения частоты ПК с частотой возбуждения, а через I_0 – в отсутствие ПК, тогда относительное изменение удобно описать отношением $K = (I - I_0) / (I + I_0) \cdot 100\%$. Максимальный коэффициент усиления сигнала эха составляет $K_{\text{макс}} \approx 85\%$. Аналогичная зависимость имеет место и при комнатной температуре, однако $K_{\text{макс}} \approx 50\%$. Эти значения K получены для случая, когда эффективный объем активного контура составлял примерно 1/3 объема исследуемого образца. В случае, когда активный контур охватывает весь объем образца, величина K уменьшается

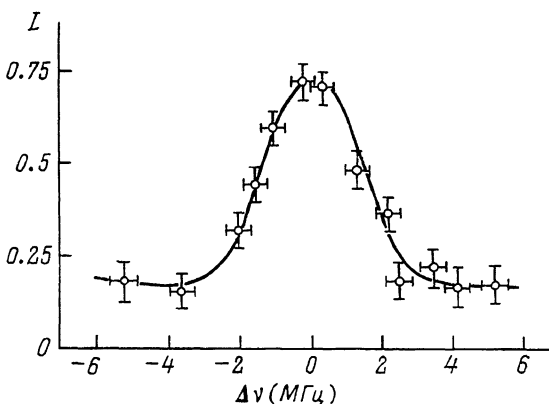


Рис. 2. Зависимость амплитуды двухимпульсного эха от расстройки $\Delta \nu = \nu_0 - \nu_{ПК}$ собственной частоты ПК $\nu_{ПК}$ от частоты ЯМР $\nu_0 = 74.1$ МГц для литиевого феррита при $T = 77$ К и $P = 1.2$.

до 15%. Величины K принимают равные значения для двухимпульсного и трехимпульсного эха. Зависимость эффекта усиления от частоты настройки ПК носит резонансный характер, причем острота определяется добротностью ПК (рис. 2). На рис. 1, 2 приведены данные для ЯМР в литиевом феррите, где времена релаксации составляют $T_2 \approx 2.5$ мс, $T_1 = 8$ мс. Сходные зависимости получены для Co_2MnSi , где времена релаксации гораздо короче и составляют $T_2 \approx 46$ мкс и $T_1 \approx 330$ мкс. Было исследовано также изменение рассеянного РЧ поля вне объема образца при включенном ПК и без него. Измерения показывают, что включение ПК заметно уменьшает амплитуду рассеянного РЧ поля.

Переходя к интерпретации экспериментальных данных, отметим, что взаимодействие контура с поперечной намагниченностью сводится к ее повороту к оси z за время T_R [6]. Поскольку поперечная намагниченность существует время $T_2^* = (\Delta^*)^{-1}$ (где Δ^* — неоднородная ширина ЯМР) после первого импульса и время того же порядка в момент возникновения каждого сигнала эха, то на T_R накладывается ограничение $T_R \sim T_2^*$. В магнетиках из-за уменьшения T_R в $\eta \sim 10^3 - 10^5$ раз по сравнению с парамагнетиком воздействие контура на движение намагниченности в эксперименте по спиновому эхо вполне возможно. Действительно, используя данные для литиевого феррита: $\gamma_n = 4\pi \cdot 863.9 \cdot 10^{-3} \frac{M}{cA}$, $m_0 = 342 \times 10^{-5} \frac{A}{M}$ (при 77 К и 100% обогащении образца ядрами ^{57}Fe) $\eta \approx 10^5$, $\Delta^* \approx 10^6$ Гц, $\eta_0 = 0.8$, $Q = 70$, получаем, что $T_R \approx \approx 7 \cdot 10^{-6}$ с, что порядка T_2 . Таким образом, при перечисленных данных ПК может взаимодействовать с намагниченностью. Если на

начальном этапе этого взаимодействия намагниченность составляет с осью z угол θ , больший $\frac{\pi}{2}$, оно сводится к уменьшению θ и увеличению поперечной намагниченности, т.е. возрастанию сигнала эха. Из-за большого значения коэффициента усиления такие углы достижимы и при малых значениях амплитуды возбуждающего поля. Из приведенных простых соображений видно, что ПК может усиливать сигналы эха в магнетиках, в то время как в парамагнетиках из-за большой величины T_R контур не взаимодействует с намагниченностью в экспериментах по спиновому эху [7].

Суммируя, можно сказать, что такие черты наблюдаемого усиления сигналов эха, как: 1) резонансный по настройке ПК характер; 2) уменьшение эффекта при повышении температуры (увеличении T_R из-за уменьшения m_0) свидетельствуют о том, что усиление сигналов эха при включении ПК является результатом стимулированного излучения ядерными моментами.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] B ö s i g e r P., B r u n E., M e i e r D. // Phys. Rev. A. 1978. V. 18. N 2. P. 671-684.
- [2] А б р а г а м А. Ядерный магнетизм. М.: ИЛ, 1963, гл. 3. 552 с.
- [3] К и с е л е в Ю.Ф., П р у д к о г л я д А.Ф., Ш у м о в с к и й А.С., Ю к а л о в В.И. // ЖЭТФ. 1988. Т. 94. В. 2. С. 344-349.
- [4] К у р к и н М.И., С е р и к о в В.В. // ФТТ. 1970. Т. 12. С. 3524-3529.
- [5] B a n c r o f t M.H. // Phys. Rev. B. 1970. V. 2. N 1. P. 182-188.
- [6] П о м е р а н ц е в Н.М., Р ы ж к о в В.Н., С к р о ч к и й Г.В. Физические основы квантовой магнитометрии. М.: Наука, 1972.
- [7] B l o e m b e r g e n N., P o u n d R.V. // Phys. Rev. 1954. V. 95. P. 8-15.

Поступило в Редакцию
10 февраля 1989 г.

Письма в ЖТФ, том 15, вып. 10 26 мая 1989 г.
07; 12

КОМПЬЮТЕРНЫЙ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЙ МИКРОСКОП

В.П. Т ы ч и н с к и й, А.В. Т а в р о в

Предложен и реализован новый модуляционный метод получения поляризационно-контрастного изображения прозрачных микробиъек-
36