

К-172

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

13 - 3307



В.В. Калиниченко

О НАБЛЮДЕНИИ ЭПР В СИСТЕМАХ
С БЕГУЩЕЙ ВОЛНОЙ

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

1967.

13 - 3307

5005/3 мр.

В.В. Калининко

О НАБЛЮДЕНИИ ЭПР В СИСТЕМАХ
С БЕГУЩЕЙ ВОЛНОЙ

Институт
физики
и химии
Сибирского
научного
центра
СО РАН
БИБЛИОТЕКА

Наиболее удобными приборами, измеряющими абсолютную величину индукции магнитных полей в диапазоне $1 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 10^{-2}$ тл (и несколько выше) с относительно высокой точностью, являются магнитометры, основанные на явлениях электронного парамагнитного резонанса /1-4/.

Однако использование ЭПР для измерения магнитной индукции выше значения приблизительно равного $5 \cdot 10^{-3}$ тл связано с определенными трудностями. В диапазоне частот, соответствующих таким значениям индукции, трудно реализовать автодинный метод детектирования ЭПР, наиболее удобный для магнитометров. Практически легко реализуемая схема Роллина, особенно эффективная при использовании коаксиальных резонаторов со спиральным внутренним проводником /5/, не может быть применена в широкодиапазонном приборе, так как требует сопряженной перестройки двух резонаторов (контура автогенератора и контура датчика). Таким образом, применение узкополосных датчиков сигналов ЭПР в магнитометрах при значении индукции измеряемых полей выше $5 \cdot 10^{-3}$ тл нежелательно (под датчиком сигналов ЭПР подразумевается устройство, в котором происходит взаимодействие электромагнитного поля со спиновой системой образца и осуществляется преобразование результата этого взаимодействия в какую-либо физически регистрируемую величину; в том частном случае, когда регистрируется только сигнал поглощения, это устройство будем называть поглощающей камерой).

Простейшим широкополосным датчиком сигналов ЭПР в дециметровом и сантиметровом диапазонах является отрезок коаксиальной линии, заполненный парамагнитным веществом. Датчик такого типа используется, например, в широко-

диапазонном частотомере (0,6–10 ГГц) с магнитной настройкой^{/8/}. Важно отметить, что для получения удовлетворительного отношения сигнал/шум требуется относительно большой объем образца (в рассматриваемом примере длина заполненного парамагнитным веществом участка линии равна 50 мм, диаметр внутреннего проводника $d \approx 9,5$ мм, внутренний диаметр экрана $D \approx 22$ мм). Это свидетельствует о низкой эффективности взаимодействия спиновой системы образца с электромагнитным полем в таком устройстве.

В работе^{/7/} отмечается, что эффективные широкополосные поглощающие камеры могут быть построены на основе направляющих систем, обладающих способностью сильно концентрировать высокочастотное магнитное поле. С этой точки зрения представляет интерес рассмотреть возможность использования одиночной спиральной линии для наблюдения ЭПР в метровом и дециметровом диапазонах, тем более, что успешные эксперименты с использованием спирали для наблюдения ЭПР в 3-сантиметровом диапазоне при относительно узкой полосе описаны в работе^{/8/}.

Для определения величины сигнала поглощения ЭПР при размещении образца внутри спирали необходимо знать продольную компоненту высокочастотного магнитного поля $H_z(r, \theta, z)$. Строгий расчет конфигурации полей в спирали связан с большими математическими трудностями. Воспользуемся результатами расчета, приведенными в работе^{/9/}. Эти расчеты выполнены для модели спирально-проводящего цилиндра, заменяющего реальную спираль. Итак, интересующая нас компонента может быть определена из выражения^{/9/}:

$$H_z = -j \frac{\gamma a}{k a \operatorname{ctg} \psi} \frac{E_0}{\rho} \frac{I_0(\gamma a)}{I_1(\gamma a)} I_0(\gamma r). \quad (1)$$

Здесь a – средний радиус спирали;

k – волновое число, $k = 2\pi/\lambda$;

γ – радиальная постоянная распространения;

ψ – угол подъема спирали, определяемый шагом h и радиусом спирали. $\operatorname{ctg} \psi = 2\pi a/h$;

I_0, I_1 – модифицированные функции Бесселя первого рода; $\rho = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0}$;

E_0 – продольная составляющая напряженности электрического поля на оси спирали.

Средний по времени поток энергии, протекающий по спирально-проводящему цилиндру, равен ^{/9/}:

$$P = \frac{\pi a^2 (\beta a) (ka)}{(\gamma a)^3} F_0(\gamma a) \frac{F_0^2}{2\rho}. \quad (2)$$

Здесь:

$$F_0(\gamma a) = \frac{I_0(\gamma a)}{K_0(\gamma a)} \left[\frac{I_1(\gamma a)}{I_0(\gamma a)} - \frac{I_0(\gamma a)}{I_1(\gamma a)} + \frac{K_0(\gamma a)}{F_1(\gamma a)} - \frac{K_1(\gamma a)}{K_0(\gamma a)} + \frac{4}{\gamma a} \right];$$

β - волновое число вдоль оси z , $\beta^2 = \gamma^2 + k^2$;

K_0, K_1 - функции Макдональда. Численные значения функции $F_0(\gamma a)$ приведены в таблице П. III. 2 ^{/9/}.

Мощность, поглощаемая образцом при резонансе ^{/10/},

$$\Delta P = \frac{1}{2} \mu_0 \omega \chi'' \int_{V_n} H_z^2 dV_n, \quad (3)$$

где χ'' - мнимая часть комплексной динамической восприимчивости,
 V_n - объем образца.

Из выражения (3) с учетом выражений (1) и (2), а также принимая во внимание, что при больших замедлениях

$$\beta a = \gamma a = ka \operatorname{ctg} \psi,$$

получаем:

$$\frac{\Delta P}{P} = \frac{\mu_0 \omega \chi'' n}{\pi a^2 \rho} \frac{\gamma a}{F_0(\gamma a)} \left[\frac{I_0(\gamma a)}{I_1(\gamma a)} \right]^2 \int_{V_n} [I_0(\gamma r)]^2 dV_n,$$

где n - замедление, $n = \beta a / ka = \operatorname{ctg} \psi$.

Полагая, что радиус образца равен среднему радиусу спирали, получим после интегрирования (в режиме бегущей волны):

$$\frac{\Delta P}{P} = \frac{\mu_0 \omega \chi'' n V_s}{\pi a^2 \rho} \Phi(\gamma a). \quad (4)$$

Здесь

$$\Phi(\gamma a) = \frac{\gamma a}{F_0(\gamma a)} \left[\frac{I_0(\gamma a)}{I_1(\gamma a)} \right]^2 \{ [I_0(\gamma a)]^2 - [I_1(\gamma a)]^2 \}.$$

Численные значения функции $\Phi(\gamma a)$ приведены в следующей таблице.

Т а б л и ц а

γa	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,5
$\Phi(\gamma a)$	4,65	4,65	3,30	2,40	1,80	1,43	1,15	0,90
γa	1,8	2,0	2,3	2,5	3,0	3,5	4,0	
$\Phi(\gamma a)$	0,73	0,65	0,56	0,51	0,43	0,39	0,37	

Выражение (4) позволяет оценить величину резонансного сигнала и, кроме того, может быть полезным при определении конструктивных параметров спиральной поглощающей камеры.

Можно показать, что для коаксиальной поглощающей камеры относительное изменение проходящей мощности при резонансе (в режиме бегущих волн) равно:

$$\frac{\Delta P}{P} = \frac{\mu_0 \omega \chi'' V_s}{\rho \pi (D^2 - d^2)/4}. \quad (5)$$

При выводе выражения (5) предполагалось, что парамагнитное вещество полностью заполняет на некоторой длине пространство между внутренним и внешним проводниками коаксиальной линии.

Сравнение (4) и (5) показывает, что интенсивность сигнала ЭПР для спиральной камеры, по крайней мере, в n раз больше, чем для коаксиальной

при одинаковых условиях наблюдения. В этом несомненное достоинство спиральной поглощающей камеры. Однако серьезным препятствием является трудность согласования спирали с линиями передачи в широком диапазоне частот. В этой работе вопросы согласования не рассматриваются.

Исследование свойств спиральной поглощающей камеры в диапазоне 150–1000 Мгц производилось на установке, блок-схема которой показана на рис. 1а. Спираль выполнена на прямоугольном полистироловом стержне сечением $7 \times 10 \text{ мм}^2$ и заключена в прямоугольный экран. Для намотки использован провод ПЭВ-1 $\phi 0,23 \text{ мм}$, шаг спирали $h \approx 0,5 \text{ мм}$. Согласование спирали с входной и выходной линиями передачи достигается изменением шага, а также зазора между спиралью и экраном. Согласующие элементы образуют единое целое с основной секцией спиральной линии, в центре которой размещен образец из дифенилпикрилгидразила. Образец представляет собой цилиндр диаметром 6 мм и высотой 7 мм. Изменение поступающей к детектору мощности при прохождении резонансного значения индукции в установке рис. 1а определяется выражением $^{1/4}$. При хорошем согласовании спирали, детекторной камеры и соответствующих линий передачи амплитуда сигнала ЭПР в рабочем диапазоне частот монотонно нарастает с увеличением частоты.

Эксперимент подтверждает возможность уверенной регистрации сигнала ЭПР в образце из дифенилпикрилгидразила, помещенного в электромагнитное поле спирали. Как уже отмечалось, спиральная поглощающая камера была опробована в диапазоне 150–1000 Мгц. Можно надеяться, что совершенствование регистрирующей аппаратуры и улучшение согласования позволит расширить рабочий диапазон как в сторону высоких, так и в сторону низких частот. Спиральную поглощающую камеру целесообразно использовать в широкодиапазонных магнитометрах.

На рис. 2 представлены осциллограммы сигнала ЭПР, полученные на установке рис. 1а для двух различных значений частоты (индукции) в пределах диапазона 150–1000 Мгц.

На рис. 1б изображена блок-схема регистрации сигнала ЭПР, содержащая меньшее количество элементов. Спираль при помощи неотражающего перехода связывается с линией передачи, к входу которой подключен генератор высокой частоты. Второй конец спирали соединен с экраном, таким образом, в спирали и линии устанавливается режим стоячих волн, причем парамагнитный образец

находится в пучности высокочастотного магнитного поля. При резонансе происходит дополнительный отбор энергии от колебательной системы автогенератора, что может быть отмечено по изменению амплитуды напряжения на контуре. Следует отметить, что такому методу регистрации присущи весьма глубокие изменения амплитуды сигнала в рабочем диапазоне частот. Это обусловлено резкими изменениями степени связи поглощающей камеры с контуром автогенератора при перестройке частоты.

Автор выражает благодарность дипломнице Казанского университета С.З. Курманаевой за большую помощь при постановке эксперимента. Автор благодарит Ю.Н. Денисова, прочитавшего рукопись и сделавшего ряд замечаний, способствовавших ее улучшению.

Л и т е р а т у р а

1. Д. Инграм. Спектроскопия на высоких и сверхвысоких частотах. ИЛ, 1959.
2. А.В. Кубарев, Ю.А. Мезенев. ПНТПО № П-61-5/1 (1961).
3. В.М. Рыжков, А.К. Чирков. Труды Уральского политехнического института, сб. 111, 89 (1961).
4. Ю.Н. Денисов, В.В. Калиниченко. Транзисторный ЭПР-магнитометр. Препринт ОИЯИ, 13/3013-1, Дубна 1966.
5. Ю.Н. Денисов, В.В. Калиниченко. ПТЭ, № 2, 134 (1965).
6. P.H.Vartanian, J.L.Melchor. Proc. IRE, N2, 175 (1956).
7. Ю.Н. Денисов, В.В. Калиниченко. ПТЭ, № 3, 152 (1966).
8. R.H.Welb. Rev. Scient Instr., 33, 732 (1962).
9. Р.А. Силин, В.П. Сазонов. Замедляющие системы "Сов. радио", 1966.
10. А.Ф. Харвей. Техника сверхвысоких частот, т. 1, "Сов. радио", 1965.
11. И.С. Градштейн и И.М. Рыжик. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. Физматгиз, М, 1962.

Рукопись поступила в издательский отдел
27 апреля 1967 г.

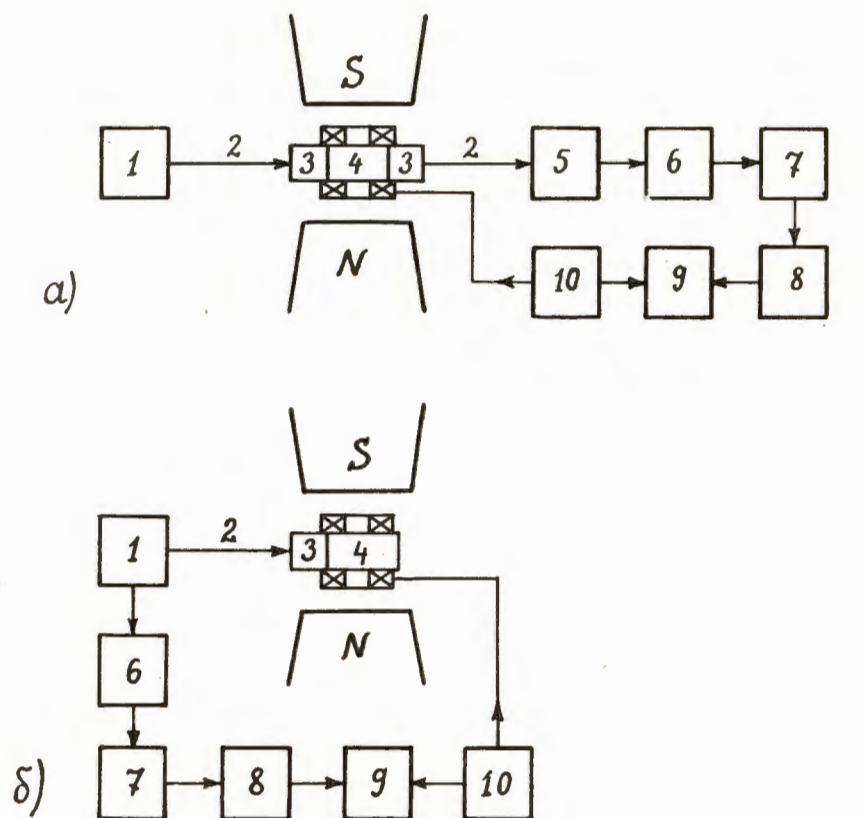


Рис. 1. Блок-схема установки для исследования спиральной поглощающей камеры. 1. Генератор сверхвысоких частот ГСС-12. 2. Коаксиальные линии передачи $W = 75$ ом. 3. Согласующие переходы от коаксиальной линии к спиральной. 4. Спиральная линия с образцом. 5. Широкополосная детекторная камера. 6. Двойной Т-образный мост, $f_0 = 50$ гц. 7. Усилитель низкой частоты У2-1А (28 ИМ). 8. RC-фильтр нижних частот. 9. Осциллограф СИ-1. 10. Генератор звуковой частоты ЗГ-10.