

03;09;12

# Определение параметров магнитной жидкости по отражению сверхвысокочастотного излучения

© Д.А. Усанов, Ал.В. Скрипаль, Ан.В. Скрипаль, А.В. Курганов

Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского,  
410026 Саратов, Россия  
e-mail: UsanovDA@info.sgu.ru

(Поступило в Редакцию 5 марта 2001 г.)

Приведены результаты исследований взаимодействия сверхвысокочастотного излучения в диапазоне частот от 20 до 40 GHz с магнитной жидкостью, полностью заполняющей волновод и ограниченной диэлектрической вставкой. Показана зависимость от величины приложенного магнитного поля положения на частотной оси чередующихся интерференционных максимумов и минимумов, связанных с отражением от передней и задней стенок диэлектрической вставки, обусловленная изменением комплексной магнитной восприимчивости магнитной жидкости. Приводится решение обратной задачи по определению параметров магнитной жидкости — диаметра ферромагнитных частиц и объемной доли твердой фазы магнитной жидкости по результатам измерения частотной зависимости коэффициента отражения.

## 1. Введение

Описанию особенностей взаимодействия сверхвысокочастотного (СВЧ) излучения с магнитной жидкостью посвящен ряд работ, в которых описан характер дисперсии магнитной восприимчивости магнитной жидкости [1,2] и исследовано влияние зависимости величины мнимой компоненты магнитной восприимчивости магнитной жидкости от индукции магнитного поля на характеристики ферромагнитного резонанса [3,4]. При этом в [3,4] зависимость величины действительной компоненты магнитной восприимчивости от индукции магнитного поля не учитывалась. Такой подход может привести к неадекватной трактовке экспериментальных данных, в частности, при определении параметров магнитной жидкости СВЧ методами.

В настоящей работе приведены результаты экспериментальных исследований особенностей отражения СВЧ излучения от слоя магнитной жидкости в волноводе при воздействии внешнего стационарного магнитного поля и их сравнение с данными теоретического анализа, учитывающего зависимость величины как действительной, так и мнимой компонент магнитной восприимчивости магнитной жидкости от величины индукции магнитного поля. Исследована возможность использования полученных результатов для определения параметров магнитной жидкости.

## Теоретический анализ

При теоретическом анализе рассматривались распространение  $TE_{10}(H_{10})$ -волны в волноводе и ее отражение от слоя магнитной жидкости 3, ограниченного диэлектрической вставкой 2 (рис. 1).

Выражение для комплексного коэффициента отражения электромагнитной волны от полубесконечного слоя магнитной жидкости в волноводе, ограниченного диэлек-

трической вставкой, может быть представлено в виде [5]

$$R^* = \frac{\exp(2\gamma_d L)(\gamma_d - \gamma_0)(\gamma + \gamma_d) + (\gamma_0 + \gamma_d)(\gamma - \gamma_d)}{-\exp(2\gamma_d L)(\gamma_d + \gamma)(\gamma_0 + \gamma_d) + (\gamma_0 - \gamma_d)(\gamma - \gamma_d)}, \quad (1)$$

где

$$\gamma_1^2 = \frac{\pi^2}{a^2} - \omega^2 \varepsilon_0 \mu_0 \varepsilon \mu^*;$$

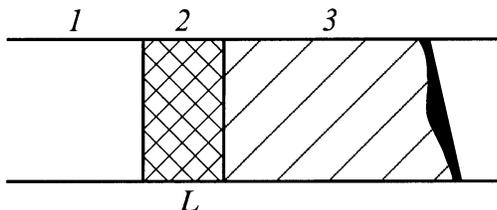
$\gamma_0$  и  $\gamma_1$  — постоянные распространения в пустой и заполненной части волновода соответственно;  $\gamma_d$  — постоянная распространения волны в диэлектрике;  $a$  — размер широкой стенки волновода;  $\varepsilon_0$  и  $\mu_0$  — электрическая и магнитная постоянные;  $\varepsilon$  и  $\mu^* = 1\chi'_m - j\chi''_m$  — диэлектрическая и магнитная проницаемости среды, заполняющей поперечное сечение волновода;  $\chi'_m$  и  $\chi''_m$  — действительная и мнимая части магнитной восприимчивости соответственно [6]

$$\chi'_m = \frac{\gamma \varphi M L(\sigma)}{\omega H_n} \frac{(1 + \eta^2)^2 H_n^4 + (\eta^2 - 1) H_n^2}{(1 + \eta^2)^2 H_n^4 + 2(\eta^2 - 1) H_n^2 + 1},$$

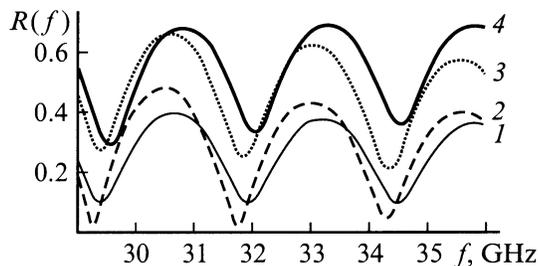
$$\chi''_m = \frac{\gamma \varphi M L(\sigma)}{\omega H_n} \frac{\eta H_n^2 (1 + H_n^2 (1 + \eta^2))}{(1 + \eta^2)^2 H_n^4 + 2(\eta^2 - 1) H_n^2 + 1},$$

$$\eta = \xi \left( \frac{1}{L(\sigma)} - \frac{1}{\sigma} \right), \quad \sigma = \frac{\mu_0 M_d V}{kT} H. \quad (2)$$

Здесь  $L(\sigma)$  — функция Ланжевена;  $H_n$  — приведенное магнитное поле  $H_n = \gamma H / \omega$ ;  $\sigma$  — величина, характеризующая параметры магнитной жидкости;  $M_d$  — намагниченность насыщения твердого магнетика;  $V = 4\pi d^3 / 3$  — объем ферромагнитной частицы;  $\xi$  — постоянная затухания электромагнитной волны в магнитной жидкости;  $d$  — размер феррочастиц;  $\varphi$  — объемная доля твердой фазы магнитной жидкости. В приближении сферичности ферромагнитных частиц предполагается, что диэлектрические свойства магнитной жидкости не зависят от величины магнитного поля.



**Рис. 1.** Схема заполнения волновода слоем магнитной жидкости: 1 — незаполненная область волновода, 2 — диэлектрическая вставка толщиной  $L$ , 3 — полубесконечный слой магнитной жидкости.



**Рис. 2.** Зависимости коэффициента отражения СВЧ сигнала от частоты. Значения индукции магнитного поля  $B, T$ : 1 — 0.0, 2 — 0.5, 3 — 0.75, 4 — 1.0.

На рис. 2 приведены результаты расчета зависимости модуля коэффициента отражения электромагнитной волны  $R = |R^*|$  от частоты падающего СВЧ излучения для различных значений внешнего магнитного поля. В расчетах использовались следующие параметры магнитной жидкости:  $M_d = 0.48 T$ ,  $\varphi = 0.1$ ,  $d = 5.5 \text{ nm}$  и диэлектрической вставки  $\varepsilon = 2.1$ ,  $L = 37 \text{ mm}$ .

Как следует из результатов расчета, приведенных на рис. 2, на частотной зависимости модуля коэффициента отражения  $R(f)$  от слоя магнитной жидкости, ограниченного диэлектрической вставкой, наблюдаются чередующиеся области интерференционных максимумов и минимумов (кривая 1 на рис. 2), обусловленные отражением от передней и задней диэлектрической вставки.

Анализ изменения зависимости  $R(f)$  при воздействии магнитного поля показывает, что наряду с частотным смещением минимумов коэффициента отражения электромагнитной волны наблюдается изменение абсолютного значения модуля коэффициента отражения в минимумах частотной зависимости  $R(f)$ . При этом частотное смещение минимумов коэффициента отражения электромагнитной волны в основном определяется зависимостью величины действительной компоненты магнитной восприимчивости магнитной жидкости от индукции магнитного поля, а изменение абсолютного значения модуля коэффициента отражения в минимумах частотной зависимости  $R(f)$  — зависимостью величины мнимой компоненты магнитной восприимчивости магнитной жидкости от магнитного поля.

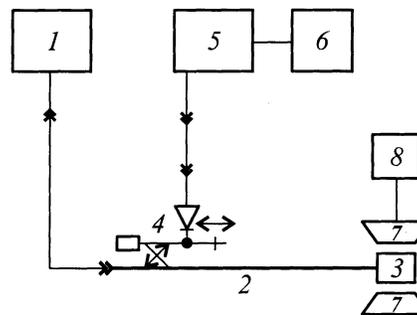
## Экспериментальные исследования

Экспериментальные исследования проводились на установке, схема которой приведена на рис. 3. СВЧ излучение от панорамного измерителя КСВН и ослабления 1 направлялось на исследуемую магнитную жидкость 3, полностью заполняющую поперечное сечение волновода ( $7.2 \times 3.4 \text{ mm}$ ) длиной 70 mm. Магнитная жидкость удерживалась в волноводе с помощью диэлектрических вставок из фторопласта. Толщина слоя магнитной жидкости выбиралась из условия реализации отражения электромагнитной волны в основном от передней (прилегающей к слою диэлектрика) границы магнитной жидкости. Отраженное от магнитной жидкости СВЧ излучение через направленный ответвитель поступало на детектор 4, сигнал с которого поступал на индикаторный блок 5 и регистрировался самописцем 6. Отрезок волновода с магнитной жидкостью помещался между полюсами 7 электромагнита, запитываемого от источника постоянного тока 8. В качестве исследуемой магнитной жидкости использовалась магнитная жидкость на основе керосина с магнетитовыми частицами, стабилизированная олеиновой кислотой, с параметрами  $M_d = 0.48 T$ ,  $\varphi = 0.25$ ,  $\varepsilon = 3$ .

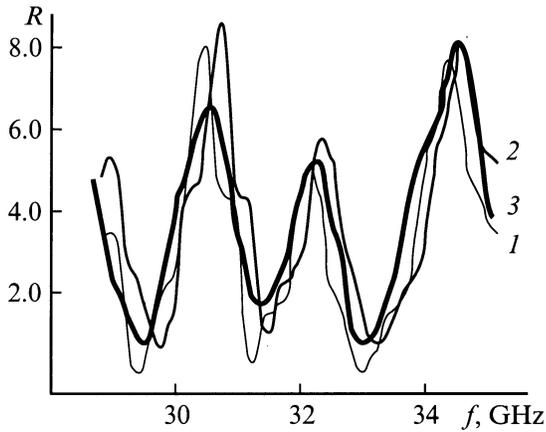
На рис. 4 приведены экспериментальные зависимости коэффициента отражения  $R(f)$  от частоты падающего СВЧ излучения для различных значений внешнего стационарного магнитного поля, приложенного к исследуемой магнитной жидкости, при  $T = 293 \text{ K}$ .

Как следует из результатов эксперимента, представленных на рис. 4, на частотной зависимости коэффициента отражения  $R(f)$  от слоя магнитной жидкости, ограниченного диэлектрической вставкой, наблюдаются чередующиеся области интерференционных максимумов и минимумов (кривая 1 на рис. 4).

Анализ изменения экспериментальной зависимости  $R(f)$  подтверждает теоретически предсказанное смещением минимумов коэффициента отражения электромагнитной волны и изменение абсолютного значения модуля коэффициента отражения в минимумах частотной зави-



**Рис. 3.** Схема установки для измерения зависимости коэффициента отражения от приложенного магнитного поля: 1 — генератор, 2 — волновод, 3 — магнитная жидкость, 4 — детектор, 5 — индикатор, 6 — самописец, 7 — электромагнит, 8 — источник постоянного тока.



**Рис. 4.** Экспериментальные зависимости коэффициента отражения СВЧ излучения от частоты. Значения индукции магнитного поля  $B, T$ : 1 — 0.0, 2 — 0.25, 3 — 0.5.

смости  $R(f)$  при воздействии внешнего магнитного поля. Возможность теоретического описания зависимости  $R$  от  $f$  и измерения этой зависимости позволяет решить так называемую обратную задачу: определить параметры магнитной жидкости по этим зависимостям.

## Решение обратной задачи

Для решения обратной задачи измеряли коэффициент отражения  $R(f)$  при разных значениях частоты СВЧ излучения  $f$ . Затем строили сумму квадратов отклонений экспериментальных значений коэффициента отражения  $R_{\text{exp}}(f)$  от теоретических  $R_{\text{theor}}(f)$

$$S = \sum_{i=1}^n [R_{\text{theor}}(f_i, d, \varphi) - R_{\text{exp}}(f_i)]^2. \quad (3)$$

Здесь диаметр феррочастиц  $d$  и объемная доля твердой фазы магнитной жидкости  $\varphi$  — искомые параметры обратной задачи. Решение обратной задачи состоит в том, чтобы найти такие значения искомых параметров, при которых сумма  $S$  будет иметь наименьшее значение. В точке минимума суммы  $S$  ее частные производные равны нулю. После дифференцирования  $S$  по параметрам  $d$  и  $\varphi$  и приравнивания к нулю частных производных  $\partial S/\partial d$  и  $\partial S/\partial \varphi$  в точке минимума получаем систему двух уравнений:

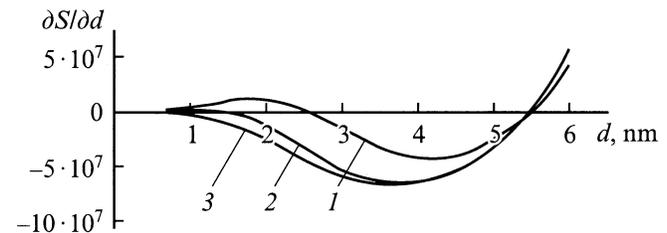
$$\frac{\partial S}{\partial d} = 2 \sum_{i=1}^n [R_{\text{theor}}(f, d, \varphi) - R_{\text{exp}}(f)] \frac{\partial R(f, d, \varphi)}{\partial d} = 0,$$

$$\frac{\partial S}{\partial \varphi} = 2 \sum_{i=1}^n [R_{\text{theor}}(f, d, \varphi) - R_{\text{exp}}(f)] \frac{\partial R(f, d, \varphi)}{\partial \varphi} = 0,$$

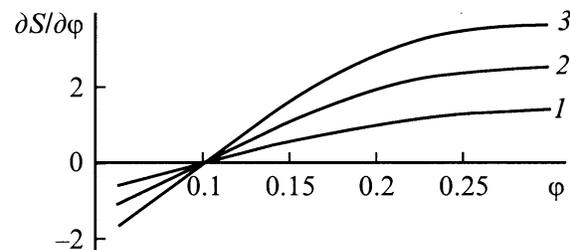
где  $R_{\text{theor}}(f, d, \varphi)$  находится из уравнений (1) и (2); из решения системы уравнений (4) определяются две искомые величины  $d$  и  $\varphi$ .

Численное моделирование решения обратной задачи проводилось для магнитной жидкости с параметрами  $d = 5.5 \text{ nm}$  и  $\varphi = 0.1$ . По этим значениям с помощью уравнений (1)–(3) строилась сумма  $S$ , в которой вместо набора экспериментальных точек зависимости  $R_{\text{exp}}(f_i)$  использовался набор модельных точек  $R_{\text{theor}}(f_i, d, \varphi)$ , рассчитанный для магнитной жидкости с заданными параметрами  $d$  и  $\varphi$ . Затем для различных наборов модельных точек  $n$  вычислялись частные производные  $\partial S/\partial d$  и  $\partial S/\partial \varphi$ . На рис. 5 и 6 приведены зависимости  $\partial S/\partial d$  от диаметра феррочастиц  $d$  и объемной доли твердой фазы магнитной жидкости  $\varphi$  для различного набора  $n$  модельных точек  $R_{\text{theor}}(f_i, d, \varphi)$ . Как видно из рис. 5, равенство частной производной  $\partial S/\partial d$  нулю может возникать при двух значениях параметра  $d$ : например, при  $n = 5$  имеем  $d = 5.5 \text{ nm}$  и  $d = 2.56 \text{ nm}$ . Однако при увеличении числа точек  $n$  второй корень уравнения  $\partial S/\partial d = 0$  смещается влево по оси  $d$  и может совсем исчезнуть. Сходимость значений параметров  $d$  и  $\varphi$  наблюдается уже при  $n = 2$ , а ложный корень исчезает при  $n = 12$ .

Для исследования влияния случайного отклонения значения коэффициента отражения на погрешность определения искомых параметров при решении обратной задачи к теоретическому значению коэффициента отражения прибавлялась случайная величина, задаваемая ЭВМ с помощью функции генерации случайных чисел. Задание 5%-го отклонения значения коэффициента отражения  $R$  от теоретического не приводило при восстановлении параметров  $d$  и  $\varphi$  к погрешности, превышающей 5%.



**Рис. 5.** Зависимость частной производной  $\partial S/\partial d$  от диаметра феррочастиц. Набор  $n$  модельных точек зависимости  $R_{\text{theor}}(f_i, d, \varphi)$ : 1 — 5, 2 — 10, 3 — 15.



**Рис. 6.** Зависимость частной производной  $\partial S/\partial \varphi$  от объемной доли твердой фазы магнитной жидкости. Набор  $n$  модельных точек зависимости  $R_{\text{theor}}(f_i, d, \varphi)$ : 1 — 5, 2 — 10, 3 — 15.

По вышеописанной методике были обработаны экспериментальные результаты, приведенные на рис. 4. Решения системы уравнений (4) при использовании набора из 12 экспериментальных точек позволили определить средний диаметр феррочастиц  $d = 47 \text{ nm}$  и объемную долю твердой фазы магнитной жидкости  $\varphi = 0.249$ .

## Выводы

Таким образом, проведенные экспериментальные и теоретические исследования особенностей отражения СВЧ-излучения от слоя магнитной жидкости в волноводе при воздействии внешнего стационарного магнитного поля позволили установить, что при реализации картины чередующихся интерференционных максимумов и минимумов на зависимости  $R(f)$  наблюдаются частотное смещение минимумов коэффициента отражения электромагнитной волны, определяемое зависимостью величины действительной компоненты магнитной восприимчивости магнитной жидкости от индукции магнитного поля, и изменение абсолютного значения модуля коэффициента отражения в минимумах частотной зависимости  $R(f)$ , определяемое зависимостью величины мнимой компоненты магнитной восприимчивости магнитной жидкости от магнитного поля.

Установленные закономерности позволяют использовать предложенную схему измерений для решения обратной задачи по определению действительной и мнимой компонент магнитной восприимчивости магнитной жидкости, а также параметров магнитной жидкости — диаметра ферромагнитных частиц и объемной доли твердой фазы магнитной жидкости.

## Список литературы

- [1] Райхер Ю.Л., Шлюмис М.И. // ЖЭТФ. 1974. Т. 67. Вып. 3. С. 1060–1073.
- [2] Fannin P.C., Charles S.W., Relihan T. // Meas. Sci. Technol. 1993. Vol. 4. P. 1160–1162.
- [3] Raikher Y.L., Stepanov V.I. // Phys. Rev. B. 1994. Vol. 50. N 9. P. 6250–6259.
- [4] Raikher Y.L., Stepanov V.I. // Phys. Rev. B. 1995. Vol. 51. N 22. P. 16 428–16 431.
- [5] Усанов Д.А. СВЧ методы измерения параметров полупроводников. Изд-во Саратовского ун-та, 1985. 55 с.
- [6] Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Ермолаев С.А. // Магнитная гидродинамика. 1996. Т. 32. № 4. С. 503–508.