

ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СВЧ-СВОЙСТВ МАГНИТНЫХ СТРУКТУР

М.К. Ходзицкий**, инженер; **А.А. Гирич***, соискатель;

С.И. Тарапов**, д-р физ.-мат. наук, профессор

* Харьковский национальный университет радиоэлектроники

** Институт радиофизики и электроники НАН Украины

ВВЕДЕНИЕ

Растущие требования к информативности и точности физического эксперимента приводят к необходимости применения цифровых средств регистрации данных, а также — адекватного программного обеспечения, обеспечивающего как можно более быстрый анализ зарегистрированных данных. Одной из современных областей радиофизики, где данное исследование является особо важным — это спектроскопические исследования взаимодействия сверхвысокочастотного (СВЧ) излучения с материальными средами, в частности, — эффект электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) и гигантского магнитного импеданса (ГМИ) [1]. Методика экспериментов, требующих сегодня максимальной чувствительности, сводится к необходимости оцифровки и регистрации сигнала, пропорционального величине СВЧ-сигнала (P), прошедшего через образец как функции некоего внешнего параметра (в данном случае — постоянного магнитного поля (H)) $P=f(H)$; а также к последующему усреднению и аппроксимации спектров.

Стандартные регистрирующие приборы являются, как правило, узкопрофильными и не в состоянии выполнить данные функции.

Данная работа является очередным шагом в заполнении этого пробела. В статье представлены принципы построения и конструкционные особенности, разработанного программно-аппаратного комплекса (Q-SPECTR) для регистрации СВЧ-спектров в различных магнитных структурах; проведен анализ результатов контрольных физических экспериментов.

ПРИЕМ, ОБРАБОТКА И АНАЛИЗ ДАННЫХ С ПОМОЩЬЮ Q-SPECTR

Разработанный программно-аппаратный комплекс включает в свой состав тесламетр, микроконтроллер и специальную программу обработки и анализа SPECTRUM-GL [2,3].

Тесламетр построен по модульному принципу, при этом имеется возможность подключать различные съемные наконечники с датчиками Холла и различные типы усилителей. В состав тесламетра также входят: экранированный блок усилителя с варьируемым коэффициентом усиления (4, 8, 45, 90), блок источника тока (3 мА), блок питания (5 В), выход на 9-контактный разъем для удобства подключения к микроконтроллеру. Тесламетр измеряет магнитные поля от 0 до 2 Т для ЭПР-измерений и от -0,2 Т до 0,2 Т для магнитоимпедансных измерений, где применена схема усилителя со смещением рабочей точки.

Аналоговые данные с тесламетра и СВЧ детектора (через усилитель и преобразователь) поступают на 1 и 2 канал АЦП, который входит в состав микроконтроллера. Микроконтроллер включает в себя модуль микропроцессора и модуль АЦП, связанных между собой по кросс-плате. Модуль микропроцессора собран на микросхеме AT89C4051: flash-память 4 кБайта; 128 байт ОЗУ; 15 линий ввода/вывода; UART канал; рабочая частота до 24 МГц. Модуль АЦП собран на базе 16-разрядного АЦП AD977: время преобразования 100 мкс; последовательный обмен; входное

напряжение до +/-10 В. Для обеспечения мультисканального режима измерения применен 8 канальный аналоговый мультиплексор ADG508A.

После микроконтроллера сигнал в цифровом виде передается в ПК по интерфейсу RS-232 и обрабатывается программой SPECTRUM-GL. Программа реализована в среде Delphi и занимает 1500 Кбайт. Работа программы возможна в двух режимах: приема и обработки данных.

Реализацию режима приема данных для ЭПР-измерений можно представить в следующем виде: осуществлен последовательный опрос 1-го и 2-го каналов АЦП через СОМ-порт; биты с 1-го канала преобразуются в значение напряженности магнитного поля (Э), а с 2-го канала в интенсивность снимаемого сигнала (мВ). Реализацию режима приема магнитоимпедансных данных можно представить в следующем виде: осуществлен опрос 1-го канала АЦП через СОМ-порт, биты с которого преобразуются в значение напряженности магнитного поля (Э); с помощью технологии СОМ через локальную сеть Ethernet программа получает данные о измеряемом S11 параметре [4].

В режим обработки включены такие средства, как интегрирование, дифференцирование, аппроксимация функциями Лоренца, Гаусса, полиномами Лежандра и Чебышева, усреднение семейства спектров полиномами Лежандра и Чебышева, а также рекурсивная фильтрация.

Аппроксимация функциями Гаусса и Лоренца, осуществляются по формулам (1) и (2) соответственно:

$$y(x) = y_{\min} + (y_{\max} - y_{\min}) \cdot \exp\left(-\frac{(x - x_c)^2}{0.36w^2}\right), \quad (1)$$

$$y(x) = y_{\min} + \frac{y_{\max} - y_{\min}}{1 + \frac{(x - x_c)^2}{(0.5w)^2}}, \quad (2)$$

где y_{\min} — минимальная интенсивность; y_{\max} — максимальная интенсивность; w — ширина линии на полувысоте; x_c — координаты при пиковой амплитуде. Есть возможность взаимного перехода гауссовой формы спектральной линии в лоренцевую форму при помощи соответствующего коэффициента в настройках программы.

Для фильтрации спектров использован рекурсивный цифровой фильтр первого порядка. Его временные характеристики задаются следующим выражением:

$$y_k = y_{k-1} + \frac{x_k - y_{k-1}}{N}, \quad (3)$$

где x_k — исходное (измеренное) значение спектра для дискрета поля с номером k ; y_k — усредненное (полученное в результате фильтрации) значение спектра для дискрета с номером k ; y_{k-1} — усредненное значение спектра для дискрета с номером $k-1$; N — характеристическая постоянная (постоянная времени) фильтра. Фильтрация произведена в соответствии с приведенным выражением для дискретов с номером $k \geq N$. Для начальных точек (дискретов) диапазона с номерами $0 \leq k \leq N$ характеристика фильтра описывается выражением:

$$y_k = \frac{1}{k+1} \sum_{i=0}^k x_i. \quad (4)$$

Аналогом этого фильтра является RC цепочка с постоянной времени $RC = N \cdot \Delta t$, где Δt — время между дискретами измерения поля.

После выполнения фильтрации каждый элемент (отсчет) спектра x_k заменен на экране на соответствующее ему значение y_k .

Для наиболее гладкого представления функций (с минимальным числом и амплитудой выбросов) выбраны полиномы Чебышева $T_n(x)$, которые определены и ортогональны в интервале $[-1, +1]$ с весовой функцией $(1 - x^2)^{-1/2}$. Значения полиномов Чебышева определены по рекуррентной формуле

$$T_{k+1}(x) = 2x \cdot T_k(x) - T_{k-1}(x). \quad (5)$$

Особенностью такой формы полиномов Чебышева является отсутствие коэффициентов у высших степеней x в каждом из полиномов.

Полиномы Лежандра определяются по рекуррентной формуле

$$L_{k+1}(x) = [(2k+1) \cdot xL_k(x) + kL_{k-1}(x)] / (k+1). \quad (6)$$

Для определения ширины резонансной линии используется метод двух граничных линий, между которыми определяется уровень на полувысоте. В результате сканирования на этом уровне, исходя из заданных параметров минимальной ширины и среднего расстояния между точками по оси абсцисс, определяется ширина линии. При анализе спектра используется маркер мыши. При перемещении маркер по полю отображения в строке состояния отображается соответствующее положению указателя значение поля и амплитуда сигнала.

К дополнительным возможностям программы можно отнести следующие: сохранение полученных спектров в txt-формате; загрузка и получение семейства спектров; печать результатов; измерение значений резонансной интенсивности и резонансного магнитного поля; нормировка; масштабирование, смещение экспериментальных резонансных линий, удаление ошибочных точек, калибровка осей и выбор цвета резонансных линий; калибровка и тестирования каналов АЦП.

ИЗМЕРЕНИЕ СВЧ-СПЕКТРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ Q-SPECTR

Комплекс Q-SPECTR предназначенный для экспериментов в миллиметровом диапазоне радиоволн, функционирует в составе:

- а) ЭПР-спектрометра «КВАРК» [5];
- б) модуля для измерения магнитного импеданса, оснащенного панорамным анализатором Network Analyzer PNA N5230A.

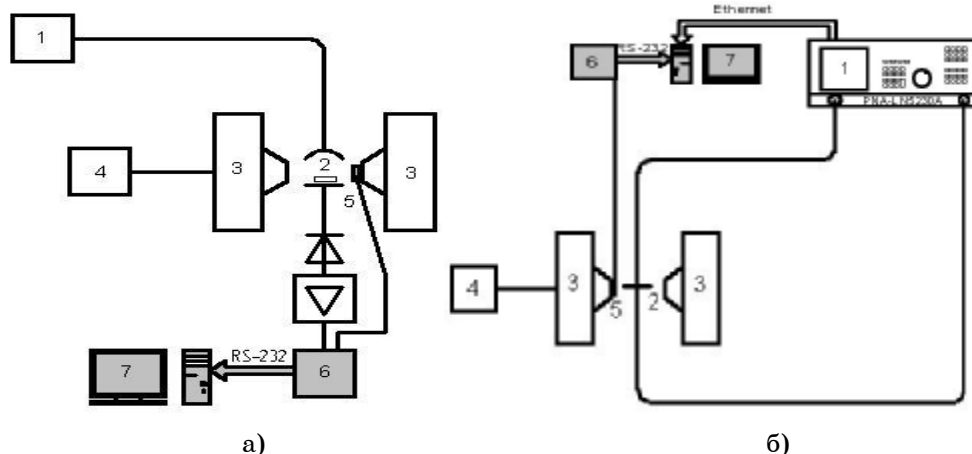


Рисунок 1 — Блок-схемы установок: а) квазиоптического магнитного радиоспектрометра миллиметрового диапазона «КВАРК» б) модуля для измерения магнитоимпеданса. Серым цветом выделены элементы Q-SPECTR

Радиоспектрометр «КВАРК» позволяет исследовать ЭПР в веществах в частотном диапазоне 38-70 ГГц в полях до 2 Т. Электромагнитная волна из СВЧ-генератора 1 попадает в резонансную ячейку с образцом 2. Ячейка расположена между концентраторами магнитного поля электромагнита 3 с блоком питания 4. После детектирования и усиления сигнал подается на вход второго канала АЦП 6. На вход первого канала АЦП подается сигнал с тесламетра 5, расположенного между концентраторами магнитного поля электромагнита 3. Далее данные в цифровой форме принимает ПК 7 с программой SPECTRUM — GL.

Модуль для измерения магнитоимпеданса позволяет исследовать эффект ГМИ в широкой полосе частот 10 МГц - 40 ГГц в полях от - 0.2 Т до + 0.2 Т. Электромагнитная волна из Network Analyzer PNA N5230A 1 облучает кювету с образцом 2, расположенную в зазоре электромагнита 3 с блоком питания 4. Отраженное излучение детектируется приемным портом. Значения магнитного поля, измеренные тесламетром 5, передаются в микроконтроллер 6. Микроконтроллер осуществляет оцифровку аналогового сигнала в реальном масштабе времени. После этого сигнал в цифровом виде передается в ПК. ПК, соединенный с Network Analyzer через локальную сеть Ethernet, получает значения действительной и/или мнимой части коэффициента отражения электромагнитной волны S_{11} от кюветы с образцом. Полученные данные отображаются на экране ПК в реальном масштабе времени в виде графической зависимости $S_{11} = f(H)$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Достоинства программы продемонстрированы серией контрольных экспериментов.

В миллиметровом диапазоне длин волн зарегистрированы ЭПР-спектры как хорошо изученных объектов (рубин - $Al_2O_3(Cr^{3+})$), так и активно исследуемых сегодня — перспективных наноструктурах — аморфного микропровода ($Fe_{69}Si_{16}B_{10}C_5$) [6]. Кроме того, были зарегистрированы СВЧ-спектры многослойной структуры $Fe/(Co/Cu)_{16}$ [1], демонстрирующие интенсивно изучаемый эффект Гигантского магнитного импеданса (ГМИ). Этапы анализа экспериментальных данных проиллюстрированы на рис. 2.

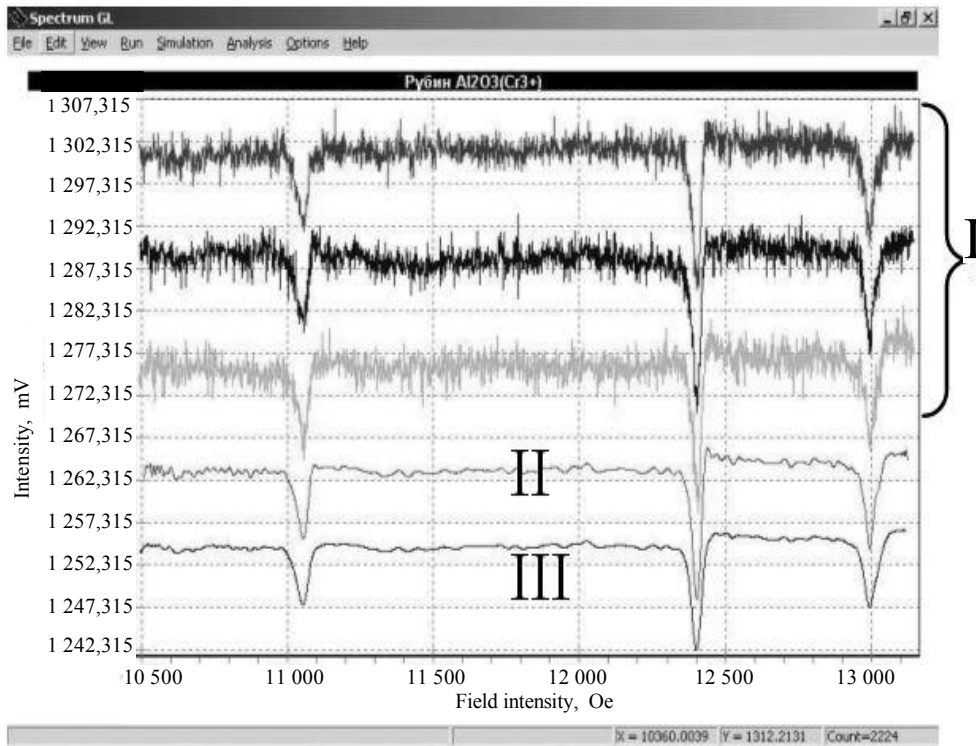
В ходе регистрации спектров:

На рис. 2а (I), 2б (I) показаны три последовательных реализации ЭПР-спектра. После аппроксимации каждой реализации произведено их статистическое усреднение рис. 2а (II), рис. 2б (II). Хорошо виден результат — значительное уменьшение величины случайных ошибок регистрируемого сигнала (величины шума). Последующая операция дополнительной фильтрации приводит к еще большему снижению шума рис. 2а (III), рис. 2б (III).

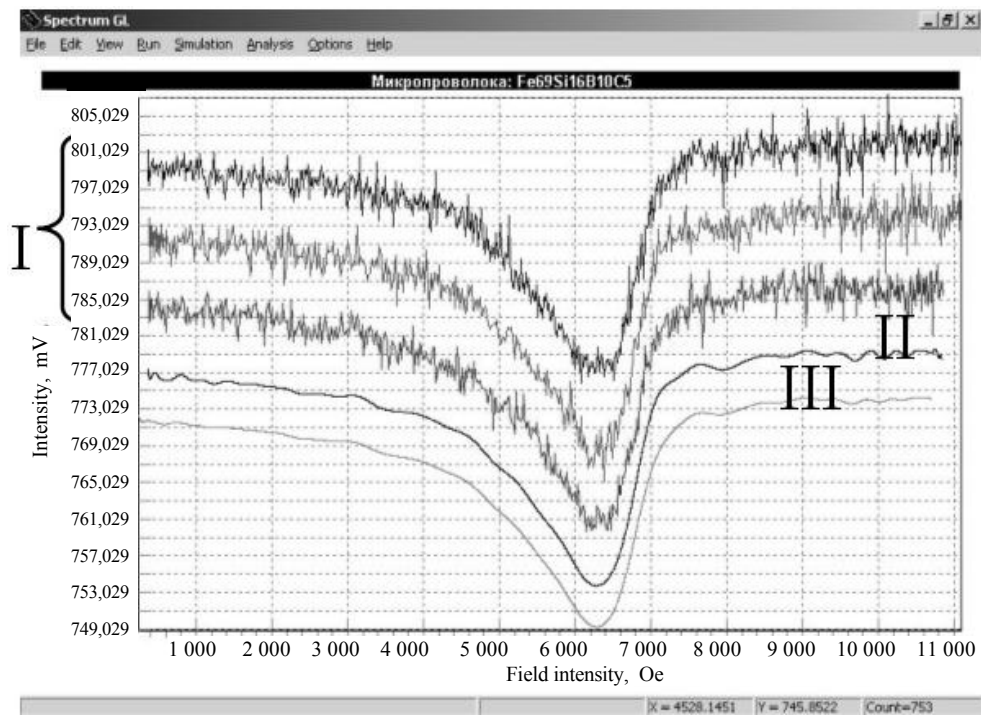
Запись спектров магнитного импеданса (рис. 3), проведенные в других методических условиях, демонстрирует тот же положительный эффект, что подтверждает универсальность разработанного Q-SPECTR.

Отличие этого эксперимента от приведенных на рис. 2а, 2б состоит лишь в том, что в данном случае по причине более низких аппаратурных шумов — не требуется проведения операции усреднения.

Как следует из рисунка, в результате использования осуществлено как увеличение отношения сигнал/шум в 20 раз, так и нивелирование случайных ошибок (заметных на одиночных реализациях спектров (I)).



a)



б)

Рисунок 2 – ЭПР-спектр: а) спектр рубина на частоте $f = 35,575$ ГГц; б) спектр микропровода $Fe_{69}Si_{16}B_{10}C_5$, $f = 37,454$ ГГц.

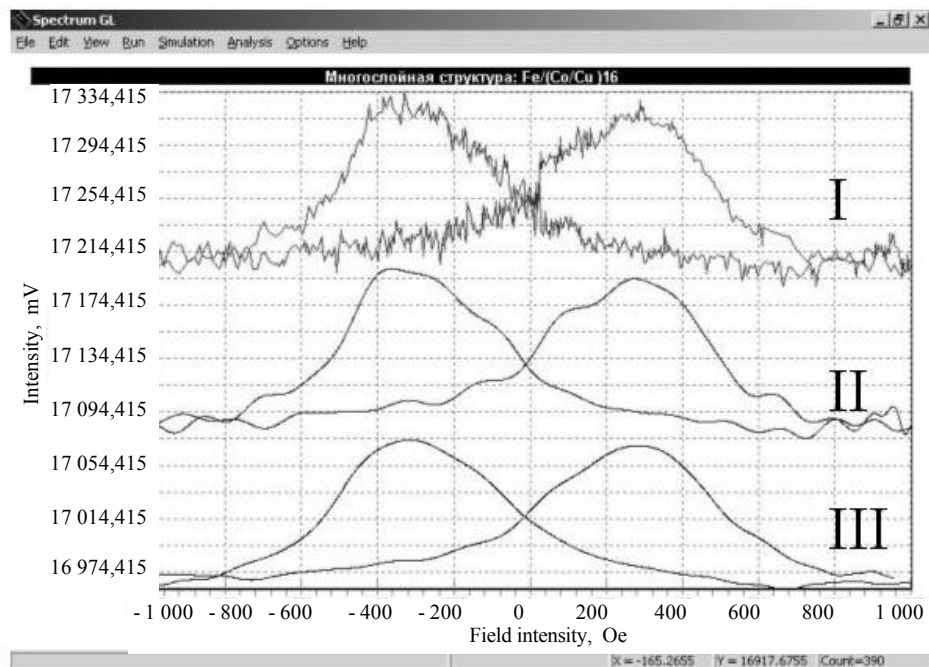


Рисунок 3 – Модуль коэффициента пропускания многослойной структуры $Fe/(Co/Cu)_{16}$ как функция магнитного поля $S_{11} = f(H)$, $f = 34,000000001$ ГГц

ВЫВОДЫ

Таким образом, в ходе данной работы разработан лабораторный образец программно-аппаратного комплекса Q-SPECTR для исследования спектральных свойств магнитных наноструктур в миллиметровом диапазоне радиоволн. В результате тестирования эксплуатационных параметров Q-SPECTR в процессе радиофизического эксперимента:

- обеспечена способность цифровой регистрации СВЧ-спектров и проведение экспресс-анализа результатов;
- экспериментально показана способность поднять соотношение сигнал/шум регистрируемых спектров не менее чем в 20 раз.

SUMMARY

In this paper the design features have been shown and the main principles of function of software-hardware complex for the measuring of spectral characteristic in millimeter waveband. During the analysis of test experimental results by the registration of magnetoimpedance and magnetoimpedance spectrums the positive advantages of the complex have been demonstrated.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рощенко С.Т., Равлик А.Г. и др. Магниторезистивные и магнитные свойства мультислойных структур Co/Cu с переменным числом слоев // Физика металлов и металловедение. – 2000. – 90, №3. – С. 58-64.
2. Ходзицкий М.К., Гирич А.А. Программно-аппаратный комплекс для ЭПР-измерений // Материалы 10-го молодежного форума "Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке". – 2006. – С. 54.
3. Girich A.A., Khodzitskiy M.K. Program for processing and analysis of data for automatized measuring system of ESR-spectroscopy // Материалы 10-го молодежного форума "Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке". – 2006. – С. 572.
4. Printed Version of PNA Help Agilent Technologies PNA Series Network Analysers, 2004.
5. V.N.Derkach, S.V.Nedukh, A.G.Ravlik, I.G.Shipkova, S.T.Roschenko, S.I.Tarapov, High Frequency Properties of Co/Cu Multilayer Structures In Millimeter Wavelengths Band // Radiophysics and Electronics. – 2002. – V.7, N1/ – P.115-118.
6. Yildiz, Rameev B.Z., Tarapov S.I., Tagirov L.R., Aktas B. High-frequency magnetoimpedance absorption in amorphous magnetic microwires // JMMM. – 2002, 247. – P.222-229.

Поступила в редакцию 21 июля 2006 г.