

## Электроника

УДК 620.17

### Электронный модуль для анализа спектра ферромагнитного резонанса

А.Н. КУПО, Е.А. КОВАЛЕВ

Описана методика исследования кинетики дислокационной структуры поверхности никеля при фрикционном воздействии методом ферромагнитного резонанса (ФМР). Описана принципиальная и электрическая схема электронного модуля, сопряжённого с радиоспектрометром ФМР. С использованием разработанного электронного устройства и программного обеспечения проведены исследования зависимости интенсивности отражённого электромагнитного поля от напряжённости внешнего магнитного поля для ряда образцов. Осуществлена автоматизация регистрируемых параметров с использованием аналого-цифрового преобразователя (АЦП).

**Ключевые слова:** метод ферромагнитного резонанса, автоматизация измерений, электронный модуль, аналого-цифровой преобразователь.

The technique for studying the kinetics of the dislocation structure of the nickel surface under frictional action by the method of ferromagnetic resonance (FMR) is studied. The basic and electrical circuits of the electronic module interfaced with the FMR radio spectrometer are described. Using the developed electronic device and software, investigations of the dependence of the intensity of the reflected electromagnetic field on the intensity of the external magnetic field for a number of samples were carried out. The recorded parameters were automatized using an analog-digital converter (ADC).

**Keywords:** ferromagnetic resonance method, measurement automation, electronic module, analog-to-digital converter.

**Введение.** В кристаллических твердых телах (в частности, в металлах) при трении протекают физические и физико-химические процессы, обусловленные микродеформациями и механическими напряжениями в поверхностных слоях.

Микромеханические свойства поверхности при нагруженном фрикционном контакте металлов определяются, как увеличением плотности дислокаций, их перемещениями и взаимодействием между собой, так и дефектами кристаллического строения материала.

Среди факторов, определяющих распределение дислокаций в поверхностном слое металла, можно выделить следующие:

- окисление поверхности и образование хрупких пленок окислов;
- коррозия поверхности или отдельных ее участков;
- влияние поверхностно-активных веществ (ПАВ) (при их наличии, например, в смазке).

Для экспериментального изучения структурных аспектов поверхностных слоёв металлов при трении, исследования кинетики дислокационной структуры в этих слоях используется метод ферромагнитного резонанса (ФМР). Идея метода заключается в том, что плотность дислокаций в поверхностном слое оказывает существенное влияние на магнитные свойства ферромагнетиков. В частности, это влияние на ширину линии напряжённости магнитного поля ( $\Delta H$ ) при ФМР обусловлено тем, что при наличии линейных дефектов в кристалле в электронном энергетическом спектре возникают полосы локализованных спиновых возбуждений, которые носят характер плоских волн. Такие возбуждения принято называть «спиновые волны» [1], [2]. Разность энергий энергетических уровней этих возбуждений соответствует величине энергии кванта, в диапазоне сверхвысоких частот (СВЧ), что даёт возможность для изучения дислокационной структуры методом ФМР. СВЧ электромагнитные колебания вызывают резонанс при взаимодействии с поверхностью металла, в результате которого происходит интенсивное поглощение энергии электромагнитного поля спиновой системой.

В настоящее время метод ФМР представляет собой самостоятельную научную область, и является эффективным методом изучения внутренних свойств ферромагнитных материалов [1]–[3]. Влияние плотности дислокаций на  $\Delta H$  проявляется в материалах с ненулевой константой магнитострикции. По причине явления магнитострикции упругое напряжение вокруг дислокаций, порождаемых поверхностной деформацией ферромагнетика, например, при фрикционном воздействии, вызывает появление дополнительного магнитного поля  $H_{don}$  в ферромагнитном образце. Это приводит к смещению резонансных частот переменного электромагнитного поля, что проявляется как уширение линии ферромагнитного резонанса, и может быть зарегистрировано методом ФМР. Влияние сформировавшейся дислокации на резонансное усиление определяется следующими соотношениями [2]:

$$\omega_{рез} = \gamma \cdot H_{эфф}, \quad (1)$$

$$H_{эфф} = H_o + H_{don}, \quad (2)$$

где  $H_{don}$  – дополнительная напряжённость локального магнитного поля в окрестности дислокации, обусловленная механическим напряжением,  $\omega_{рез}$  – частота резонанса,  $H_o$  – напряжённость внешнего магнитного поля,  $\gamma$  – коэффициент пропорциональности.

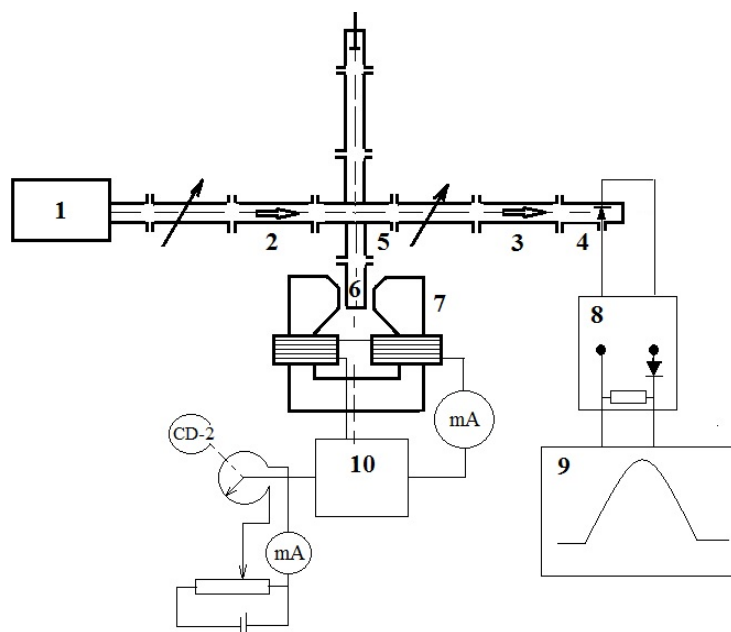
Целью данной работы является повышение точности, чувствительности и разрешающей способности метода ФМР. Для достижения этой цели был автоматизирован процесс монотонного изменения напряжённости постоянного магнитного поля с последующим преобразованием аналогового сигнала поглощённого электромагнитного поля в цифрой. Полученный сигнал подвергается обработке с помощью специального программного обеспечения, и затем рассчитывается плотность дислокационной структуры поверхностного слоя ферромагнитным материалом и анализируется кинетика её изменения при трении.

**Методика эксперимента и схема измерительного модуля.** В исследованиях ФМР аппаратная часть измерительного модуля определяется особенностями частотного диапазона переменных электромагнитных полей, в котором находятся нормальные колебания спиновой системы. В исследованиях характеристики резонансного поглощения энергии электромагнитного поля определяются путём измерения отклика волноводных систем, содержащих исследуемые ферромагнитные образцы.

ФМР возникает во взаимноперпендикулярных магнитных полях и переменном поле в СВЧ диапазоне. Как правило, регистрируется либо объёмное поглощение энергии СВЧ поля, либо коэффициент отражения волны от поверхности образца. В случае металлов, ввиду малой глубины проникновения поля СВЧ (скин-слой), измеряются параметры отраженной электромагнитной волны. При резонансных измерениях образцы располагаются в резонаторе волнового типа. Для регистрации сигнала с применением формулы (1) необходимо варьировать или напряжённость внешнего магнитного поля  $H_o$  или частоту поля СВЧ посредством клистронного генератора. Технически удобнее реализовать изменение  $H_o$  с помощью электромагнита, а частоту клистрона стабилизировать.

Радиоспектрометр ФМР разработан и изготовлен по типу аппаратуры волноводной мостовой схемы. Его принципиальная схема приведена на рисунке 1 [4].

Линия резонансного поглощения регистрировалась на частоте 9400 МГц отражённой электромагнитной волны с применением амплитудной модуляции клистронного генератора напряжением прямоугольной формы и частоты 1 кГц, подаваемым на отражатель клистрона. При этом было реализовано термостатирование клистронного генератора СВЧ-поля посредством помещения клистрона типа К-129 М в ёмкость с трансформаторным маслом. Была достигнута чёткая стабилизация рабочей частоты внешнего электромагнитного поля, достигнута высокая чувствительность измерительной схемы благодаря применению резонатора отражательного типа.



1 – генератор сигналов (51-И); 2, 3 – ферритовые вентили; 4 – детектор;  
5 – двойной тройник; 6 – резонатор; 7 – электромагнит; 8 – усилитель 28-ИМ;  
9 – электронный модуль анализа спектра ФМР; 10 – источник питания УИП-1

Рисунок 1 – Принципиальная схема радиоспектрометра ФМР

Ввиду сильных сигналов резонансного поглощения упрощена методика эксперимента, конечным результатом которой явилось использование способа регистрации кривой поглощения без компенсации и подстройки резонатора и без компенсации с подстройкой резонатора. Величина добротности связи резонатора с измерительной частью схемы составляла  $\approx 10^{-102}$  и определялась размерами окна связи, которые составили  $8 \times 10$  мм.

В качестве объектов исследования были выбраны поликристаллический и монокристаллический никель (Ni) повышенной чистоты 99,99 %, а также сплав никеля с железом 78 Ni – 22 Fe (пермаллой). В пермаллое константа магнитоstriction  $\lambda$  равна нулю и уширение линии ФМР с деформацией отсутствовало (эталонный образец).

Электрическая схема изменения магнитного поля на индуктивной катушке (соленоиде) приведена на рисунке 2. Увеличение величины напряжённости магнитного поля на катушке осуществляется увеличением напряжения на катушке с помощью реостата.

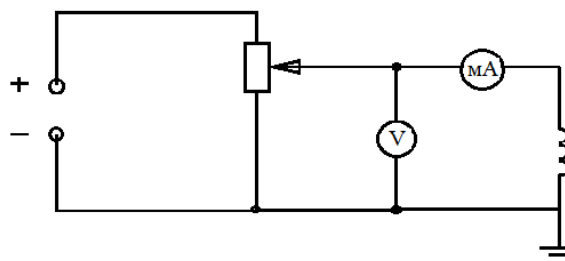


Рисунок 2 – Электрическая схема изменения величины магнитного поля на соленоиде

В представленной схеме реализовано две функции: регистрация линии поглощения ферромагнитным образцом (входной канал А (см. рисунок 3)); плавное изменение напряжённости магнитного поля путём увеличения величины напряжения от 1 до 300 В между полюсами индуктивных катушек, где расположен исследуемый образец (входной канал В (рисунок 3)). Оригинальная электрическая схема автоматизации спектрометра ФМР представлена на рисунке 3. В данной схеме предусмотрены: аналогово-цифровой преобразователь (АЦП), контролер, усилитель, а так же USB интерфейс для подключения к компьютеру и последующей программной обработке результатов измерений.

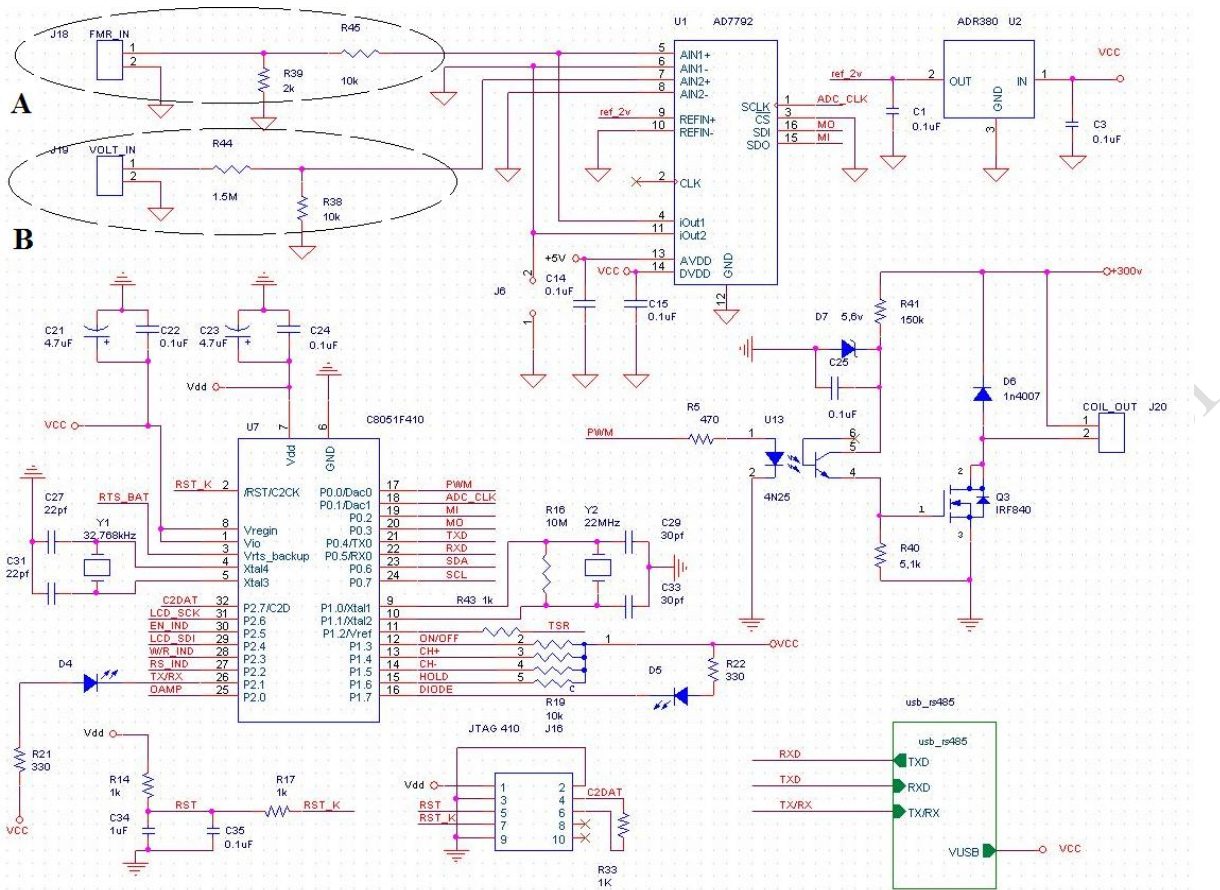


Рисунок 3 – Электрическая схема автоматизации спектрометра ФМР

Входная часть автоматизированного модуля состоит из 16 битового аналогового цифрового преобразователя (АЦП), имеющего два входных канала для сигналов А и В. АЦП типа AD7792 используется для автоматизации промышленных процессов, оцифровки аналоговых сигналов с датчиков различного назначения. Входной сигнал, поступающий на вход АЦП, находится в диапазоне 2,7–5,25 В. Преимущества данного АЦП: низкая мощность потребления энергии (величина тока составляет 400 мкА); низкий уровень шумов (40–85 нВ) позволяет использовать его для высокоточных измерений. Частота обмена данными АЦП: 4,17–470 Гц. Используется аппаратный фильтр подавления.

АЦП одновременно регистрирует напряжения каналов А и В с частотой 0,5 Гц и передает цифровые данные сигналов в контроллер C8051F410 Silicon Lab. Контроллер обрабатывает сигналы и передает на компьютер через USB интерфейс, сделанный на базе микросхемы FT232RL, электрическая схема которого представлена на рисунке 4.

С помощью разработанного программного обеспечения в среде моделирования «Labwindows CVI» осуществляется автоматическая регистрация линии поглощения ферромагнитным образцом в зависимости от напряжения на катушке электромагнита. Программа осуществляет регистрацию и расчёт площади поглощения электромагнитного поля ферромагнетиком, ширину линии поглощения, величину напряжённости внешнего магнитного поля, при котором интенсивность поглощения поля максимальна.

Расчёт уширения линии ферромагнитного резонанса осуществляется путём определения разницы линий ферромагнитного резонанса исходного и деформированного в результате фрикционного нагружения образцов. Ширина линии ферромагнитного резонанса определяется по графику зависимости интенсивности отражённого электромагнитного поля от напряжённости внешнего магнитного поля как разность значений, соответствующих изменению резонансной частоты.

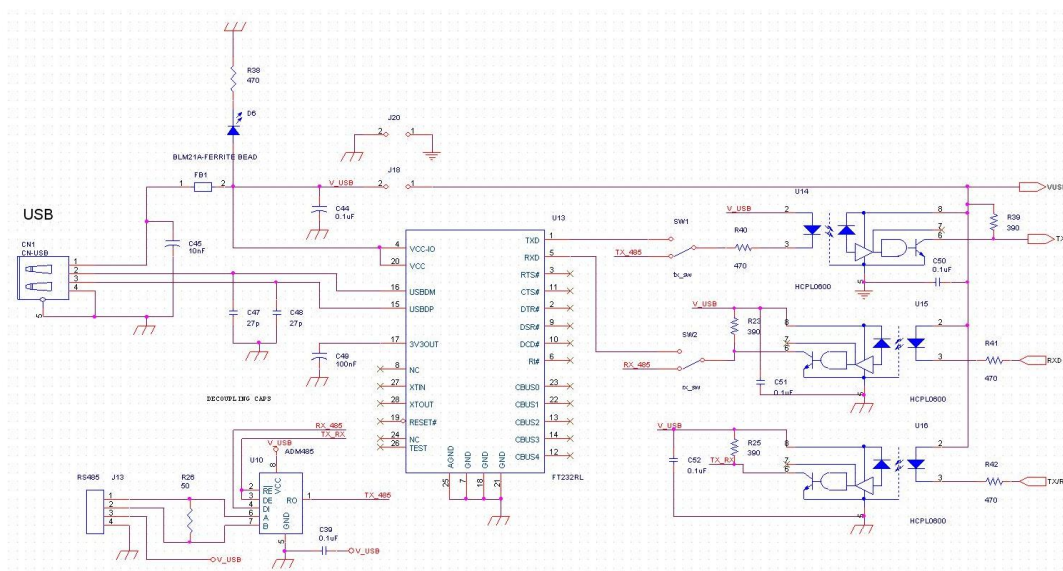


Рисунок 4 – Электрическая схема USB интерфейса электронного модуля ФМР

Интенсивность поглощённого электромагнитного поля прямо пропорциональна числу элементарных резонансов – электронов, обладающих некомпенсированным магнитным моментом. Информация, полученная представленным методом, позволяет сделать выводы, как о кинетике плотности дислокаций в ферромагнетике и её монотонном увеличении при обычных методах деформации (прокатка, сжатие и др.), так и о циклическом изменении плотности дислокаций с течением времени, и накоплении энергии упругих и пластических деформаций.

**Заключение.** На базе микроконтроллера C8051F410 разработан электронный модуль для непрерывного изменения напряжённости магнитного поля на соленоиде радиоспектрометра ФМР путём плавного изменения напряжения в диапазоне 1–300 В. Использование аналого-цифрового преобразователя (АЦП) в представленном модуле посредством USB интерфейса позволяет исследовать оцифрованный аналоговый сигнал интенсивности поглощённого электромагнитного поля с помощью разработанного программного обеспечения в среде «Labwindows CVI». Кроме того, осуществлена автоматизация процесса регистрации параметров эксперимента, что повышает точность определения уширения линии ФМР, делает исследования кинетики плотности дислокаций объективными и достоверными.

В частности, показано, что в поликристаллическом и монокристаллическом никеле с увеличением степени пластической деформации ширина линии ФМР возрастает, а при фрикционном нагружении имеет место циклический характер изменения плотности дислокаций, что согласуется с известными результатами [5].

## Литература

1. Stroh, A.N. The formation of cracks in plastic flow / A.N. Stroh // Proc. Royal Society. – 1955. – Vol. 232 A, № 1191. – P. 548–560.
2. Вествуд, А.Р. Чувствительных механических свойств к действию окружностей среды / А.Р. Вествуд – М. : Изд. Мир, 1972. – 176 с.
3. Хирт, Д. Теория дислокаций / Д. Хирт, Н. Лоте. – М. : Атомиздат, 1972. – 569 с.
4. Гуревич, А.Г. Измерение параметров ферритов на сверхвысоких частотах / А.Г. Гуревич, Е.И. Головечиц, С.С. Старобинец, А.П. Сафантиевский // Физические методы исследования. – 1962. – Т. XXVII, № 2. – 456 с.
5. Пинчук, В.Г. Кинетика упрочнения и разрушения поверхности металлов при трении / В.Г. Пинчук, С.В. Короткевич // Saarbrucken : LAP Lambert Academic Publishing, 2014. – 180 с.