



УДК 59.29.33

Е. Г. Бишард, М. П. Цепич

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Устройство для измерения намагниченности материалов со специализированными магнитными свойствами на образцах малого объема в заводских условиях

Изложены особенности испытаний магнитных материалов на образцах малых размеров с невысокими значениями намагниченности с помощью вибрационного метода в заводских условиях. Показано, что современные зарубежные установки весьма дорогостоящие и требуют для своей эксплуатации высококвалифицированной поддержки. Отмечено, что в заводских условиях существенную роль приобретают вопросы помехозащищенности. Приведена структурная схема магнитометра для определения намагниченности насыщения и кривой намагничивания ферритов СВЧ. Предложен способ повышения помехоустойчивости за счет схемотехнических решений. Даются рекомендации по применению для намагничивания феррита СВЧ специальных источников магнитного поля, выполненных на постоянных магнитах. Рассмотрена конструкция поворотного устройства, на котором размещены два постоянных магнита, вращающихся относительно неподвижных полюсных наконечников, в зазоре которых размещен испытуемый образец, и создающая постоянное магнитное поле $\pm 0,6$ Тл.

Вибрационный магнитометр, вибрационный метод, ферриты СВЧ, постоянные магниты

Виды магнитных материалов, методы измерения намагниченности. Научные успехи в области физики магнитных материалов, появление материалов, обладающих уникальными свойствами и, что особенно важно, разработанные технологии промышленного производства привели к расширению их применения в столь важных областях как микроэлектроника, радиотехника, компьютерные технологии, биомедицина и др. Прежде всего следует отметить материалы специализированного назначения, такие как ферриты СВЧ, материалы с прямоугольной петлей гистерезиса, магнитные пленки, материалы со специфическими доменными структурами (в т. ч. композиционной), которые выполняют функции носителей информации, способны обеспечить высокие плотность и помехозащищенность ее записи, хранения и обработки. Весьма перспективны и аморфные магнитные материалы.

В последнее время большой интерес вызывает новый класс материалов, содержащих в своем составе наноразмерные элементы – наноструктурированные магнитные материалы [1]. Магнит-

ные материалы обладают способностью при внесении их в магнитное поле намагничиваться, а некоторые из них сохраняют свою намагниченность и после прекращения воздействия магнитного поля. Магнитными материалами могут быть различные сплавы, химические соединения, жидкости.

К магнетикам относятся практически все вещества (ни у какого из них магнитная восприимчивость не равна нулю), большинство из них относится к классам:

1) диамагнетиков (имеют небольшую отрицательную магнитную восприимчивость, и несколько ослабляют магнитное поле);

2) парамагнетиков (имеют небольшую положительную магнитную восприимчивость и несколько усиливают магнитное поле);

3) чаще всего встречаются ферромагнетики (имеют большую положительную магнитную восприимчивость и намного усиливают магнитное поле) [1].

Последний класс представляет большой интерес, так как ферромагнитные материалы играют важную роль в электротехнике. Они позволяют

получать сильные магнитные поля и конструировать электромагнитные устройства, обладающие заданными характеристиками, при относительно небольших напряженностях. Одним из важнейших параметров ферромагнитных материалов является намагниченность насыщения – величина, которая при анализе характеристик СВЧ-устройств входит во многие расчетные соотношения.

Естественно, что на первый план выдвигается задача по определению характеристик таких материалов, причем обойтись только традиционными методами магнитных измерений не удастся [2]. Появляются новые и совершенствуются старые методы определения магнитных свойств этих материалов с учетом их уникальных особенностей. Это разновидности вибрационных методов, методы магнитных резонансов, СКВИД-магнитометрия, магнитосиловая сканирующая зондовая микроскопия и др. Одними из отличий, которые необходимо учитывать при разработке магнитной аппаратуры на этом этапе, являются малый размер образцов для испытания и в ряде случаев малое количество исследуемого вещества, а также слабость магнитных эффектов, особенно присущих наноструктурам. Это приводит к тому, что измерительные приборы должны обладать очень высокой чувствительностью и высокой помехозащищенностью при сохранении достаточной точности.

Измерение намагниченности СВЧ-материала. Рассмотрим, как решается в настоящее время задача измерения намагниченности СВЧ-материала, широко используемого в радиотехнических устройствах. Для создания оптимальных ферритовых СВЧ-устройств с высокими метрологическими свойствами применяют ферритовые вкладыши с определенными наперед заданными магнитными характеристиками, имеющими достаточно жесткий допуск по параметрам намагниченности. Традиционные способы измерения кривой намагниченности феррита на образцах, изготовленных специально для этих целей в виде торов, позволяют определить некую усредненную величину для партии ферритов. Из-за сложности технологии производства таких материалов наблюдаются значительные отклонения их свойств по объему и полученные результаты могут служить лишь для ориентировочных расчетов при построении конкретных устройств. Это обстоятельство приводит к необходимости контролировать параметры на готовых образцах (вкладышах), имеющих сравнительно малые размеры: диаметр 0.8...1.2 мм, сравнительно низкую намагниченность $J \approx 16$ кА/м. Интерес представ-

ляет и характер ее изменения в широком диапазоне постоянных полей с напряженностью H .

Наиболее распространенным для этих целей методом измерения намагниченности является индукционный метод и его разновидность – вибрационный метод, на основе которого американский ученый С. Фонер одним из первых в 1963 г. создал серийно выпускаемый вибрационный магнитометр FM-1.

Идея метода иллюстрируется рис. 1, где 1 – испытуемый образец объема V с намагниченностью J , расположенный в постоянном магнитном поле H ; 2 – приемные катушки; 3 – источник постоянного магнитного поля; 4 – измерительное устройство.

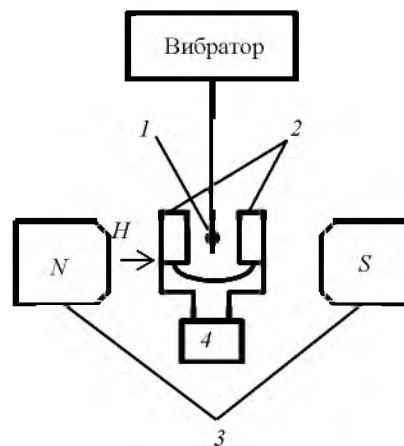


Рис. 1

Возникшее при этом электромагнитное поле, характеризуемое осциллирующим магнитным моментом (образец в виде диполя представлен на рис. 2), может быть измерено с помощью приемных катушек 2. По его магнитной составляющей можно судить о намагниченности образца.

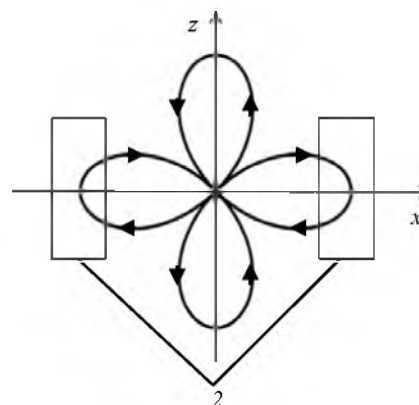


Рис. 2

Если с помощью вибратора придать образцу колебательное движение с частотой ω в направлении, перпендикулярном полю H , то в приемных катушках наводится ЭДС:

$$e = KVA\omega J,$$

где K – коэффициент, зависящий от расположения и геометрических размеров катушек; A – амплитуда колебаний образца.

При постоянных значениях K , V , A и ω показания измерительного устройства могут быть проградуированы в единицах намагниченности.

В статье Г. С. Кускова и Л. В. Ларионова [3], изданной в 1970 г. и не устаревшей до нашего времени, проведен подробный анализ вибрационного метода, рассмотрены причины погрешностей измерения намагниченности и структурные схемы построения этих приборов отечественными и зарубежными производителями.

Технические трудности при реализации вибрационных магнитометров. В настоящее время несколько известных зарубежных приборостроительных фирм выпускают вибрационные магнитометры для исследования материалов со специфическими магнитными свойствами на образцах малых размеров и даже на пленочных образцах в широком диапазоне полей и температур. Как показывает опыт, реализация подобных приборов наталкивается на значительные технические и схемотехнические трудности, связанные с необходимостью повышения чувствительности, точности и помехозащищенности. В первую очередь это проблемы при разработке механической части, обеспечивающей постоянство амплитуды и частоты колебания образца и жесткую фиксацию его в намагничивающем поле. Другая трудность заключается в определении оптимальных размеров катушек и их размещении относительно электромагнита и образца. Общей задачей является выбор структурной схемы и ее элементов с точки зрения измерения входных сигналов очень низкого уровня (порядка нановольт).

Начиная с 2013 г. фирмой «Lake Shore Cryotronics Inc» (США) выпускается линейка вибрационных магнитометров VSM-серии (VSM-7400). Три базовые модели серии различаются величиной зазора между полюсами и максимальным значением намагничивающего поля. Аналогичными возможностями обладает установка фирмы «Cryogenic Limited», изготовленная в Великобритании. Большой интерес представляет магнитометр для научных исследований, измеряющий намагничиваемость исследуемых веществ непосредственно в процессе их химических превращений, т. е. при контроле состава газовой среды и в диапазоне температур 70...1200 К [6].

Следует отметить, что перечисленная аппаратура является дорогостоящей, требует специальной установки и высококвалифицированной технической поддержки. Кроме того, в условиях

промышленной эксплуатации перечисленные трудности усиливаются из-за наличия широкого спектра различных помех (от сетевых до климатических). В связи с этим актуальным остается вопрос разработки отечественных приборов, обеспечивающих достаточный уровень решения практических задач в заводских условиях и являющихся менее затратными.

Отечественные промышленные магнитометры. Отечественные установки по типу, описанному в [3], [4], дают хороший результат как для лабораторных, так и для производственных цеховых испытаний. На рис. 3 приведена структурная схема вибрационного магнитометра для измерения зависимости намагниченности СВЧ-феррита от напряженности постоянного магнитного поля [4].

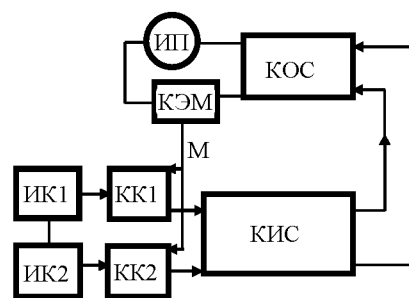


Рис. 3

Схема построена по принципу компенсационного преобразования за счет применения вибрирующей с частотой ω катушки эталонного момента (КЭМ), связанной с компенсационными катушками (КК) индуктивной связью (М). Она обеспечивает стабилизацию частоты и амплитуды колебания образца. Здесь ИК1, ИК2 – измерительные катушки, в которых наводится ЭДС; КК1, КК2 – компенсационные катушки, в которых наводится ЭДС обратной связи путем индукционной связи с катушкой эталонного момента; КИС – измерительный канал; КОС – канал для создания отрицательной обратной связи; ИП – измерительный прибор для измерения намагниченности после калибровки образца.

Вместо аналогового измерительного прибора можно использовать цифровой преобразователь с выходом на персональный компьютер.

Высокие помехозащищенность и чувствительность обеспечиваются схемотехнически применением при построении измерительного канала синхронного детектирования с предварительной фильтрацией сигнала при помощи избирательных цепей [8], [9].

Регулируемый источник магнитного поля на постоянных магнитах. Все перечисленные вибрационные магнитометры для получения магнитного поля используют электромагниты, питаемые от ре-

гулируемых источников тока, а в ряде случаев и сверхпроводящие соленоиды. Применение электромагнитов для создания больших полей требует очень мощных источников тока. Такие устройства вносят погрешности из-за наличия дополнительных блоков питания, связанных общей сетью.

Для создания постоянного магнитного поля целесообразно применить простой и надежный механический способ регулирования поля с помощью специальной магнитной системы, состоящей из двух постоянных магнитов и полюсных наконечников, в зазоре которых расположен испытуемый элемент (рис. 4).

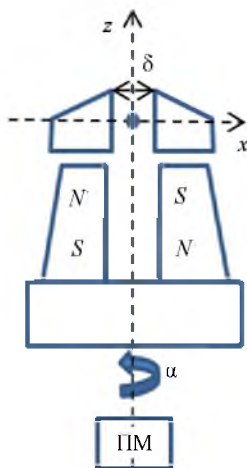


Рис. 4

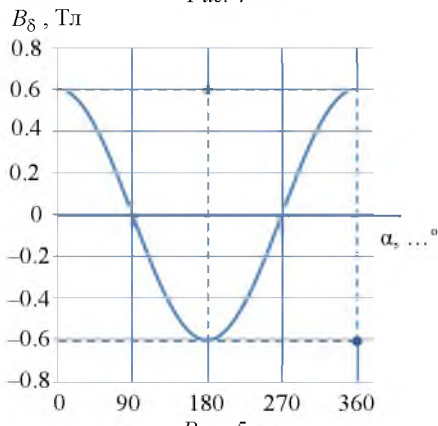


Рис. 5

Два постоянных магнита установлены на магнитной платформе, служащей в качестве магнитопровода. При помощи специального механического устройства в виде поворотного стола платформа может поворачиваться на угол α от 0 до 360° относительно неподвижных полюсных наконечников конической формы. Такая система обеспечивает в зазоре $\delta = 2.5$ см индукцию $B_{\delta} = \pm 0.6$ Тл. На рис. 5

приведена получаемая при этом зависимость индукции от угла поворота $B_{\delta} = f(\alpha)$.

Для установки требуемого значения поля необходимо выставить на основной шкале поворотного стола значение угла, которое соответствует этому полю. Для точной установки предусмотрена нониусная шкала на его маховике. Регулируемая магнитная система проградуирована в единицах напряженности методом компарирования с высокой точностью (0.2 %). Такой способ создания поля применен в вибрационном магнитометре, разработанном на кафедре ИИСТ СПбГЭТУ «ЛЭТИ» [5].

Остановимся на преимуществах такой системы по сравнению с электрическими методами регулирования полей. В первую очередь отметим высокую стабильность поля во времени и практическое отсутствие влияния климатических условий (температуры). Это достигается выбором материала постоянного магнита (ЮНДК24) и частичным размагничиванием полностью намагниченной в собранном виде системы с помощью специальной импульсной установки, также разработанной на кафедре ИИСТ.

Поскольку на точность измерения намагниченности оказывает влияние неоднородность поля по объему межполюсного зазора, то при выборе геометрических размеров конических полюсных наконечников были учтены рекомендации, касающиеся соотношений между их размерами и формой [7].

Предложенная система обеспечивает однородность поля не менее чем 10^{-2} .

Материал полюсных наконечников и их геометрические размеры выбираются в зависимости от размеров испытуемого образца, а также от размеров и местоположения измерительных (приемных) катушек, чтобы уменьшить так называемый зеркальный эффект полюсных наконечников.

Масса регулируемого магнитного источника постоянного магнитного поля составляет порядка 80 кг.

Таким образом, описанное устройство с регулируемым источником магнитного поля на постоянных магнитах может быть эффективно использовано в заводских условиях на промышленных предприятиях для измерения намагниченности СВЧ-ферритов, а также для испытаний других материалов со специализированными магнитными свойствами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гареев К. Г., Мирошкин В. П. Физические основы магнитных материалов: учеб. пособие /под общ. ред. В. П. Мирошкина. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014.

2. Преображенский А. А., Бишард Е. Г. Магнитные материалы и элементы: учеб. для студентов вузов по

специальности «Полупроводники и диэлектрики». 3-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк., 1986.

3. Кусков Г. С., Ларионов Л. В. Измерение намагниченности насыщения СВЧ-материалов вибрационными магнитометрами // Обзор по электронной технике. Сер. Ферритовая техника. 1970. Вып. 4.

4. Вибрационный магнитометр / Е. Г. Бишард, Г. С. Кусков, А. М. Полонский, А. А. Преображенский; под ред. А. М. Фремке // Информационно-измерительная техника. Л.: Изд-во Ленинград. ун-та, 1973.

5. Бишард Е. Г. Устройство для определения зависимости намагниченности ферритовых образцов малых размеров от напряженности поля // Измерительная техника / ЛЭТИ. Л., 1973.

6. Вибрационные магнитометры LakeShoreCryotronicshttp. URL: //www.cryotrade.ru/lakeshore_vibro_magnet.html (дата обращения 03.05.2017).

7. Преображенский А. А., Шарыгин Н. В., Васильев Б. В. Расчет зависимости изменения напряженности магнитного поля при варьировании рабочего зазора системы в заданных пределах // Изв. вузов. Приборостроение. Т. 19, № 2. Л.: Изд-во Ленингр. ин-та точной механики и оптики, 1976.

8. Бедов Ю. С., Лукин Е. В., Романцов М. П. Анализ методов уменьшения порога чувствительности широкополосных средств измерения первой производной по времени от магнитной индукции. М.: Приборостроение, 2013. № 8.

9. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники. М.: Мир, 1998.

E. G. Bishard, M. P. Cepich
Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

DEVICE FOR MEASURING THE MAGNETIZATION OF MAGNETIC MATERIALS WITH SPECIALIZED PROPERTIES ON SAMPLES OF SMALL VOLUME IN THE FACTORY

Given the peculiarities of testing of magnetic materials on samples of small dimensions with low values of the magnetization by using vibration method in the factory. It is shown that modern foreign units are very expensive and require for its operation highly qualified support. Noted that the industrially significant role, issues of jamming protection. The block diagram of the magnetometer to determine the magnetization of saturation and the magnetization curve of the ferrite microwave. The proposed method improve the noise immunity of circuit design. Recommendations for use to magnetize a ferrite microwave special sources of magnetic fields made of permanent magnets. Describes the design of a rotary device that hosts two permanent magnet rotating relative to the fixed pole pieces in the gap which placed the sample under test, and creates a constant magnetic field of ± 0.6 T.

Vibrating magnetometer, a vibrating method, a microwave ferrites, permanent magnets

УДК 620.179.16

Б. Ч. И, Р. С. Коновалов, С. И. Коновалов,
А. Г. Кузьменко, И. Ю. Ошурков, В. М. Цаплев
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Экспериментальное исследование возможности снижения длительности переходного процесса в системе излучения-приема

Рассмотрен импульсный режим работы системы излучения-приема, состоящей из двух идентичных пьезокерамических пластин. В качестве иммерсионной среды использован глицерин. Возбуждение излучателя осуществлялось электрическими сигналами сложной формы. Экспериментально установлено, что применение сложного сигнала позволяет существенно снизить длительность электрического импульса на выходе приемника по сравнению со случаем, когда излучатель возбуждался одним полупериодом синусоиды на частоте антирезонанса. Показано удовлетворительное соответствие экспериментальных данных результатам теоретических исследований.

Система излучения-приема, пьезопреобразователь, метод Даламбера, акустический импульс, электрический импульс, компенсирующий импульс

Исследованию импульсного режима работы пьезопреобразователей традиционно уделяется серьезное внимание в нашей стране и за рубежом.

Обеспечение возможности излучения и приема акустических сигналов, имеющих малую длительность (всего лишь несколько полупериодов