

УДК 543.08

**ИССЛЕДОВАНИЕ
ЕМКОСТНЫХ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
ДАТЧИКОВ МАГНИТНОГО ПОЛЯ**Д.О. Зятков¹, А.В. Юрченко¹, В.Б. Балашов², В.И. Юрченко²,
А.Д. Мехтиев³¹Томский политехнический университет²Научно-исследовательский

институт полупроводниковых приборов, г. Томск

³Карагандинский государственный технический университет,
г. Караганда, КазахстанE-mail: zyatkov_do@niipp.ru; niipp@inbox.ru;
drigalkin53@mail.ru; yurchenko_vi@niipp.ru

Зятков Денис Олегович, аспирант Института неразрушающего контроля ТПУ. E-mail: zyatkov_do@niipp.ru
Область научных интересов: электромагнитные поля, электрофизика магнитных жидкостей.

Юрченко Алексей Васильевич, д-р техн. наук, профессор кафедры информационно-измерительной техники Института неразрушающего контроля ТПУ, руководитель направления солнечной энергетики. E-mail: niipp@inbox.ru

Область научных интересов: возобновляемые источники энергии.

Балашов Владимир Борисович, инженер-технолог НИИ полупроводниковых приборов, г. Томск.

E-mail: drigalkin53@mail.ru
Область научных интересов: полупроводниковая электроника.

Юрченко Василий Иванович, начальник 110 отдела НИИ полупроводниковых приборов, г. Томск.

E-mail: yurchenko_vi@niipp.ru
Область научных интересов: СВЧ-электроника, методы и приборы контроля материалов и изделий, системы технического зрения, датчики.

Мехтиев Али Джаванширович, заведующий кафедрой «Технологии и системы связи» Карагандинского государственного технического университета, г. Караганда. E-mail: barton.kz@mail.ru

Область научных интересов: разработка методов повышения предела прочности и надежности конструктивных частей электромеханического оборудования.

В статье представлены результаты исследования чувствительного элемента емкостного датчика магнитного поля с мелкодисперсным магнитным наполнителем. Действие датчика основано на изменении емкости пластинчатого конденсатора с магнитным наполнителем от напряженности магнитного поля. Исследуется изменение емкости в зависимости от расстояния между обкладками, площади и объемного содержания магнитных частиц между электродами под действием внешнего магнитного поля. Рассмотрена структурная организация микрочастиц магнитного наполнителя в цепочечные агрегаты при воздействии внешнего магнитного поля. В качестве магнитного наполнителя использовали аморфный сплав железа дисперсностью менее 200 микрон. Представлена схема измерительной ячейки и описан эксперимент измерения емкости пластинчатого конденсатора. Представлены экспериментальные графики изменения емкости пластинчатого конденсатора от величины магнитного поля. Проведено измерение чувствительности емкостного датчика по магнитной индукции. Полученные результаты позволили оценить важность дальнейшей работы по данной теме в будущем.

Ключевые слова:

Магнитное поле, домены, пластинчатый конденсатор, анизотропия, цепочечные агрегаты, аморфный ферромагнетик.

Введение

Нанохимия магнитных материалов активно развивается в теоретическом и прикладном плане: магнитные жидкости, нанокластерные активные порошки, известные оттенки металлоорганической химии. Частицы малых размеров порядка 8...10 нм в магнитной жидкости вовлечены в интенсивное броуновское движение, за счет чего обеспечивается седиментационная устойчивость магнитной жидкости. Межчастичное диполь-дипольное взаимодействие магнитных моментов феррочастиц является причиной агрегационных явлений в ферроколоидах и, в частности, приводит к появлению особого типа структурных образований (агрегатов). Наиболее типичными для феррожидкостей представляются агрегаты в форме цепочек, магнитные

моменты которых сонаправлены. До сих пор представляется затруднительным дать точную характеристику этим объектам и объяснить их необычные свойства, однако данные материалы имеют огромный потенциал технологических применений.

При размерах магнитных частиц более десятков нанометров формируется мультидоменная магнитная структура. Домены (группа спинов, ориентированных в одном направлении и изменяющихся коллективно) разделены друг от друга доменными стенками. Они имеют характерный размер и соответствующие энергии образования и существования. В больших частицах образование доменов является энергетически выгодным процессом. При наноразмерах частиц разделение на домены энергетически не выгодно, и частица становится однодоменной.

В последнее время непрерывно возрастает интерес к поиску простого способа изготовления магнитных датчиков.

Модель воздействия магнитного поля

Каждый атом магнитного вещества представляет собой крошечный магнит, или магнитный диполь, так что полная намагниченность вещества достигается, когда все отдельные атомные магниты оказываются выстроенными в определенном порядке. В ферромагнетике намагниченность создается спиновыми магнитными моментами. Наличие магнитных моментов приводит к возникновению вращающего момента, действующего на произвольно расположенную по отношению к направлению магнитного поля частицу, при этом модуль механического момента, определяемый как [1, 2]

$$K_m = \mu_0 |[\vec{m}\vec{H}]|, \quad (1)$$

может быть представлен в виде

$$K_m = \mu_0 m_0 H \frac{3n-1}{2} \frac{\chi}{2+\chi+\chi n} \sin 2\varphi, \quad (2)$$

где H – модуль напряженности магнитного поля; φ – угол между направлением напряженности магнитного поля и большой осью частицы; m_0 – магнитный момент частицы в момент, когда направление поля совпадает с большой осью частицы; χ – магнитная восприимчивость магнитной жидкости; μ_0 – магнитная постоянная.

Таким образом, наличие магнитных моментов приводит к их ориентации большой полуосью вдоль направления поля (в случае частиц анизотропной формы). Вследствие их взаимодействия [3] они могут объединяться, образуя цепочечные агрегаты. Предполагается, что цепочечные агрегаты, образующиеся в магнитных жидкостях, оказывают существенное влияние на вязкость ферроколлоида и являются одной из основных причин неньютоновской жидкости. Наряду с необычными реологическими свойствами ферроколлоиды обладают уникальными для жидкостей оптическими свойствами. В отсутствие внешнего магнитного поля феррожидкости являются оптически однородными. Однако под действием внешнего магнитного поля они приобретают свойства одноосного кристалла с очень сильной оптической анизотропией [4]. Причиной сильной оптической анизотропии может являться ориентация цепочечных агрегатов в магнитном поле (рис. 1).

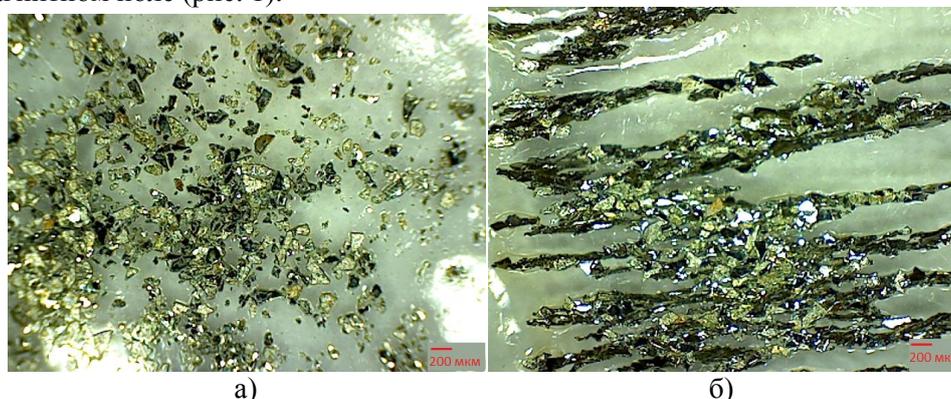


Рис. 1. Мелкодисперсный магнитный наполнитель из аморфного сплава: *а* – в отсутствие магнитного поля; *б* – под действием магнитного поля

На рис. 1 изображены мелкодисперсные частицы размерами меньше 200 мкм в 3,5%-м растворе ПВС (поливиниловый спирт) до воздействия и во время воздействия горизонтального магнитного поля. При снятии магнитного поля подвижность жидкости восстановится, если остаточная намагниченность будет не слишком большой. Эти частицы получали из аморфной ленты толщиной 30 микрон путем растирания их в агатовой ступке и просеивания через 200-микронное сито. Атомно-эмиссионный спектральный анализ показал, что в состав аморфной ленты входит железо (примерно 97 %), никель, медь, а также присутствуют «следы» свинца и сурьмы.

Формирование цепочечных агрегатов способно привести к значительным изменениям магнитных и других свойств феррожидкостей, которые проявляются на изменении емкости конденсатора.

Исследование емкостных чувствительных элементов

Были проведены исследования с мелкодисперсными магнитными частицами эллипсоидальной формы. Частицы, имеющие вытянутые (в виде иголок) или плоские (в виде дисков) формы, легче поддаются магнитному текстурированию, т. е. упорядочению направлений магнитных осей частиц [5] (рис. 2).

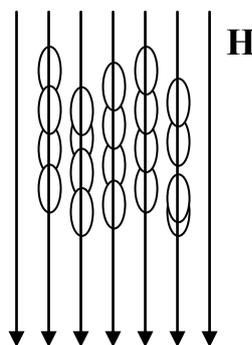


Рис. 2. Ориентация частиц вдоль направления поля

В измерительные ячейки в виде трех цилиндров с подвижными внутри медными обкладками площадью 2,54, 1,53 и 0,63 см², засыпался порошок анизотропной формы. Расстояние между обкладками менялось от 7 до 2 мм путем передвижения поршня внутри цилиндра (рис. 3).

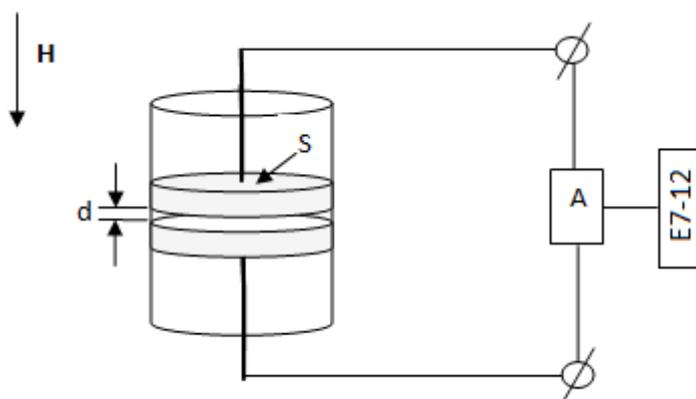


Рис. 3. Схема измерительной ячейки и схема измерения: А – контактное устройство (адаптер) измерителя E7-12

Емкость полученных измерительных ячеек измерялась с помощью цифрового измерителя L, C, R типа E7-12с адаптером для снижения влияния паразитных параметров (рис. 4).



Рис. 4. Измеритель L, C, R типа E7-12 и магнит для проведения эксперимента: 1 – E7-12; 2 – адаптер; 3 – магнит

После заполнения ячейки мелкодисперсными магнитными частицами контактные устройства устанавливаются в пазы адаптера 2. Для создания магнитного поля использовали постоянный магнит 3 (рис. 4).

Магнит располагался над конденсатором на расстоянии 5 см от верхней обкладки таким образом, что силовые линии магнитного поля были перпендикулярно обкладкам.

Емкость конденсатора с магнитными частицами существенным образом зависит от площади обкладок, расстояния между ними и объемным заполнением магнитных частиц. Как видно из рис. 5, емкость конденсатора уменьшается при увеличении расстояния между обкладками. Вектор напряженности магнитного поля H перпендикулярен обкладкам конденсатора в виде круглых дисков диаметром 1,8 см. Площадь обкладок $2,54 \text{ см}^2$. Масса мелкодисперсных магнитных частиц 1,49 гр.

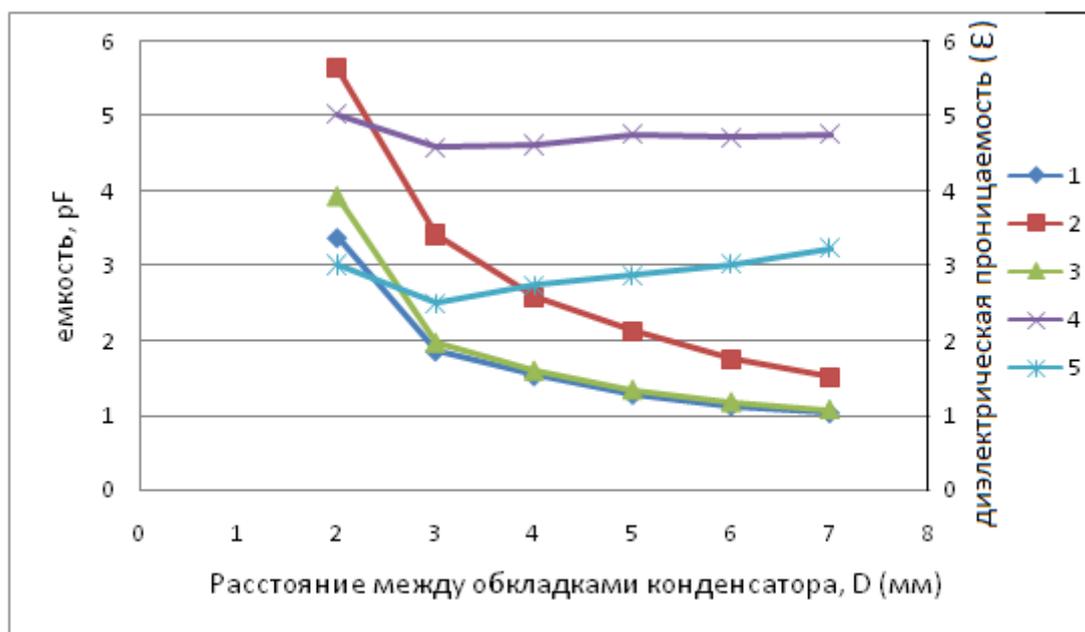


Рис. 5. Зависимость емкости измерительной ячейки от расстояния между обкладками: 1 – до воздействия магнитным полем; 2 – во время воздействия магнитным полем; 3 – после воздействия магнитным полем; 4 – диэлектрическая проницаемость вещества в магнитном поле; 5 – диэлектрическая проницаемость в отсутствии магнитного поля

Включение магнитного поля увеличивает емкость, приводя к эквивалентному уменьшению расстояния между обкладками или увеличению диэлектрической проницаемости (ϵ).

С уменьшением количества частиц до 1,03 гр. уменьшается и емкость конденсатора (рис. 6).

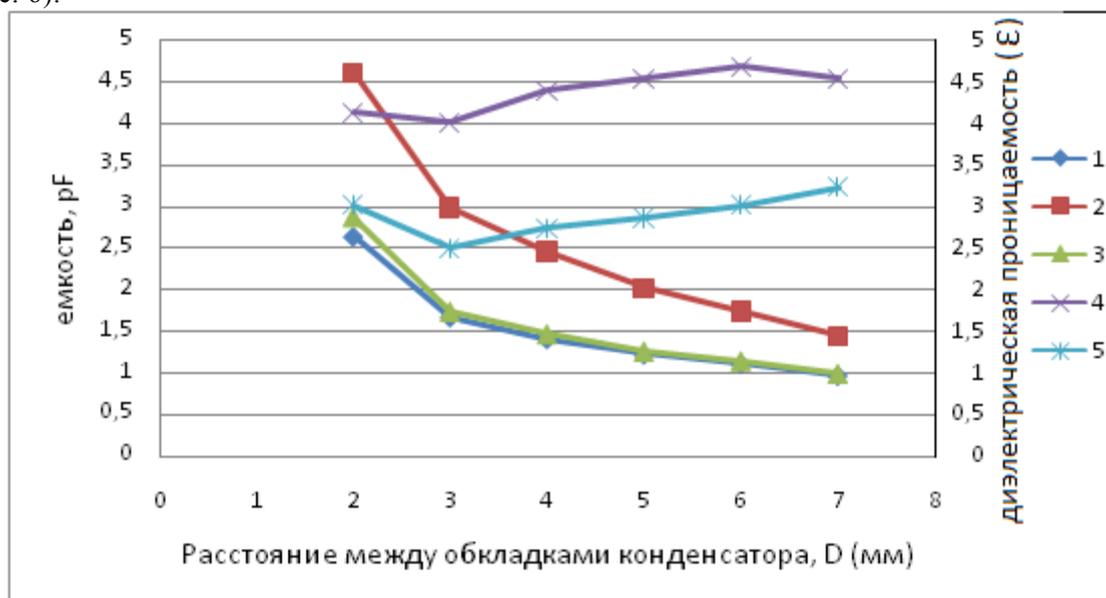


Рис. 6. Зависимость емкости измерительной ячейки от расстояния между обкладками: 1 – до воздействия магнитным полем; 2 – во время воздействия магнитным полем; 3 – после воздействия магнитным полем; 4 – диэлектрическая проницаемость вещества в магнитном поле; 5 – диэлектрическая проницаемость в отсутствии магнитного поля

На рис. 7 представлено изменение емкости (ΔC , %) измерительной ячейки при разной массе наполнителя.



Рис. 7. Изменение емкости измерительной ячейки в перпендикулярном магнитном поле: m1 – масса вещества, равная 1,49 гр.; m2 – масса вещества, равная 1,03 гр.

Следующий график изображает зависимость изменения емкости от площади обкладок и расстояния между ними (рис. 8).

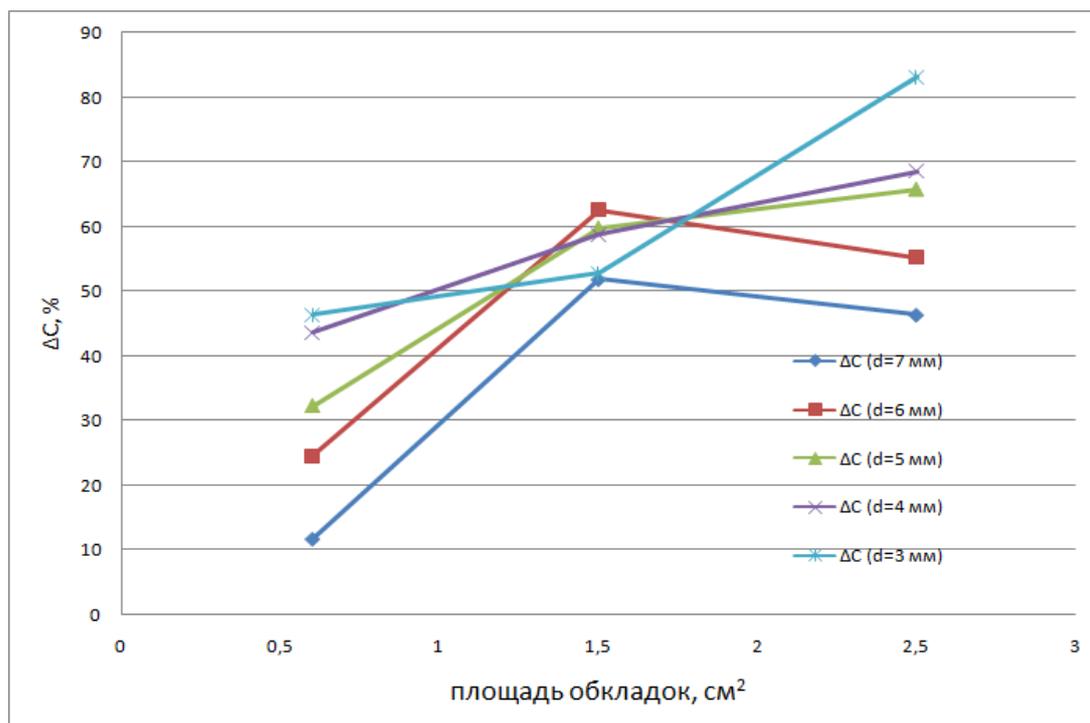


Рис. 8. Изменение емкости в перпендикулярном магнитном поле от площади обкладок

Из рис. 8 видно, что наибольшее изменение емкости при площади обкладок $2,54 \text{ см}^2$, и расстоянием между ними 3 мм. Для измерения чувствительности данного датчика измерительную ячейку помещали в экранированную трубу, которая была изготовлена из лент аморфных магнитомягких сплавов (рис. 9).



Рис. 9. Экранированная труба из лент аморфных магнитомягких сплавов

Магнитная индукция внутри данной трубы измерялась при помощи микротесламетра МТ-10. Изменение магнитной индукции, равное $\Delta B = 5,9 \text{ мкТл}$, приводило к изменению емкости на 1,35 пФ, т. е. чувствительность емкостного датчика составила $0,228 \text{ пФ/мкТл}$.

Точность измерителя E7-12 составляет 0,001 пФ, тогда точность измерения и предел обнаружения поля примерно 4,3 нТл.

Заключение

Проведенные исследования позволяют утверждать, что вследствие ориентации мелко-дисперсных аморфных магнитных частиц и их взаимодействия они становятся зависимыми от напряженности магнитного поля. Чувствительность по магнитной индукции измерительной ячейки составила 0,228 пФ/мкТл. В дальнейшем планируется исследовать предельную чувствительность датчика при использовании композиционных магнитных жидкостей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смерек Ю.Л. Электрическая проводимость магнитной жидкости с мелкодисперсным наполнителем в магнитном поле // Вестник СГУ. 2001. – Вып. 28. – С. 184–187.
2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. – М.: Наука, 1982. – 623 с.
3. Блум Э.Я., Майоров М.М., Цеберс А.О. Магнитные жидкости. – Рига: Зинатне, 1989. – 386 с.
4. Канторович С.С. Цепочечные агрегаты в полидисперсных магнитных жидкостях: дис. ... канд. физ.-мат. наук. – Екатеринбург, 2004. – 175 с.
5. Губин С.П., Кокшаров Ю.А., Хомутов Г.Б., Юрков Г.Ю. Магнитные наночастицы: методы получения, строение и свойства // Успехи химии. – 2005. – Вып. 74 (6). – С. 541–574.

Поступила 26.01.2015 г.