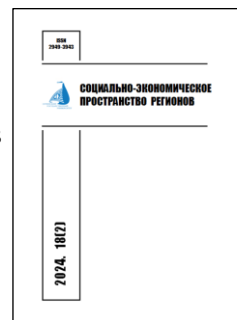


© 2024 Сочинский государственный университет



Издается в Российской Федерации с 2007 г.
Социально-экономическое пространство регионов
Все права защищены
ISSN: 2949-3943
2024. 18(2): 86-95

www.vestnik.sutr.ru



УДК 338.32 621.382

Электропроводящие магнитные жидкости для современной экономики: разработка способов изготовления, исследование свойств, определение областей применения

Юрий Анатольевич Дмитриев^{a, *}, Елена Константиновна Воробей^a

^a Сочинский государственный университет, г. Сочи, Российская Федерация

Аннотация. Разработана электропроводящая магнитная жидкость на основе высокодисперсного железа, неполярного органического растворителя – вазелинового масла и добавок поверхностно-активных и тиксотропных веществ, выполняющих роль стабилизаторов, электропроводность которой находится в диапазоне, соответствующем диапазонам измерения стандартных электроизмерительных приборов.

Увеличение электропроводности магнитной жидкости достигнуто за счет предварительного формирования на поверхности частиц железа слоев металлической меди методом химического осаждения в растворе сульфата меди, а также за счет добавления в состав жидкости некоторого количества высокодисперсной коллоидной меди, получаемой методом восстановления оксида меди углеродом в среде высококипящего органического растворителя полидиметилсилоксана.

При помощи лабораторного стенда, позволяющего создавать магнитные поля с различной величиной индукции и определять электрическое сопротивление магнитной жидкости при действии этих полей, было установлено, что магнитное поле вызывает уменьшение сопротивления жидкости, то есть чем больше индукция, тем, соответственно, ниже сопротивление, и наоборот, чем индукция меньше, тем сопротивление больше. Данный эффект позволяет предложить использование полученной магнитной жидкости в качестве альтернативы современным полупроводниковым магниторезисторам – широко применяемым приборам, принцип действия которых основан на изменении их электрического сопротивления под действием внешнего магнитного поля. Показано, что магнитоизмерительные элементы, изготовленные из электропроводящей магнитной жидкости, способны работать в диапазоне более слабых (примерно в 3 раза по величине индукции) магнитных полей, чем полупроводниковые магниторезисторы, а также имеют более низкую (примерно в 4 раза) стоимость, что свидетельствует в пользу целесообразности их применения вместо полупроводниковых аналогов.

Ключевые слова: электропроводящая магнитная жидкость, ферромагнитный материал, карбонильное железо, диэлектрическая жидкость, поверхностно-активные вещества, электрическая проводимость, электрическое сопротивление, магнитное поле, индукция, магниторезистор.

1. Введение

В настоящее время ведутся активные поиски по замене традиционных полупроводниковых материалов, применяемых в электронике, на альтернативные

* Корреспондирующий автор

Адреса электронной почты: sgu-osnid@mail.ru (Ю.А. Дмитриев), vorobei.sochi@yandex.ru (Е.К. Воробей)

материалы, что обусловлено достижением пределов возможностей, которые обеспечивают полупроводники (Орлов, 2015; Кузнецов, 2016); высокой стоимостью производства полупроводниковых материалов и современной практикой распределения этапов этого производства по территориям самых различных государств (Бойко, 2021). Помимо перечисленных обстоятельств, российская экономика столкнулась с санкционными ограничениями со стороны производителей полупроводниковых материалов (Терехова, Дертев, 2022), что вынуждает налаживать собственное производство. В 2020 году была принята стратегия развития электронной промышленности до 2030 года (Стратегия..., 2020), направленная на создание новой конкурентоспособной продукции на основе развития научно-технического и кадрового потенциалов, оптимизации, модернизации и технического перевооружения производственных мощностей, а также создания новых технологических направлений и технологий. Касательно новых технологических направлений развития элементной базы отечественной электроники возможно предположить реализацию в перспективе несколько вариантов:

- а) совершенствование технологий полупроводниковых материалов на основе известных апробированных подходов;
- б) поиск и внедрение в производство новых материалов и технологий, способных полностью заменить полупроводниковые материалы;
- в) сочетание обоих указанных вариантов.

В настоящее время все чаще возникают предложения по использованию в качестве альтернативы полупроводниковым материалам различных комбинаций оксидов переходных металлов (Boris, 2011), графена, квантовых точек на основе наноманитов (Орлов, 2015), сверхпроводников в сочетании с ферромагнитными материалами (Россияне придумали..., 2019) и других материалов. Все подобные предложения основываются на использовании веществ высокой степени очистки, имеющих строго определенную кристаллическую структуру, поскольку от наличия или отсутствия некоторых примесей, а также от состояния кристаллической структуры вещества, существенно зависят его электрические свойства, от которых, в свою очередь, зависят характеристики производимых электронных приборов. Очистка, легирование, выращивание кристаллов полупроводниковых и других твердых материалов, применяемых в электронике, представляют собой сложные и высокочрезвычайно технологические процессы (например, технология зонной плавки (Зонная плавка), технология термического разложения и осаждения (Устройство для получения...) и т.д.). В связи с этим представляет интерес возможность получения таких альтернативных материалов для производства электронных приборов, электрические свойства которых не будут существенно зависеть от степени очистки, концентрации примесей в их структуре и состояния кристаллической решетки, но будут определяться взаимным расположением частиц таких материалов в какой-либо внешней среде, например, в среде не проводящей электрический ток диэлектрической жидкости.

Научная новизна исследования заключается в реализации одного из возможных вариантов создания упомянутого материала, а именно в получении магнитной жидкости, содержащей электропроводящий магниточувствительный компонент, например, металл, обладающий ферромагнитными свойствами (железо, никель или кобальт), у которого предварительно при помощи специальной обработки была увеличена электропроводность. Магнитная жидкость получается путем диспергирования электропроводящего магниточувствительного компонента с повышенной электропроводностью в диэлектрической жидкости, в качестве которой используется неполярный органический растворитель.

Известно (Zyatkov, 2016; Способ измерения...), что при воздействии внешнего магнитного поля на магнитную жидкость, содержащую частицы ферромагнитного металла, имеет место объединение таких частиц в упорядоченные цепочечные структуры, ориентированные по направлению вектора магнитного поля. Можно ожидать, что объединение ферромагнитных частиц в структуры повлияет на способность магнитной жидкости проводить электрический ток, поскольку благодаря такому упорядочиванию могут изменяться расстояния между частицами и, как следствие, может изменяться толщина разделяющих их диэлектрических прослоек (от которой в конечном счете зависит электрическое сопротивление жидкости). В таком случае при помощи внешнего магнитного поля можно будет управлять электрической проводимостью магнитной жидкости, добиваясь того же эффекта, который имеет место в магниторезисторах – полупроводниковых приборах, электрическое сопротивление которых изменяется в зависимости от величины индукции

приложенного магнитного поля ([Магниторезистор](#)), но не предъявляя при этом высоких требований к чистоте материала, так как главным фактором, определяющим сопротивление, будет толщина прослойки диэлектрической жидкости между частицами, а не наличие или отсутствие примесей в кристаллической структуре частиц ферромагнитного материала.

2. Материалы и методы

Электропроводящая магнитная жидкость ([Рисунок 1а](#)) была получена из карбонильного железа с размером частиц 10 мкм (ГОСТ 13610-79), электропроводность которого была искусственно увеличена за счет покрытия поверхности частиц слоем металлической меди методом химического осаждения в растворе сульфата меди (по аналогии со способом ([Электропроводящий наполнитель...](#))), диспергированного в неполярном органическом растворителе – смеси предельных углеводов с числом атомов углерода от 10 до 15 – вазелиновом масле (ГОСТ 3164-78), которое является диэлектриком, практически не проводящим электрический ток.

В целях придания магнитной жидкости устойчивости в нее вводились добавки поверхностно-активных веществ – олеиновой кислоты и додецилсульфата натрия и тиксотропного вещества – искусственного каучука (под устойчивостью магнитной жидкости понимается способность ее частиц не агрегировать и сохранять в течение определенного времени постоянными свои физические, химические и магнитные свойства ([Герасимчук, 2006](#))).

Поверхностно-активные вещества обеспечивают физическое связывание поверхности металлических частиц с молекулами растворителя. Благодаря образующимся связям при воздействии внешнего магнитного поля частицы металла и растворитель не разделяются, но ведут себя как единое целое (фотография, приведенная на [Рисунке 1б](#), наглядно показывает структурирование магнитной жидкости под действием внешнего магнитного поля).

Тиксотропное вещество обеспечивает стабилизацию вязкости магнитной жидкости на определенном уровне вне зависимости от величины индукции действующего магнитного поля. Такая стабилизация достигается за счет протекания ряда процессов. Образование цепочечных структур в магнитной жидкости при действии магнитного поля вызывает увеличение ее вязкости ([Магнитореологические жидкости...](#), 2017), которое является нежелательным, так как может стать причиной замедления реакции жидкости на изменение поля. Известным свойством тиксотропных веществ является их способность уменьшать свою вязкость (разжижаться) при механическом воздействии и увеличивать ее при снятии такого воздействия ([Тиксотропия](#)). При действии магнитного поля на магнитную жидкость все входящие в ее состав частицы железа начинают двигаться, увлекая за собой весь объем жидкости и объединяясь в итоге в вышеуказанные цепочечные структуры. То есть магнитное поле оказывает механическое воздействие на магнитную жидкость, и в момент этого механического воздействия начинают проявляться свойства тиксотропной добавки, вязкость которой уменьшается и вызывает пропорциональное уменьшение вязкости всего объема жидкости. В итоге магнитная жидкость не загустевает настолько сильно, как это могло бы иметь место при отсутствии тиксотропной добавки. При прекращении действия магнитного поля исчезает и механическое воздействие на магнитную жидкость; вязкость тиксотропной добавки возрастает и вместе с ней возрастает вязкость всего объема жидкости, достигая своего исходного значения.



Рис. 1. а). Электропроводящая магнитная жидкость на поверхности стеклянной пластины.
б). Электропроводящая магнитная жидкость на поверхности постоянного магнита

Искусственное увеличение электропроводности карбонильного железа обусловлено необходимостью снижения электрического сопротивления получаемой магнитной

жидкости до таких значений, которые могут быть измерены стандартными электроизмерительными приборами – до значений не более нескольких МОм. Без использования медного покрытия на поверхности частиц железа сопротивление магнитной жидкости оказывается очень высоким – более 50-60 МОм, что представляет неудобство с точки зрения практического использования. Благодаря тому, что медь обладает примерно в 6 раз более высокой электропроводностью по сравнению с железом ($5,96 \cdot 10^7$ См/м против $1,00 \cdot 10^7$ См/м), медное покрытие поверхности частиц железа позволяет значительно снизить электрическое сопротивление магнитной жидкости. Кроме того, с целью снижения сопротивления в магнитную жидкость дополнительно вводилось некоторое количество высокодисперсной коллоидной меди, полученной методом восстановления оксида меди углеродом в среде высококипящего органического растворителя полидиметилсилоксана.

3. Результаты

Полученная электропроводящая магнитная жидкость содержала около 85 мас. % омедненного карбонильного железа и около 8 мас. % вазелинового масла; остальные 7 мас. % приходились на смесь коллоидной меди и поверхностно-активных веществ; плотность жидкости – более 2 г/см³.

Основные электрические характеристики магнитной жидкости были установлены при помощи лабораторного стенда (Рисунок 2), включающего магнитоизмерительный элемент – стеклянную кювету объемом 7 см³ с двумя металлическими электродами, заполненную полученной магнитной жидкостью; электромагнит, позволяющий создавать магнитные поля с различной величиной индукции; источник постоянного напряжения; прибор для измерения электрического сопротивления.

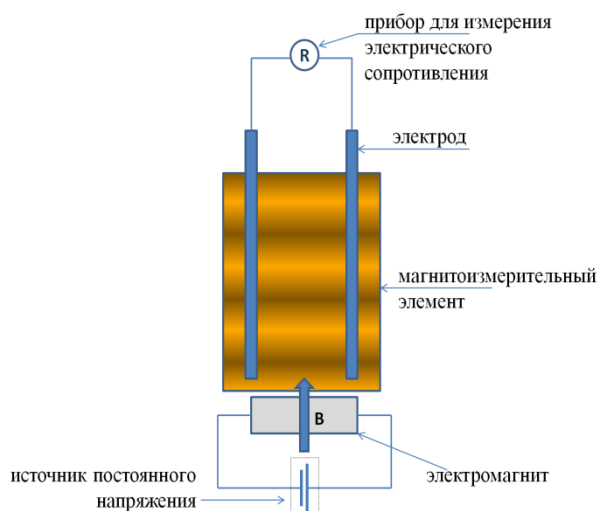


Рис. 2. Лабораторный стенд для исследования влияния магнитного поля на электрические характеристики электропроводящей магнитной жидкости

На [Рисунке 3](#) представлена экспериментально установленная зависимость электрического сопротивления магнитоизмерительного элемента на основе магнитной жидкости от величины индукции приложенного магнитного поля. Видно, что магнитоизмерительный элемент имеет относительно невысокое электрическое сопротивление – порядка 300 КОм, которое может быть измерено практически любым стандартным электроизмерительным прибором и которое изменяется при воздействии магнитного поля – уменьшается или увеличивается на 4КОм при соответствующем увеличении или уменьшении индукции поля на 120мТл; чувствительность электросопротивления к изменениям магнитного поля составляет 33 Ом/мТл.

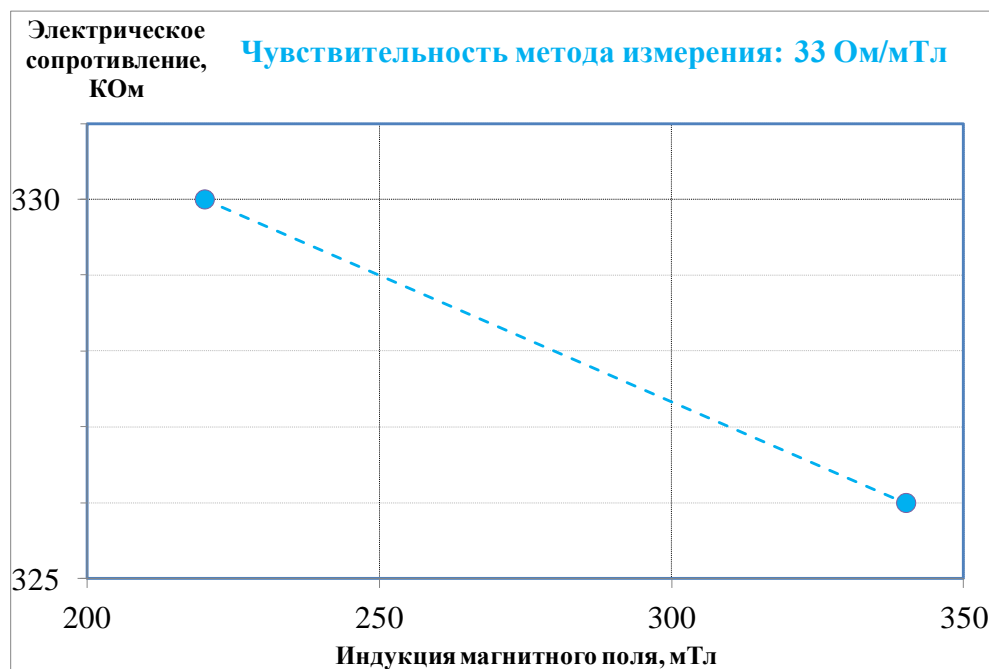


Рис. 3. Зависимость электрического сопротивления магнитоизмерительного элемента на основе электропроводящей магнитной жидкости от величины индукции приложенного магнитного поля

Разработанный магнитоизмерительный элемент существенно отличается от традиционно используемых полупроводниковых магниторезисторов: он способен работать в более слабых магнитных полях (от 200 до 350 мТл, что примерно в 3 раза меньше значений рабочего диапазона полупроводниковых магниторезисторов, который составляет от 0,5 до 1,0 Тл ([Магниторезистор](#))).

Следовательно, элементы на основе электропроводящей магнитной жидкости могут применяться в качестве альтернативы полупроводниковым магниторезисторам в тех электронных системах, в которых нежелательно или технически невозможно создание сильных магнитных полей. Кроме того, учитывая более низкую стоимость предполагаемых магнитожидкостных элементов по сравнению с традиционными полупроводниковыми магниторезисторами ([Таблица 1](#)), может быть рекомендовано их использование в качестве альтернативы во всех тех сферах, где в настоящее время применяются магниторезисторы в качестве чувствительных элементов магнитометров, в качестве бесконтактных регулировочных и переключающих элементов и т. д.

4. Обсуждение

В [Таблице 1](#) представлены средние цены на полупроводниковые магниторезисторы в России по состоянию на 2019 год и для сравнения приведена ориентировочная стоимость двух основных компонентов магнитоизмерительного элемента на основе электропроводящей магнитной жидкости, рассчитанная на основании сведений об актуальных оптовых ценах на эти компоненты. Видно, что суммарная стоимость карбонильного железа и вазелинового масла, необходимых для получения одного

магнитоизмерительного элемента (34 руб.), примерно в четыре раза ниже средней цены полупроводникового магниторезистора.

Таблица 1. Сравнение стоимости полупроводниковых магниторезисторов и основных компонентов магнитоизмерительного элемента на основе электропроводящей магнитной жидкости

Полупроводниковые магниторезисторы			
Средние цены на рынке магниторезисторов по Федеральным округам РФ в 2019 г.	120,7 руб. (среднее значение по 8 Федеральным округам)		
Основные компоненты магнитоизмерительного элемента на основе электропроводящей магнитной жидкости			
Компонент	Ориентировочная оптовая цена	Количество в расчете на 1 элемент, г	Ориентировочная стоимость в расчете на 1 элемент, руб.
Железо карбонильное радиотехническое Р-10 ГОСТ 13610-79 порошок	2 800 руб./кг	12	34
Вазелиновое масло	153,4 руб./9 кг	1	Менее 1
ИТОГО:			34*

* Итоговая стоимость магнитоизмерительного элемента может быть несколько выше с учетом стоимости вспомогательных компонентов магнитной жидкости, электродов, корпуса и стоимости сборки.

Составлено по данным: [Анализ рынка...](#); [Железо карбонильное...](#)

5. Заключение

Помимо прямой экономической выгоды от замены полупроводниковых магниторезисторов на магнитножидкостные элементы, следует учитывать и отдаленные последствия, также сулящие определенные выгоды. Известно ([Терехова, Дертев, 2022](#)), что современная полупроводниковая электроника требует очень больших финансовых вложений в научно-исследовательские работы, что обусловлено растущей конкуренцией на данном рынке и увеличивающимися запросами на инновации. Очевидно, что выбор в некоторых частных случаях других направлений развития технологий электронных приборов (например, направлений, связанных с разработкой различных классов электропроводящих магнитных жидкостей) может позволить отчасти снизить затраты благодаря тому, что технологии получения магнитных жидкостей менее сложны и в целом менее затратны, чем технологии получения полупроводниковых материалов.

Литература

[Анализ рынка...](#) – Анализ рынка магниторезисторов в России (аналитический отчет агентства «DISCOVERY RESEARCH GROUP»). [Электронный ресурс]. URL: https://drgroup.ru/components/com_jshopping/files/demo_products/10511.pdf (дата обращения: 18.04.2024).

[Бойко, 2021](#) – *Бойко Р.* Кремниевый занавес: почему России не нужна полупроводниковая независимость. Сайт портала «mobile-review.com». [Электронный ресурс]. URL: <https://mobile-review.com/all/articles/misc/kremnievyj-zanaves-pochemu-rossii-ne-nuzhna-poluprovodnikovaya-nezavisimost/> (дата обращения: 18.04.2024).

Вазелиновое масло – Вазелиновое масло ф.9 кг. Сайт портала «Пульс цен». [Электронный ресурс]. URL: https://perm.pulscen.ru/products/vazelinovoye_maslo_f_9kg_264908661 (дата обращения: 18.04.2024).

Герасимчук, 2006 – Герасимчук Н.А. и др. Магнитные жидкости в современном обществе // *Успехи современного естествознания*. 2006. № 10. С. 66-66. [Электронный ресурс]. URL: <https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=11626> (дата обращения: 10.05.2024).

Железо карбонильное радиотехническое – Железо карбонильное радиотехническое Р-10 ГОСТ 13610-79 порошок. Сайт портала «Пульс цен». [Электронный ресурс]. URL: https://kostroma.pulscen.ru/products/zhelezo_karbonilnoye_radiotekhnicheskoye_r_10_gost_13610_79_poroshok_228664773 (дата обращения: 18.04.2024).

Зонная плавка - Зонная плавка // Сайт портала Большой российской энциклопедии. [Электронный ресурс]. URL: <https://bigenc.ru/c/zonnaia-plavka-550084> (дата обращения: 18.04.2024).

Кузнецов, 2016 – Кузнецов В. Создано первое устройство без использования полупроводниковых материалов. Сайт портала «hi-news.ru». [Электронный ресурс]. URL: <https://hi-news.ru/technology/sozdano-pervoe-ustrojstvo-bez-ispolzovaniya-poluprovodnikovyx-materialov.html> (дата обращения: 18.04.2024).

Магниторезистор – Магниторезистор. Сайт портала Большой российской энциклопедии. [Электронный ресурс]. URL: <https://bigenc.ru/c/magnitorezistor-eb6b56> (дата обращения: 18.04.2024).

Магнитореологические жидкости..., 2017 – Магнитореологические жидкости: технологии создания и применение: монография / Е.С. Беляев [и др.]; под ред. А.С. Плехова. Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева, 2017. 94 с. [Электронный ресурс]. URL: <https://vntr.ru/lib/vntr18-VOL7.pdf> (дата обращения: 19.11.2023).

Орлов, 2015 – Орлов А. Что придет на смену кремниевой электронике? Сайт портала «postnauka.org». [Электронный ресурс]. URL: <https://postnauka.org/faq/56852> (дата обращения: 18.04.2024).

Россияне придумали..., 2019 – Россияне придумали замену полупроводникам, которая ускорит компьютеры в десятки раз. Сайт портала «cnews.ru». [Электронный ресурс]. URL: https://www.cnews.ru/news/top/2019-08-26_rossiyane_razrabatyvayut_nanoelementy (дата обращения: 18.04.2024).

Способ измерения... – Изобретение RU2709703C1. Способ измерения параметров магнитного поля.

Стратегия..., 2020 – Стратегия развития электронной промышленности Российской Федерации на период до 2030 года. Официальный сайт Правительства РФ. [Электронный ресурс]. URL: <http://static.government.ru/media/files/1QkfNDghANiBUNBbXaFBM69Jxd48ePeY.pdf> (дата обращения: 10.05.2024).

Терехова, Дертев, 2022 – Терехова К., Дертев А. Запрет на развитие: как российские технологии выживут без полупроводников. Сайт сетевого издания «forbes.ru». [Электронный ресурс]. URL: <https://www.forbes.ru/tekhnologii/457563-zapret-na-razvitie-kak-rossijskie-tehnologii-vyživut-bez-poluprovodnikov> (дата обращения: 18.04.2024).

Тиксотропия – Тиксотропия / Сайт портала Большой российской энциклопедии. [Электронный ресурс]. URL: <https://bigenc.ru/c/tiksotropiia-3d0959> (дата обращения: 10.05.2024).

Устройство для получения... – Устройство для получения металлов термическим разложением галогенидов - Изобретение SU977509A1. Устройство для получения металлов термическим разложением галогенидов. // Сайт портала «Яндекс-патенты». [Электронный ресурс]. URL: https://yandex.ru/patents/doc/SU977509A1_19821130 (дата обращения: 18.04.2024).

Электропроводящий наполнитель... – Изобретение SU1740395A1. Электропроводящий наполнитель для получения состава экранирующего покрытия. Сайт портала «Яндекс-патенты». [Электронный ресурс]. URL: https://yandex.ru/patents/doc/SU1740395A1_19920615 (дата обращения: 18.04.2024).

Boris, 2011 – Boris A. et al. Dimensionality Control of Electronic Phase Transitions in Nickel-Oxide Superlattices. // *Science*. 2011. 332(6032): 937-40. DOI: 10.1126/science.1202647 [Электронный ресурс]. URL: https://www.researchgate.net/publication/51150823_Dimensionality

Control of Electronic Phase Transitions in Nickel-Oxide Superlattices (дата обращения: 18.04.2024).

[Zyatkov, 2016](#) – *Zyatkov D.O. et al.* The Capacitive Magnetic Field Sensor // *Journal of Physics: Conference Series*. 2016. 671(1): 012065. DOI: 10.1088/1742-6596/671/1/012065. [Электронный ресурс]. URL: https://www.researchgate.net/publication/291186131_The_Capacitive_Magnetic_Field_Sensor (дата обращения: 18.04.2024).

References

[Analiz rynka...](#) – Analiz rynka magnitorezistorov v Rossii (analiticheskii otchet agentstva «DISCOVERY RESEARCH GROUP») [Analysis of the magnetoresistor market in Russia (analytical report from the DISCOVERY RESEARCH GROUP agency)]. [Electronic resource]. URL: https://drgroup.ru/components/com_jshopping/files/demo_products/10511.pdf (date of access: 18.04.2024). [in Russian]

[Boiko, 2021](#) – *Boiko, R.* (2021). Kremnievyi zhanaves: pochemu Rossii ne nuzhna poluprovodnikovaya nezavisimost' [Silicon curtain: why Russia does not need semiconductor independence]. Sait portala «mobile-review.com». [Electronic resource]. URL: <https://mobile-review.com/all/articles/misc/kremnievyj-zhanaves-pochemu-rossii-ne-nuzhna-poluprovodnikovaya-nezavisimost/> (date of access: 18.04.2024). [in Russian]

[Boris, 2011](#) – *Boris A. et al.* Dimensionality Control of Electronic Phase Transitions in Nickel-Oxide Superlattices. // *Science*. 2011. 332(6032): 937-40. DOI: 10.1126/science.1202647 [Electronic resource]. URL: https://www.researchgate.net/publication/51150823_Dimensionality_Control_of_Electronic_Phase_Transitions_in_Nickel-Oxide_Superlattices (date of access: 18.04.2024).

[Elektroprovodyashchii napolnitel'...](#) – Izobrenenie SU1740395A1. Elektroprovodyashchii napolnitel' dlya polucheniya sostava ekraniruyushchego pokrytiya. Sait portala «Yandeks-patenty» [Invention SU1740395A1. Electrically conductive filler for obtaining the composition of a shielding coating. Website of the Yandex Patents portal]. [Electronic resource]. URL: https://yandex.ru/patents/doc/SU1740395A1_19920615 (date of access: 18.04.2024). [in Russian]

[Gerasimchuk, 2006](#) – Gerasimchuk, N.A. i dr. (2006). Magnitnye zhidkosti v sovremennom obshchestve [Magnetic fluids in modern society]. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*. 10: 66-66. [Electronic resource]. URL: <https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=11626> (date of access: 10.05.2024). [in Russian]

[Kuznetsov, 2016](#) – *Kuznetsov, V.* (2016). Sozdano pervoe ustroystvo bez ispol'zovaniya poluprovodnikovyx materialov [The first device was created without the use of semiconductor materials]. Sait portala «hi-news.ru». [Electronic resource]. URL: <https://hi-news.ru/technology/sozdano-pervoe-ustrojstvo-bez-ispolzovaniya-poluprovodnikovyx-materialov.html> (date of access: 18.04.2024). [in Russian]

[Magnitoreologicheskie zhidkosti..., 2017](#) – Magnitoreologicheskie zhidkosti: tekhnologii sozdaniya i primenenie: monografiya [Magnetorheological fluids: technologies of creation and application: monograph]. E.S. Belyaev [i dr.]; pod red. A.S. Plekhova. Nizhegorod.gos. tekhn. un-t im. R.E. Alekseeva, 2017. 94 p. [Electronic resource]. URL: <https://vntr.ru/lib/vntr18-VOL7.pdf> (date of access: 19.11.2023). [in Russian]

[Magnitorezistor](#) – Magnitorezistor. Sait portala Bol'shoi rossiiskoi entsiklopedii [Magnetoresistor. Website of the portal of the Great Russian Encyclopedia]. [Electronic resource]. URL: <https://bigenc.ru/c/magnitorezistor-eb6b56> (date of access: 18.04.2024). [in Russian]

[Orlov, 2015](#) – *Orlov, A.* (2015). Chto pridet na smenu kremnievoi elektronike? [What will replace silicon electronics?]. Sait portala «postnauka.org». [Electronic resource]. URL: <https://postnauka.org/faq/56852> (date of access: 18.04.2024). [in Russian]

[Rossiyane pridumali..., 2019](#) – Rossiyane pridumali zamenu poluprovodnikam, kotoraya uskorit komp'yutery v desyatki raz [The Russians came up with a replacement for semiconductors that will speed up computers tens of times.]. Sait portala «cnews.ru». [Electronic resource]. URL: https://www.cnews.ru/news/top/2019-08-26_rossiyane_razrabatyvayut_nanoelementy (date of access: 18.04.2024). [in Russian]

[Sposob izmereniya...](#) – Izobrenenie RU2709703C1. Sposob izmereniya parametrov magnitnogo polya [Invention RU2709703C1. Method for measuring magnetic field parameters]. [in Russian]

[Strategiya..., 2020](#) – Strategiya razvitiya elektronnoi promyshlennosti Rossiiskoi Federatsii na period do 2030 goda [Strategy for the development of the electronics industry of the Russian

Federation for the period until 2030]. Ofitsial'nyi sait Pravitel'stva RF. [Electronic resource]. URL: <http://static.government.ru/media/files/1QkfNDghANiBUNBbXaFBM69Jxd48ePeY.pdf> (date of access: 10.05.2024). [in Russian]

[Terekhova, Dertev, 2022](#) – *Terekhova, K., Dertev, A. (2022). Zapret na razvitie: kak rossiiskie tekhnologii vyzhivut bez poluprovodnikov* [Ban on development: how Russian technologies will survive without semiconductors.]. Sait setevogo izdaniya «forbes.ru». [Electronic resource]. URL: <https://www.forbes.ru/tekhnologii/457563-zapret-na-razvitie-kak-rossijskie-tehnologii-vyzhivut-bez-poluprovodnikov> (date of access: 18.04.2024). [in Russian]

[Tiksotropiya](#) – Tiksotropiya [Thixotropy]. Sait portala Bol'shoi rossiiskoi entsiklopedii. [Electronic resource]. URL: <https://bigenc.ru/c/tiksotropiia-3d0959> (date of access: 10.05.2024). [in Russian]

[Ustroistvo dlya polucheniya...](#) – Ustroistvo dlya polucheniya metallov termicheskim razlozheniem galogenidov – Izobrenenie SU977509A1. Ustroistvo dlya polucheniya metallov termicheskim razlozheniem galogenidov. Sait portala «Yandeks-patenty» [Device for producing metals by thermal decomposition of halides - Invention SU977509A1. A device for producing metals by thermal decomposition of halides.]. [Electronic resource]. URL: https://yandex.ru/patents/doc/SU977509A1_19821130 (date of access: 18.04.2024). [in Russian]

[Vazelinovoe maslo](#) – Vazelinovoe maslo f.9 kg [Vaseline oil, 9 kg]. Sait portala «Pul's tsen». [Electronic resource]. URL: https://perm.pulscen.ru/products/vazelinovoye_maslo_f_9kg_264908661 (date of access: 18.04.2024). [in Russian]

[Zhelezo karbonil'noe radiotekhnicheskoe](#) – Zhelezo karbonil'noe radiotekhnicheskoe R-10 GOST 13610-79 poroshok [Carbonyl iron for radio engineering R-10 GOST 13610-79 powder]. Sait portala «Pul's tsen». [Electronic resource]. URL: https://kostroma.pulscen.ru/products/zhelezo_karbonilnoye_radiotekhnicheskoye_r_10_gost_13610_79_poroshok_228664773 (date of access: 18.04.2024). [in Russian]

[Zonnaya plavka](#) – Zonnaya plavka [Zone melting]. Sait portala Bol'shoi rossiiskoi entsiklopedii. [Electronic resource]. URL: <https://bigenc.ru/c/zonnaia-plavka-550084> (date of access: 18.04.2024). [in Russian]

[Zyatkov, 2016](#) – *Zyatkov D.O. et al. The Capacitive Magnetic Field Sensor // Journal of Physics: Conference Series. 2016. 671(1): 012065. DOI: 10.1088/1742-6596/671/1/012065.* [Electronic resource]. URL: https://www.researchgate.net/publication/291186131_The_Capacitive_Magnetic_Field_Sensor (date of access: 18.04.2024).

UDC 338.32 621.382

Electroconductive Magnetic Fluids for Modern Economy: Development of Manufacturing Methods, Research of Properties, Definition of Applications

Yuri A. Dmitriev ^{a,*}, Elena K. Vorobey ^a

^a Sochi State University, Sochi, Russian Federation

Abstract

An electroconductive magnetic liquid has been developed based on highly dispersed iron, a non-polar organic solvent – vaseline oil and additives of surfactants and thixotropic substances that act as stabilizers, the electrical conductivity of which is in the range corresponding to the measurement ranges of standard electrical measuring instruments.

Increase of magnetic liquid electric conductivity is achieved due to preliminary formation of copper metal layers on iron particles surface by method of chemical deposition in copper sulphate solution, and also due to addition to liquid composition of some amount of highly dispersed colloidal copper produced by method of copper oxide reduction by carbon in medium of high-boiling organic solvent polydimethylsiloxane.

With the aid of a laboratory bench capable of generating magnetic fields with different magnitudes of induction and determining the electrical resistance of the magnetic fluid under the

* Corresponding author

E-mail addresses: sgu-osnid@mail.ru (Yu.A. Dmitriev), vorobei.sochi@yandex.ru (E.K. Vorobey)

action of these fields, it has been found that the magnetic field causes a decrease in the resistance of the fluid, that is, the larger the induction, the correspondingly lower the resistance, and vice versa, the smaller the induction, the greater the resistance. This effect allows us to propose the use of the obtained magnetic liquid as an alternative to modern semiconductor magnetoresistors – widely used devices, the principle of operation of which is based on changing their electrical resistance under the influence of an external magnetic field. It has been shown that magnetic measuring elements made of electroconductive magnetic liquid are capable of operating in the range of weaker (about 3 times in terms of induction) magnetic fields than semiconductor magnetoresistors, and also have a lower (about 4 times) cost, which indicates the feasibility of their use instead of semiconductor analogues.

Keywords: electroconductive magnetic fluid, ferromagnetic material, carbonyl iron, dielectric fluid, surfactants, electrical conductivity, electrical resistance, magnetic field, induction, magnetoresistor.