

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

*на диссертацию Бочковой Татьяны Сергеевны
«Особенности взаимодействия электромагнитного излучения
сверхвысокочастотного и оптического диапазонов с
формирующимися в магнитном поле агломератами
ферромагнитных наночастиц магнитной жидкости»,
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-
математических наук по специальностям 01.04.03– «Радиофизика»,
05.27.01 –«Твердотельная электроника, радиоэлектронные
компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых
эффектах»*

Среди новых типов материалов, применяемых в технике СВЧ-диапазона, можно выделить многокомпонентные магнитные среды, отличительной особенностью которых является возможность управления параметрами таких сред магнитным полем.

Расширение области использования многокомпонентных магнитных сред при проектировании различных высокочастотных и сверхвысокочастотных устройств, а также возможность определения их свойств и параметров радиоволновыми методами привело к тому, что изучение закономерностей взаимодействия электромагнитных колебаний с такими средами становится актуальной задачей для радиофизики. Проведение таких исследований позволяет совершенствовать и качественно изменять структуру многокомпонентных сред, расширять области их применения, создавать новые устройства на основе эффектов, наблюдаемых в результате взаимодействия электромагнитного излучения с подобными средами.

Актуальность измерений электрофизических параметров многокомпонентных магнитных сред с микро- и нановключениями в СВЧ-диапазоне связана с возможностью их практического применения, например, в различных областях СВЧ техники, в системах связи и спутниковой навигации, для создания широкополосных поглощающих покрытий и для использований таких многокомпонентных покрытий в технологии «Stealth» с управляемыми параметрами.

Прямые измерения электрофизических параметров индивидуальных микро- и наночастиц, входящих в состав многокомпонентных магнитных сред выполняются, как правило, с использованием зондовых методов измерений, что представляет собой технически сложную задачу. Использование СВЧ-методов измерений параметров материалов, с одной стороны, обеспечивает бесконтактность измерений, с другой —

обеспечивает возможность одновременного определения нескольких параметров исследуемых материалов и сред.

Исследование свойств и параметров подобных магнитных сред по характеру взаимодействия с ними электромагнитного излучения с использованием радиофизических моделей трансформации и распространения электромагнитной волны связано с проблемой адекватного моделирования структуры магнитной среды, что представляется достаточно сложной задачей. При описании магнитных свойств концентрированных коллоидов необходимо учитывать наличие в многокомпонентных средах межчастичных взаимодействий. В диссертационной работе предложена модель формирования агломератов ферромагнитных частиц магнитной жидкости, помещенной во внешнее магнитное поле, учитывающая их пространственное расположение и наличие монослоя поверхностно-активного вещества (ПАВ) на ферромагнитных частицах, проанализирован характер взаимодействия электромагнитного излучения с такой многокомпонентной средой и оценены возможности определения ее свойств и параметров, что является предметом исследований в области твердотельной электроники.

Применение многокомпонентных магнитных сред в качестве материалов, используемых при создании устройств с характеристиками, управляемыми внешними электрическими и магнитными полями – одно из перспективных направлений электроники. В диссертационной работе автором доказывается возможность применения композитных материалов на основе магнитной жидкости с углеродными нановключениями для реализации методов модуляции электромагнитного излучения.

Это позволяет сделать вывод об актуальности для радиофизики и твердотельной электроники проведенных в диссертации исследований особенностей взаимодействия электромагнитного излучения сверхвысокочастотного и оптического диапазонов с формирующимися под действием магнитного поля микроразмерными агломератами однодоменных ферромагнитных частиц магнитной жидкости и их использование для определения параметров магнитной жидкости и повышения эффективности модуляции линейно поляризованного оптического излучения, взаимодействующего с магнитной жидкостью с многостенными углеродными нанотрубками, при воздействии магнитного поля, с изменяющимся направлением вектора магнитной индукции и с величиной, достаточной для формирования агломератов ферромагнитных наночастиц.

Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 133 страницы машинописного текста, включая 42 рисунка и 1 таблицу. Список литературы содержит 155 наименований. Работа по структуре и объему соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям.

Во введении обоснована актуальность темы исследований, сформулированы цель, решаемые задачи, основные положения, выносимые на защиту, описана структура и объем работы.

В первом разделе диссертации описаны способы синтезирования магнитных жидкостей, методы исследования процессов агломерации и их отличительные особенности. Автором проведен критический анализ современных исследований, посвященных изучению свойств и параметров магнитной жидкости по характеру взаимодействия с ней электромагнитного излучения. Отмечено, что на характер дисперсии динамической магнитной восприимчивости магнитной жидкости, имеющий резонансную особенность в СВЧ-диапазоне, в условиях ферромагнитного резонанса влияет размер ферромагнитных частиц. Обсуждена проблема учета агломератов ферромагнитных наночастиц при описании взаимодействия СВЧ-излучения с магнитной жидкости в магнитном поле и возможности уменьшения погрешности при определении параметров магнитной жидкости в ходе решения соответствующей обратной задачи.

Во втором разделе рассмотрено влияние агломерации ферромагнитных частиц на взаимодействие электромагнитного излучения СВЧ-диапазона с магнитной жидкостью. Приведена зависимость длин агломератов ферромагнитных наночастиц с диаметром 5–10 нм и объемной долей твердой фазы $\varphi=0,1$ от величины магнитного поля в тонком слое магнитной жидкости. Отмечено, что процесс агломерации магнитной жидкости значительно изменяет ее гидродинамические свойства, поэтому знание характеристик этого процесса важно при практическом использовании. Установлено, что пороговый характер в изменении зависимости коэффициента отражения электромагнитного излучения сверхвысокочастотного диапазона, взаимодействующего с магнитной жидкостью, от величины индукции приложенного магнитного поля, обусловлен изменением размеров агломератов, образованных однодоменными ферромагнитными наночастицами, их концентрацией и величиной намагниченности.

В третьем разделе приведены результаты решения обратной задачи по определению параметров магнитной жидкости с помощью предложенной модели взаимодействия электромагнитного излучения СВЧ-диапазона с формирующимися в магнитном поле агломератами ферромагнитных наночастиц магнитной жидкости, с учетом их пространственного расположения и наличия монослоя ПАВ на ферромагнитных наночастицах.

При реализации методики определения параметров магнитной жидкости автор ввёл понятие эффективной постоянной распространения электромагнитной волны на участке волновода, полностью заполненном магнитной жидкостью, содержащей агломераты ферромагнитных наночастиц, что позволило использовать аналитическое выражение для

расчета коэффициента отражения электромагнитного излучения от слоя магнитной жидкости. При этом эффективная постоянная распространения находилась из решения обратной задачи, при реализации которого слой магнитной жидкости представлялся в виде многослойной структуры.

В работе показано, что учет размеров агломератов из магнетитовых наночастиц, их пространственного расположения и наличия оболочек ПАВ приводит к уточнению определения искомых параметров по сравнению с методиками, не учитывающими в расчете структурные образования.

Автором подробно описана методика проведения экспериментального исследования амплитудно-частотных характеристик коэффициента отражения электромагнитного излучения, взаимодействующего с магнитной жидкостью, мостовым методом с использованием двойного волноводного тройника, в измерительное плечо которого помещался слой магнитной жидкости, полностью заполняющий поперечное сечение волновода.

Для иллюстрации результатов определения параметров магнитной жидкости численными методами представлены графики зависимостей, используемых для расчетов функции невязок от искомых параметров.

В четвертом разделе рассмотрено применение магнитной жидкости с добавлением многостенных углеродных нанотрубок в качестве среды с управляемыми параметрами для модуляции электромагнитного излучения оптического диапазона. В работе управление поляризованным излучением осуществлялось путем помещения на пути излучения полупроводникового лазера поляризационного фильтра, в роли которого выступал слой магнитной жидкости с нанотрубками, помещенный в область действия внешнего магнитного поля с изменяющимся направлением вектора магнитной индукции.

Интенсивность прошедшего через слой магнитной жидкости поляризованного лазерного излучения изменялась вследствие изменения ориентации вытянутых агломератов, образованных ферромагнитными частицами и нанотрубками, при изменении направления вектора магнитной индукции внешнего магнитного поля с величиной, достаточной для образования агломератов, относительно электрической компоненты лазерного излучения. Автором установлено, что введение в магнитную жидкость нанотрубок в количестве 40 г/л обеспечивает увеличение глубины модуляции прошедшего лазерного излучения от 22% до 54%.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы, полученные в ходе выполнения диссертации.

Без сомнения, полученные диссертантом результаты **новы** с научной точки зрения, **обоснованы** и **практически значимы**.

К числу новых результатов, представляющих наибольший научный интерес, с моей точки зрения, можно отнести следующие:

1. Выявление взаимосвязи процесса образования агломератов, образованных наноразмерными магнетитовыми частицами магнитной жидкости на основе керосина под воздействием приложенного магнитного поля с индукцией до 1.2 Тл, приводящего к изменению их размеров, концентрации, ориентации относительно компонент электромагнитной волны и величины намагниченности, с пороговым характером зависимости коэффициента отражения СВЧ-излучения, взаимодействующего с магнитной жидкостью, от величины приложенного магнитного поля. А также установление того факта, что величина порогового магнитного поля, при которой наблюдается значительное изменение коэффициента отражения СВЧ-излучения, превышает величину 0.2 Тл, при которой агломераты магнитной жидкости достигают предельных размеров.
2. Использование для теоретического описания спектров отражения электромагнитного излучения СВЧ-диапазона от слоя магнитной жидкости с агломератами ферромагнитных наночастиц модели, учитывающей их пространственное расположение, размеры, объемную долю твердой фазы и наличие монослоя ПАВ на поверхности ферромагнитных наночастиц, что позволило адекватно решить обратную задачу определения параметров магнитной жидкости по экспериментально измеренным спектрам отражения.
3. Изменение интенсивности поляризованного лазерного излучения, прошедшего через слой магнитной жидкости, с введенными многостенными углеродными нанотрубками с длиной ~ 2 мкм, наружным 15–40 нм и внутренним диаметром 3–8 нм в количестве 40 г/л, при изменении направления вектора магнитной индукции внешнего магнитного поля с величиной, достаточной для образования агломератов, достигает 54%.

Практическая значимость выполненных автором диссертации исследований заключается в разработке радиоволновой методики измерения параметров магнитной жидкости в условиях образования агломератов ферромагнитных наночастиц и магнитооптических модуляторов с характеристиками, свидетельствующими о перспективности их технического применения.

Следует отметить, что автором получен патент РФ на изобретение № 2679457 «Способ определения параметров магнитной жидкости», это дополнительно подтверждает новизну и практическую значимость проведенных исследований.

Обоснованность и достоверность результатов, изложенных в диссертации, научных положений и сделанных выводов подтверждаются как использованием теоретически обоснованного метода описания взаимодействия СВЧ-излучения с магнитной жидкостью в условиях образования агломератов ферромагнитных наночастиц, использованием современной измерительной аппаратуры, соответствием выводов теории основным результатам, полученным экспериментально, так и доведением результатов исследований до практически значимых результатов.

Анализируя полученные автором диссертации результаты и сделанные выводы считаю обоснованным представление диссертации на стыке специальностей: радиофизика и твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах.

Вместе с тем, необходимо высказать ряд замечаний:

1. В разделе 2.2 диссертации приводятся данные по оптическим исследованиям структуры магнитной жидкости, на рис. 2.6 приводится и атомно-силовое изображение магнитной жидкости, но информативность изображения крайне низкая. При этом не указан режим, в котором оно получено. Не используются хорошо разработанные к настоящему времени режимы магнитно-силовой сканирующей зондовой микроскопии, которые представляются весьма важными для исследований магнитных наночастиц – основных объектов диссертации.

2. В третьем разделе диссертации автором для описания взаимодействия СВЧ-излучения с магнитной жидкостью, содержащей агломераты ферромагнитных наночастиц, использовалась эквивалентная структура магнитной жидкости в виде многослойной структуры, состоящей из множества чередующихся слоев магнитной жидкости с агломератами ферромагнитных наночастиц, которые образуются в магнитной жидкости при приложении магнитного поля, и без агломератов. Однако автором не определены применимости такого подхода, например, в зависимости от объемной доли твердой фазы в магнитной жидкости.

3. При проведении экспериментальных исследований отражения СВЧ-излучения от слоя магнитной жидкости, содержащей агломераты ферромагнитных наночастиц, использовалась радиоинтерференционная схема с использованием двойного волноводного тройника. Однако автором диссертации не обсужден выбор 8-ми миллиметрового диапазона длин волн, используемого для измерений.

4. Автором диссертации доказывается, что повышение точности экспериментального определения параметров магнитной жидкости СВЧ-методом в результате решения обратной задачи обеспечивается использованием при расчете теоретической зависимости коэффициента отражения СВЧ-излучения от слоя магнитной жидкости модели, учитывающей образование агломератов ферромагнитных частиц в

магнитном поле. Однако представляет несомненный интерес сравнение результатов измерения параметров магнитной жидкости разработанным СВЧ-методом с результатами прямых измерений, например, зондовыми методами.

5. В диссертации представлены спектры отражения СВЧ-излучения, используемые при измерениях параметров магнитной жидкости, однако не приведены результаты анализа влияния на погрешности измерений использование этих спектров, измеренных при нескольких значениях температур.

6. В работе отсутствуют результаты спектроскопии комбинационного рассеяния в комбинации с магнитно-силовой микроскопией, информативность которых весьма высока при исследовании структур с как с одностенными, так и многостенными углеродными нанотрубками.

Данные замечания не носят принципиального характера и не влияют на положительную оценку выполненной работы и не ставят под сомнение выводы диссертации.

Оценивая диссертацию в целом, считаю, что диссертационная работа Бочковой Т.С. является законченным научным исследованием, которое может быть квалифицировано как решение важной научной задачи, имеющей существенное значение для радиофизики и твердотельной электроники, связанной с выявлением особенностей взаимодействия электромагнитного излучения СВЧ- и оптического диапазонов с формирующимися в магнитном поле агломератами ферромагнитных наночастиц магнитной жидкости, определением на этой основе параметров магнитной жидкости и использования магнитной жидкости с добавлением нанотрубок для повышения эффективности модуляции поляризованного оптического излучения во внешнем магнитном поле с изменяющимся направлением вектора магнитной индукции.

Диссертация написана литературным и профессиональным языком, представленный иллюстративный материал хорошо оформлен.

По результатам исследований, выполненных при работе над диссертацией, опубликовано 9 работ, в том числе 4 статьи в журналах, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России, из них 3 статьи в журналах, включенных в базу данных Scopus и Web of Science, получен патент РФ, опубликованы 5 работ в сборниках статей по докладам на конференциях.

Автореферат полностью отражает основное содержание диссертации.

Считаю, что диссертационная работа Бочковой Т.С. «Особенности взаимодействия электромагнитного излучения сверхвысокочастотного и оптического диапазонов с формирующимися в магнитном поле агломератами ферромагнитных наночастиц магнитной жидкости» соответствует критериям п. 9–11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. №842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а автор диссертации Бочкова Татьяна Сергеевна заслуживает

присуждения ей ученой степени кандидата физико-математических наук по специальностям 01.04.03 – Радиофизика и 05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах.

Официальный оппонент:

доктор технических наук,
профессор МФТИ, действительный член
академии инженерных наук
им. А.М. Прохорова и Академии
технологических наук, президент
Нанотехнологического общества России,
Почетный президент группы
компаний «NT-MDT Spectrum Instruments»

Быков Виктор Александрович

Личную подпись доктора технических наук Быкова Виктора Александровича

«ЗАВЕРЯЮ»

Ученый секретарь
ГК «НТ-МДТ Спектрум Инструментс»
к.ф.-м.н.

В.Н. Рябокони

Группа компаний НТ-МДТ Спектрум Инструментс (НТ-МДТ СИ)
124460, Россия, г. Москва, г. Зеленоград, проезд №4922, д. 4, стр. 3.
www.ntmdt-si.ru
тел. e-mail: info@ntmdt-si.com

Научные специальности докторской диссертации Быкова Виктора Александровича

05.27.01 - твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты,
микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах,
01.04.01 - приборы и методы экспериментальной физики

16 ноября 2019 года.