



Прокофьев Андрей Валентинович

**Взаимодействие когерентного оптического излучения с
феррожидкостями сложного состава в магнитном поле**

Специальность 01.04.21 – «Лазерная физика»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук

Работа выполнена в ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Научный руководитель

доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник,
Плешаков Иван Викторович

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник,
Каманина Наталия Владимировна

АО «ГОИ им. С. И. Вавилова»,
начальник отдела «Фотофизика сред
с нанобъектами»

кандидат физико-математических наук,
доцент, Погода Анастасия Павловна

ФГБОУ ВО «Балтийский государственный
технический университет «Военмех»
им. Д. Ф. Устинова», доцент кафедры
И1 «Лазерная техника»

Ведущая организация

Федеральное государственное
автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский
университет ИТМО»

Защита состоится 23 сентября 2021 г. в 16.00 на заседании диссертационного совета У.01.04.21 федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, корпус 2, аудитория 249).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте https://www.spbstu.ru/science/the-department-of-doctoral-studies/defences-calendar/the-degree-of-candidate-of-sciences/prokofev_andrey_valentinovich/ федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Автореферат разослан

Ученый секретарь диссертационного совета

кандидат физико-математических наук, доцент,
Медведев Андрей Викторович

Общая характеристика работы

Актуальность работы

Магнитные жидкости или феррожидкости представляют собой коллоидные растворы однодоменных магнитных частиц в некотором растворителе. Их седиментационная устойчивость обеспечивается присутствием поверхностно-активного вещества или поверхностного заряда, как в случае ионно-стабилизированных магнитных жидкостей. Размер частиц твердой фазы обычно лежит в пределах 5-15 нм, поэтому они находятся в броуновском движении и магнитный момент системы в целом равен нулю. Однако в присутствии внешнего магнитного поля возникает преимущественная ориентация частиц, а также, при достаточно высокой концентрации, образование протяженных агрегатов, что придает коллоидной системе анизотропные свойства. [1] Существенным обстоятельством является тот факт, что при выключении поля, магнитная жидкость способна возвращаться в первоначальное состояние. Взаимодействие когерентного излучения с упорядоченными структурами, возникающими в феррожидкостях, находящимися в магнитном поле, приводит к ряду интересных эффектов. Их исследование представляется важным как с точки зрения понимания фундаментальных вопросов, связанных со структурой магнитных коллоидов, так и для практических применений подобных систем. В последнее время появилось множество исследований, предлагающих использование феррожидкостей в устройствах фотоники и оптоэлектроники, а также в некоторых важных биомедицинских и диагностических приложениях. [2-4] Получение достоверной картины формирования структур магнитными наночастицами во внешнем поле, особенно в случае сложных растворителей, является необходимым условием возможности практического применения феррожидкостей в указанных областях. Для медицинских применений актуальным является исследование характеристик слабоконцентрированных образцов. Методы лазерной физики в этом случае являются весьма информативными и удобными с точки зрения проведения экспериментов,

проясняющих природу формирования кластеров наночастиц в магнитном поле. Например, одна из методик, примененных в настоящем исследовании, основана на зондировании образцов феррожидкости излучением с высокой степенью поляризации и позволяет исследовать двулучепреломление в широком диапазоне концентраций твердой фазы и при наличии в составе добавочных компонентов. Данная часть работы производилась с использованием высокочувствительного лазерного поляризационно-оптического анализатора, разработанного в Институте аналитического приборостроения РАН главным научным сотрудником, д.ф.-м.н. Я. А. Фофановым.

Цель и задачи исследования

Цель настоящей работы заключалась в установлении закономерностей взаимодействия оптического излучения с различной степенью когерентности со структурами магнитных частиц, которые формируются в феррожидкостях на базе различных, преимущественно, содержащих добавки растворителей в присутствии магнитного поля, необходимом для биомедицинских задач, связанных с введением наночастиц в биологическую среду, а также для создания устройств фотоники и оптоэлектроники, использующих феррожидкости в качестве магнитоуправляемого элемента.

Для достижения указанной цели были решены следующие задачи:

- созданы экспериментальные установки, позволяющие выполнять когерентно-оптические исследования свойств феррожидкостей в присутствии магнитного поля (стенды, реализующие методики Z-сканирования, лазерной корреляционной спектроскопии и зондирования образцов с модуляцией поляризации света были дополнены магнитными системами, была создана установка волоконно-оптического зондирования магнитной жидкости с возможностью приложения поля);
- с использованием созданных экспериментальных установок выполнены эксперименты по:

- Z-сканированию образцов феррожидкости разной толщины с различными растворителями;
- изучению процессов роста агрегатов в феррожидкости, находящейся в магнитном поле с помощью лазерной корреляционной спектроскопии;
- наблюдению индуцированного магнитным полем двулучепреломления феррожидкостей с различными добавками модуляционно-поляризационным методом;
- волоконно-оптической регистрации показателя преломления и шумовых характеристик феррожидкостей с различными добавками в магнитном поле;
- проведен анализ экспериментальных данных, позволивший уточнить физические модели формирования агрегатов в феррожидкости в магнитном поле и даны качественные объяснения наблюдавшимся в работе магнитооптическим эффектам.

Научная новизна

Научная новизна настоящего исследования заключается в развитии комплекса методик, примененных для регистрации магнитооптического отклика феррожидкостей. Были исследованы образцы различного типа, в том числе, содержащие многокомпонентные растворители и биологически важные добавки.

Впервые был использован поляризационно-модуляционный метод для определения двулучепреломления в образцах магнитных жидкостей, содержащих сверхмалую объемную концентрацию твердой фазы (до 10^{-5}). Лазерная корреляционная спектроскопия была впервые применена для наблюдения процесса формирования кластеров магнитных частиц во включенном магнитном поле. Продемонстрирована качественная зависимость магнитооптического отклика феррожидкостей от наличия добавок (альбумин, избыток поверхностно-активного вещества, микросферы SiO_2). Обнаружена

зависимость сигнала, отраженного от торца волокна, погруженного в феррожидкость от мощности зондирующего излучения, исследованы шумовые характеристики оптического отклика. Методика Z-сканирования, дополненная подвижной магнитной системой, была впервые использована для определения поперечных размеров капельных и цепочечных агрегатов в магнитной жидкости.

Теоретическая и практическая значимость

Теоретическая значимость исследования состоит в том, что разработанные в его рамках подходы позволяют углубить понимание физических процессов, происходящих при взаимодействии когерентного излучения со средой содержащей магнитные частицы и находящейся в магнитном поле. Методики, основанные на взаимодействии когерентного излучения со структурами, образованными в магнитной жидкости в присутствии поля могут быть использованы для получения значимой информации о кинетике агрегации и релаксации коллоидных частиц.

Исследование обладает практической значимостью, поскольку его результаты могут быть применены при разработке оптоэлектронных устройств, использующих магнитное поле для управления световыми потоками. Кроме того, методики, примененные в настоящей работе, могут быть использованы в биомедицинских и диагностических применениях феррожидкостей.

Методология диссертационного исследования

Работа представляла собой экспериментальное исследование, использующее стандартные подходы лазерной физики и когерентной оптики. Для изучения свойств магнитных жидкостей, находящихся в магнитном поле был применен комплекс методик, а именно, Z-сканирование, лазерная корреляционная спектроскопия, поляризационно-модуляционная методика и

волоконно-оптическое зондирование, специально приспособленные к возможности проведения измерений в присутствии магнитного поля. Синтез образцов магнитной жидкости производился методом химического соосаждения, являющимся наиболее распространенным и надежным способом получения феррожидкостей со стабильными характеристиками.

Достоверность результатов

Достоверность полученных данных была обеспечена многократными экспериментами, показавшими высокую воспроизводимость. Образцы феррожидкости подготавливались непосредственно перед каждой серией экспериментов и затем утилизировались. Основные результаты работы были опубликованы в рецензируемых научных журналах, а также докладывались и обсуждались на конференциях. Полученные в работе данные согласуются с известными закономерностями поведения магнитных жидкостей, описанными в литературе в тех случаях, когда возможно их сопоставление.

Положения, выносимые на защиту

- В случае тонких образцов феррожидкости с добавлением поверхностно-активного вещества Z-сканирование позволяет получить дифракционную картину, регистрируя которую можно определить поперечные размеры агрегатов, причем в магнитных полях более тысячи эрстед и при концентрации твердой фазы до двух объемных процентов, эти размеры превышают десять микрометров.
- Разработанный на основе поляризационно-модуляционной методики способ наблюдения двулучепреломления, наведенного в феррожидкости магнитным полем, позволяет регистрировать этот эффект в образцах с объемной концентрацией наночастиц вплоть до 10^{-5} . Добавление избыточного поверхностно-активного вещества (олеиновой кислоты) в количестве до 15 об. % к коллоидному раствору магнетита в керосине в малых (несколько десятков эрстед) полях приводит к увеличению двулучепреломления.
- Предложенная аппроксимация зависимости двулучепреломления феррожидкости от сканирующего магнитного поля «сжатой»

экспоненциальной функцией дает лучшее согласование с экспериментальными данными, чем ранее использовавшаяся квадратичная функция. В модельной биологической среде на основе водного раствора альбумина концентрация белка влияет на параметры аппроксимирующей функции.

- Оптоволоконное зондирование образцов, в сочетании с импульсами магнитного поля, позволяет изучать зависимость эффективного показателя преломления феррожидкости от поля, а также регистрировать оптический шум отраженного света и определять его характеристики.

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на международных конференциях а также на форумах с международным участием таких как: PIERS-2015 - Progress In Electromagnetics Research Symposium, Proceedings, Прага, 2015 г.; Международная конференция по лазерной оптике, Санкт-Петербург, 2016, 2018 гг.; Неделя Науки СПб ПУ, Санкт-Петербург 2014, 2015, 2016 гг.; Девятый международный Фридмановский семинар, Санкт-Петербург, 2015 г.; 16-я международная конференция NEW2AN, Санкт-Петербург, 2016 г.; Физика диэлектриков (Диэлектрики-2017), Санкт-Петербург, 2017 г.; International Baltic conference on magnetism IBCM, Светлогорск, 2017 г.; VIII Международный конгресс «Слабые и сверхслабые поля и излучения в биологии и медицине», Санкт-Петербург, 2018; XI International Symposium on Photon Echo and Coherent Spectroscopy (PECS 2017), Svetlogorsk, 2017.

Публикации

По материалам работы опубликовано шесть научных статей в журналах, рекомендуемых ВАКом, а также тринадцать публикаций в материалах конференций.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и библиографии. Общий объем диссертации 129 страниц, 53 рисунка, 2 таблицы и список литературы из 228 наименований.

Содержание работы

Во введении к работе дается характеристика работы с точки зрения новизны, практической и теоретической значимости, кратко описываются объект и методы исследования, а также поставленные цели и решаемые задачи. Кроме того, приводятся защищаемые положения.

Первая глава представляет собой обзор современных методов исследования феррожидкостей и основных эффектов, возникающих при взаимодействии когерентного излучения с магнитными жидкостями в присутствии поля. Рассмотрены основные свойства магнитных коллоидов, определяющиеся однодоменной структурой твердой фазы. Достаточно подробно описаны перспективные применения феррожидкостей в медицинских и диагностических приложениях. Отдельно рассмотрена важность растворов белков альбумина как модельной биологической среды. Приведенный обзор современного состояния исследований, касающихся магнито-оптического отклика феррожидкостей позволяет сделать вывод о существующих проблемах в данной области. Поведение многокомпонентных систем на основе ферромагнитных частиц в присутствии магнитного поля отличается многообразием и сложностью теоретического описания [5-6]. Лазерное излучение представляет собой инструмент, позволяющий получить информацию о микроструктурах, формирующихся в магнитном поле и дополнить современные представления о данном классе веществ. Развитие методов, изучающих взаимодействие оптического излучения с магнитными структурами также важно с точки зрения практического использования ферроколлоидов.

Во второй главе рассматриваются процессы взаимодействия лазерного излучения с образцами магнитной жидкости, связанные со стабильностью и влиянием нагрева образцов. Основные характеристики образцов, исследованных в настоящей работе, приведены в Таблице 1.

параметр методика	Растворитель	Характерные значения концентраций магнитной фазы	Оптическая длина	Добавки	Механизм стабилизации	Примечание
Z-сканирование	керосин вода	0.02-2 об. %	~10-12 мкм	• избыток ПАВ • микросферы SiO₂	• Олеиновая кислота • Олеат натрия	Основные эксперименты проводились на керосине
Лазерная корреляционная спектроскопия	вода	10 ⁻² - 10 ⁻¹ об. %	10 мм (см. примечание)	• альбумин (0.01-2.5 % вес.) • микросферы SiO₂	• Олеат натрия	Несмотря на довольно большой размер кюветы, рабочая область в которой происходило рассеяние на неоднородностях не превышала 1 мм
Поляризационно модуляционная методика	керосин вода	10 ⁻³ - 10 ⁻¹ об. %	10 мм	• избыток ПАВ • альбумин (0.1-2.5 % вес.)	• Олеиновая кислота • Олеат натрия	Для обработки магнитооптического отклика регистрировался эталонный сигнал от пустой кюветы
Волоконно-оптическое зондирование	керосин вода	0.01-1 об. %	~500-1000 мкм (см. примечание)	• избыток ПАВ • микросферы SiO₂	• Олеиновая кислота • Олеат натрия • Ионно-стабилизированные МЖ	капилляр с Ø 0.2-0.5 мм оценка дистанции зондирования основана на длине когерентности используемого источника излучения

Таблица 1. Характеристики образцов, использованных в работе.

Кроме этого, во второй главе описаны два метода исследования структур в магнитной жидкости при помощи лазерного излучения, Z-сканирование и лазерная корреляционная спектроскопия.

Z-сканирование – достаточно распространённый метод исследования нелинейных свойств образцов [7]. Суть метода заключается в том, что кювета с феррожидкостью перемещается вдоль оси лазерного пучка. По изменению интенсивности на оси в дальней зоне можно судить о нелинейном показателе преломления вещества. В настоящей работе, однако, Z-сканирование было дополнено возможностью приложения достаточно сильного магнитного поля (1800 Э) и перемещением кюветы в плоскости перпендикулярной направлению распространения излучения. В этом случае, при нахождении образца в области перетяжки, оказывается возможным наблюдать дифракционную картину на отдельных цепочечных агрегатах магнитных частиц. Характерное распределение интенсивности излучения при этом показано на Рисунке 1.

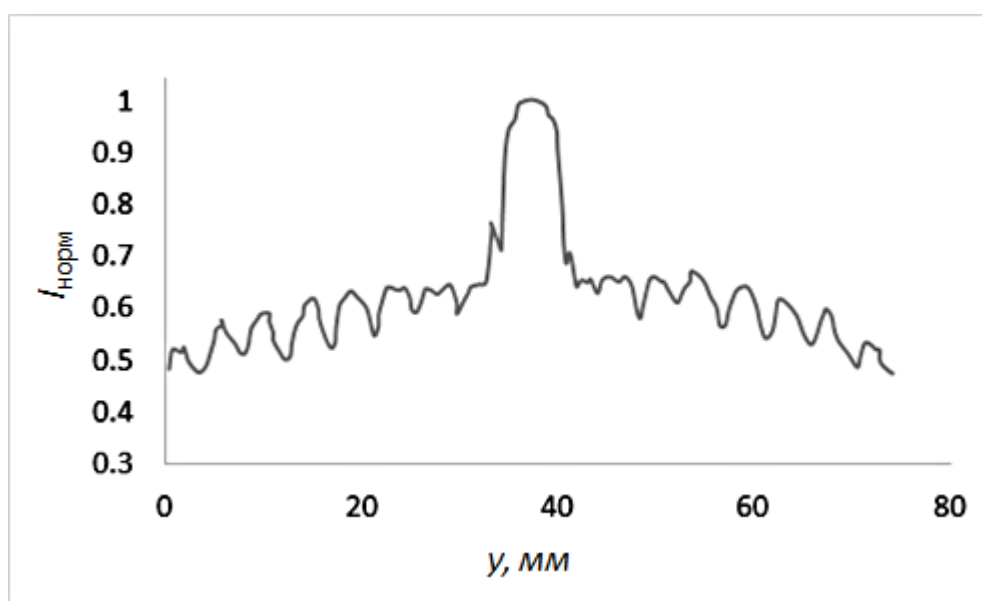


Рис. 1. Типичное распределение нормированной на максимум интенсивности $I_{\text{норм}}$ дифракционной картины в плоскости, перпендикулярной распространению луча в направлении оси y (перпендикулярном приложенному магнитному полю). 0 по оси абсцисс соответствует началу движения координатной подвижки. Соответствующий размер агрегатов – 20 мкм.

Известное выражение для дифракционных минимумов позволяет оценить поперечный размер кластеров:

$$z\lambda = d\sin\theta ,$$

где z – порядковый номер минимума; λ – длина волны; d – поперечный размер агрегата; θ – угол дифракции на минимум с номером z .

Для исследованных образцов вычисленный размер сформированных кластеров составил 20 мкм, что хорошо совпало с данными оптической микроскопии (17,4 мкм). Склонность к агрегированию, значительно увеличивается в присутствии добавочных компонентов или избытка ПАВ, что в свою очередь оказывает влияние на дифракционную картину.

Другим информативным методом, позволяющим исследовать магнитоупорядоченные структуры является лазерная корреляционная спектроскопия которая позволила наблюдать кинетику агрегации магнитных частиц, находящихся в магнитном поле. В настоящей работе было показано, что для значений магнитного поля 150 Э рост агломератов продолжается довольно длительное время (порядка 30 мин) и приводит к появлению агрегатов радиусом до 140 нм, хотя основная часть приходится на размер 30-60 нм.

В третьей главе приводятся результаты эксперимента с использованием поляризационно-модуляционной методики регистрации оптического отклика. Магнитное поле создавалось электромагнитом и представляло собой временную развертку. На первом этапе магнитооптический отклик аппроксимировался параболой. Основные эксперименты проводились с магнитной жидкостью на основе керосина. При этом удалось зарегистрировать устойчивый сигнал для концентраций феррожидкости до 10^{-5} . Результаты основных экспериментов показаны на Рисунке 2.

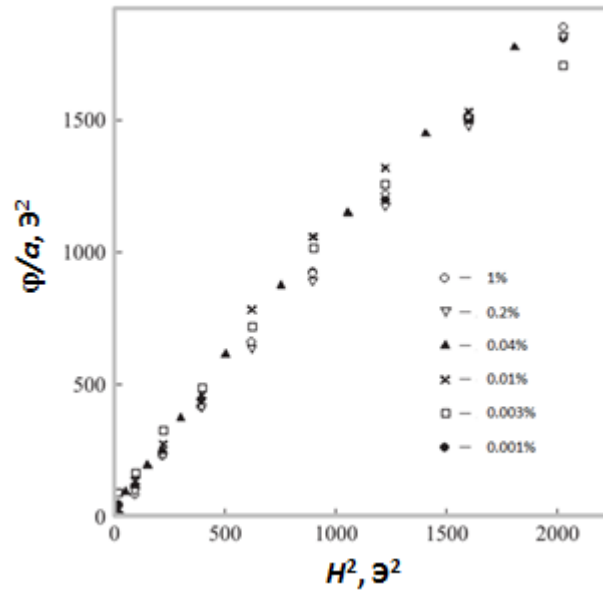


Рис. 2. Зависимость нормированной разности фаз (φ/a) от квадрата магнитного поля. На вставке указаны объемные концентрации магнетита. Растворитель – керосин.

Для жидкости на основе керосина была определена зависимость отклика от количества поверхностно-активного вещества в коллоидном растворе. Обнаружено что до некоторых значений олеиновой кислоты двулучепреломление увеличивается. Предположительно данный эффект связан с образованием микрокапельных агрегатов в объеме образца [8]. При дальнейшем увеличении концентрации ПАВ происходит нарушение агрегационной устойчивости коллоида.

В дальнейшем было опробовано несколько различных типов аппроксимаций и показано, что линейное изменение магнитного поля вызывает изменение двулучепреломление, которое хорошо описывается зависимостью вида:

$$\varphi = \varphi_0 \left(1 - e^{-\left(\frac{H}{b}\right)^c} \right)$$

Где коэффициент (φ_0) является откликом насыщения, H – магнитное поле. Параметр b определяет масштаб кривой. Он представляет собой характерное

значение поля, которое необходимо чтобы отклик достиг $\sim 63.2\%$ от своего максимального значения (φ_0); c – параметр формы.

Значительная часть экспериментальной работы была посвящена определению двулучепреломления возникающего в феррожидкости на водной основе с добавкой альбумина.

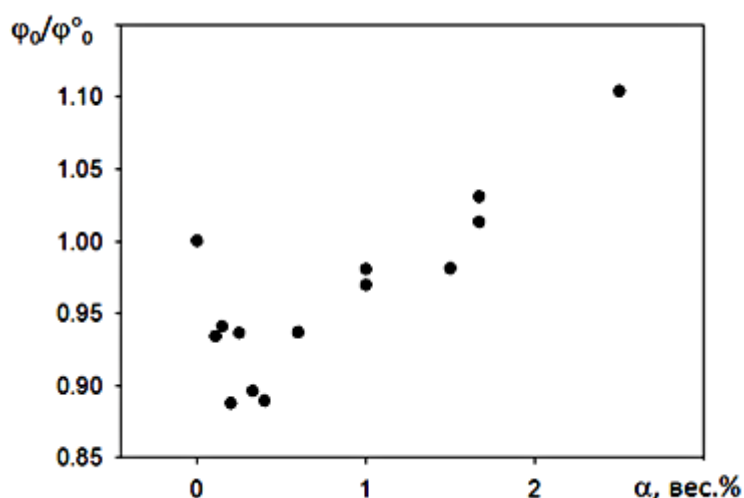


Рис. 3 Зависимость нормированного отклика насыщения от концентрации добавленного альбумина. Для каждой точки содержание магнитной фазы фиксировано. Φ_0 – с добавкой альбумина; Φ_0^0 – без альбумина.

На Рисунке 3 приведена зависимость нормированного отклика насыщения от концентрации альбумина. Для всех точек концентрация магнетита находилась в диапазоне от 0,002 до 0,04 об. %. Поскольку олеиновой кислоте свойственно высокое сродство с альбумином [9], можно предположить, что в растворе образуются вначале агрегаты магнетита с белком. Рост максимального двулучепреломления после некоторой критической концентрации альбумина может свидетельствовать о том, что в растворе образуется пространственная структура из молекул альбумина и связанных с ними магнитных частиц.

В четвертой главе приводятся результаты экспериментов, полученные с помощью волоконно-оптического зондирования [10]. Оптоволокно помещалось в капилляр с магнитной жидкостью и регистрировался сигнал отраженный от границы раздела. Было обнаружено, что вычисленный показатель преломления феррожидкости находящейся в магнитном поле зависит от мощности зондирующего излучения (Рисунок 4).

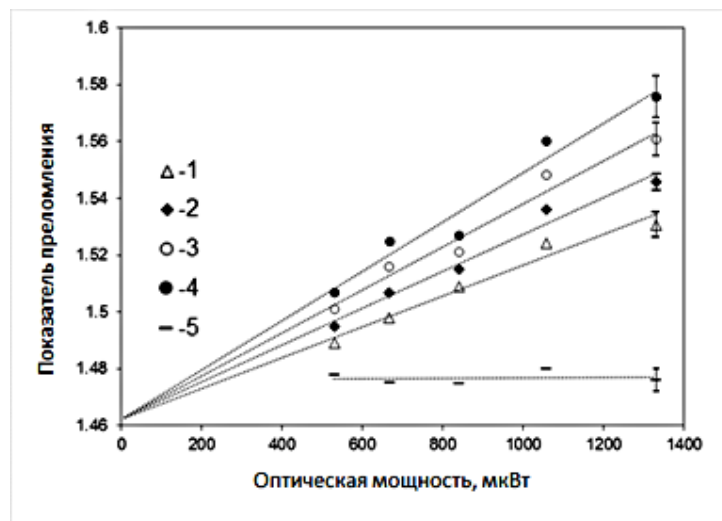


Рис. 4. Эффективный показатель преломления в зависимости от оптической мощности зондирующего излучения для различных значений магнитного поля (1 – 40Э; 2 – 70Э; 3 – 100 Э; 4 – 130 Э; 5 – отсутствие поля).

Данный факт свидетельствует о том, что существенная часть излучения отражается от агломератов и вносит вклад в магнитооптический отклик (Рисунок 5).



Рис. 5. Формирование магнитооптического отклика от торца волокна.

Наряду с чистыми магнитными жидкостями, были исследованы образцы с добавками микросфер диоксида кремния и альбумина. Оказалось, что их влияние в целом сходно, и приводит к двум эффектам. Во-первых, магнитооптический отклик начинает регистрироваться при меньших концентрациях твердой фазы, что, по-видимому, связано с облегчением условий образования агрегатов, а во-вторых, как правило, растет среднеквадратическое значение шумовой части сигнала, что предположительно связано с большим разбросом размера возникающих агрегатов. На Рисунке 6 представлен пример зависимости минимального отклика от приложенного магнитного поля. При данной концентрации феррочастиц без микросфер отклика не наблюдалось.

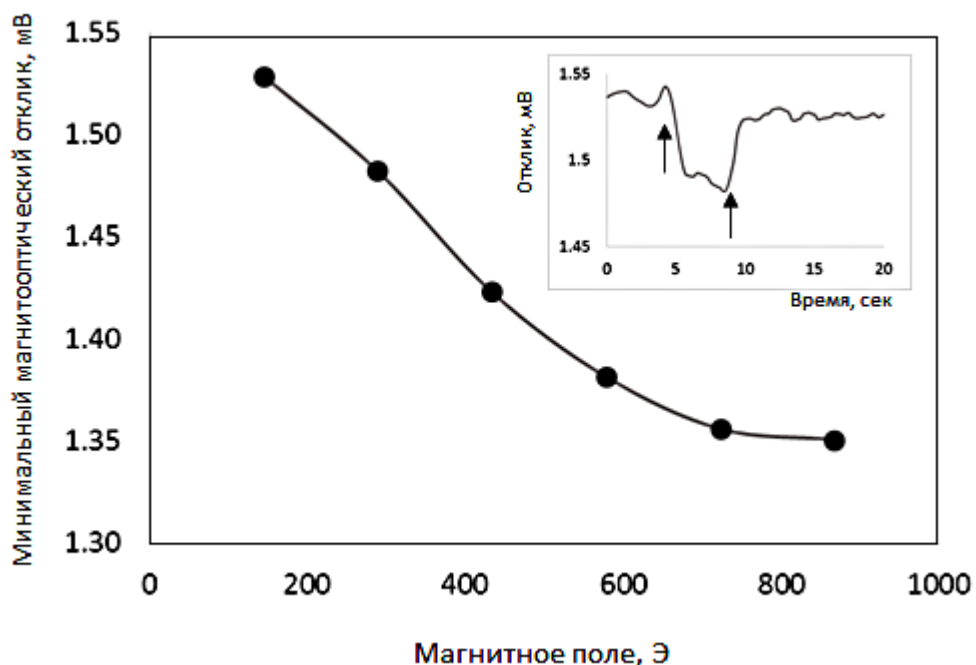


Рис. 6. Зависимость минимального сглаженного магнитооптического отклика жидкости на основе воды ($\phi=0.4\%$) с добавкой микросфер SiO_2 от поля. Объемная доля микросфер $\sim 1\%$. Поле приложено перпендикулярно направлению распространения света. На вставке показан отклик для 289 Э, стрелки обозначают моменты включения и выключения электромагнита.

Шумовые характеристики ионно-стабилизированных магнитных жидкостей существенно отличаются от коллоидных систем, в которых стабильность обеспечивается поверхностно активным веществом.

Для ионно-стабилизированной феррожидкости при включении магнитного поля не наблюдалось характерное изменение постоянной составляющей сигнала, вызываемое изменением показателя преломления границы торец – магнитная жидкость. Кроме того, наблюдалось существенное увеличение шума, что может свидетельствовать о существенно меньшей устойчивости подобных систем.

В заключении сформулированы следующие основные результаты настоящей работы:

1. Выполнена доработка ряда оптических методик изучения феррожидкости (поляризационно-оптической методики, техники Z-сканирования, лазерной корреляционной спектроскопии, а также экспериментального подхода, использующего в измерениях характеристик среды оптоволоконные элементы), обеспечившая возможность приложения магнитного поля к образцу. Достигнута высокая чувствительность лазерного поляризационно-оптического зондирования феррожидкостей сложного состава;

2. Проведено изучение магнитооптического отклика феррожидкостей на основе различных носителей, в том числе содержащих добавки вещества, моделирующего биологическую среду (водорастворимый белок альбумин). Показано, что добавки влияют на характер формирования структур, индуцируемых магнитным полем. Установлено, что присутствие небольшого избытка поверхностно-активного вещества заметно увеличивает двулучепреломление, а наличие альбумина в растворе может как уменьшать, так и увеличивать магнитооптический отклик;

3. Для случая волоконно-оптической методики и при наличии магнитного поля, обнаружен рост показателя преломления феррожидкости, в зависимости от мощности отраженного от торца волокна излучения. Сделано предположение о том, что данная зависимость показателя преломления обусловлена добавкой излучения, рассеянного назад от образованных в магнитном поле агрегатов магнитных частиц;

4. Впервые были исследованы шумы магнитооптического отклика феррожидкостей и показано, что шумовые характеристики существенно зависят от механизма стабилизации коллоидного раствора.

Основное содержание диссертационного исследования опубликовано в следующих работах:

Статьи в журналах из Перечня изданий, рецензируемых ВАК и включенных в международные базы данных (Scopus, Web of Science):

- A1. Прокофьев А.В., Плешаков И.В., Бибик Е.Е., Кузьмин Ю.И. Оптическое исследование геометрических характеристик агрегатов, образованных частицами магнитной жидкости // Письма в ЖТФ. – 2017. – Т. 43. – № 4. – С. 26-31.
- A2. Прокофьев А.В., Фофанов Я.А., Плешаков И.В., Бибик Е.Е. Лазерное поляризационно-оптическое наблюдение агломерации магнитных наночастиц в жидкой среде // Научное приборостроение. – 2017. – Т. 27. – № 4. – С. 3-7.
- A3. Фофанов Я.А., Плешаков И.В., Прокофьев А.В., Бибик Е.Е. Исследование поляризационных магнитооптических откликов слабоконцентрированной феррожидкости // Письма в ЖТФ. – 2016. – Т. 42. – № 20. – С. 66-72.
- A4. Nepomnyashchaya E. K., Prokofiev A.V, Velichko E.N., Pleshakov I.V., Kuzmin Yu I. Investigation of magneto-optical properties of ferrofluids by laser light scattering techniques // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2017. – Vol. 431. – P. 24-26.
- A5. Прокофьев А.В., Плешаков И.В., Shlyagin M., Агрозов П.М., Бибик Е.Е., Кузьмин Ю.И. Шумовые характеристики оптического отклика феррожидкостей на воздействие магнитного поля // Письма в ЖТФ. – 2019. – Т. 45. – № 15. – С. 3-5.
- A6. Shlyagin M.G., Agrozov P.M., Pleshakov I.V., Prokofiev A.V., Bibik E.E. Incident-power-dependent refractive index of ferrofluid in magnetic field measured with a fiber optic probe // Optik. – 2019. – Vol. 186. P. 418-422.

Материалы конференций и другие публикации:

- A7. Прокофьев А.В., Плешаков И.В. Магнитооптическая установка и методика измерений нелинейных характеристик феррожидкостей, используемых в устройствах оптоэлектроники – Материалы научно-практической конференции с международным участием «Неделя науки СПбГПУ (институт физики, нанотехнологий и телекоммуникаций)», СПб, 2015, с. 115-117.
- A8. Прокофьев А.В., Плешаков И.В. Измерение магнитооптических характеристик феррожидкостей на основе магнетита. – Материалы научного форума с международным участием «Неделя науки СПбГПУ (институт физики, нанотехнологий и телекоммуникаций)», СПб, 2015, с. 110-111.
- A9. Prokofiev A.V., Varlamov A.V, Agruzov P.M., Pleshakov I.V., Bibik E.E., Stepanov S.I., Shamray A.V. Ferrofluid as promising magnetically controlled material for optofluidics and microstructured fiber-based sensing. – IEEE Conference Publications, International Conference Laser Optics (LO), Saint Petersburg (Russia), p. R9-7, 2016.
- A10. Nepomniashchaia E.K., Prokofiev A.V., Aksenov E.T., Pleshakov I.V., Bibik E.E., Velichko E.N., Kuzmin Yu.I. Laser correlation spectroscopy and nonlinear magnetooptic response of structures formed by nanoparticles in magnetic fluid. – IEEE Conference Publications, International Conference Laser Optics (LO), Saint Petersburg (Russia), 2016, p. R9-9, 2016.
- A11. Prokofiev A., Nepomnyashchaya E., Pleshakov I., Kuzmin Yu., Velichko E., Aksenov E. Study of specific features of laser radiation scattering by aggregates of nanoparticles in ferrofluids used for optoelectronic communication systems. – Proceedings of 16th International Conference NEW2AN 2016 (Next Generation Teletraffic and Wire/Wireless Advanced Networks and Systems), St. Petersburg (Russia), 2016, p. 680-689.

- A12. Фофанов Я.А., Плешаков И.В., Прокофьев А.В., Бирик Е.Е. Наблюдение слабых поляризационных откликов магнитной наножидкости. – IX Международная конференция «Фундаментальные проблемы оптики» ФПО-2016 (сборник трудов), Санкт-Петербург (Россия), Университет ИТМО, 2016, с. 51-52.
- A13. Прокофьев А.В., Плешаков И.В., Бирик Е.Е. Исследование оптического отклика образцов магнитной жидкости с добавлением микросфер диоксида кремния. – Материалы XIV Международной конференции «Физика диэлектриков (Диэлектрики-2017)», Санкт-Петербург (Россия), изд-во РГПУ им А.И. Герцена, 2017, Т. 2, с. 124-126.
- A14. Matveev V.V., Prokofiev A.V., Pleshakov I.V., Bibik E.E. Optical and magnetic investigations of structures formed by ferrofluid-based systems – International Baltic conference on magnetism IBCM 2017, Book of abstracts, Svetlogorsk (Russia), 20-24 Aug. 2017, p. 62.
- A15. Shlyagin M., Prokofiev A.V., Pleshakov I.V., Agruzov P.M., Nepomnyashchaya E.K., Velichko E.N. Magnetic fluid analysis by optical fiber method. – Proceedings - 18th International Conference on Laser Optics ICLO 2018, Saint Petersburg (Russia), 4-8 June 2018, p. 407.
- A16. Фофанов Я.А., Плешаков И.В., Прокофьев А.В., Курапцев А.С., Бирик Е.Е. Чувствительное поляризационно-оптическое наблюдение процессов структурообразования в магнитных наножидкостях //VIII Международный конгресс «Слабые и сверхслабые поля и излучения в биологии и медицине». Научные труды Конгресса. – 2018. – с. 89-90.
- A17. Yakov Fofanov Y., Sokolov I., Pleshakov I., Vetrov V., Prokofiev A., Kuraptsev A. and Bibik E. On the criteria for strong and weak polarization responses of ordered objects and systems //EPJ Web of Conferences. – EDP Sciences, 2017. – Vol. 161. – P. 01003.
- A18. Прокофьев А. В. Дифракция лазерного излучения на структурных элементах магнитной жидкости и методика исследования их размеров //Неделя науки СПбПУ. – 2016. – с. 200-201.

- A19. Prokofiev A. V., Petrov V.M., Pleshakov I.V., Shamray A.V. Nonlinear optical phenomena in iron oxide containing magnetic nanocolloids // Progress in Electromagnetics Research Symposium. – 2015. – P. 2692-2694.

Список цитируемой литературы:

1. Jamon D. et al. Experimental investigation on the magneto-optic effects of ferrofluids via dynamic measurements //Journal of magnetism and magnetic materials. – 2009. – Vol. 321. – № 9. – P. 1148-1154.
2. Hua M. Y. et al. The effectiveness of a magnetic nanoparticle-based delivery system for BCNU in the treatment of gliomas //Biomaterials. – 2011. – Vol. 32. – № 2. – P. 516-527.
3. Kumar A. et al. Multifunctional magnetic nanoparticles for targeted delivery //Nanomedicine: Nanotechnology, Biology and Medicine. – 2010. – Vol. 6. – № 1. – P. 64-69.
4. Tibbe A. G. J. et al. Optical tracking and detection of immunomagnetically selected and aligned cells //Nature biotechnology. – 1999. – Vol. 17. – № 12. – P. 1210-1213.
5. Jordan P. C. Field dependent chain formation by ferromagnetic colloids //Molecular Physics. – 1979. – Vol. 38. – № 3. – P. 769-780.
6. Wang Z., Holm C. Structure and magnetic properties of polydisperse ferrofluids: A molecular dynamics study //Physical Review E. – 2003. – Vol. 68. – № 4. – P. 041401.
7. Chapple P. B. et al. Single-beam Z-scan: measurement techniques and analysis //Journal of Nonlinear Optical Physics & Materials. – 1997. – Vol. 6. – № 03. – P. 251-293.
8. Лахтина Е. В., Пшеничников А. Ф. О влиянии коагулянта и свободного стабилизатора на образование агрегатов в магнитных жидкостях //Коллоидный журнал. – 2010. – Т. 72. – № 2. – С. 231-237.
9. Spector A. A. Fatty acid binding to plasma albumin //Journal of lipid research. – 1975. – Vol. 16. – № 3. – P. 165-179.
10. Chen L. X. et al. Fiber magnetic-field sensor based on nanoparticle magnetic fluid and Fresnel reflection //Optics letters. – 2011. – Vol. 36. – № 15. – P. 2761-2763.