



Конкурс для школьников «Гениальные мысли» Автореферат проекта победителя конкурса

Название работы – Магнитооптическая модуляция сигналов с помощью коллоидных нанопластинок гексаферрита стронция.

Автор – Деянков Данила Андреевич (11 класс, СУНЦ МГУ, г. Москва).

Руководитель – Анохин Евгений Олегович, аспирант факультета наук о материалах МГУ имени М.В.Ломоносова.

Основная идея работы, цели, задачи

Поиск новых материалов с превосходящими качественными характеристиками – актуальная задача на сегодняшний день. Так на смену магнитным жидкостям на основе суперпарамагнитных частиц пришли коллоидные системы с магнитотвёрдыми наночастицами. Магнитные жидкости являются перспективными для применения в различных областях медицины, оптических системах, а также для создания различных наноструктур.

Наночастицы гексаферрита стронция отличаются высокой термической и химической стабильностями, а также характеризуются сильным взаимодействием с магнитным полем. Одной из наиболее интересных областей применения коллоидов гексаферрита является использование магнитооптического эффекта. Данное явление основано на том, что при приложении даже слабого магнитного поля к коллоиду, содержащему анизотропные магнитотвёрдые частицы, частицы легко поворачиваются, выстраиваясь вдоль силовых линий, и таким образом, меняют оптическую плотность коллоида [1–3]. Эффект легко фиксируется даже невооруженным глазом. К сожалению, на данный момент эта же область применения является в значительной области неописанной: эффект зафиксирован и описан для постоянных магнитных полей, для переменных полей лишь отмечено, что он существует, отсутствуют какие-либо систематические описания.

Поэтому *целью данного проекта* является получение и исследование магнитных жидкостей с высокочастотным магнитооптическим откликом. В рамках данной цели были поставлены следующие *задачи*:

- синтезировать стабильные коллоиды магнитотвёрдых анизотропных наночастиц гексаферрита стронция;
- сконструировать установку для измерения магнитооптического отклика в переменных магнитных полях различной конфигурации (в т. ч. вращающееся магнитное поле);
- исследовать зависимость величины магнитооптического отклика от частоты прилагаемого внешнего магнитного поля;
- изучить магнитооптическую модуляцию музыкальных сигналов.

Основные результаты

Характеризация коллоидных частиц

В рамках данной работы были синтезированы стабильные коллоиды на основе наночастиц гексаферрита стронция. Согласно данным ПЭМ, коллоидные частицы имеют анизотропную пластинчатую форму со средними диаметром и толщиной 50×5 нм (рис. 1). Измерения магнитных свойств высушенных частиц показали, что частицы являются магнитотвёрдыми с коэрцитивной силой 5 кЭ и намагниченностью насыщения 50 э.м.е./г (рис. 2).

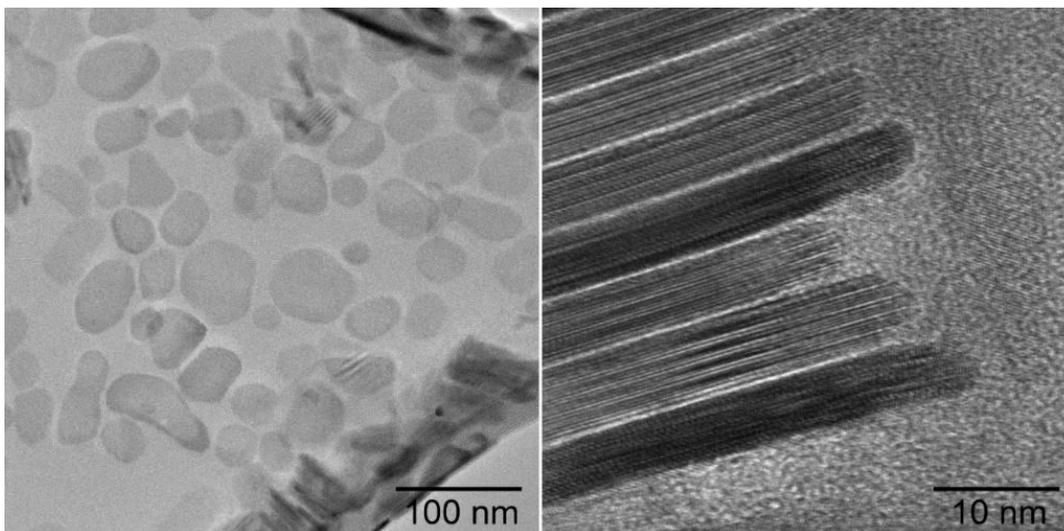


Рис. 1. ПЭМ микрофотографии коллоидных частиц.

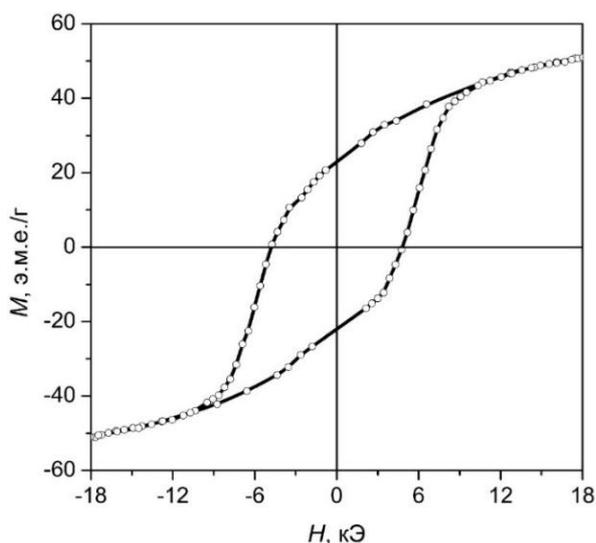


Рис. 2. Петля намагничивания высушенных коллоидных частиц.

При приложении внешнего магнитного поля коллоидные частицы поворачиваются и выстраиваются вдоль силовых линий, в результате чего изменяется оптическая плотность коллоида (рис. 3).



Рис. 3. Коллоид в отсутствие магнитного поля и при применении поля в разных направлениях.

Магнитооптика в переменных полях

Для коллоида была изучена частотная зависимость магнитооптического сигнала от частоты переменного сигнала, подаваемого на катушки. При этом была использована максимальная начальная амплитуда сигнала 5 В (Vpp). Магнитооптический сигнал начинает быстро убывать при превышении частоты 200 Гц, достигая практически нулевого значения при частоте поля свыше 2 кГц (рис. 4).

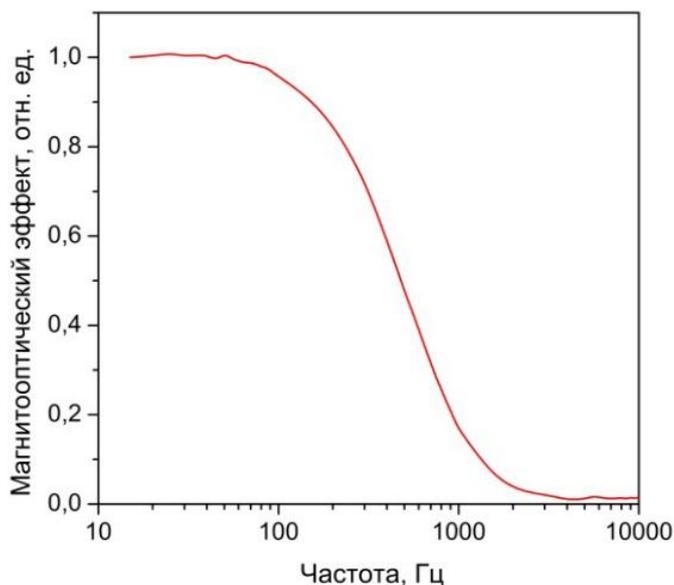


Рис. 4. Частотная зависимость магнитооптического отклика коллоида в магнитном поле переменной напряженности.

Снижение магнитооптического отклика при повышении частоты магнитного поля обусловлено различными факторами: во-первых, повышением импеданса катушек с ростом частоты переменного тока, вследствие чего снижается реальное магнитное поле, получающееся в катушках, а во-вторых, с трудностями, возникающими при вращении частиц в вязкой среде; с некоторой частоты частицы перестают успевать совершать полный оборот вслед за изменяющимся направлением магнитного поля.

Решением проблемы ограничения частотного диапазона, предложенным в данной работе, является использование дополнительного ориентирующего магнитного поля. При приложении к коллоиду магнитотвердых пластинок внешнего магнитного поля порядка нескольких десятков эрстед происходит ориентация частиц вдоль магнитных силовых линий поля (рис. 5).



Рис. 5. Схема ориентирования частиц.

Нами было использовано ориентирующее поле индукцией 18 мТл, что вдвое больше магнитного поля, создаваемого катушками (при низкой частоте 100 Гц). При подобной геометрии установки ориентирующее поле сохраняет коллоидные частицы приблизительно в одном положении, в то время как модулирующее поле катушек вызывает небольшие колебания частиц относительно этого положения равновесия.

Зависимость значения магнитооптического отклика от частоты модулирующего поля в присутствии ориентирующего поля (рис. 6) имеет тот же вид, что и в его отсутствие, однако, при этом значительно увеличивается диапазон фиксируемых с помощью магнитооптического эффекта частот модулирующего поля, в пределе достигая 5 кГц.

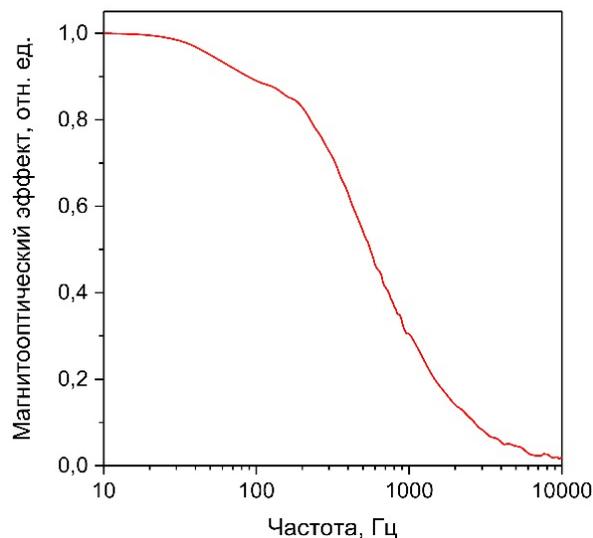


Рис. 6. Частотная зависимость магнитооптического отклика коллоида в магнитном поле переменной напряженности с применением ориентирующего поля.

С точки зрения физического смысла наибольшую значимость имеет измерение магнитооптического отклика коллоида в переменных полях с постоянной пиковой величиной напряженности. С имеющимися в наличии источником сигналов и усилителем максимальная частота, на которой удастся создать разумное (приемлемое соотношение сигнал / шум магнитооптического отклика) по напряженности поле величиной 10 Э вплоть до частоты переменного поля 3000 Гц.

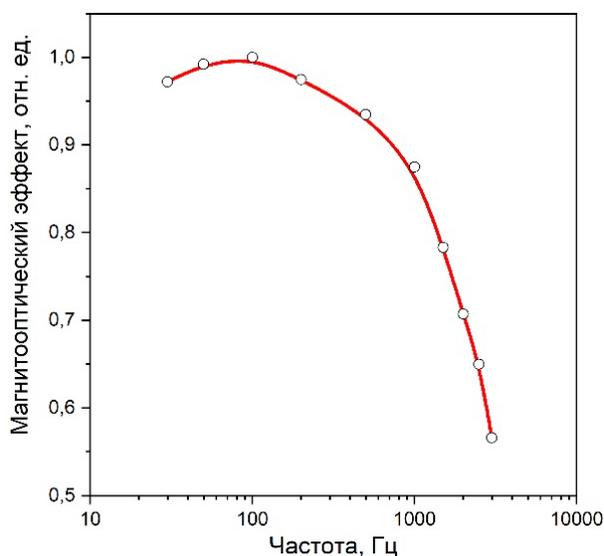


Рис. 7. Частотная зависимость магнитооптического отклика при амплитуде поля 10 Э.

При измерении в поле постоянной амплитуды частотная зависимость магнитооптического отклика принимает несколько иной вид (рис. 7): значительный отклик ($> 50\%$ от максимального) наблюдается даже при максимальной частоте 3 кГц. Таким образом, коллоиды пластинчатых частиц гексаферрита обладают наиболее быстрым магнитооптическим откликом среди всех известных коллоидных сред. Наблюдаемый спад отклика в области малых частот менее 100 Гц представляется крайне интересным, однако не объясненным феноменом. Можно предположить, что этот эффект связан с релаксационными броуновскими процессами, протекающими в момент, когда напряженность переменного поля равна нулю. Вероятно, в низкочастотных полях частицы способны успевать релаксировать в случайное ориентационное положение, при переходе из которого величина изменения оптической плотности оказывается меньше, нежели чем из положения нулевого поля в случае высокочастотного сигнала.

Магнитооптика во вращающемся магнитном поле

При помощи вращающегося магнитного поля был зарегистрирован отклик, наилучшим образом соответствующий форме подаваемого сигнала (рис. 8). Он представляет собой неискаженную синусоиду с удвоенной частотой относительно подаваемого сигнала. Удвоение частоты обусловлено полным поворотом частицы вокруг своей оси; в процессе поворота присутствуют два эквивалентных с точки зрения магнитооптического отклика положения частицы относительно лазерного луча.

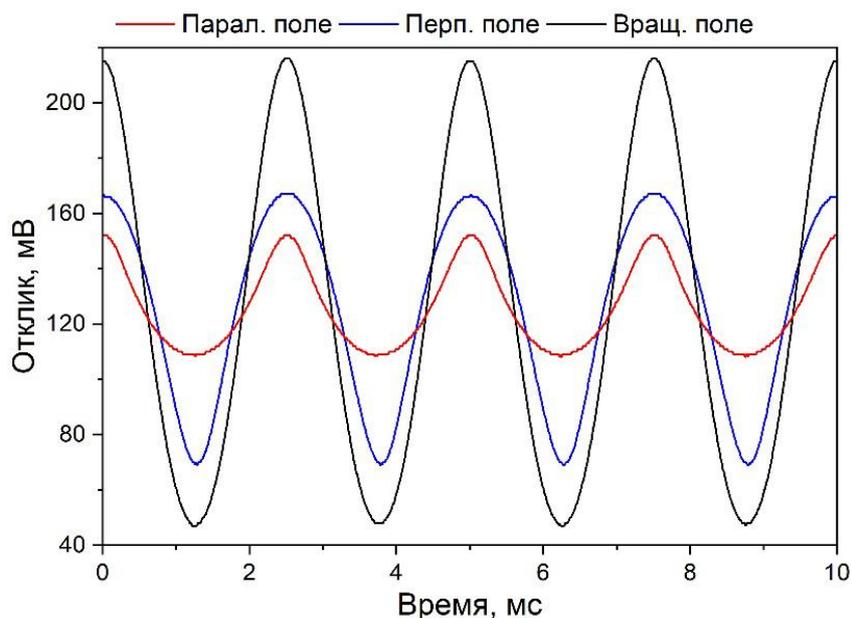


Рис. 8. Сравнение регистрируемых сигналов при приложении переменного поля параллельно направлению распространения лазерного луча, перпендикулярно лучу и вращающегося поля. Напряженность поля 10 Э, частота 200 Гц.

Объяснение наблюдаемого эффекта отсутствия искажений в сигнале может быть следующее: в отличие от переменного магнитного поля, вращающееся поле лишено моментов, когда напряженность поля равна нулю. Поэтому броуновские релаксационные процессы не оказывают значительного влияния на динамику вращения частиц. Отличие отклика по величине (наибольший отклик для вращающегося поля и различные отклики для различных ориентаций переменного поля относительно лазерного луча) служит косвенным подтверждением предположения о том, что статистически случайное положение частицы, приобретаемое в ходе релаксационных процессов, влияет на эффективную величину магнитооптического отклика.

Модулирование и искажение музыкального сигнала

В качестве *proof of concept* нами была продемонстрирована возможность использования магнитной жидкости как среды для модуляции сигнала в акустическом звуковом диапазоне до 5 кГц, что перекрывает весь частотный диапазон фортепиано (до пятой октавы – 4186 Гц). Поэтому такого интервала модулируемых частот достаточно для воспроизведения музыкальных композиций. В качестве источника переменного электрического сигнала был использован аудиовыход смартфона, сигнал сложной гармонической природы (музыкальная композиция).

При помощи изготовленной нами установки, становится возможным не только передавать сигнал, но и вносить различные искажения в него путём изменения направления внешнего ориентирующего магнитного поля относительно центральной оптической оси. Нами показана возможность создавать такие акустические эффекты, как овердрайв (Рис. 9А), дисторшн (на Рис. 9С), удвоение частоты (Рис. 9В), а также различные другие искажения по частоте, амплитуде и фазе (Рис. 9D).

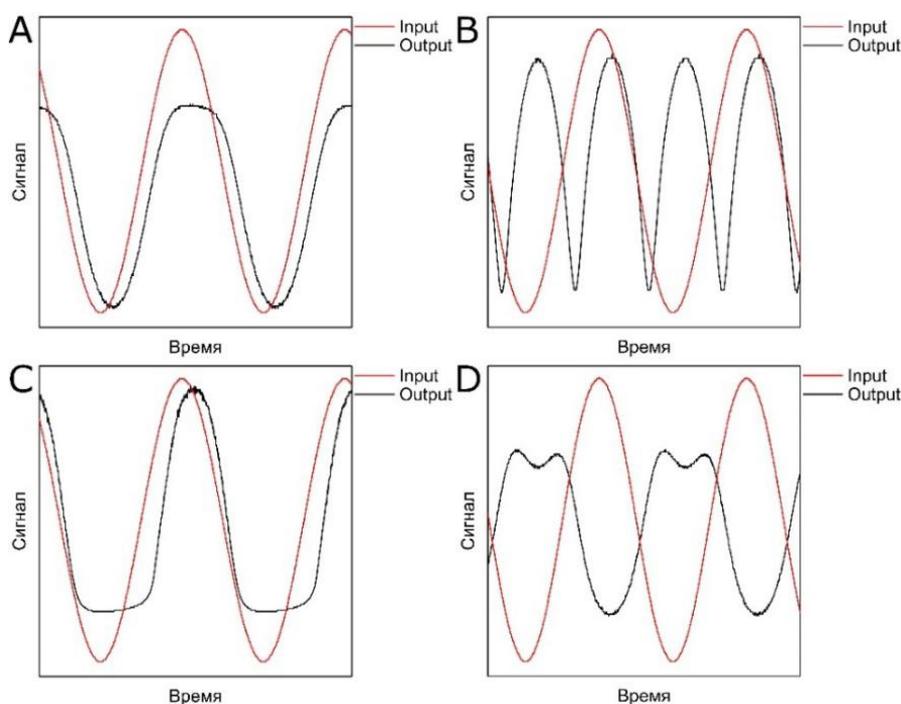


Рис. 9. Различные виды искажений, вносимых в сигнал.

Выводы, заключение, перспективы

Методом растворения стеклокерамического прекурсора получены стабильные коллоиды магнитотвёрдых наночастиц гексаферрита стронция. Коллоиды анизотропных пластинчатых частиц обладают значительным магнитооптическим откликом, который сохраняется вплоть до частот свыше 3кГц. В работе выдвинуто предложение использовать дополнительное ориентирующее магнитное поле, позволяющее расширить рабочий частотный диапазон магнитооптической модуляции. Так, в виде *proof of principle* работы модуляции в акустическом звуковом диапазоне до 5кГц, нами была показана модуляция музыкального аудиосигнала. Показана возможность использования магнитной жидкости в качестве эквалайзера путём внесения различных искажений при модуляции сигнала. Дополнительно показано, что использование вращающегося магнитного поля позволяет регистрировать сигналы без искажений, при этом величина магнитооптического отклика для вращающегося поля значительно превосходит аналогичную для переменного поля.

Список цитированных источников*

1. S.E. Kushnir, A.I. Gavrilov, P.E. Kazin, A.V. Grigorieva, Y.D. Tretyakov, M. Jansen, J. Mater. Chem. 22 (2012) 18893.
2. L.A. Trusov, A.V. Vasiliev, M.R. Lukatskaya, D.D. Zaytsev, M. Jansen, P.E. Kazin, Chem. Commun. 50 (2014) 14581–14584.
3. A.A. Eliseev, A.A. Eliseev, L.A. Trusov, A.P. Chumakov, P. Boesecke, E.O. Anokhin, A.V. Vasiliev, A.E. Sleptsova, E.A. Gorbachev, V. V Korolev, P.E. Kazin, Appl. Phys. Lett. 113 (2018) 113106.

* В силу того, что выше представлен сжатый текст работы, я привожу и сжатый список литературы, который состоит из самых основных источников.