

ЭФФЕКТЫ ДВОЙНОГО ЛУЧЕПРЕЛОМЛЕНИЯ И ДИХРОИЗМА В МАГНИТНЫХ ЖИДКОСТЯХ С РАЗЛИЧНОЙ СТЕПЕНЬЮ АГРЕГАТИВНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ.

В. И. Вивчарь¹, К.В. Ерин¹

*¹Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Северо-Кавказский федеральный университет», г.
Ставрополь 355017 ул. Пушкина, 1, Россия*

e-mail: vicklyh74@gmail.com

Поступила в редакцию . .2023.

Аннотация – Исследованы спектры оптических эффектов дихроизма и двойного лучепреломления в магнитных жидкостях типа магнетит в керосине со средним размером частиц 6,7 нм и 13,7 нм. Обнаружены существенные отличия, как в величине эффектов, так и в их спектральном поведении, которые связаны с образованием агрегатов в образце с более крупными частицами. Присутствие агрегатов частиц существенным образом меняет оптические свойства системы. Была произведена интерпретация эффектов на основе одночастичной ориентационной модели с учетом суперпарамагнетизма наночастиц магнетита.

ВВЕДЕНИЕ

Магнитные жидкости являются устойчивыми коллоидами магнитных наночастиц в немагнитных жидких средах. Действия магнитного, электрического и гидродинамического полей приводит к возникновению в таких системах разнообразных эффектов, связанных с ориентационным и структурным упорядочением наночастиц [1]. Магнитные жидкости получили широкое применение в уплотнениях вращающихся валов и амортизаторах, датчиках магнитного поля и системах детектирования органических и неорганических соединений [2]. Ряд применений основан на изменении оптических свойств магнитной жидкости под действием внешних полей. Наиболее изученными оптическими эффектами в магнитной жидкости являются двойное лучепреломление (ДЛП) и дихроизм [3]. Величина данных эффектов в разной степени зависит от таких параметров, как размер частиц, распределение по размерам, химический состав, концентрация твердой фазы, температура, а также от возможности возникновения агрегативных структур под действием поля или при нарушении целостности адсорбционных оболочек. Для исследования влияния агрегатов на свойства магнитных коллоидов применяют оптические, реологические, магнитные методы, а также методы нейтронного и рентгеновского рассеяния [4-6].

В настоящей работе мы представляем результаты исследований влияния агрегатов, возникающих под действием магнитного поля, на величину и спектральное поведение эффектов двойного лучепреломления и дихроизма.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Для экспериментов мы выбрали две исходные магнитные жидкости. Образец №1 (производитель ОАО «НИПИГазпереработки», г. Краснодар) со средним радиусом частиц магнетита 6,7 нм, исходная концентрация 15%. Образец №2 (производитель НТЦ «Магнитные жидкости», г. Наро-Фоминск), со средним радиусом частиц магнетита 13,7 нм, исходная концентрация 10%. Дисперсионной средой в обоих образцах был керосин, стабилизация поверхности осуществлялась олеиновой кислотой. Из двух исходных магнитных жидкостей путем разбавления были получены образцы с объемной концентрацией 0,01%. Исследования методами динамического и статического рассеяния света на приборе «PhotocorComplex» показали, что образец №1 проявлял высокую агрегативную устойчивость при воздействии магнитного поля до 20 кА/м, в образце №2 под действием такого же поля возникали агрегаты частиц размером до 100 нм.

Для определения параметров ДЛП Δn и дихроизма Δk нами был использован спектральный эллипсометрический комплекс «ЭЛЛИПС-1891», который позволял измерять эллипсометрические параметры Δ и ψ в диапазоне длин волн от 350 до 1050 нм. Для создания магнитного поля применялся электромагнит, в область однородного магнитного поля помещался исследуемый образец в кювете толщиной 5 мм. Связь между эллипсометрическими параметрами и значениями ДЛП и дихроизма дается формулами [7]:

$$\Delta n = n_{||} - n_{\perp} = \frac{\lambda}{2\pi l} \Delta, \quad \Delta k = k_{||} - k_{\perp} = \frac{\lambda}{2\pi l} (\tan \psi) \quad (1)$$

На рис. 1 и рис. 2 показаны зависимости параметров двойного лучепреломления Δn и дихроизма Δk от длины волны света при различных напряжённостях магнитного поля для двух образцов. Характерной особенностью спектров двойного лучепреломления является наличие максимума в области около 490 нм. При увеличении напряженности магнитного поля наблюдается заметный рост параметра Δn во всем спектральном диапазоне. В поле одной и той же напряженности и при одинаковых длинах волн эффект ДЛП в образце №2 примерно в 2,5 раза больше, чем в образце №1.

В спектрах дихроизма обоих образцов (рис. 2) наблюдается ярко выраженный максимум в области 470-480 нм и минимум в области 740-750 нм. Спектры дихроизма ведут себя различным образом при воздействии магнитного поля. В образце №1 действие поля делает более выраженным минимум в области 750 нм и увеличивает амплитуду максимума в коротковолновой области. В образце №2 рост поля приводит к росту дихроизма во всей видимой области, при этом наиболее значительный рост наблюдается в области 700-1000 нм и приводит к практически полному исчезновению минимума в этой области. У образца №2 параметр дихроизма Δk в области максимума примерно в 4 раза больше чем у образца №1, а в ближней ИК-области величины дихроизма отличаются примерно в 14 раз.

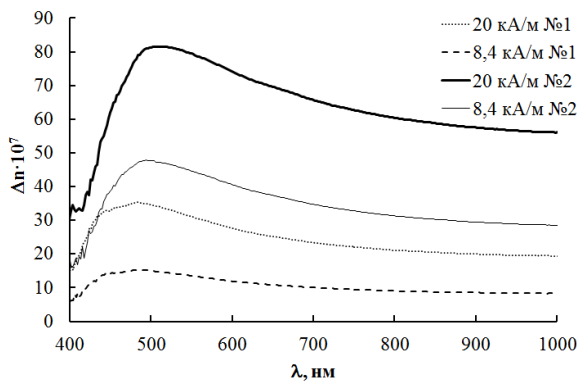


Рис. 1. Спектры эффекта ДЛП.

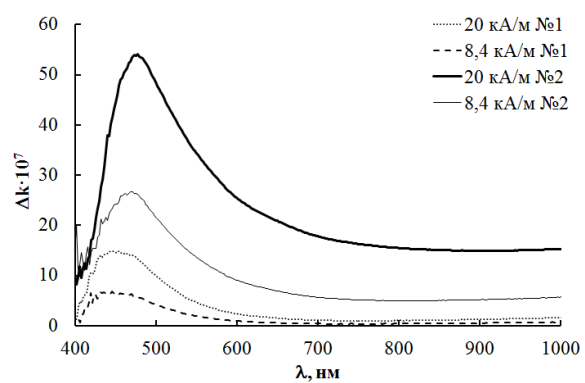


Рис. 2. Спектры эффекта дихроизма.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Интерпретация спектров ДЛП и дихроизма в магнитных жидкостях может быть построена на основе одночастичной ориентационной модели. Согласно этой модели, при воздействии магнитного поля происходит ориентационное упорядочение длинных осей несферических магнитных наночастиц вдоль направления поля, приводящее к возникновению оптической анизотропии. В рамках данной модели параметры Δn и Δk могут быть определены по следующим формулам [7,8]:

$$\Delta n = C_v \operatorname{Re}(\tilde{B})\Phi(\sigma, \xi), \quad \Delta k = C_v \operatorname{Im}(\tilde{B})(\sigma, \xi) \quad (2)$$

где C_v – объемная концентрация частиц, $\Phi(\sigma, \xi)$ – ориентационная функция, B – параметр, определяемый формой и оптическими характеристиками частиц.

$$\tilde{B} = \frac{1}{2}n_0(N_{\perp} - N_{\parallel})\left(\frac{Q^2}{(1 + QN_{\perp})(1 + QN_{\parallel})}\right), \quad Q = m^2 - 1, \quad (3)$$

где $m = n_m/n_0$ – относительный показатель преломления, n_m – показатель преломления магнетита, n_0 – показатель преломления дисперсионной среды. N_{\parallel} и N_{\perp} –

компоненты тензора деполяризации вдоль и перпендикулярно главной оси частицы соответственно. Спектр эффектов ДЛП и дихроизма в рамках одночастичной модели определяется параметром B и входящими в него показателями преломления, так как другие множители в выражениях (2) не зависят от длины волны. Таким образом при описании спектров оптической анизотропии решающую роль играет спектральное поведение параметра Q .

Выражения для ориентационной функции приведены в [7]. В приближении слабых полей ориентационная функция квадратична полю, и эффект двойного лучепреломления в магнитной жидкости оказывается подобен хорошо известному эффекту Коттона-Мутона в молекулярных жидкостях [9]. Оценка показывает, что за счет эффекта суперпарамагнетизма в малых частицах образец №1 должен быть более чувствителен к воздействию магнитного поля, но при этом магнитный момент частиц в нем почти на порядок меньше, то есть степень ориентации частиц и величина эффектов должна быть меньше, чем в образце №2 с более крупными, хотя и магнитожесткими частицами. Рис. 1 в целом подтверждает этот вывод, величина эффекта в образце №2 больше только в 2,5 раза, несмотря на то, что магнитные моменты частиц в этом образце больше в 8 раз.

Выражения одночастичной модели (2,3) не предсказывают зависимость спектра эффекта от размера частицы и величины внешнего магнитного поля. В эксперименте это наблюдается только в агрегативно устойчивом образце №1. В образце №2 действие поля меняет не только величину эффекта, но и форму его спектральной зависимости. Это может быть объяснено тем, что в образце №2 под действием поля происходит образование агрегатов. Эффективный показатель преломления агрегативной структуры из нескольких десятков или сотен наночастиц отличается от показателя преломления отдельных частиц. Аналогичный эффект изменения спектров пропускания магнитных жидкостей в результате агрегирования описан нами в [10].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования спектров двойного лучепреломления и дихроизма в образцах магнитных жидкостей, содержащих агрегаты наночастиц и свободных от таких агрегатов, позволили обнаружить существенное влияние магнитного поля на форму спектров дихроизма в агрегированных системах. Влияние магнитного поля на спектры двойного лучепреломления описанных типов магнитных жидкостей может быть корректно интерпретировано в рамках одночастичной ориентационной модели с

учетом полидисперсности и суперпарамагнетизма магнитных наночастиц. Таким образом, исследование спектральных особенностей дихроизма расширяет арсенал методов изучения агрегативной устойчивости магнитных коллоидных систем.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (проект FSRN-2023-0006) с использованием оборудования ЦКП СКФУ проект RF-2296.61321X0029.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Такетоми С., Тикадзуми С. Магнитная жидкость. М.: Мир. 1993. 272 с.
2. Zahn M. Magnetic fluid and nanoparticle applications to nanotechnology // J. Nanopart. Res. 2001. V. 3. P. 73-78.
3. Davies H.W., Llewellyn J.P. Magneto-optic effects in ferrofluids // J. Phys. D.: Appl. Phys. 1980. V. 13. P. 2327-2336.
4. Mehta R.V., Patel Rajesh, and Upadhyay R.V. Direct observation of magnetically induced attenuation and enhancement of coherent backscattering of light // Phys. Rev. B. 2006. V. 74. 195127.
5. Нагорный А.В., Авдеев М.В., Иванькова А.И., Шлапа Ю.Ю., Солопан С.А., Нагорная Т.В., Шуленина А.В., Забулонов Ю.Л., Белоус А.Г., Булавин Л.А. Структурная стабильность дисперсий магнитных наночастиц в водных растворах полисорбата-80 // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2021. №8. С. 3-9.
6. Авдеев М.В., Аксенов В.Л. Малоугловое рассеяние нейтронов в структурных исследованиях магнитных жидкостей // Успехи физических наук. 2010. №10. С. 1009-1034.
7. Ерин К.В., Вивчарь В.И., Шевченко Е.И. спектры эффектов магнитного двойного лучепреломления и дихроизма в магнитных коллоидах с различным размером частиц. Известия РАН. Серия физическая. 2023. Т. 87. № 3. С. 315-320.
8. Ерин К.В. Определение комплексного показателя преломления наноразмерного магнетита по данным оптической анизотропии магнитных коллоидов. Неорг. матер. 2022. Т. 58. № 4. С. 421-431.
9. Taketomi S. Magnetic Fluid's Anomalous Pseudo Cotton-Mouton Effects about 107 Times Larger than that of Nitrobenzene // Jap. J. Appl. Phys. 1983. V. 22, №7. P. 1137-1143.
10. Yerin C. V., Vivchar V. I. Effect of a magnetic field on the transmission spectra of magnetic fluids with different sizes of nanoparticles // JMMM. 2023. 171437.