

03;09

Оптическое исследование геометрических характеристик агрегатов, образованных частицами магнитной жидкости

© А.В. Прокофьев^{1,2}, И.В. Плешаков^{1,2,¶}, Е.Е. Бибики³,
Ю.И. Кузьмин^{1,2}

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

³ Санкт-Петербургский государственный технологический институт

(технический университет)

¶ E-mail: ivanple@yandex.ru

Поступило в Редакцию 1 ноября 2016 г.

Исследованы размеры элементов структуры, образованной наночастицами коллоидного раствора магнетита под действием магнитного поля. При освещении тонкого слоя такой жидкости сфокусированным лазерным пучком наблюдалась картина, характерная для дифракции на бесконечно длинном диэлектрическом цилиндре, что было использовано для измерения толщины отдельных агрегатов. Эти данные оказались хорошо согласованными с оценкой, выполненной методом оптической микроскопии.

DOI: 10.21883/PJTF.2017.04.44294.16554

Магнитные жидкости, или феррожидкости, представляющие собой коллоидные растворы магнитоупорядоченных материалов, являются веществами с особыми физическими свойствами и рассматриваются как перспективные для применения в различных областях, в частности в оптике [1]. Размеры частиц твердой фазы (десятки нанометров) определяют специфику магнитного поведения феррожидкостей. Известно, что в магнитном поле частицы группируются в протяженные агрегаты [2], меняющие оптический отклик среды [3]. Это свойство можно использовать в оптических фильтрах [4], сенсорах [5] и других устройствах фотоники [6,7]. Очевидно, что сведения о характеристиках структурных элементов феррожидкости важны при анализе работы указанных оптоэлектронных приборов.

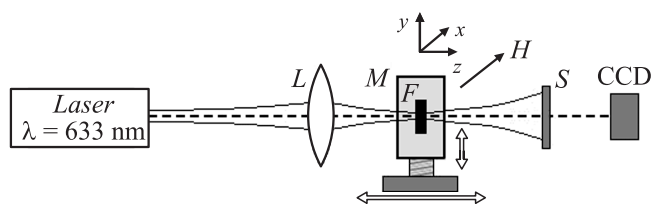


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

Основными методами получения данных о размерах агрегатов являются малоугловое рентгеновское рассеяние [8,9] и оптическая микроскопия [10]. Существуют также работы, посвященные лазерной корреляционной спектроскопии магнитных жидкостей [11]. Каждый из этих подходов обладает определенными недостатками: даже если изучаемый элемент достаточно велик для того, чтобы его можно было визуализировать, данные микроскопии могут быть неточными из-за краевого размытия изображения; в других случаях извлекается информация только о средних величинах. В настоящей работе предлагается прямой метод оптического зондирования феррожидкости, основанный на дифракционном эффекте и позволяющий достаточно точно определять толщину индивидуальных агрегатов.

Эксперименты проводились с раствором магнетита (Fe_3O_4) в керосине, который был синтезирован гидролизом раствора хлорида и сульфата железа аммиаком. Наночастицы Fe_3O_4 экстрагировались из реакционной смеси керосиновым раствором олеиновой кислоты, действующей как предотвращающее их слипание поверхностно-активное вещество. Данная технология позволяет получать стандартную магнитную жидкость со средним значением диаметра частиц примерно 10 nm. Такой же материал был исследован в работе [12]. Объемное содержание твердой фазы в нашем случае составляло 1%.

Использованный экспериментальный подход состоял в сканировании тонкого образца сфокусированным лазерным пучком. Схема установки изображена на рис. 1. Излучение гелий-неонового лазера мощностью 10 mW после прохождения собирающей линзы L с фокусным расстоянием 6 см направлялось на образец с феррожидкостью F , располагавшийся между полюсами постоянного магнита M , поле которого было направлено вдоль оси x , перпендикулярной направлению распростране-

ния света. Прошедшее через кювету с жидкостью излучение попадало на полупрозрачный экран S . Дифракционная картина регистрировалась цифровой фотокамерой CCD. Магнит создавал однородное поле с напряженностью $H = 1800$ Ое. Достаточно большая величина H была выбрана для того, чтобы исключить влияние кинетики агрегации частиц на результат эксперимента, поскольку известно, что при воздействии малых полей окончательная структура кластеров в магнитной жидкости устанавливается десятки минут [13].

Кювета с образцом была фиксирована между полюсами магнита и могла перемещаться вместе с ним вдоль осей z и y . Движением вдоль z выбиралось такое положение, при котором расположенная вблизи фокуса область перетяжки оптического пучка находилась внутри жидкости, а перемещение по y позволяло проходить вытянутые по x агрегаты в поперечном направлении. Размер перетяжки был оценен с помощью метода лучевых матриц и составил $\sim 24 \mu\text{m}$. Эксперимент выполнялся при комнатной температуре.

Представление о сформированной магнитным полем структуре дает микрофотография, приведенная на рис. 2. Видно, что вдоль H расположены нитевидные (до 10^3 и более микрон в длину) объекты, расстояние между которыми составляет сотни микрон, т. е. сканирование структуры сфокусированным пучком должно выделять ее отдельный элемент.

Длина оптического пути в среде составляла $8.5 \mu\text{m}$. Известно, что магнитные частицы обладают большим поглощением в видимом диапазоне; и возникающие при этом явления тепловой линзы и термомагнитной конвекции могут приводить к существенному изменению оптических характеристик объемного образца [14]. Таким образом, использование вещества в виде тонкого слоя принципиально при выполнении опытов типа описанных выше, поскольку в этом случае конвективные потоки подавляются. При избранных нами толщине кюветы и концентрации феррожидкости тепловые эффекты были минимизированы, что определялось по стабильности наблюдаемой дифракционной картины.

Эксперимент заключался в регистрации рассеянного лазерного излучения на экране S при движении образца вдоль координат z и y .

В отсутствие магнитного поля свет рассеивался жидкостью очень слабо. Приложение поля в том случае, когда образец находился вдали от фокуса, приводило к возникновению спекл-структуры в виде полосы, перпендикулярной направлению H . Когда же вещество перемещалось в

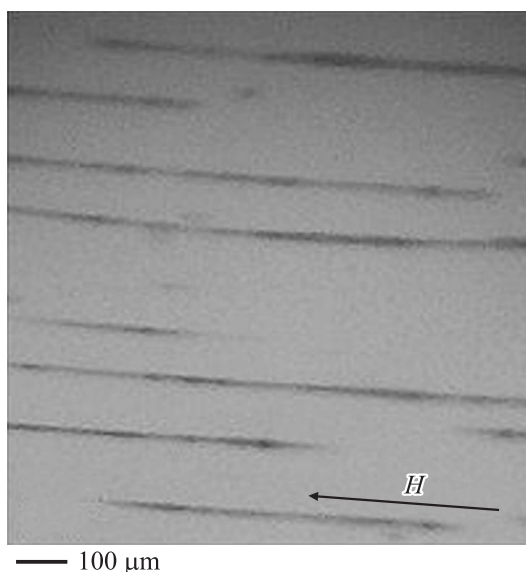


Рис. 2. Микрофотография структуры, сформированной в феррожидкости под действием магнитного поля $H = 1800$ Ое.

область перетяжки, спекл при определенных значениях u сменялся на дифракционную картину, состоящую из явно выраженных минимумов и максимумов интенсивности I (рис. 3). При смещении образца по y в фокусной плоскости эта картина периодически исчезала и появлялась вновь, причем, как видно из рис. 3, ее период менялся.

Фактически данное явление представляет собой дифракцию на бесконечном диэлектрическом цилиндре, поскольку области с высокой концентрацией наночастиц имеют коэффициент преломления, отличающийся от такового в чистом растворителе [15]. Несколько упрощая ситуацию и предполагая, что отдельный протяженный агрегат создает препятствие, на котором происходит дифракция Фраунгофера, можно, воспользовавшись известной формулой $\lambda m = d \sin \theta$, где m — порядковый номер минимума, λ — длина волны (в нашем случае 633 nm), d — размер препятствия, θ — угол дифракции на минимум с номером m , определить его толщину. Для всех выполненных измерений эта величина находилась в пределах нескольких десятков микрон, а в конкретных

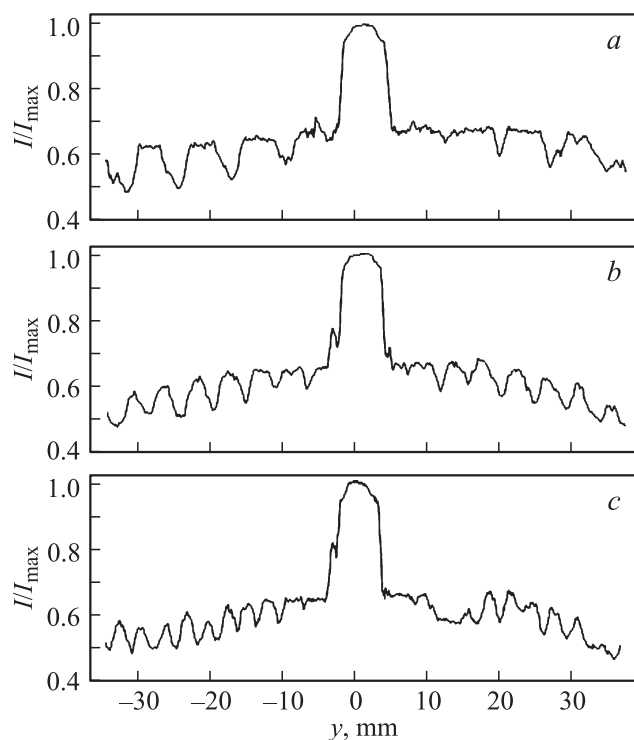


Рис. 3. Распределение нормированной интенсивности дифракционной картины вдоль направления оси y . Изображения a , b и c относятся к трем агрегатам с различающимися диаметрами d , μm : a — 14, b — 20, c — 26.

примерах, приведенных на рис. 3 a , b и c , она составила 14, 20 и 26 μm соответственно.

Обработка микрофотографий также позволяет, хотя и менее точно, выполнить оценку поперечного размера агрегатов. Усредненное значение d , полученное при измерении толщины десяти случайно выбранных протяженных структурных элементов, сходных с показанными на рис. 2, составило примерно 20 μm . Сравнение этой величины с данными, приведенными выше, демонстрирует согласованность наших экспериментальных результатов.

Таким образом, в настоящей работе показано, что применение простой оптической методики, основанной на дифракционном эффекте, позволяет выполнять исследование характеристик отдельных агрегатов, сформированных наночастицами магнитной жидкости под воздействием внешнего поля.

Работа поддержана Программой президиума РАН П-03.

Список литературы

- [1] Philip J., Laskar J.M. // J. Nanofluids. 2012. V. 1. N 1. P. 3–20.
- [2] Chin-Yih Hong, Jang I.J., Horng H.E. et al. // J. Appl. Phys. 1997. V. 81. N 8. P. 4275–4277.
- [3] Reena Mary A.P., Suchand Sandeep C.S., Narayanan T.N. et al. // Nanotechnology. 2011. V. 22. N 37. P. 375702 (1–7).
- [4] Jian Li, Xiaodong Liu, Yueqiang Lin et al. // Appl. Phys. Lett. 2007. V. 91. N 25. P. 253108 (1–3).
- [5] Candiani A., Argyros A., Leon-Saval S.G. et al. // Appl. Phys. Lett. 2014. V. 104. N 11. P. 111106 (1–5).
- [6] Agruzov P.M., Pleshakov I.V., Bibik E.E., Shamray A.V. // Appl. Phys. Lett. 2014. V. 104. N 7. P. 071108 (1–4).
- [7] Yong Zhao, Riqing Lv, Yuyan Zhang, Qi Wang // Opt. Lasers Engin. 2012. V. 50. N 9. P. 1177–1184.
- [8] Kruse T., Krauthäuser H.-G., Spanoudaki A., Pelster R. // Phys. Rev. B. 2003. V. 67. N 9. P. 094206 (1–10).
- [9] Butter K., Hoell A., Wiedenmann A. et al. // J. Appl. Crystallogr. 2004. V. 37. N 6. P. 847–856.
- [10] Хиженков А.К., Дорман В.А., Барьяхтар Ф.Г. // Магнитная гидродинамика. 1989. № 2. С. 35–40.
- [11] JitKang Lim, Swee Pin Yeap, Hui Xin Che, Siew Chun Low // Nanosc. Res. Lett. 2013. V. 8. N 1. P. 1–14.
- [12] Фофанов Я.А., Плеваков И.В., Прокофьев А.В., Бирик Е.Е. // Письма в ЖТФ. 2016. Т. 42. В. 20. С. 66–72.
- [13] Rablau C., Vaishnava P., Sudakar C., Tackett R. et al. // Phys. Rev. E. 2008. V. 78. N 5. P. 051502 (1–9).
- [14] Prokofiev A.V., Petrov V.M., Pleshakov I.V., Shamray A.V. // Proc. „Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS)“. Prague (Czech Republic): The Electromagnetics Academy, 2015. P. 2692.
- [15] Horng H.E., Chin-Yih Hong, Yang S.Y., Yang H.C. // Appl. Phys. Lett. 2003. V. 82. N 15. P. 2434–2436.