

03:09

Исследование поляризационных магнитооптических откликов слабоконцентрированной феррожидкости

© Я.А. Фофанов¹, И.В. Плешаков^{2,3}, А.В. Прокофьев^{2,3},
Е.Е. Бибик⁴

¹ Институт аналитического приборостроения РАН, Санкт-Петербург

² Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

³ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург

⁴ Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), Санкт-Петербург
E-mail: ivanple@yandex.ru

Поступило в Редакцию 7 июня 2016 г.

Высокочувствительная лазерная поляризационно-оптическая методика развита и применена к исследованию феррожидкости, помещенной в магнитное поле. В качестве образца использован коллоидный раствор магнетита в керосине. Показано, что магнитооптический отклик этого вещества уверенно регистрируется до объемного содержания твердой фазы порядка 10^{-5} . Обнаружено, что в пределах очень значительного изменения концентрации раствора сохраняется квадратичная зависимость величины наблюдаемого двулучепреломления от поля небольшой напряженности (до нескольких десятков эрстед).

Оптические методики, основанные на взаимодействии с исследуемыми объектами модулированного по поляризации света, успешно используются при изучении различных, в том числе магнитных, материалов [1]. Существующие в этой области подходы позволяют достичь высокой, определяемой естественными шумами зондирующего лазерного излучения чувствительности измерений и зарегистрировать весьма тонкие эффекты [2]. Большой интерес представляет дальнейшее развитие данных методов и их применение к исследованию веществ, магнетизм которых проявляется относительно слабо, например феррожидкостей. Являясь коллоидными растворами магнитных частиц, феррожидкости обладают рядом особых физических свойств, среди которых большое внимание привлекает возможность управления их оптическими харак-

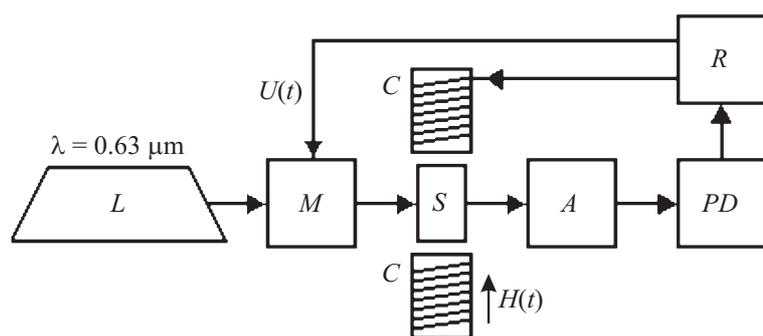


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки.

теристиками [3]. Данное направление развивается, в частности, в связи с перспективой создания оптоэлектронных устройств, использующих феррожидкость в качестве активного элемента [4–7]. При этом особенно важно выяснение специфики магнитооптических откликов жидкостей, имеющих малую концентрацию частиц, благодаря которой активные элементы остаются прозрачными при их значительной протяженности (необходимой в ряде задач). Отметим, что процессы, протекающие при намагничивании феррожидкости, достаточно сложны, вследствие чего завершённой модели формирования ее магнитооптических откликов пока не существует (см., например, [7,8]).

Цель настоящей работы заключается в развитии лазерной поляризационно-модуляционной методики применительно к изучению магнитооптических характеристик феррожидкостей, преимущественно при малых концентрациях, обычно используемых в оптических системах.

Методика измерений иллюстрируется рис. 1. На изображенной здесь блок-схеме установки показано прохождение света от лазера L ($\lambda = 0.63 \mu\text{m}$) через управляемый внешним гармоническим напряжением $U(t)$ модулятор M , помещенный в магнитное поле образец S и анализатор A . Падающий на S свет имел глубокую модуляцию по поляризации. Выходное излучение поступало на фотоприемное устройство PD , и далее переменный электрический сигнал обрабатывался и отображался в системе регистрации и управления R . Линейно развертываемое во времени магнитное поле $H(t)$ создавалось двухсекционным

соленоидом S , через который из блока R пропускаться медленно изменяющийся ток. Кювета с исследуемой жидкостью размещалась в разрыве между секциями S .

Показано, что в предположении о малости вносимой исследуемым объектом разности фаз φ ($\varphi \ll 1 \text{ rad}$) регистрируемый сигнал пропорционален φ [9,10], т.е. установка обеспечивает возможность измерения абсолютной величины эффекта двулучепреломления (поляризационного отклика). Подробное описание процедур измерений и калибровки дано в работах [1,10].

Образец представлял собой коллоидный раствор магнетита (Fe_3O_4) в керосине, полученный по технологии, широко используемой для создания подобных композитов [11]. Синтез Fe_3O_4 проводился гидролизом водного раствора смеси солей FeCl_3 и FeSO_4 аммиаком, что позволяет получать магнитные наночастицы со средним значением диаметра около 10 nm. Частицы магнетита экстрагировались из реакционной смеси керосиновым раствором олеиновой кислоты, образующей на частицах оболочку, которая обеспечивает хорошую смачиваемость частиц керосином и предотвращает их слипание. Исходный раствор имел концентрацию твердой фазы 1 vol.%, а далее он последовательно разбавлялся вплоть до 10^{-3} vol.% (т.е. до 10^{-5}). Известно, что при данных концентрациях вклад дихроизма в поляризационные отклики пренебрежимо мал [12,13].

В процессе измерения поле линейно разворачивалось от -45 до $+45$ Oe в течение 200 s. Результат эксперимента, представляющий собой зависимости наблюдаемых поляризационных откликов от напряженности магнитного поля, показан на рис. 2. Из рисунка видно, что при разных концентрациях магнетита (приведены данные для концентраций, различающихся на три порядка) качественный ход кривых $\varphi(H)$ одинаков. Они хорошо описываются параболой, что согласуется с работой [13], продемонстрировавшей квадратичную зависимость отклика феррожидкости φ от H в малых полях: $\varphi(H) = a(n)H^2$, где $a(n)$ — коэффициент, зависящий от концентрации n . Малыми в [13] считаются поля $H < 50$ Oe, что совпадает с нашим случаем.

Приведенные данные показывают, что сигнал регистрируется до $n = 10^{-5}$, что является демонстрацией высокой чувствительности метода. Как видно из рис. 2, отношение сигнал/шум даже при $n = 10^{-5}$ оставалось достаточно большим (при $n = 10^{-4}$ и 10^{-5} дополнительно использовалось накопление сигнала, увеличившее данное отношение в

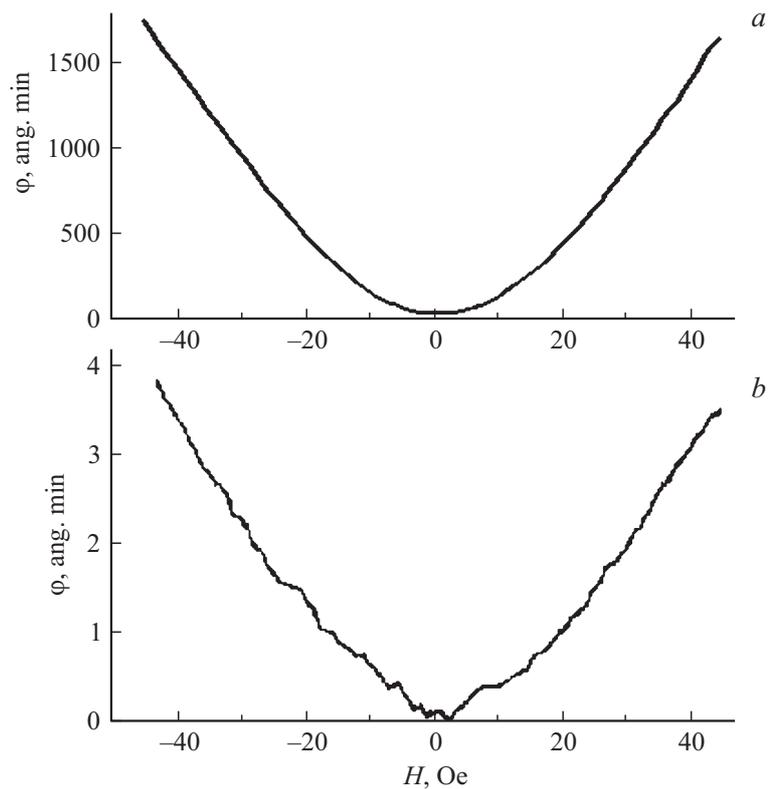


Рис. 2. Зависимости фазового сдвига, связанного с двулучепреломлением, от магнитного поля. *a* — $n = 1\%$, *b* — $n = 0.001\%$.

два раза). Следовательно, можно утверждать, что развиваемый нами подход потенциально способен обеспечить очень высокую чувствительность, позволяющую выполнять эксперименты с феррожидкостью при ее весьма сильном разбавлении.

В феррожидкостях могут реализоваться разные механизмы двулучепреломления [14]. Одним из основных считается агрегирование с образованием вытянутой вдоль направления поля структуры. При этом следует обратить внимание, что, согласно данным выполненных нами экспериментов, магнитооптические отклики сохраняют подобие

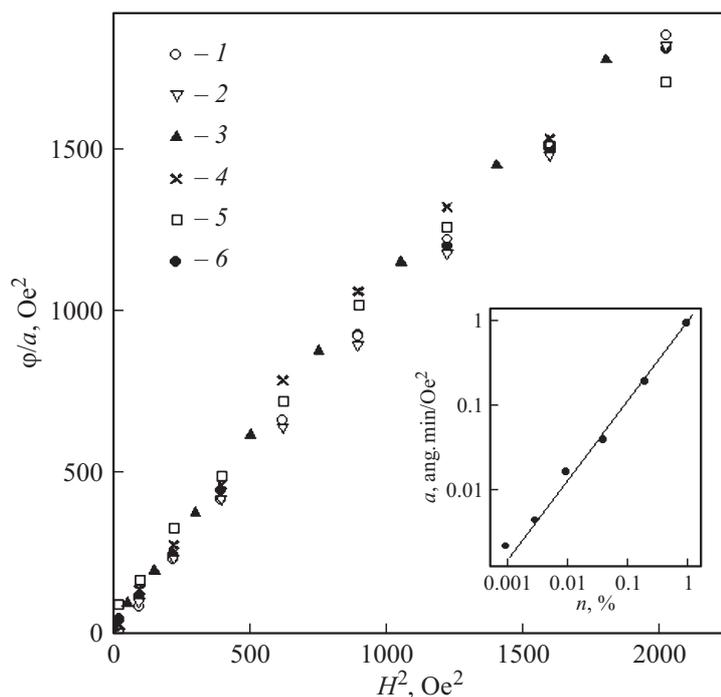


Рис. 3. Зависимость нормированной величины фазового сдвига от квадрата магнитного поля при разных концентрациях феррожидкости (1 — $n = 1\%$, 2 — $n = 0.2\%$, 3 — $n = 0.04\%$, 4 — $n = 0.01\%$, 5 — $n = 0.003\%$, 6 — $n = 0.001\%$). На вставке: зависимость коэффициента a от концентрации.

при очень существенном изменении концентрации, хотя при малой величине последней влияние агрегирования должно уменьшаться. Это демонстрирует рис. 3, где приведен масштабированный график магнитооптического отклика, построенный в осях H^2 (ось абсцисс) и $\varphi/a(n)$ (ось ординат) для разных концентраций. Очень хорошее совпадение характера зависимостей при изменении n на три порядка показывает, что в данном диапазоне концентраций природа эффекта остается одной и той же. (При понижении n наблюдается лишь небольшое отклонение от квадратичной функции.) Это подтверждается также линейностью зависимости $a(n)$, показанной на вставке рис. 3.

Другой причиной появления оптической анизотропии при намагничивании исследуемой среды является поворот наночастиц, форма которых отлична от сферической [12]. Представляется, что для слабоконцентрированной феррожидкости такой механизм мог бы быть основным, однако индуцированное полем агрегирование полностью исключить нельзя. Несмотря на то что каждое измерение выполнялось нами с образцом, до этого не участвовавшим ни в каких экспериментах, требующих приложения магнитного поля, первичные образования, служащие далее центрами зарождения агломератов, в них могли присутствовать [8].

Хотя в общем случае зависимостей $\varphi(H)$, по-видимому, недостаточно для однозначного определения механизма двулучепреломления, важный результат наших опытов заключается в обнаруженном сохранении подобия поведения магнитооптических откликов при уменьшении концентрации феррожидкости на несколько порядков. Это является указанием на единую природу данного явления в растворах с сильно различающимся содержанием твердой фазы.

Таким образом, в работе развита лазерная поляризационно-модуляционная методика измерения магнитооптических откликов, обладающая высокой чувствительностью и позволяющая исследовать слабомагнитные материалы. Ее применение к разбавленным феррожидкостям продемонстрировало, что, несмотря на весьма значительное различие в концентрациях, процессы их намагничивания могут определяться одним механизмом.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 15-02-08703, и программы президиума РАН П-03.

Список литературы

- [1] *Фофанов Я.А., Плешаков И.В., Кузьмин Ю.И.* // Оптический журнал. 2013. Т. 80. № 1. С. 88–93.
- [2] *Fofanov Ya.A.* // Proc. SPIE. 1992. V. 1811. P. 413–414.
- [3] *Philip J., Laskar J.M.* // J. Nanofluids. 2012. V. 1. N 1. P. 3–20.
- [4] *Candiani A., Konstantaki M., Margulis W., Pissadakis S.* // Opt. Lett. 2012. V. 37. N 21. P. 4467–4469.
- [5] *Chi Chiu Chan, Peng Zu, Wen Siang Lewet et al.* // Opt. Lett. 2012. V. 37. N 3. P. 398–399.
- [6] *Agruzov P.M., Pleshakov I.V., Bibik E.E., Shamray A.V.* // Appl. Phys. Lett. 2014. V. 104. N 7. P. 071108–4.

- [7] *Agruzov P.M., Pleshakov I.V., Bibik E.E. et al. // Europhys. Lett. 2015. V. 111. N 5. P. 57003–5.*
- [8] *Ерин К.В., Куникин С.А. // ЖТФ. 2007. Т. 77. В. 10. С. 85–88.*
- [9] *Acher O., Bigan E., Drevillon B. // Rev. Sci. Instrum. 1989. V. 60. N 1. P. 65–77.*
- [10] *Sokolov I.M., Fofanov Ya.A. // J. Opt. Soc. Am. A. 1995. V. 12. N 7. P. 1579–1588.*
- [11] *Scherer C., Figueiredo Neto A.M. // Brazilian J. Phys. 2005. V. 35. N 3A. P. 718–727.*
- [12] *Скибин Ю.Н., Чеканов В.В., Райхер Ю.Л. // ЖЭТФ. 1977. Т. 72. В. 3. С. 949–955.*
- [13] *Davis H.W., Llewellyn J.P. // J. Phys. D: Appl. Phys. 1979. V. 12. N 2. P. 311–319.*
- [14] *Scholten P.C. // IEEE Trans. Magnetics. 1980. V. MAG-16. N 2. P. 221–225.*