

## 09 Эффект тепловой линзы при двухлучевом лазерном воздействии на магнитную жидкость

© А.А. Алексеев<sup>1,2</sup>, И.В. Плешаков<sup>1</sup>, Ю.И. Кузьмин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: arseniy.alekseev98@gmail.com

Поступило в Редакцию 24 декабря 2024 г.

В окончательной редакции 21 января 2025 г.

Принято к публикации 2 февраля 2025 г.

Методом, использующим два лазерных луча, исследована светоиндуцированная неоднородность в виде линзы тепловой природы в магнитной жидкости, представляющей собой коллоидный раствор магнетита. Применение указанной схемы позволило наблюдать возникновение особенности в области сфокусированного интенсивного лазерного луча путем регистрации дифракционных картин как в интенсивном, так и в дополнительном слабом зондирующем луче. Обнаружено, что размеры этих картин зависят от магнитного поля.

**Ключевые слова:** магнитная жидкость, феррожидкость, тепловая линза.

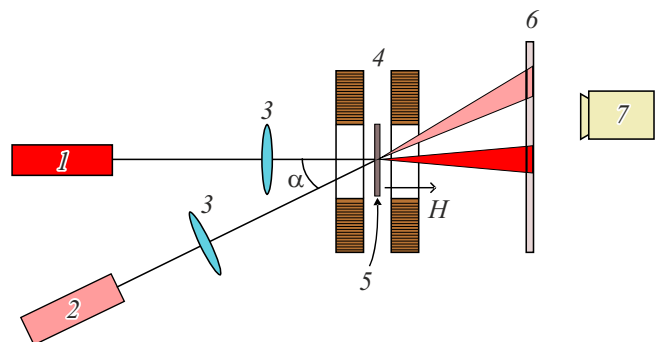
DOI: 10.61011/PJTF.2025.10.60328.20236

Магнитные жидкости (феррожидкости) известны с шестидесятых годов прошлого века и за прошедшие десятилетия нашли многочисленные применения в самых различных областях [1]. Будучи необычными материалами, они и по сей день являются объектом исследований, обнаруживающих их новые свойства и открывающих дополнительные возможности использования феррожидкостей в практических целях. Так, в последнее время широко обсуждаются медицинские аспекты этой научной области [2–5], а также рассматриваются перспективы создания на основе таких веществ оптоэлектронных устройств: датчиков магнитного поля, модуляторов, перестраиваемых фильтров и др. [6–11].

Оптические характеристики феррожидкостей зависят от магнитного поля, что и определяет интерес к ним как к управляемым элементам фотоники, причем анализ такого воздействия на их оптический отклик до сих пор представляет собой актуальную задачу. Наряду с прочими механизмами на формирование отклика оказывают существенное влияние тепловые эффекты. Удобным инструментом их изучения является наблюдение тепловой линзы, эксперименты с которой проводились (наряду с другими дисперсными системами) также и в магнитных жидкостях [12,13]. Было показано, что она может быть описана как область со сложным образом изменяющимся показателем преломления, формирующаяся в сфокусированном лазерном луче вследствие термически индуцированного перераспределения концентрации коллоидных частиц (в гауссовом пучке появляется неоднородность, рассматриваемая как эквивалентная вогнутая линза [13]). Во всех случаях регистрируемым и анализируемым откликом была дифракционная картина, возникающая при взаимодействии луча с порожденным им же объектом.

В настоящей работе с целью создания способа независимого просвечивания тепловой линзы была использована установка с двумя лазерами: сфокусированным на образце (далее он будет называться возбуждающим) и таким, плотность мощности излучения которого на образце уменьшена, а луч направлен под углом к нему (далее зондирующий).

Схема установки показана на рис. 1. В качестве возбуждающего был использован He–Ne-лазер с длиной волны излучения 633 нм и выходной мощностью 17 мВт. Его пучок концентрировался на образце линзой. Плотность мощности в области фокуса составляла около  $1.8 \cdot 10^7 \text{ W/m}^2$ . Зондирующий лазер излучал под углом  $\alpha = 20^\circ$  к возбуждающему и представлял собой лазерный диод с длиной волны 660 нм и мощностью 12 мВт. Он фокусировался за пределами образца таким образом, что в его световом пятне, совмещенном с наведенной первым лазером неоднородностью, плотность мощности

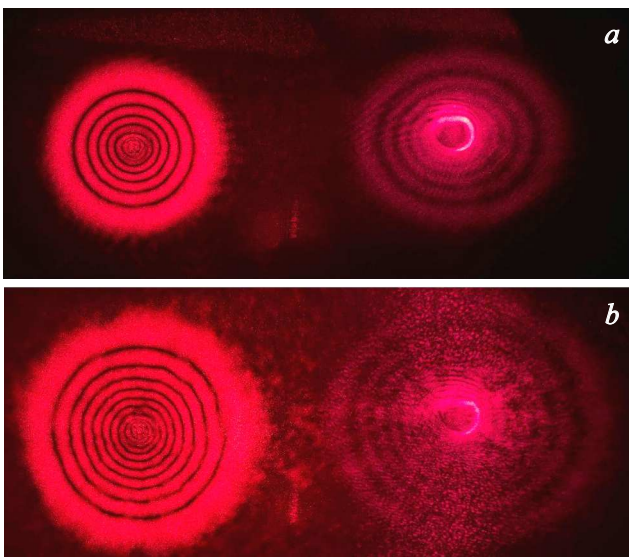


**Рис. 1.** Экспериментальная установка для двухлучевого исследования эффекта тепловой линзы. 1 — возбуждающий лазер, 2 — зондирующий лазер, 3 — фокусирующая линза, 4 — катушки Гельмгольца, 5 — образец, 6 — экран, 7 — камера.

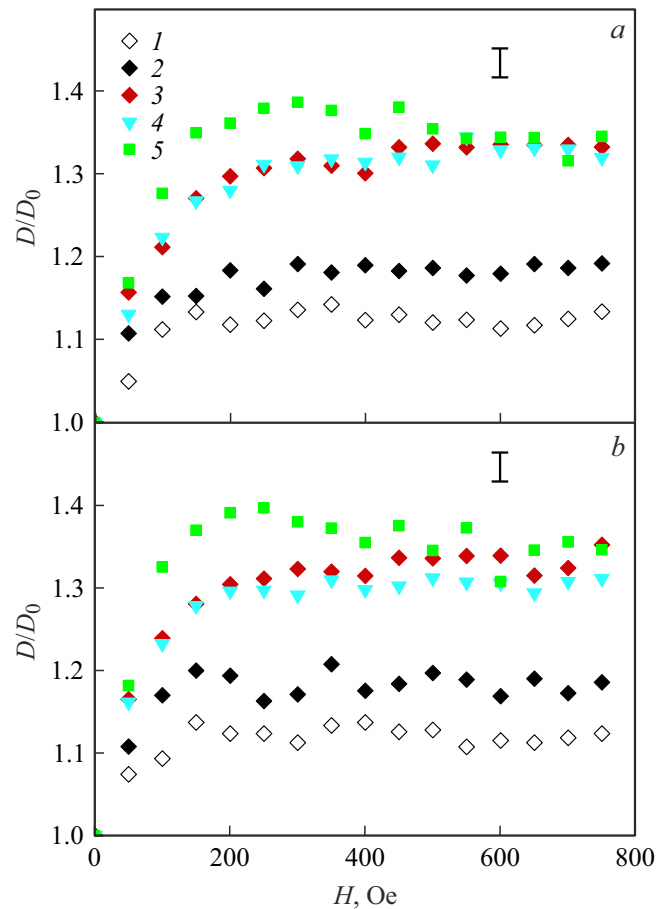
не превосходила  $4 \cdot 10^3 \text{ W/m}^2$ , т.е. была недостаточной для существенного влияния на распределение показателя преломления. Отклик в виде двух дифракционных картин наблюдался на экране. Установка предусматривала возможность приложения внешнего магнитного поля  $H$ , создаваемого катушками Гельмгольца и ориентированного перпендикулярно плоскости образца. Оно регулировалось в пределах  $0\text{--}750 \text{ Oe}$ .

Образец находился в плоскопараллельной оптической кювете с толщиной  $60 \mu\text{m}$  и представлял собой коллоид магнетита  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  на основе керосина — коммерческую феррожидкость с полимерной стабилизацией и добавлением в раствор органического масла (до 22 vol.%). Частицы магнитного материала имели размер около  $10 \text{ nm}$ . Это вещество было тем же, что использовалось в [14] (отметим, что в этой работе рассматривался эффект взаимодействия наночастиц с лазерным лучом). Исходная концентрация твердой фазы  $N$  составляла 18 vol.%, при проведении экспериментов жидкость разбавлялась до  $N = 1\text{--}3 \text{ vol.}\%$ .

На рис. 2 показан пример дифракционных картин для образца с  $N = 2 \text{ vol.}\%$  при двух значениях поля:  $H = 0$  и  $700 \text{ Oe}$  (рис. 2, *a* и *b* соответственно). В обоих лучах видны в целом похожие световые пятна с хорошо разрешенными концентрическими кольцами, в деталях, однако, демонстрирующие определенные различия: при приблизительном равенстве их характерных размеров в пятне от зондирующего луча темные промежутки между кольцами несколько больше; кроме того, оно имеет форму, близкую к эллиптической (оценка эксцентриситета  $e \approx 0.53$ ). Приложение поля вызывает рост размеров пятен и увеличение числа колец, при этом эллиптичность пятна, происходящего от зондирующего луча, уменьшается ( $e \approx 0.47$ ).



**Рис. 2.** Дифракция возбуждающего (слева) и зондирующего (справа) пучков для образца с концентрацией магнитной фазы 2 vol.% при  $H = 0$  (*a*) и  $700 \text{ Oe}$  (*b*).



**Рис. 3.** Зависимость размеров дифракционного пятна в лучах возбуждающего (*a*) и зондирующего (*b*) лазеров от магнитного поля.  $N$ , vol.%: 1 — 1.0, 2 — 1.5, 3 — 2.0, 4 — 2.5, 5 — 3.0.

Зависимости относительных размеров дифракционных картин от  $H$  приведены на рис. 3 ( $D$  — диаметр внешнего кольца,  $D_0$  — диаметр внешнего кольца при  $H = 0$ ). Их полевое поведение для возбуждающего (рис. 3, *a*) и зондирующего (рис. 3, *b*) пучков практически одинаково. Видно, что концентрация магнитной жидкости сильно влияет на величину изменения  $D$ , причем при всех  $N$  наблюдается сохранение приближенного подобия кривых  $D(H)/D_0$  с выходом их на насыщение примерно при  $H = 200 \text{ Oe}$ .

Механизм образования дифракционной картины в возбуждающем пучке, очевидно, не отличается от описанных ранее явлений этого рода. Пятно, образованное зондирующим лучом, представляет собой дифракцию на особенности, созданной излучением возбуждающего лазера. Боковое просвечивание данного объекта (в нашем случае под небольшим углом) дает в общем сходное изображение, но при этом несколько измененное по сравнению с основным. Оценка размеров той области в объеме образца, где сосредоточена мощность излучения возбуждающего лазера, может быть выполнена с использованием известных выражений для диаметра

пучка в фокусе линзы ( $2w_0$ ) и рэлеевской длины ( $z_R$ ). Для параметров нашей оптической схемы эти величины оказываются следующими:  $2w_0 \approx 35 \mu\text{m}$  и  $z_R \approx 900 \mu\text{m}$ . Очевидно, что протяженность сформированной светом структуры ограничена толщиной кюветы, т.е. ее характерные размеры составляют  $\sim 35 \times 60 \mu\text{m}$ . Можно предположить, что вытянутость этого объекта отражена в эллипсоподобной форме дифракционного пятна, происходящего от зондирующего луча.

Известно, что показатель преломления феррожидкости  $n$  зависит от магнитного поля, возрастая с увеличением его напряженности [15]. Это является причиной изменений, происходящих с дифракционными картинками при приложении  $H$ . Рассматривая индуцированную светом неоднородность как вогнутую линзу, можно, задаваясь определенными параметрами последней, получить уменьшение ее фокусного расстояния с ростом функции  $n(H)$ , т.е. увеличение угла расходимости лазерного пучка, и, значит, величины  $D$ . Однако данная схема, будучи упрощенной, хотя и объясняет наблюдаемые эффекты на качественном уровне, но не принимает во внимание другие происходящие в системе процессы. В частности, должна учитываться специфика поведения феррожидкости при приложении  $H$ . Образующиеся в магнитном поле агрегаты по размерам сопоставимы с областью, ограниченной каустикой. Последняя, скорее всего, совмещена с одиночным агрегатом, создавая особенность со сложным пространственным распределением наночастиц. Магнитное поле, ориентируя магнитные моменты, приводит к их сближению вследствие дипольного взаимодействия и тем самым повышению  $N$ , вызывающему увеличение  $n$ . Отметим также, что тепловой механизм формирования данной неоднородности, по всей вероятности, не единственный. Иные возможности взаимодействия наночастиц со светом также существуют (см., например, работу [14] и ссылки в ней).

Выход зависимостей  $D(H)/D_0$  на насыщение, наступающий гораздо раньше, чем регистрируется по кривым намагничивания, согласуется с результатами, полученными для  $n(H)$  в [15], где отмечено существенное замедление роста  $n$  начиная с  $H \approx 150\text{--}200$  Ое. Изменение степени эллиптичности дифракционного пятна в сильном поле, возможно, связано с увеличением радиального размера тепловой линзы при росте концентрации формирующих ее наночастиц твердой фазы.

Таким образом, в работе предложена методика получения данных о тепловой линзе, индуцируемой в магнитных жидкостях лазерным излучением, которая расширяет возможности экспериментальных подходов к изучению данного явления. С ее использованием проведено предварительное исследование магнитного поведения неоднородности такого типа в магнетитсодержащей феррожидкости.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] O. Oehlsen, S.I. Cervantes-Ramírez, P. Cervantes-Avilés, I.A. Medina-Velo, ACS Omega, **7** (4), 3134 (2022). DOI: 10.1021/acsomega.1c05631
- [2] V. Socoliuc, M.V. Avdeev, V. Kuncser, R. Turcu, E. Tombácz, L. Vékás, Nanoscale, **14** (13), 4786 (2022). DOI: 10.1039/d1nr05841j
- [3] V. Pilati, G. Gomide, R. Cabreira Gomes, G.F. Goya, J. Depeyrot, Langmuir, **37** (3), 1129 (2021). DOI: 10.1021/acs.langmuir.0c03052
- [4] M. Monteserín, S. Larumbe, A.V. Martínez, S. Burgui, L. Francisco Martín, J. Nanosci. Nanotechnol., **21** (5), 2705 (2021). DOI: 10.1166/JNN.2021.19062
- [5] M. Imran, M.M. Alam, A. Khan, Nanotechnology, **32** (42), 422001 (2021). DOI: 10.1088/1361-6528/ac137a
- [6] M. Taghizadeh, F. Bozorgzadeh, M. Ghorbani, Sci. Rep., **11** (1), 14325 (2021). DOI: 10.1038/s41598-021-93568-z
- [7] P.M. Agruzov, I.V. Pleshakov, E.E. Bibik, A.V. Shamray, Appl. Phys. Lett., **104** (7), 071108 (2014). DOI: 10.1063/1.4866165
- [8] N.V. Kamanina, A.S. Toikka, Ya.V. Barnash, D.N. Redka, S.V. Lihkomanova, Yu.A. Zybtsova, P.V. Kyzhakov, Z.M. Jovanović, S. Jovanović, Liq. Cryst. Their Appl., **22** (4), 83 (2022). DOI: 10.18083/LCAppl.2022.4.83
- [9] Z. Hao, Y. Li, S. Pu, J. Wang, F. Chen, L. Mahieddine, Nanophotonics, **11** (15), 3519 (2022). DOI: 10.1515/nanoph-2022-0224
- [10] S. Han, S. Pu, Z. Hao, C. Zhang, W. Liu, S. Duan, J. Fu, M. Wu, P. Mi, X. Zeng, L. Mahieddine, Opt. Lett., **48** (17), 4504 (2023). DOI: 10.1364/OL.499780
- [11] V. Dave, R.V. Mehta, Optik, **311**, 171925 (2024). DOI: 10.1016/j.ijleo.2024.171925
- [12] P. Sharma, V.V. Alekhya, S. Pathak, K. Jain, P. Tomar, G.A. Basheed, K.K. Maurya, R.P. Pant, J. Magn. Magn. Mater., **534** (17), 168024 (2021). DOI: 10.1016/j.jmmm.2021.168024
- [13] T. Du, S. Yuan, W. Luo, Appl. Phys. Lett., **65** (14), 1844 (1994). DOI: 10.1063/1.112861
- [14] I.V. Pleshakov, A.A. Alekseev, E.E. Bibik, I.V. Ilichev, A.V. Prokof'ev, Nanosystems: Phys. Chem. Math., **15** (3), 346 (2024). DOI: 10.17586/2220-8054-2024-15-3-346-351
- [15] H.E. Horng, C.-Y. Hong, S.Y. Yang, H.C. Yang, Appl. Phys. Lett., **82** (15), 2434 (2003). DOI: 10.1063/1.1568147