

## Физическая оптика

Научная статья

УДК 544.032.65

DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.18305>

### ДВУХЛУЧЕВОЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ НЕОДНОРОДНОСТИ, ИНДУЦИРОВАННОЙ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ В МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ

А. А. Алексеев<sup>1</sup> , И. В. Плешаков<sup>2,1</sup>, Ю. И. Кузьмин<sup>2</sup>, Я. А. Фофанов<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия;

<sup>2</sup> Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия;

<sup>3</sup> Институт аналитического приборостроения РАН, Санкт-Петербург, Россия

 [arseniy.alekseev98@gmail.com](mailto:arseniy.alekseev98@gmail.com)

**Аннотация.** В статье предложен новый метод экспериментального исследования магнитной жидкости, основанный на эффекте индуцирования в ней так называемой тепловой линзы под действием высокоинтенсивного сфокусированного лазерного излучения. Такая линза — это светоиндуцированная неоднородность, и она представляет собой область с пространственно-изменяющимся показателем преломления, которая формируется в результате перераспределения концентрации наночастиц в жидкой среде и теплового расширения жидкости-носителя. Указанная область просвечивается световым пучком вспомогательного лазера малой интенсивности. Оптический отклик среды регистрируется в виде дифракционных картин, образующихся от каждого из двух лазерных пучков. Установлено, что размеры дифракционных пятен зависят от напряженности приложенного внешнего магнитного поля.

**Ключевые слова:** магнитная жидкость, лазерное излучение, тепловая линза, светоиндуцированная неоднородность, дифракционная картина

**Для цитирования:** Алексеев А. А., Плешаков И. В., Кузьмин Ю. И., Фофанов Я. А. Двухлучевой метод исследования неоднородности, индуцированной лазерным излучением в магнитной жидкости // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2025. Т. 18. № 3. С. 60–67. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.18305>

Статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Original article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.18305>

### A DUAL-BEAM METHOD FOR STUDYING THE INHOMOGENEITY INDUCED BY LASER RADIATION IN A MAGNETIC FLUID

A. A. Alekseev<sup>1</sup> , I. V. Pleshakov<sup>2,1</sup>, Yu. I. Kuzmin<sup>2</sup>, Ya. A. Fofanov<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia;

<sup>2</sup> Ioffe Institute, St. Petersburg, Russia;

<sup>3</sup> Institute for Analytical Instrumentation RAS, St. Petersburg, Russia

 [arseniy.alekseev98@gmail.com](mailto:arseniy.alekseev98@gmail.com)

**Abstract.** In the paper, a new method of experimental study based on the induction of a so-called thermal lens (TL) by the focused high-level laser radiation has been put forward for magnetic fluids. This TL is a region with a spatially changing refractive index, which occurs



due to the redistribution of the nanoparticle concentration in the material and the thermal expansion of the carrier fluid. This region was illuminated by the low-level light emission of an auxiliary laser. The optical response of the medium was recorded as diffraction patterns formed from each of these two beams. The shape of the diffraction pattern in the auxiliary beam was shown to depend on the angle at which it was directed to the TL. The diffraction spot sizes were found to depend on the strength of the applied external magnetic field.

**Keywords:** magnetic fluid, laser radiation, thermal lens, light-induced inhomogeneity, diffraction pattern

**For citation:** Alekseev A. A., Pleshakov I. V., Kuzmin Yu. I., Fofanov Ya. A., A dual-beam method for studying the inhomogeneity induced by laser radiation in a magnetic fluid, St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. 18 (3) (2025) 60–67. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.18305>

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

## Введение

Магнитные жидкости, представляющие собой коллоиды, твердая фаза которых является магнитоупорядоченным материалом, находят множество разных практических применений [1, 2]. Они интересны и как объект научных исследований: например, в настоящее время изучается их поведение при внедрении в биологические системы [3 – 5] и другие сложные среды [6 – 8]. Рассматривается возможность создания оптоэлектронных устройств (модуляторы, датчики, перестраиваемые фильтры и др.) с рабочим веществом на основе магнитных жидкостей [9 – 12].

При использовании оптических свойств этих веществ важно учитывать, что луч с высокой интенсивностью изменяет концентрацию магнитных наночастиц. За это могут отвечать разные механизмы, основной среди которых – это тепловой (см. работу [13] и приведенные в ней ссылки). Изменение концентрации приводит к изменению показателя преломления  $n$  и появлению в образце линзоподобной неоднородности, так называемой тепловой линзы, или термолинзы (ТЛ), на которой свет дифрагирует. Фактически, это вариант самодифракции. Эффект образования ТЛ в области интенсивного лазерного излучения, в принципе, свойствен многим материалам, в частности, он наблюдался и в магнитных жидкостях [14, 15].

Обычная методика исследования ТЛ заключается в фокусировании лазерного пучка в среде и регистрации дифракции того же пучка на наведенной им неоднородности. Информация, получаемая из таких экспериментов, существенна как при разработке приборов фотоники, так и для понимания характера процессов, происходящих в подобных системах.

Поскольку излучение лазера создает ТЛ и дифрагирует на ней же, его характеристиками (мощность, форма пучка и др.) нельзя варьировать, не изменяя тем самым и изучаемый объект.

В настоящей работе для изучения эффекта тепловой линзы предложено применять вспомогательный лазер малой интенсивности, просвечивающий наведенную неоднородность под некоторым углом. Преимущество такого подхода состоит в возможности независимого зондирования изучаемого объекта.

## Экспериментальная часть

**Образцы.** Образцы изготавливались из коммерческой магнитной жидкости с твердой фракцией в виде наночастиц магнетита, имеющих средний диаметр около 10 нм. Растворителями служили керосин и вода с добавлением органических масел и стабилизаторов (поверхностно-активные вещества, предотвращающие слипание). Они разбавлялись соответствующим носителем до концентраций  $\varphi = 1 - 3$  об. %. Жидкость помещалась в кювету толщиной  $d = 60$  мкм.

**Экспериментальная установка.** Эксперименты выполнялись на установке, блок-схема которой показана на рис. 1. Основной источник света (гелий-неоновый лазер) имел длину волны 633 нм и мощность 17 мВт. Его излучение с помощью линзы фокусировалось в образце; согласно оценкам размеров фокусного пятна, интенсивность оптического излучения в нем составляла  $18 \text{ МВт/м}^2$ . Излучение вспомогательного полупроводникового лазера с длиной волны 660 нм и мощностью 12 мВт фокусировалось до образца. Интенсивность этого излучения на неоднородности, индуцированной основным лазером, не превышала  $4 \text{ кВт/м}^2$  (по нашей оценке), т. е. не могла оказывать на нее какого-либо существенного влияния. На полупрозрачном экране, расположенном за кюветой с образцом, каждый из двух лучей образовывал свою дифракционную картину.

Кювету с магнитной жидкостью помещали в электромагнит, который создавал поле напряженностью  $H$ , ортогональное ее плоскости. Оно могло изменяться от нуля до  $60 \text{ кА/м}$ .

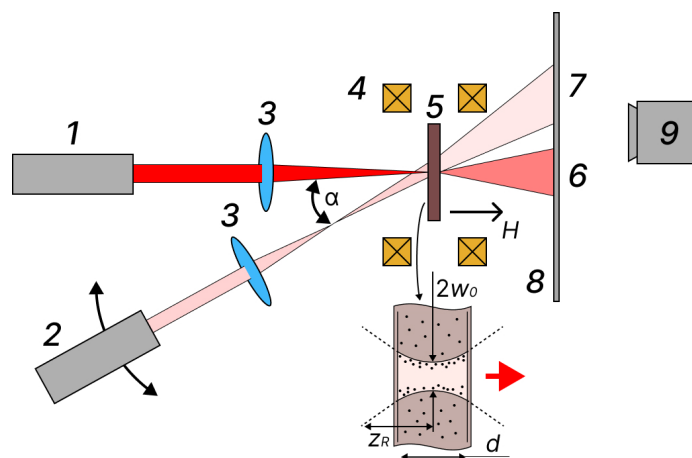


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1, 2 – основной и вспомогательный лазеры, соответственно; 3 – фокусирующие линзы; 4 – электромагнит; 5 – кювета с образцом; 6, 7 – дифракционные пятна от основного и вспомогательного лучей, соответственно; 8 – экран, 9 – цифровая CMOS-камера (англ. Complementary Metal-Oxide-Semiconductor).

На вставке: область излучения, сфокусированного на образце, с параметрами перетяжки

Размеры термолинзы оценивались с учетом ее приближенного ограничения каустикой (см. вставку на рис. 1); при этом использовались величины, характеризующие перетяжку лазерного луча: его диаметр в фокусе линзы  $2w_0$  и рэлеевская длина  $z_R$ . Они вычислялись по известным формулам, и для геометрии нашей оптической схемы оказались равными 35 и 900 мкм соответственно. Поскольку толщина кюветы  $d$  гораздо меньше рэлеевской длины  $z_R$ , было рассчитано, что неоднородность имеет примерно цилиндрическую форму с диаметром около 35 мкм и длиной 60 мкм.

### Полученные результаты

В экспериментах было получено несколько серий изображений дифракционных картин при разных условиях и для разных образцов (рис. 2).

Для магнитной жидкости на основе керосина в обоих лучах наблюдались ярко выраженные дифракционные картины в виде концентрических колец (см. рис. 2, а), на которые заметным образом влияло приложение магнитного поля (см. рис. 2, б). Во вспомогательном пучке пятно было вытянутым, увеличение значения угла  $\alpha$  приводило к повышению его эллиптичности (см. рис. 2, с). В водных образцах размеры пятен были намного меньше, чем в образцах на основе керосина (на рис. 2, d показано изображение, полученное на примерно втрое большем удалении экрана от кюветы), причем видно, что дифракционные кольца разрешены слабо (дифракционная картина от вспомогательного пучка, расположенная справа на рис. 2, d, увеличена в несколько раз для наглядности), поэтому далее приведены только результаты, полученные на керосиновых образцах.

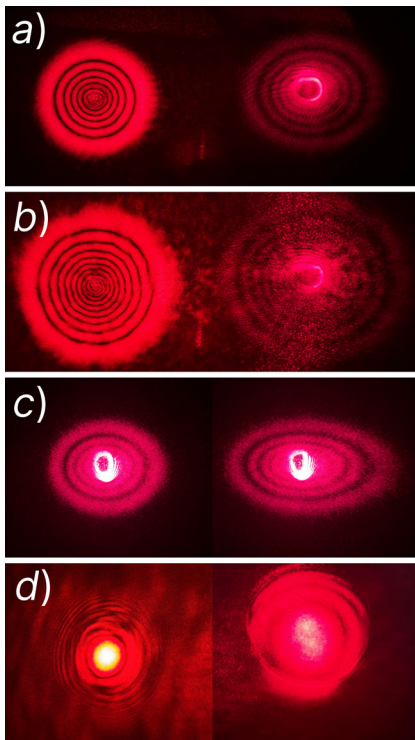


Рис. 2. Примеры дифракционных картин от разных образцов при разных условиях: образцы на основе керосина,  $\varphi = 2$  об. % ( $a - c$ ) и воды,  $\varphi = 3$  об. % ( $d$ ); приложенные магнитные поля  $H = 0$  ( $a, c, d$ ) и  $H = 56$  кА/м ( $b$ );  $a, b, d$  – представлены картины от основных (слева) и вспомогательных (справа) пучков; значения угла  $\alpha$  (см. рис. 1) составляли при этом  $20^\circ$ . Отличие на рис. 2,  $c$ : здесь оба изображения – от вспомогательных пучков: слева при  $\alpha = 35^\circ$ , справа при  $\alpha = 55^\circ$

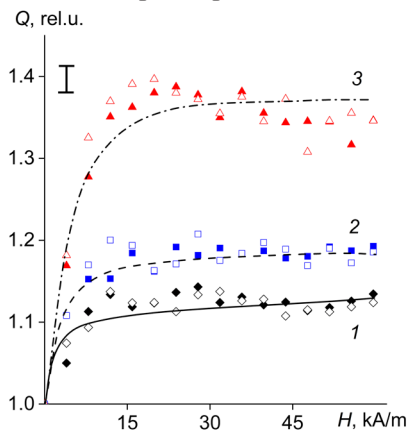


Рис. 3. Зависимости относительных размеров дифракционных пятен от напряженности магнитного поля в магнитных жидкостях на основе керосина при разных значениях концентрации  $\varphi$ , об. %: 1,0 (кривая 1), 1,5 (2), 3,0 (3).

Представлены данные для основных (затусованные символы) и вспомогательных (незатусованные) лазерных лучей при значении угла  $\alpha = 20^\circ$

Размер  $D$  дифракционных картин зависел от напряженности магнитного поля  $H$ , а изменение этого размера было удобно охарактеризовать нормированным параметром

$$Q(H) = D(H)/D_0,$$

где  $D(H)$ ,  $D_0$  – средние диаметры внешнего кольца пятна дифракции при напряженности поля  $H$  и при  $H = 0$ , соответственно.

Зависимости  $Q$  от величины магнитного поля для некоторых концентраций  $\varphi$  продемонстрированы на рис. 3. Угол  $\alpha$  здесь выбран небольшим, чтобы эллиптическое искажение отклика во вспомогательном луче было незначительным. Видно, что формы кривых  $Q(H)$  для откликов в основном и вспомогательном пучках совпадают. Концентрационные зависимости  $Q(\varphi)$  приведены на рис. 4, показывающем рост относительного размера дифракционных пятен с повышением концентрации.

### Обсуждение результатов

Анализ полученных экспериментальных результатов позволяет их интерпретировать следующим образом. Если неоднородность, имеющая форму цилиндра и индуцированная излучением основного лазера, находится в поле дополнительного излучения второго лазера, направленного к оси первого под углом, то на экране должна появляться еще одна дифракционная картина, сходная

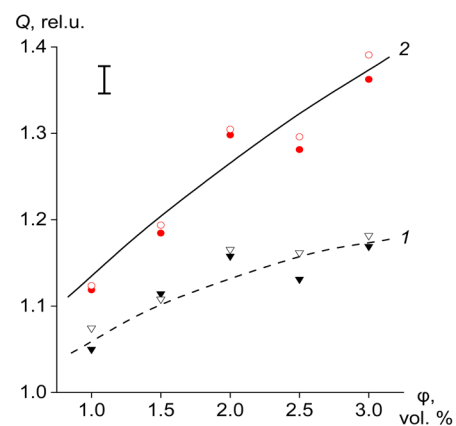


Рис. 4. Концентрационные зависимости относительных размеров дифракционных пятен в магнитных жидкостях на основе керосина при значениях напряженности магнитного поля  $H = 4,0$  кА/м (1) и  $16$  кА/м (2).

Представлены данные для основных и вспомогательных лазерных лучей (затусованные и незатусованные символы, соответственно)

с основной; а именно это и наблюдается. Возрастание вытянутости дифракционного пятна, полученного от вспомогательного луча, при увеличении угла  $\alpha$  между осями двух излучений коррелирует с удлинением проекции цилиндрической неоднородности при ее боковом освещении, причем количество разрешенных колец в дифракционной картине при этом уменьшается.

Поскольку размер дифракционных картин в случае водной магнитной жидкости намного меньше, логично предположить, что характерный размер термолинзы в них следует оценить как больший, чем в образцах с керосином в качестве растворителя. Это предположение согласуется с результатами работы [13], где обнаружена склонность таких магнитных жидкостей формировать под действием лазерного излучения крупные ассоциаты наночастиц, значительно превышающие по величине значение  $2w_0$  (диаметр лазерного луча в фокусе линзы).

Поведение оптических откликов в магнитном поле качественно объясняется свойствами магнитных жидкостей. Известно, что под действием магнитного поля в них возникают нитеобразные агрегаты, диаметры которых составляют от единиц до нескольких десятков микрометров (для жидких сред, где растворителями являются керосин или вода, и напряженности магнитного поля  $H$  более 8 кА/м) [16, 17]. Эти значения размеров агрегатов сравнимы с диаметром  $2w_0$ , т. е. неоднородность, созданная лазерным излучением, соизмерима с магнитоиндуцированным агрегатом. Естественным предположить, что при включении магнитного поля форма этого объекта радикально не изменяется, но при этом в объекте происходит преобразование пространственного распределения частиц (и показателя преломления  $n$ , связанного с их концентрацией [17]) за счет появления дипольного взаимодействия магнитных моментов, ориентированных вдоль вектора магнитного поля. В экспериментах на керосиновых образцах наблюдался рост расходимости лазерного пучка, прошедшего через термолинзу, по мере повышения напряженности магнитного поля, что указывает на уменьшение размера этой линзы.

Нетрудно заметить, что графики функций  $Q(H)$  для разных значений концентрации  $\phi$  практически подобны, и выходят на насыщение при магнитном поле, равном примерно 15 кА/м (см. рис. 3). Полученное нами значение напряженности поля насыщения отличается от величин, типичных для магнитных жидкостей, однако находится в хорошем согласии с данными по зависимости показателя преломления  $n$  от напряженности поля  $H$  [17]. Дифракционные картины водных магнитных жидкостей почти не зависят от магнитного поля, что, скорее всего, можно объяснить формированием в них более крупной и плотной структуры, чем в образцах с керосином в качестве растворителя [13].

### Заключение

Проведенное исследование позволяет заключить, что использование дополнительного лазерного пучка для изучения светоиндуцированных особенностей в магнитных жидкостях может служить эффективным методом получения информации об их физических свойствах. Его преимущество состоит в возможности проводить независимое зондирование неоднородности, индуцированной интенсивным излучением, с помощью слабого лазерного луча.

Предлагаемый подход позволяет изучать подобные неоднородности, не изменяя условий их формирования, но варьировать при этом режимы воздействия на них вспомогательным лазером.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Scherer C., Figueiredo Neto A. M. Ferrofluids: properties and applications // Brazilian Journal of Physics. 2005. Vol. 35. No. 3A. Pp. 718–727.
2. Oehlsen O., Cervantes-Ramírez S. I., Cervantes-Avilés P., Medina-Velo I. A. Approaches on ferrofluid synthesis and applications: Current status and future perspectives // ACS Omega. 2022. Vol. 7. No. 4. Pp. 3134–3150.
3. Socoliuc V., Avdeev M. V., Kuncser V., Turcu R., Tombácz E., Vékás L. Ferrofluids and bio-ferrofluids: Looking back and stepping forward // Nanoscale. 2022. Vol. 14. No. 13. Pp. 4786–4886.





4. **Monteserín M., Larumbe S., Martínez A. V., Burgui S., Francisco M. L.** Recent advances in the development of magnetic nanoparticles for biomedical applications // *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*. 2021. Vol. 21. No. 5. Pp. 2705–2741.
5. **Imran M., Alam M. M., Khan A.** Advanced biomedical applications of iron oxide nanostructures based ferrofluids // *Nanotechnology*. 2021. Vol. 32. No. 42. P. 422001.
6. **Yerin C., Belykh S.** Magnetic emulsions as prospective magneto-optical media // *IEEE Transactions on Magnetics*. 2022. Vol. 58. No. 2 (Part 1). P. 4600704.
7. **Pleshakov I. V., Alekseev A. A., Bibik E. E., Dudkin V. I., Kudryashova T. Yu., Karseeva E. K., Kostitsyna T. A., Medvedeva E. A.** Magnetic nanoparticles in solid matrices: Formation and fixation of structures, induced by magnetic field // *Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics*. 2023. Vol. 14. No. 5. Pp. 544–548.
8. **Ерин К. В., Вивчарь В. И.** Спектры пропускания разбавленных и концентрированных коллоидов магнетита в жидких диэлектриках // *Журнал прикладной спектроскопии*. 2023. Т. 90. № 6. С. 843–849.
9. **Zhao Y., Zhang Y., Lv R.-Q., Wang Q.** Novel optical devices based on the tunable refractive index of magnetic fluid and their characteristics // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2011. Vol. 323. No. 23. Pp. 2987–2996.
10. **Hao Z., Li Y., Pu Sh., Wang J., Chen F., Lahoubi M.** Ultrahigh-performance vector magnetic field sensor with wedge-shaped fiber tip based on surface plasmon resonance and magnetic fluid // *Nanophotonics*. 2022. Vol. 11. No. 15. Pp. 3519–3528.
11. **Han Sh., Pu Sh., Hao Z., et al.** In-line temperature-compensated vector magnetic field sensor with side-polished fiber // *Optics Letters*. 2023. Vol. 48. No. 17. Pp. 4504–4507.
12. **Dave V., Mehta R. V.** Diffraction of laser light by a ferrocell and ferrofluid layers: A comparison // *Optik*. 2024. Vol. 311. September. P. 171925.
13. **Pleshakov I. V., Alekseev A. A., Bibik E. E., Ilichev I. V., Prokof'ev A. V.** Effect of laser radiation on magnetite nanoparticles in deposited ferrofluid // *Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics*. 2024. Vol. 15. No. 3. Pp. 346–351.
14. **Du T., Yuan S., Luo W.** Thermal lens coupled magneto-optical effect in a ferrofluid // *Applied Physics Letters*. 1994. Vol. 65. No. 14. Pp. 1844–1846.
15. **Sharma P., Alekhya V. V., Pathak S., Jain K., Tomar P., Basheed G. A., Maurya K. K., Pant R. P.** A novel experimental approach for direct observation of magnetic field induced structuration in ferrofluid // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2021. Vol. 534. 15 September. P. 168024.
16. **Прокофьев А. В., Плешаков И. В., Бибик Е. Е., Кузьмин Ю. И.** Оптическое исследование геометрических характеристик агрегатов, образованных частицами магнитной жидкости // *Письма в Журнал технической физики*. 2017. Т. 43. № 4. С. 26–31.
17. **Hong H. E., Hong Ch.-Y., Yang S. Y., Yang H. C.** Designing the refractive indices by using magnetic fluids // *Applied Physics Letters*. 2003. Vol. 82. No. 15. Pp. 2434–2436.

## REFERENCES

1. **Scherer C., Figueiredo Neto A. M.**, Ferrofluids: properties and applications, *Braz. J. Phys.* 35 (3A) (2005) 718–727.
2. **Oehlsen O., Cervantes-Ramírez S. I., Cervantes-Avilés P., Medina-Velo I. A.**, Approaches on ferrofluid synthesis and applications: Current status and future perspectives, *ACS Omega*. 7 (4) (2022) 3134–3150.
3. **Socoliuc V., Avdeev M. V., Kuncser V., et al.**, Ferrofluids and bio-ferrofluids: Looking back and stepping forward, *Nanoscale*. 14 (13) (2022) 4786–4886.
4. **Monteserín M., Larumbe S., Martínez A. V., et al.**, Recent advances in the development of magnetic nanoparticles for biomedical applications, *J. Nanosci. Nanotechnol.* 21 (5) (2021) 2705–2741.
5. **Imran M., Alam M. M., Khan A.**, Advanced biomedical applications of iron oxide nanostructures based ferrofluids, *Nanotechnology*. 32 (42) (2021) 422001.
6. **Yerin C., Belykh S.**, Magnetic emulsions as prospective magneto-optical media, *IEEE Trans. Magn.* 58 (2-1) (2022) 4600704.

7. Pleshakov I. V., Alekseev A. A., Bibik E. E., et al., Magnetic nanoparticles in solid matrices: Formation and fixation of structures, induced by magnetic field, *Nanosyst. Phys. Chem. Math.* 14 (5) (2023) 544–548.
8. Yerin K. V., Vivchar V. I., Transmission spectra of diluted and concentrated magnetite colloids in liquid dielectrics, *J. Appl. Spectrosc.* 90 (7) (2024) 1205–1211.
9. Zhao Y., Zhang Y., Lv R.-Q., Wang Q., Novel optical devices based on the tunable refractive index of magnetic fluid and their characteristics, *J. Magn. Magn. Mat.* 323 (23) (2011) 2987–2996.
10. Hao Z., Li Y., Pu Sh., et al., Ultrahigh-performance vector magnetic field sensor with wedge-shaped fiber tip based on surface plasmon resonance and magnetic fluid, *Nanophotonics*. 11 (15) (2022) 3519–3528.
11. Han Sh., Pu Sh., Hao Z., et al., In-line temperature-compensated vector magnetic field sensor with side-polished fiber, *Opt. Lett.* 48 (17) (2023) 4504–4507.
12. Dave V., Mehta R. V., Diffraction of laser light by a ferrocell and ferrofluid layers: A comparison, *Optik*. 311 (Sept) (2024) 171925.
13. Pleshakov I. V., Alekseev A. A., Bibik E. E., et al., Effect of laser radiation on magnetite nanoparticles in deposited ferrofluid, *Nanosyst. Phys. Chem. Math.* 15 (3) (2024) 346–351.
14. Du T., Yuan S., Luo W., Thermal lens coupled magneto-optical effect in a ferrofluid, *Appl. Phys. Lett.* 65 (14) (1994) 1844–1846.
15. Sharma P., Alekhya V. V., Pathak S., et al., A novel experimental approach for direct observation of magnetic field induced structuration in ferrofluid, *J. Magn. Magn. Mat.* 534 (Sept) (2021) 168024.
16. Prokof'ev A. V., Pleshakov I. V., Bibik E. E., Kuz'min Yu. I., An optical investigation of the geometric characteristics of aggregates formed by particles of magnetic fluid, *Tech. Phys. Lett.* 43 (2) (2017) 194–196.
17. Horng H. E., Hong Ch.-Y., Yang S. Y., Yang H. C., Designing the refractive indices by using magnetic fluids, *Appl. Phys. Lett.* 82 (15) (2003) 2434–2436.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**АЛЕКСЕЕВ Арсений Александрович** — аспирант Высшей школы прикладной физики и космических технологий Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29

arseniy.alekseev98@gmail.com

ORCID: 0009-0000-5368-6788

**ПЛЕШАКОВ Иван Викторович** — доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Физико-технического института имени А. Ф. Иоффе РАН, профессор Высшей школы прикладной физики и космических технологий Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

194021, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26

ivanple@yandex.ru

ORCID: 0000-0002-6707-6216

**КУЗЬМИН Юрий Игоревич** — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Физико-технического института имени А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия.

194021, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26

iourk@yandex.ru

ORCID: 0000-0001-6052-8251

**ФОФАНОВ Яков Андреевич** — доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Института аналитического приборостроения РАН, Санкт-Петербург, Россия.

198095, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, 31-33, лит. А.

yakinvest@yandex.ru

ORCID: 0009-0004-2565-8834

**THE AUTHORS****ALEKSEEV Arseniy A.**

*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*  
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia  
arseniy.alekseev98@gmail.com  
ORCID: 0009-0000-5368-6788

**PLESHAKOV Ivan V.**

*Ioffe Institute of RAS*  
*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*  
26 Polytekhnicheskaya St., St. Petersburg, 194021, Russia  
ivanple@yandex.ru  
ORCID: 0000-0002-6707-6216

**KUZMIN Yuri I.**

*Ioffe Institute of RAS*  
26 Polytekhnicheskaya St., St. Petersburg, 194021, Russia  
iourk@yandex.ru  
ORCID: 0000-0001-6052-8251

**FOFANOV Yakov A.**

*Institute for Analytical Instrumentation of RAS*  
31-33, Ivan Chernykh St., St. Petersburg, 198095, Russia  
yakinvest@yandex.ru  
ORCID: 0009-0004-2565-8834

*Статья поступила в редакцию 21.02.2025. Одобрена после рецензирования 20.03.2025.*  
*Принята 20.03.2025.*  
*Received 21.02.2025. Approved after reviewing 20.03.2025. Accepted 20.03.2025.*