



## НАНОТЕХНОЛОГИИ, НАНОМАТЕРИАЛЫ И МЕТАМАТЕРИАЛЫ

Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2024. Т. 24, вып. 2. С. 171–179  
*Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2024, vol. 24, iss. 2, pp. 171–179  
<https://fizika.sgu.ru> <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2024-24-2-171-179>, EDN: MKYJYH

Научная статья  
УДК 621.37:621.385.69:621.373

### Модуляция лазерного излучения суспензией углеродных нанотрубок в магнитной жидкости

А. Э. Постельга, С. В. Игонин<sup>✉</sup>, Т. С. Бочкова, Г. М. Нагорнов, Ал. В. Скрипаль

Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, Россия, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, д. 83

Постельга Александр Эдуардович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики твердого тела, [sanyalace@list.ru](mailto:sanyalace@list.ru), <https://orcid.org/0000-0003-2086-1492>, AuthorID: 175088

Игонин Семен Владимирович, аспирант кафедры физики твердого тела, [igoninsemen@ya.ru](mailto:igoninsemen@ya.ru), <https://orcid.org/0009-0001-6274-3016>, AuthorID: 1225767

Бочкова Татьяна Сергеевна, доцент базовой кафедры твердотельной электроники СВЧ СГУ имени Н. Г. Чернышевского на базе АО «НПЦ «Алмаз-Фазотрон», [tatjana.vedyaeva@yandex.ru](mailto:tatjana.vedyaeva@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0002-8815-1270>, AuthorID: 1048865

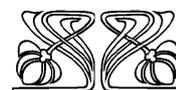
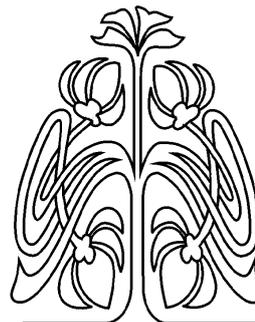
Нагорнов Георгий Михайлович, магистрант кафедры физики твердого тела, [gas2129@mail.ru](mailto:gas2129@mail.ru), <https://orcid.org/0009-0008-3100-211X>

Скрипаль Александр Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой физики твердого тела, [skripala\\_v@info.sgu.ru](mailto:skripala_v@info.sgu.ru), <https://orcid.org/0000-0001-7448-4560>, AuthorID: 36844

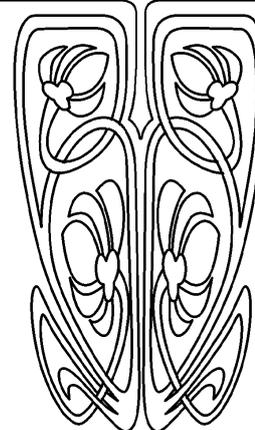
**Аннотация.** Магнитные жидкости – это уникальные нанодисперсные системы, обладающие свойствами магнитного материала и жидкости. Несмотря на то, что их магнитные свойства уступают сталям и ферритам, они являются супермагнитными по сравнению с большинством жидких сред. При приложении магнитного поля к магнитной жидкости в ней образуются агломераты ферромагнитных наночастиц, которые визуально наблюдались в данной работе. Исследована зависимость глубины модуляции лазерного излучения с длинами волн 450, 550 и 650 нм от концентрации нанотрубок и величины индукции магнитного поля. Проведено измерение коэффициента пропускания поляризованного излучения оптического диапазона в зависимости от взаимного расположения агломератов ферромагнитных наночастиц и вектора напряженности электрического поля лазерного излучения. Изменение угла между электрической компонентой лазерного излучения и вектором индукции магнитного поля осуществлялось поворотом лазерного диода с поляризатором серводвигателем относительно вертикальной оси. Выявлено, что с увеличением длины волны лазерного излучения глубина модуляции возрастает. При увеличении значения индукции магнитного поля увеличивается глубина модуляции лазерного поляризованного излучения для всех длин волн. Добавление в магнитную жидкость углеродных нанотрубок приводит к их выстраиванию вдоль агломератов. Максимальное значение глубины модуляции для магнитной жидкости без углеродных нанотрубок составило 15% и наблюдалось для лазерного излучения с длиной волны 650 нм. Добавление в магнитную жидкость многостенных углеродных нанотрубок позволило увеличить значение глубины модуляции примерно в полтора раза.

**Ключевые слова:** магнитная жидкость, углеродные нанотрубки, модуляция, длина волны, поляризованное излучение

**Для цитирования:** Постельга А. Э., Игонин С. В., Бочкова Т. С., Нагорнов Г. М., Скрипаль Ал. В. Модуляция лазерного излучения суспензией углеродных нанотрубок в магнитной жидкости //



НАУЧНЫЙ  
ОТДЕЛ





Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2024. Т. 24, вып. 2. С. 171–179. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2024-24-2-171-179>, EDN: MKYJYH

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

Article

### Modulation of laser radiation by suspension of carbon nanotubes in a magnetic liquid

A. E. Postelga, S. V. Igonin<sup>✉</sup>, T. S. Bochkova, G. M. Nagornov, Al. V. Skripal

Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia

Aleksandr E. Postelga, sanyalace@list.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2086-1492>, AuthorID: 175088

Semyon V. Igonin, igoninsemen@ya.ru, <https://orcid.org/0009-0001-6274-3016>, AuthorID: 1225767

Tatyana S. Bochkova, tatjana.vedyaeva@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8815-1270>, AuthorID: 1048865

Georgy M. Nagornov, gas2129@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0008-3100-211X>

Alexander V. Skripal, skripala\_v@info.sgu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7448-4560>, AuthorID: 36844

**Abstract. Background and Objectives:** Magnetic fluids are unique nanodispersed systems that have the properties of a magnetic material and a liquid. Although their magnetic properties are inferior to steels and ferrites, they are supermagnetic compared to most liquid media. When a magnetic field is applied to a magnetic fluid, agglomerates of ferromagnetic nanoparticles are formed in it, which were visually observed in this work. **Materials and Methods:** The dependence of the modulation depth of laser radiation with wavelengths of 450 nm, 550 nm and 650 nm on the concentration of nanotubes and the magnitude of the magnetic field induction is studied. The transmittance of polarized radiation in the optical range is measured depending on the relative position of agglomerates of ferromagnetic nanoparticles and the vector of the electric field strength of laser radiation. The angle between the electrical component of the laser radiation and the magnetic field induction vector changes by rotating the laser diode and polarizer with a servomotor relative to the vertical axis. **Results:** The maximum value of the modulation depth for magnetic fluid without carbon nanotubes is 15% and is observed for laser radiation with a wavelength of 650 nm. Adding multi-walled carbon nanotubes to the magnetic fluid makes it possible to increase the modulation depth by approximately one and a half times. **Conclusion:** It has been revealed that with increasing wavelength of laser radiation, the modulation depth increases. As the magnetic field induction value increases, the modulation depth of polarized laser radiation increases for all wavelengths. The addition of carbon nanotubes to the magnetic fluid leads to their alignment along the agglomerates.

**Keywords:** magnetic fluid, carbon nanotubes, modulation, wavelength, polarized radiation

**For citation:** Postelga A. E., Igonin S. V., Bochkova T. S., Nagornov G. M., Skripal Al. V. Modulation of laser radiation by suspension of carbon nanotubes in a magnetic liquid. *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2024, vol. 24, iss. 2, pp. 171–179 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2024-24-2-171-179>, EDN: MKYJYH

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

### Введение

Достижения в области радиофизики и твердотельной электроники стимулировали развитие исследований многокомпонентных материалов, характеристиками которых можно управлять. Магнитные жидкости относятся к такому роду материалов. Уникальность свойств магнитных жидкостей открыла возможности их применения в различных отраслях – машиностроении, медицине и технике [1–7].

При приложении магнитного поля к магнитной жидкости в ней проявляются структурные эффекты – агломерация ферромагнитных наночастиц в нитевидные образования. Разработка управляемых магнитным полем компонентов СВЧ-техники и оптических устройств на основе магнитных жидкостей требует учета пространственного расположения агломератов ферромагнитных наночастиц.

В [8–10] был зафиксирован факт образования агломератов по анизотропному светорассеянию. Динамика агломерации при изменении магнит-

ного поля исследовалась в [11–19]. В [18] описано различие процесса агломерации в объеме магнитной жидкости от процесса ее агломерации в тонких слоях. Известны работы [20–24], в которых доказывается возможность применения композиционных материалов с управляемыми характеристиками для создания методов модуляции электромагнитного излучения оптического диапазона.

Прохождение поляризованного оптического излучения через образцы магнитной жидкости с различными объемными долями твердой фазы при наличии внешнего магнитного поля описано в [25]. При воздействии магнитного поля коэффициент пропускания начинает снижаться со временем, пока не дойдет до минимального значения. По истечении некоторого времени после достижения минимума, интенсивность вновь увеличивается и достигает состояния насыщения. Пропускание уменьшается вследствие образования агломератов магнитной жидкости, которые эффективно поглощают и рассеивают оптическое



излучение. С течением времени, по мере увеличения длины агломератов промежутки между ними увеличиваются, что приводит к возрастанию коэффициента пропускания. Увеличение коэффициента пропускания поляризованного оптического излучения начинает происходить через 3 минуты, а через 10 минут зависимость коэффициента пропускания от времени выходит на насыщение.

Аналогичные стадии выделяются и в композите магнитная жидкость – нанотрубки [26]. С ростом концентрации нанотрубок и величины внешнего магнитного поля поляризационный эффект усиливается.

Целью работы является определение глубины модуляции поляризованного лазерного излучения с различными длинами волн при прохождении через суспензию углеродных нанотрубок в магнитной жидкости во внешнем магнитном поле с переменным направлением.

## 1. Исследуемые образцы

В настоящей работе изучалось прохождение поляризованного оптического излучения через магнитную жидкость при различных значениях индукции магнитного поля. В отличие от [27] исследовалась зависимость величины модуляции от длины волны лазерного излучения. В качестве источников излучения использовались три полупроводниковых лазера на квантоворазмерных структурах с различной длиной волны излучения.

Используемая в эксперименте магнитная жидкость на основе керосина с магнитными наночастицами, стабилизированными олеиновой кислотой, имела следующие параметры: средний диаметр магнетитовых частиц  $d = 10$  нм (частицы синтезированы химическим осаждением), объёмная доля твёрдой фазы  $\varphi = 0.1$ .

Из рис. 1 видно, что с увеличением индукции магнитного поля длина агломератов увеличивается

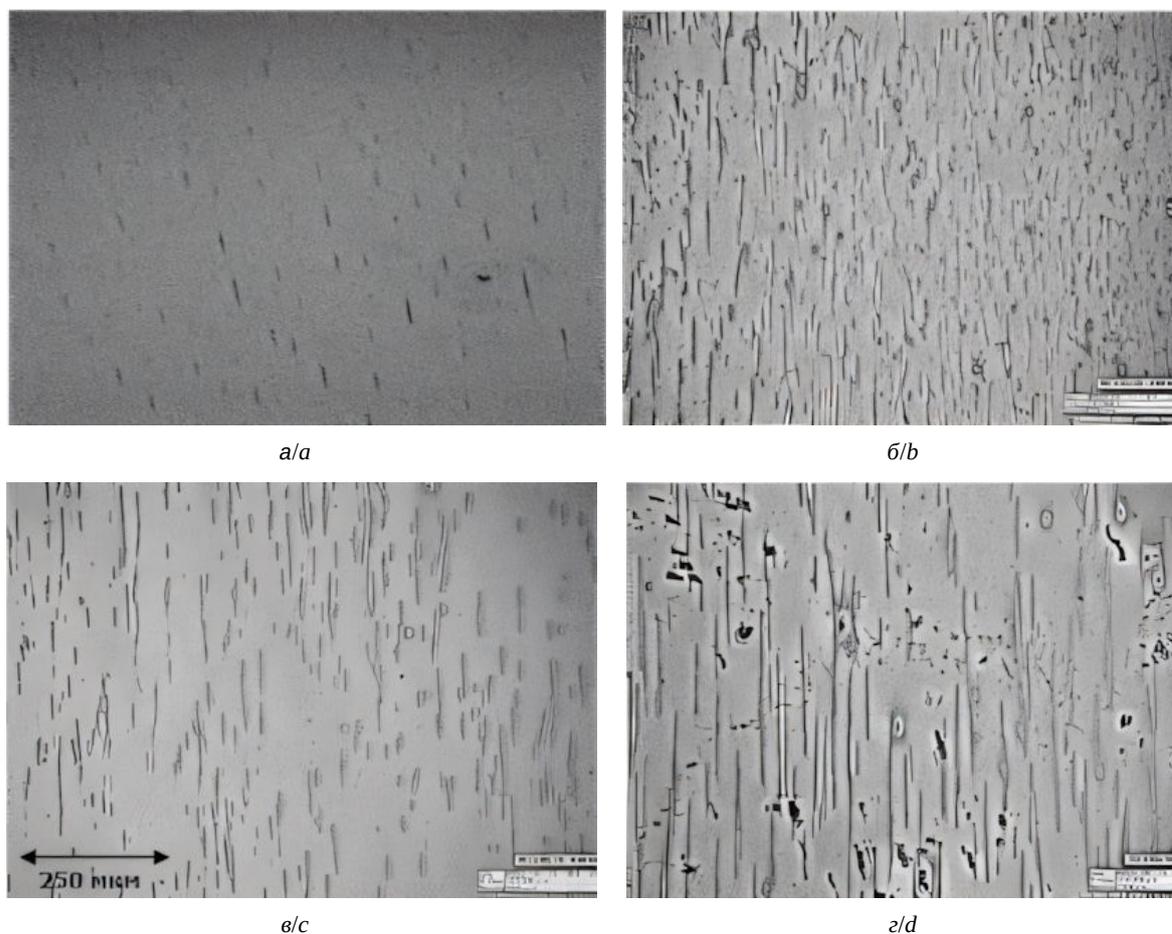


Рис. 1. Фотографии фрагментов слоя магнитной жидкости при приложении магнитного поля с индукцией, мТл:  
а – 25, б – 50, в – 115, г – 140

Fig. 1. Photographs of fragments of a magnetic fluid layer when applying a magnetic field with induction, mT:  
a – 25, b – 50, c – 115, d – 140



ся. Изображения с увеличением  $\times 280$  были получены на оптическом микроскопе HIROX KH-7700 (Hirox, Япония).

Исследуемая суспензия изготавливалась следующим образом. Навеску углеродных нанотрубок серии «Таунит-М» (УНТ) перемешивали с магнитной жидкостью на магнитной мешалке в течение 20 минут. Полученную суспензию помещали в ультразвуковую ванну и воздействовали с частотой 40 кГц в течение 1 часа. Ультразвуковое воздействие на коллоидный раствор позволяло предотвратить объединение нанотрубок. Было изготовлено три суспензии с различной концентрацией УНТ: образец № 1 без УНТ, образец № 2 с массовой долей УНТ 0.1%, образец № 3 с массовой долей УНТ 0.2%. Исследуемая суспензия помещалась в стеклянные ячейки. Площадь поверхности ячеек была значительно больше диаметра лазерного пятна, толщина слоя суспензии в ячейках составляла 100 мкм.

Для визуализации агломератов из ферромагнитных наночастиц и нанотрубок было произведено высушивание тонкого слоя магнитной жидкости и магнитной жидкости с нанотрубками. Из рис. 2, б видно, что нанотрубки выстраиваются вдоль агломератов магнитной жидкости, при этом с углеродными нанотрубками толщина агломератов увеличивается.

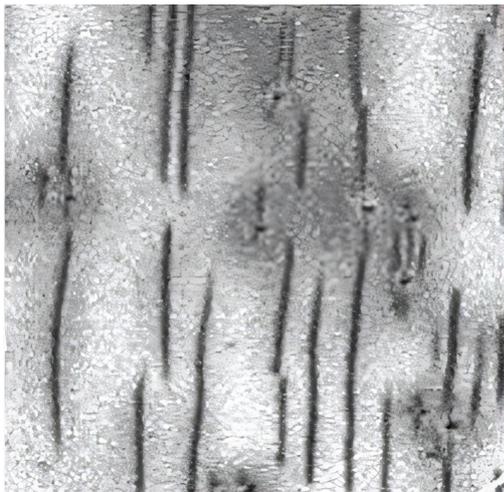
## 2. Экспериментальная установка

Схема экспериментальной установки показана на рис. 3. Ячейки с исследуемой суспензией 3

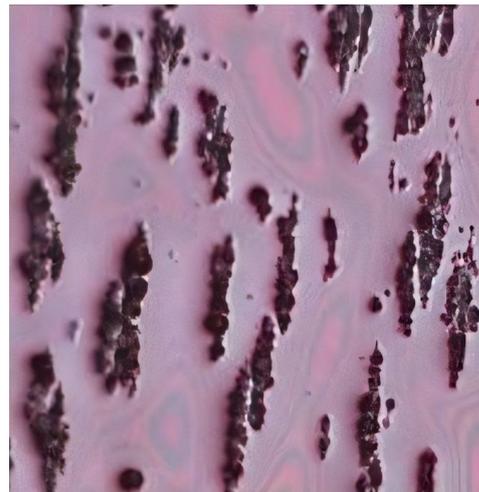
помещались в магнитное поле таким образом, чтобы вектор индукции магнитного поля был параллелен плоскостям кюветы. Источником магнитного поля служил электромагнит на основе катушек Гельмгольца 5. Величина индукции магнитного поля в области магнитной жидкости измерялась датчиком Холла и составляла 12–140 мТл. Излучение полупроводникового лазера 1 через поляризатор 2 направлялось перпендикулярно плоскости кюветы, прошедшее через кювету излучение регистрировалось фотодиодом 4, помещенным непосредственно под ячейкой. Мощность излучения лазеров устанавливалась таким образом, чтобы показания с фотодиода в отсутствии магнитного поля принимали одинаковое значение, равное 20.5 мВ.

Изменение угла между электрической компонентой лазерного излучения и вектором индукции магнитного поля в интервале от  $0^\circ$  до  $360^\circ$  осуществлялось поворотом лазерного диода с поляризатором серводвигателем относительно вертикальной оси. Сигнал с фотодиода регистрировался, оцифровывался и поступал для анализа в компьютер.

Интенсивность прошедшего сквозь ячейку лазерного излучения изменялась в зависимости от угла поворота лазера вследствие изменения ориентации электрической компоненты лазерного излучения относительно агломератов, образованных ферромагнитными частицами магнитной жидкости под действием магнитного поля.



a/a



б/б

Рис. 2. Тонкий слой магнитной жидкости, высушенный во внешнем магнитном поле с индукцией 140 мТл: а – без нанотрубок, б – с углеродными нанотрубками

Fig. 2. A thin layer of magnetic fluid dried in an external magnetic field with an induction of 140 mT: a – without nanotubes, b – with carbon nanotubes

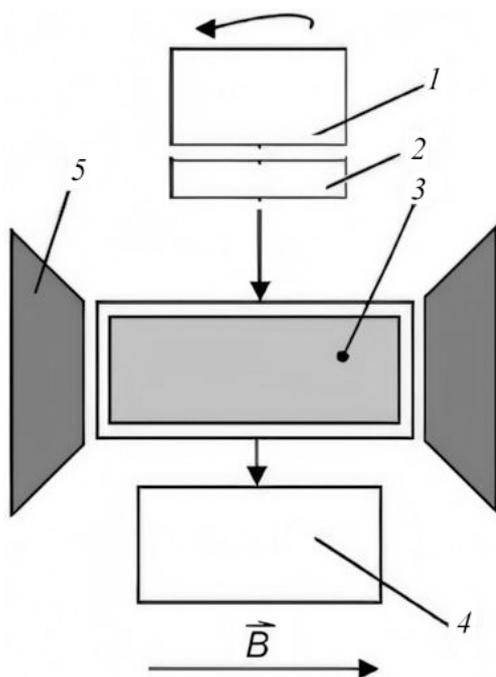


Рис. 3. Схема экспериментальной установки: 1 – источник лазерного излучения, 2 – поляризатор, 3 – ячейка с исследуемой суспензией, 4 – фотодиод, 5 – обкладки электромагнита

Fig. 3. Diagram of the experimental setup: 1 – laser radiation source, 2 – polarizer, 3 – cell with test suspension, 4 – photodiode, 5 – electromagnet plates

### 3. Обсуждение результатов

На рис. 4 приведены зависимости интенсивности прошедшего лазерного излучения с различными длинами волн через образец № 1 без углеродных нанотрубок, регистрируемого фотодиодом, от угла  $\alpha$  между вектором электрической компоненты лазерного излучения и вектором индукции магнитного поля при значении индукции магнитного поля 100 мТл.

Минимальное значение напряжения на фотодиоде (максимальное поглощение излучения) для всех трех суспензий наблюдалось при параллельной ориентации электрической составляющей лазерного излучения и вектора индукции магнитного поля ( $\alpha = 0^\circ$ ). Изменяя направление вектора индукции магнитного поля, воздействующего на магнитную жидкость, можно модулировать прошедшую сквозь нее мощность лазерного излучения.

Глубина модуляции лазерного излучения вычислялась по формуле

$$M = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{U_{\max}}, \quad (1)$$

где  $U_{\min}$  и  $U_{\max}$  – напряжение с фотодиода, при параллельном и перпендикулярном расположении вектора индукции магнитного поля и электрической составляющей линейно поляризованного лазерного излучения соответственно.

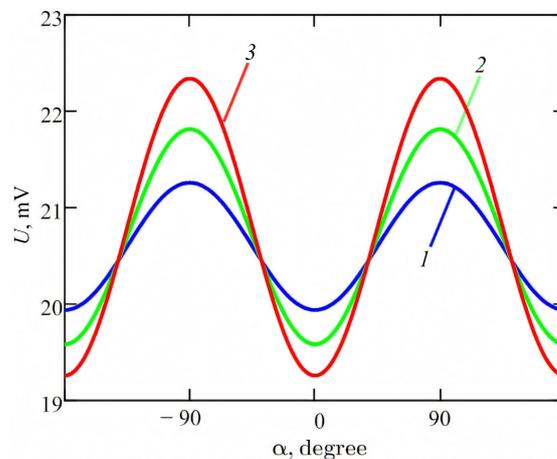


Рис. 4. Зависимость напряжения на фотодиоде от угла между вектором электрического поля лазерного излучения (1 – 450 нм, 2 – 530 нм, 3 – 650 нм) и вектором индукции магнитного поля при прохождении через образец № 1 при приложении магнитного поля с индукцией 100 мТл (цвет онлайн)

Fig. 4. Dependence of the voltage on the photodiode on the angle between the electric field vector of laser radiation (1 – 450 nm, 2 – 530 nm, 3 – 650 nm) and the magnetic field induction vector when passing through sample no. 1 when applying a magnetic field with an induction of 100 mT (color online)

Ослабление параллельного монохроматического пучка света при распространении его в поглощающей среде определяется законом Бугера – Ламберта – Бера:

$$I(L, \lambda) = I_0 \cdot e^{-k(\lambda) \cdot L}, \quad (2)$$

где  $I(L, \lambda)$  – интенсивность света, прошедшего через слой суспензии толщиной  $L$ ,  $I_0$  – интенсивность падающего излучения,  $k(\lambda)$  – коэффициент экстинкции. Коэффициент экстинкции является суммой коэффициентов поглощения  $k_{abs}$  и рассеяния  $k_{sc}$ :

$$k(\lambda) = k_{abs}(\lambda) + k_{sc}(\lambda), \quad (3)$$

и определяется свойствами поглощающей среды и длиной волны  $\lambda$  поглощаемого света. Кроме того, коэффициент экстинкции зависит от направления вектора электрического поля в зондирующем пучке, т. е. является поляризационно-зависимым. Это обусловлено различиями в усредненных по ансамблю агломератов их геометрических сечениях для двух взаимно ортогональных состояний поляризации пучка. Количественное определение этих различий представляет собой сложную



вычислительную проблему, требующую применения специальных моделей и алгоритмов (например, DDA – discrete dipole approximation). Поэтому в данной работе анализ эффекта поляризационно-зависимой экстинкции ориентированных магнитным полем агломератов проводится на качественном уровне. Изменение взаимной ориентации агломератов магнитных частиц и вектора индукции магнитного поля приводит к изменению значения коэффициента экстинкции  $k$ .

При параллельном расположении нитевидных агломератов ферромагнитных наночастиц, выстроенных вдоль вектора индукции внешнего магнитного поля, и электрической составляющей линейно поляризованного лазерного излучения, наблюдается максимальное взаимодействие поля с агломератами. Коэффициент экстинкции  $k$  достигает максимального значения. Если агломераты расположены перпендикулярно электрической компоненте лазерного излучения, то коэффициент экстинкции  $k$  принимает минимальное значение. Таким образом, изменяя направление вектора индукции магнитного поля, воздействующего на магнитную жидкость, возможна модуляция прошедшего через нее лазерного излучения.

На рис. 5 представлена зависимость глубины модуляции интенсивности линейно поляризованного излучения лазеров с различными длинами волн от величины индукции магнитного поля.

При увеличении значения индукции магнитного поля увеличивается глубина модуляции лазерного поляризованного излучения для всех длин волн. Это связано с тем, что с ростом величины индукции магнитного поля увеличивается результирующая длина и толщина образующихся агломератов ферромагнитных частиц магнитной жидкости.

При увеличении длины волны лазерного излучения глубина модуляции увеличивается, что объясняется увеличением поглощения на более коротких длинах волн вследствие увеличения толщины агломератов.

При добавлении в магнитную жидкость нанотрубок можно увидеть их объединение вдоль нитевидных агломератов наночастиц, посредством чего увеличивается результирующая толщина и проводимость агломератов, представляющих собой комплексы из ферромагнитных наночастиц и нанотрубок, обладающих высокой электропроводностью. В результате возрастает коэффициент экстинкции лазерного излучения при параллельной ориентации вектора электрического поля и агломератов. Следовательно, должна увеличиваться

и глубина модуляции прошедшего излучения (рис. 6).

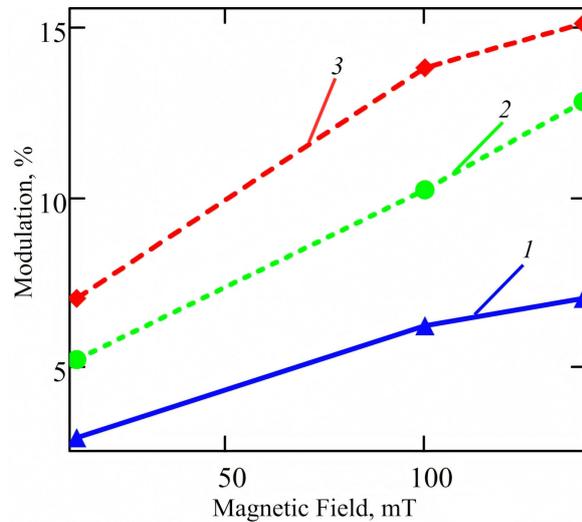


Рис. 5. Зависимость глубины модуляции поляризованного лазерного излучения при прохождении через магнитную жидкость с агломератами от индукции магнитного поля для лазеров с длиной волны, нм: 1 – 450, 2 – 530, 3 – 650 (цвет онлайн)

Fig. 5. Dependence of the modulation depth of polarized laser radiation when passing through a magnetic fluid with agglomerates on the magnetic field induction for lasers with wavelengths, nm: 1 – 450, 2 – 530, 3 – 650 (color online)

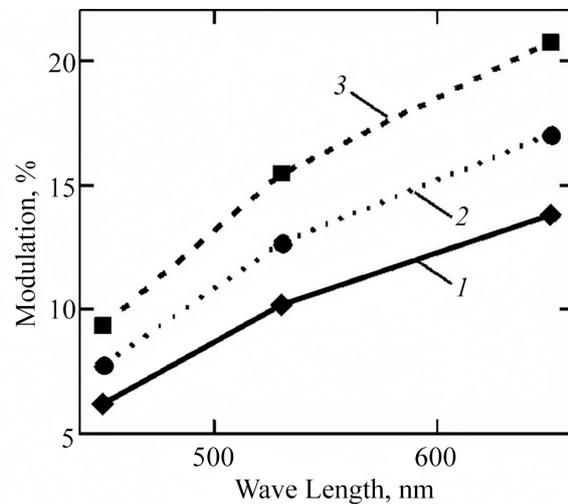


Рис. 6. Зависимость глубины модуляции интенсивности от длины волны поляризованного излучения при приложении магнитного поля с индукцией 100 мТл для суспензий с различной концентрацией углеродных нанотрубок: 1 – образец № 1 (без УНТ), 2 – образец № 2 (0.01% УНТ), 3 – образец № 3 (0.02% УНТ)

Fig. 6. Dependence of the depth of intensity modulation on the wavelength of polarized radiation when applying a magnetic field with an induction of 100 mT for suspensions with different concentrations of carbon nanotubes: 1 – sample no. 1 (without CNTs), 2 – sample no. 2 (0.01% CNTs), 3 – sample no. 3 (0.02% CNT)



**Глубина модуляции лазерного излучения с различными длинами волн через исследуемые образцы при приложении магнитного поля с различной величиной индукции**

**Depth of modulation of laser radiation with different wavelengths through the samples under study when applying a magnetic field with different induction values**

№ образца / Sample no.	Значение индукции магнитного поля, мТл / Magnetic field induction, мТ	Глубина модуляции, % / Modulation depth, %		
		450 нм	530 нм	650 нм
1	12	2.9	5.2	7.0
	100	6.2	10.2	13.8
	140	7.0	12.8	15.1
2	12	3.6	6.5	8.75
	100	7.8	12.7	17.0
	140	8.7	15.9	18.9
3	12	4.3	7.7	10.4
	100	9.3	15.4	20.7
	140	10.4	19.1	22.8

Увеличение концентрации нанотрубок в суспензии приводит к увеличению глубины модуляции (таблица).

### Заключение

Таким образом, можно сделать вывод о возможности модуляции интенсивности линейно поляризованного оптического излучения для длин волн 450, 550, 650 нм, проходящего через суспензию углеродных нанотрубок в магнитной жидкости, при воздействии магнитного поля с изменяющимся направлением вектора индукции. Выявлено, что глубина модуляции интенсивности линейно поляризованного оптического излучения, проходящего через магнитную жидкость, во внешнем магнитном поле с переменным направлением возрастает с увеличением индукции магнитного поля и длиной волны лазерного излучения. Максимальное значение глубины модуляции для магнитной жидкости без углеродных нанотрубок составило 15% и наблюдалось для лазерного излучения с длиной волны 650 нм. Добавление в магнитную жидкость многостенных углеродных нанотрубок, обладающих высокой электропроводностью, позволяет увеличить значение глубины модуляции примерно в полтора раза.

### Список литературы

1. Philip J., Laskar J. M. Magnetic nanofluids (Ferrofluids): Recent advances, applications, challenges, and future directions // *Advances in Colloid and Interface Science*. 2023. Vol. 311. Article number 102810. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2022.102810>
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, iss. 4. Article number 3134. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c05631>
3. Рыжков А. В., Меленёв П. В., Райхер Ю. Л. Магнитные и структурные свойства магнитополимерного композита: многочастичная модель // *Неделя науки СПбПУ : материалы научного форума с международным участием. Институт прикладной математики и механики. СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2015. С. 216–218. URL: <https://aero.spbstu.ru/images/attachments/week-science/ipmm-2015.pdf> (дата обращения: 29.01.2024).*
4. Zhang X., Sun L., Yu Y., Zhao Y. Flexible Ferrofluids: Design and Applications // *Adv. Mater.* 2019. Vol. 31, iss. 51. Article number 1903497. <https://doi.org/10.1002/adma.201903497>
5. Burya P., Černobilaa F., Veveričička M., Kúdelčíka J., Harďoňa Š., Rajňák M., Pavlovičová K., Timkob M., Kopčanský P. Investigation of structural changes in oil-based magnetic fluids by surface acoustic waves // *J. Magn. Magn. Mater.* 2020. Vol. 501. Article number 16639. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2020.166392>
6. Akchiche Z., Abba A. B., Saggai S. Magnetic nanoparticles for the Removal of Heavy Metals from industrial wastewater: Review // *Algerian J. Chem. Eng.* 2021. Vol. 01. P. 8–14. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4458444>
7. Hatamie A., Parham H., Zargar B., Heidari Z. Evaluating magnetic nano-ferrofluid as a novel coagulant for surface water treatment // *J. Mol. Liq.* 2016. Vol. 219. P. 694–702. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2016.04.020>
8. Дроздова В. И., Скибин Ю. Н., Шагрова Г. В. Исследование структуры разбавленных магнитных жидкостей по анизотропному светорассеянию // *Магнитная гидродинамика*. 1987. Вып. 2. С. 63–67.
9. Haas W. E., Adams J. E. Diffraction effects in ferrofluids // *Applied Physics Letters*. 1975. Vol. 27, iss. 10. P. 571–572. <https://doi.org/10.1063/1.88299>
10. Chandran S., Ronald T., Gavin L., Ratna N. Magnetic-field-induced optical anisotropy in ferrofluids: A time-dependent light-scattering investigation // *Physical*



- Review E. 2008. Vol. 78. Article number 051502. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.78.051502>
11. Ivanov A. O., Kantorovich S. S., Mendeleev V. S., Pyanzina E. S. Ferrofluid aggregation in chains under the influence of a magnetic field // *J. Magn. Magn. Mater.* 2006. Vol. 300. P. e206–e209. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2005.10.081>
  12. Černák J., Helgesen G., Skjeltorp A. T. Aggregation dynamics of nonmagnetic particles in a ferrofluid // *Phys. Rev. E.* 2004. Vol. 70. Article number 031504. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.70.031504>
  13. Eldin Wee Chuan Lim, Ruili Feng. Agglomeration of magnetic nanoparticles // *J. Chem. Phys.* 2012. Vol. 136, iss. 12. Article number 124109. <https://doi.org/10.1063/1.3697865>
  14. Yoshida T., Enpuku K., Dieckhoff J., Schilling M., Ludwig F. Magnetic fluid dynamics in a rotating magnetic field // *J. Appl. Phys.* 2012. Vol. 111, iss. 5. Article number 053901. <https://doi.org/10.1063/1.3688254>
  15. Sebastian A. Agglomeration effects in rotating ferrofluids // *J. Magn. Magn. Mater.* 2019. Vol. 482. P. 239–250. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2019.03.068>
  16. Sanz-Felipe A., Barba I., Martín J. C. Optical transmission of ferrofluids exposed to a magnetic field: Analysis by electromagnetic wave propagation numerical methods // *J. Mol. Liq.* 2020. Vol. 315. Article number 113713. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.113713>
  17. Lakić M., Andjelković L., Šuljagić M., Vulić P., Perić M., Iskrenović P., Krstić I., Kuraica M. M., Nikolić A. S. Optical evidence of magnetic field-induced ferrofluid aggregation: Comparison of cobalt ferrite, magnetite, and magnesium ferrite // *Opt. Mater.* 2019. Vol. 91. P. 279–285. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2019.03.031>
  18. Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Ермолаев С. А. Визуальное наблюдение агломератов в объеме магнитной жидкости // *Письма в ЖТФ.* 1995. Т. 21, вып. 22. С. 82–85.
  19. Усанов Д. А., Постельга А. Э., Бочкова Т. С., Гаврилин В. Н. Динамика агломерации наночастиц в магнитной жидкости при изменении магнитного поля // *ЖТФ.* 2016. Т. 86, вып. 3. С. 146–148. <https://doi.org/10.1134/S1063784216030221>
  20. Belotelov V. I., Kreilkamp L. E., Akimov I. A., Kalish A. N. Plasmon-mediated magneto-optical transparency // *Nature Communications.* 2013. Vol. 4, iss. 1. Article number 2128. <https://doi.org/10.1038/ncomms3128>
  21. Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Ермолаев С. А. Дифракция света на агломератах слоя магнитной жидкости в магнитном поле, параллельном плоскости слоя // *Письма в ЖТФ.* 1997. Т. 23, вып. 3. С. 64–67.
  22. Li J., Li G., Lu X., Wang S., Leng M., Yang S., Guan J., Long Y. Magnetically Responsive Optical Modulation: From Anisotropic Nanostructures to Emerging Applications // *Adv. Funct. Mater.* 2023. Vol. 33, iss. 41. Article number 2308293. <https://doi.org/10.1002/adfm.202308293>
  23. Jing D., Sun L., Jin J., Thangamuthu M., Tang J. Magneto-optical transmission in magnetic nanoparticle suspensions for different optical applications: A review // *Journal of Physics D: Applied Physics.* 2021. Vol. 54, iss. 1. Article number 013001. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/abb8fd>
  24. Jian Li, Xiaodong Liu, Yueqiang Lin, Lang Bai, Qiang Li. Field modulation of light transmission through ferrofluid film // *Appl. Phys. Lett.* 2007. Vol. 91. Article number 253108. <https://doi.org/10.1063/1.2825464>
  25. Philip J., Laskar J. M. Optical Properties and Applications of Ferrofluids – A Review // *J. Nanofluids.* 2012. Vol. 1, iss. 1. P. 3–20. <https://doi.org/10.1166/jon.2012.1002>
  26. Vales-Pinzón C., Alvarado-Gil J. J., Medina-Esquivel R., Martínez-Torres P. Polarized light transmission in ferrofluids loaded with carbon nanotubes in the presence of a uniform magnetic field // *J. Magn. Magn. Mater.* 2014. Vol. 369. P. 114–121. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2014.06.025>
  27. Усанов Д. А., Постельга А. Э., Бочкова Т. С., Гаврилин В. Н., Игонин С. В. Модуляция поляризованного оптического излучения, проходящего через магнитную жидкость с нанотрубками, при воздействии магнитного поля с изменяющимся направлением // *ЖТФ.* 2017. Т. 87, вып. 9. С. 1432–1435. <https://doi.org/10.21883/JTF.2017.09.44924.2188>

## References

1. Philip J., Laskar J. M. Magnetic nanofluids (Ferrofluids): Recent advances, applications, challenges, and future directions. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2023, vol. 311, article no. 102810. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2022.102810>
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, iss. 4, article no. 3134. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c05631>
3. Ryzhkov A. V., Melenov P. V., Raykher Yu. L. Magnetic and structural properties of a magnetopolymer composite: A multiparticle model. *Nedelya nauki SPbPU: materialy nauchnogo foruma s mezhdunarodnym uchastiyem. Institut prikladnoy matematiki i mekhaniki* [Science Week SPbPU. Materials of the Scientific Forum With International Participation. Institute of Applied Mathematics and Mechanics]. St. Petersburg, Polytechnic University Publ., 2015, pp. 216–218. Available at: <https://aero.spbstu.ru/images/attachments/week-science/ipmm-2015.pdf> (accessed January 01, 2024) (in Russian).
4. Zhang X., Sun L., Yu Y., Zhao Y. Flexible Ferrofluids: Design and Applications. *Adv. Mater.*, 2019, vol. 31, iss. 51, article no. 1903497. <https://doi.org/10.1002/adma.201903497>
5. Burya P., Černobilaa F., Veveriččika M., Kúdelčíka J., Harďoňa Š., Rajňák M., Pavlovičová K., Timkob M., Kopčanský P. Investigation of structural changes in oil-based magnetic fluids by surface acoustic waves. *J. Magn. Magn. Mater.*, 2020, vol. 501, article no. 16639. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2020.166392>
6. Akchiche Z., Abba A. B., Saggai S. Magnetic nanoparticles for the Removal of Heavy Metals from industrial wastewater: Review. *Algerian J. Chem. Eng.*, 2021,



- vol. 01, pp. 8–14. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4458444>
7. Hatamie A., Parham H., Zargar B., Heidari Z. Evaluating magnetic nano-ferrofluid as a novel coagulant for surface water treatment. *J. Mol. Liq.*, 2016, vol. 219, pp. 694–702. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2016.04.020>
  8. Drozdova V. I., Skibin Yu. N., Shagrova G. V. Study of the structure of dilute magnetic fluids by anisotropic light scattering. *Magnitnaya gidrodinamika* [Magnetic Hydrodynamics], 1987, iss. 2, pp. 63–67 (in Russian).
  9. Haas W. E., Adams J. E. Diffraction effects in ferrofluids. *Applied Physics Letters*, 1975, vol. 27, iss. 10, pp. 571–572. <https://doi.org/10.1063/1.88299>
  10. Chandran S., Ronald T., Gavin L., Ratna N. Magnetic-field-induced optical anisotropy in ferrofluids: A time-dependent light-scattering investigation. *Physical Review E*, 2008, vol. 78, article no. 051502. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.78.051502>
  11. Ivanov A. O., Kantorovich S. S., Mendeleev V. S., Pyanzina E. S. Ferrofluid aggregation in chains under the influence of a magnetic field. *J. Magn. Magn. Mater.*, 2006, vol. 300, pp. e206–e209. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2005.10.081>
  12. Černák J., Helgesen G., Skjeltorp A. T. Aggregation dynamics of nonmagnetic particles in a ferrofluid. *Phys. Rev. E*, 2004, vol. 70, article no. 031504. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.70.031504>
  13. Eldin Wee Chuan Lim, Ruili Feng. Agglomeration of magnetic nanoparticles. *J. Chem. Phys.*, 2012, vol. 136, iss. 12, article no. 124109. <https://doi.org/10.1063/1.3697865>
  14. Yoshida T., Enpuku K., Dieckhoff J., Schilling M., Ludwig F. Magnetic fluid dynamics in a rotating magnetic field. *J. Appl. Phys.*, 2012, vol. 111, iss. 5, article no. 053901. <https://doi.org/10.1063/1.3688254>
  15. Sebastian A. Agglomeration effects in rotating ferrofluids. *J. Magn. Magn. Mater.*, 2019, vol. 482, pp. 239–250. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2019.03.068>
  16. Sanz-Felipe A., Barba I., Martín J. C. Optical transmission of ferrofluids exposed to a magnetic field: Analysis by electromagnetic wave propagation numerical methods. *J. Mol. Liq.*, 2020, vol. 315, article no. 113713. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.113713>
  17. Lakić M., Andjelković L., Šuljagić M., Vulić P., Perić M., Iskrenović P., Krstić I., Kuraica M. M., Nikolić A. S. Optical evidence of magnetic field-induced ferrofluid aggregation: Comparison of cobalt ferrite, magnetite, and magnesium ferrite. *Opt. Mater.*, 2019, vol. 91, pp. 279–285. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2019.03.031>
  18. Usanov D. A., Skripal A. V., Ermolayev S. A. Visual observation of agglomerates in the volume of magnetic fluid. *Pis'ma v ZHTF* [Appl. Phys. Lett.], 1995, vol. 21, iss. 22, pp. 82–85 (in Russian).
  19. Usanov D. A., Postelga A. E., Bochkova T. S., Gavrilin V. N. Dynamics of nanoparticle agglomeration in a magnetic fluid in a varying magnetic field. *Tech. Phys.*, 2016, vol. 61, iss. 3, pp. 464–466. <https://doi.org/10.1134/S1063784216030221>
  20. Belotelov V. I., Kreilkamp L. E., Akimov I. A., Kalish A. N. Plasmon-mediated magneto-optical transparency. *Nature Communications*, 2013, vol. 4, iss. 1, article no. 2128. <https://doi.org/10.1038/ncomms3128>
  21. Usanov D. A., Skripal A. V., Ermolaev S. A. Diffraction of light by agglomerates in a layer of magnetic fluid situated in a magnetic field parallel to the plane of the layer. *Tech. Phys. Lett.*, 1997, vol. 23, iss. 2, pp. 115–116.
  22. Li J., Li G., Lu X., Wang S., Leng M., Yang S., Guan J., Long Y. Magnetically Responsive Optical Modulation: From Anisotropic Nanostructures to Emerging Applications. *Adv. Funct. Mater.*, 2023, vol. 33, iss. 41, article no. 2308293. <https://doi.org/10.1002/adfm.202308293>
  23. Jing D., Sun L., Jin J., Thangamuthu M., Tang J. Magneto-optical transmission in magnetic nanoparticle suspensions for different optical applications: A review. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2021, vol. 54, iss. 1, article no. 013001. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/abb8fd>
  24. Jian Li, Xiaodong Liu, Yueqiang Lin, Lang Bai, Qiang Li. Field modulation of light transmission through ferrofluid film. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, vol. 91, article no. 253108. <https://doi.org/10.1063/1.2825464>
  25. Philip J., Laskar. J. M. Optical Properties and Applications of Ferrofluids – A Review. *J. Nanofluids*, 2012, vol. 1, iss. 1, pp. 3–20. <https://doi.org/10.1166/jon.2012.1002>
  26. Vales-Pinzón C., Alvarado-Gil J. J., Medina-Esquivel R., Martínez-Torres P. Polarized light transmission in ferrofluids loaded with carbon nanotubes in the presence of a uniform magnetic field. *J. Magn. Magn. Mater.*, 2014, vol. 369, pp. 114–121. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2014.06.025>
  27. Usanov D. A., Postelga A. E., Bochkova T. S., Gavrilin V. N., Igonin S. V. Modulation of polarized optical radiation passing through magnetic liquid with nanotubes in the presence of magnetic field with variable direction. *Tech. Phys.*, 2017, vol. 62, iss. 9, pp. 1440–1443. <https://doi.org/10.1134/S1063784217090274>

Поступила в редакцию 29.01.2024; одобрена после рецензирования 11.04.2024; принята к публикации 15.04.2024  
The article was submitted 29.01.2024; approved after reviewing 11.04.2024; accepted for publication 15.04.2024