

## Модуляция поляризованного оптического излучения, проходящего через магнитную жидкость с нанотрубками, при воздействии магнитного поля с изменяющимся направлением

© Д.А. Усанов, А.Э. Постельга, Т.С. Бочкова, В.Н. Гаврилин, С.В. Игонин

Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, 410012 Саратов, Россия  
e-mail: usanovda@info.sgu.ru

(Поступила в Редакцию 31 января 2017 г.)

Показана возможность модуляции интенсивности поляризованного оптического излучения при прохождении через магнитную жидкость и суспензию магнитной жидкости с нанотрубками при воздействии магнитного поля с изменяющимся направлением. Максимальная глубина модуляции прошедшего излучения через суспензию магнитной жидкости с углеродными нанотрубками составила 54%.

DOI: 10.21883/JTF.2017.09.44924.2188

Управление светом в результате воздействия магнитного поля на взаимодействующую с ним среду является одним из методов модуляции его интенсивности и поляризации [1,2]. В [1] экспериментально показана возможность усиления эффекта Фарадея путем нанесения массивов нанопроволок из золота в тонкие пленки плазмонного фотонного кристалла. Использовалась структура, состоящая из периодически расположенных золотых нанопроволок на тонком слое магнитооптического материала, нанесенная на стеклянную подложку. В тонких пленках наблюдалось увеличение в 8,9 раз проявления эффекта Фарадея по сравнению с экспериментами с объемными материалами. С использованием полученных структур достигнутая глубина модуляции оптического излучения составила 24%.

Авторами [3,4] наблюдалось анизотропное светорассеяние для различной ориентации вектора напряженности магнитного поля при рассеянии линейно поляризованного света на тонком слое магнитной жидкости, помещенном в магнитное поле, ориентированное вдоль границ плоского слоя. Рассматривались параллельная и перпендикулярная взаимные ориентации внешнего магнитного поля и электрической компоненты лазерного излучения.

Как показано, например в [5,6], при приложении магнитного поля к магнитной жидкости образуются нитевидные агломераты. Средняя длина агломератов магнитной жидкости в магнитном поле с индукцией 10 мТ составляла 38 мкм [6]. В [7] показана возможность структурообразования в магнитном поле и его влияние на электрические свойства тонкого слоя композита на основе магнитной жидкости и микрочастиц графита. Под действием магнитного поля электропроводность и емкость композита изменялись более чем на порядок.

В [8] показано, что в магнитном поле электропроводность композита из магнитной жидкости и нанотрубок увеличивается вдоль направления приложенного магнитного поля. Это обусловлено образованием каналов

проводимости с участием нанотрубок, ориентированных вдоль вектора магнитной индукции.

Характеристики прохождения и рассеяния поляризованного оптического излучения через магнитную жидкость с различными объемными долями твердой фазы при приложении внешнего магнитного поля подробно описаны в [9].

В [10] описывается оптический переключатель, представляющий собой магнитную жидкость, заключенную между двумя призмами. Показано, что отношение отраженного света к прошедшему зависит от величины магнитного поля и угла падения луча на призму. Оптоволоконный модулятор с использованием магнитной жидкости в качестве внешнего слоя рассмотрен в [11]. При приложении магнитного поля наблюдается уменьшение прохождения оптического излучения через оптоволоконный кабель.

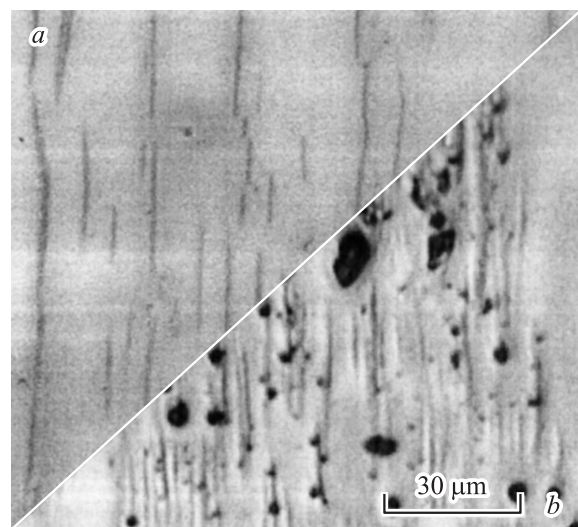
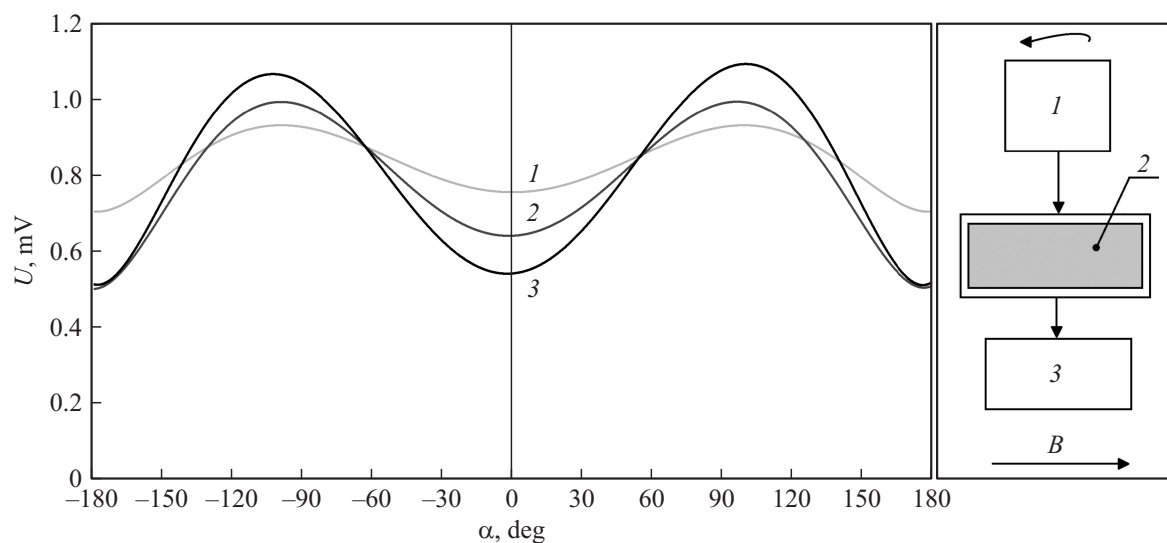


Рис. 1. Тонкий слой магнитной жидкости без нанотрубок (а) и с нанотрубками (b) серии „Таунит“.



**Рис. 2.** Зависимость напряжения на фотодиоде от угла между вектором электрического поля лазерного излучения и вектором индукции магнитного поля для суспензий с различной концентрацией нанотрубок (1 — магнитная жидкость без нанотрубок, 2 — магнитная жидкость с нанотрубками с концентрацией 10 г/л, 3 — с концентрацией нанотрубок 40 г/л). На вставке к рисунку представлена схема установки для определения глубины модуляции: 1 — источник лазерного излучения, 2 — ячейка с магнитной жидкостью, 3 — регистрирующая система.

В [12] описано влияние концентрации нанотрубок на прохождение поляризованного лазерного излучения с длиной волны 460 нм через суспензию магнитной жидкости с нанотрубками при приложении внешнего однородного магнитного поля. Были исследованы несколько образцов с разными концентрациями нанотрубок при параллельной и перпендикулярной ориентациях внешнего магнитного поля относительно вектора напряженности электрического поля лазерного излучения. Возникающий поляризационный эффект усиливался с ростом концентрации нанотрубок и величины внешнего магнитного поля.

В отличие от [12] в настоящей работе исследовалось прохождение поляризованного оптического излучения через магнитную жидкость с нанотрубками при существенно большем значении индукции магнитного поля. В качестве источника излучения использовался полупроводниковый лазер на квантоворазмерных структурах с длиной волны 650 нм. Изменение угла между электрической компонентой лазерного излучения и вектором индукции магнитного поля осуществлялось поворотом на  $360^\circ$  лазерного диода серводвигателем относительно вертикальной оси.

Целью настоящей работы являлось исследование возможности модуляции интенсивности поляризованного излучения лазера при прохождении через магнитную жидкость при воздействии магнитного поля с изменяющимся направлением, содержащую наряду с магнитными частицами нанотрубки.

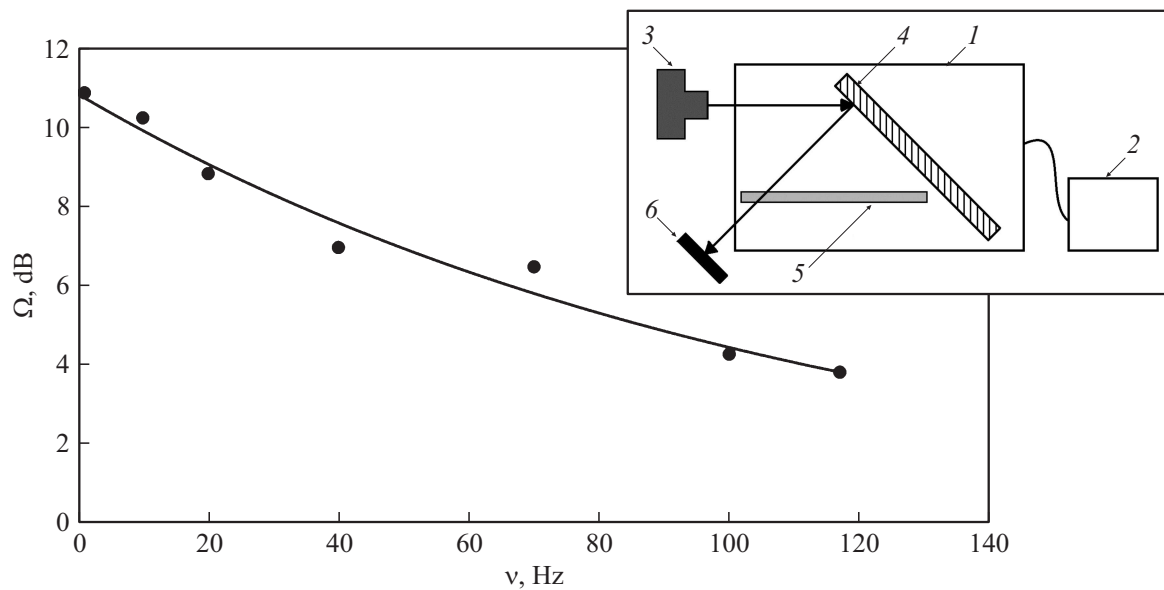
При параллельном расположении нитевидных агломератов, выстроенных вдоль вектора индукции внешнего магнитного поля, и электрической составляющей

линейно-поляризованного лазерного излучения, должно наблюдаться максимальное взаимодействие поля с поглощающими его энергией агломератами. Если агломераты расположены перпендикулярно электрической компоненте лазерного излучения, то поглощение энергии поля должно быть минимальным, если вдоль — максимальным.

Таким образом, изменяя направление действующего на магнитную жидкость внешнего магнитного поля, можно модулировать прошедшую через нее мощность лазерного излучения. При введении в магнитную жидкость нанотрубок наблюдается их агломерация вдоль нитевидных агломератов из ферритовых наночастиц, в результате чего увеличивается результирующая толщина и проводимость нитевидных агломератов, представляющих собой композиты из ферритовых наночастиц и нанотрубок. Следовательно, должна существенно увеличиваться глубина модуляции прошедшего излучения.

Используемая в эксперименте магнитная жидкость на основе керосина, стабилизированная олеиновой кислотой, имела следующие параметры: средний диаметр магнетитовых частиц  $d = 5$  нм (частицы были получены химическим путем), объемная доля твердой фазы  $\varphi = 0.1$ . Магнитная жидкость была синтезирована способом, аналогичным описанному в [13]. Измерения проводились с помощью установки, схема которой представлена на вставке к рис. 1, состоящей из источника лазерного излучения 1, прозрачной кюветы 2, полностью заполненной магнитной жидкостью, и регистрирующей системы 3.

Были исследованы возможности увеличения глубины модуляции лазерного излучения при помещении в магнитную жидкость нанотрубок. Суспензия из магнитной



**Рис. 3.** Спектр отношения величины амплитуды спектральной составляющей лазерного излучения, прошедшего через образец 3 с концентрацией нанотрубок 40 г/л, соответствующей частоте внешнего переменного магнитного поля, к уровню шума. На вставке к рисунку представлена схема установки для определения граничной частоты изменения внешнего магнитного поля: 1 — соленоид, 2 — низкочастотный генератор, 3 — лазерный диод, 4 — зеркало, 5 — исследуемый образец, 6 — фотодиод.

жидкости и нанотрубок серии „Таунит“ [14] помещалась в ячейку между двумя стеклянными подложками, площадь поверхности которых составляла  $2 \text{ см}^2$ , высота ячейки —  $100 \text{ мкм}$ . На рис. 2 представлены фрагменты тонкого слоя магнитной жидкости (а) и магнитной жидкости с нанотрубками (б), высушенного в магнитном поле. Изображения были получены на оптическом микроскопе HIROXKH-7700.

Ячейки помещались в магнитное поле таким образом, чтобы вектор магнитной индукции был параллелен плоскостям кюветы. Источником магнитного поля служил электромагнит на основе катушек Гельмгольца. Величина индукции магнитного поля в области магнитной жидкости составляла 0.2 Т. Лазерное излучение направлялось перпендикулярно плоскости кюветы, прошедшее через кювету излучение регистрировалось фотодиодом, помещенным непосредственно под ячейкой. Сигнал с фотодиода регистрировался, оцифровывался и поступал для анализа в компьютер.

Были проведены измерения глубины модуляции для трех суспензий: 1 — магнитная жидкость без нанотрубок, 2 — магнитная жидкость с нанотрубками с концентрацией 10 г/л, 3 — с концентрацией нанотрубок 40 г/л.

В зависимости от угла поворота лазера изменялась интенсивность прошедшего через ячейку лазерного излучения вследствие изменения ориентации электрической компоненты лазерного излучения относительно нитей, образованных ферромагнитными частицами и нанотрубками.

На рис. 1 приведена зависимость интенсивности прошедшего излучения, регистрируемого фотодиодом, от

угла  $\alpha$  между вектором электрической компоненты лазерного излучения и вектором индукции магнитного поля.

Глубина модуляции составила 22% для магнитной жидкости без нанотрубок; 37% для суспензии с концентрацией нанотрубок 10 г/л и 54% для суспензии с концентрацией нанотрубок 40 г/л.

Для оценки инерционных свойств полученных суспензий в изменяющемся магнитном поле была определена граничная частота, при которой наблюдалось изменение оптических свойств композита. На вставке к рис. 3 изображена экспериментальная установка. Источником переменного магнитного поля служил соленоид 1, питание которого модулировалось генератором звуковой частоты 2. В центр соленоида помещался образец 5. Лазерное излучение с длиной волны 650 нм от диода 3 после отражения от зеркала 4 проходило через образец и регистрировалось фотодиодом 6. Направление электрической компоненты лазерного излучения совпадало с вектором индукции магнитного поля. Прошедшее излучение регистрировалось фотодиодом.

Используя дискретное преобразование Фурье, были построены спектры прохождения для каждой частоты внешнего переменного магнитного поля. По каждому спектру был рассчитан коэффициент  $\Omega$ , равный отношению амплитуды спектральной составляющей на частоте внешнего магнитного поля, к уровню шумов. На рис. 3 изображена зависимость коэффициента  $\Omega$  для образца 3 с концентрацией нанотрубок 40 г/л от частоты внешнего переменного магнитного поля. Для всех образцов значение граничной частоты составило 117 Hz.

Таким образом, показана возможность модуляции интенсивности поляризованного оптического излучения при прохождении через магнитную жидкость и суспензию магнитной жидкости с нанотрубками в магнитном поле. В последнем случае достигается глубина модуляции свыше 50%.

## Список литературы

- [1] *Belotelov V.I., Kreilkamp L.E., Akimov I.A., Kalish A.N., Bykov D.A., Kasture S., Yallapragada V.J., Achanta Venu Gopal, Grishin A.M., Khartsev S.I., Nur-E-Alam M., Vasiliev M., Doskolovich L.L., Yakovlev D.R., Alameh K., Zvezdin A.K., Bayer M.* // NATURE COMMUNICATIONS.
- [2] *Jessie Yao Chin, Tobias Steinle, Thomas Wehlius, Daniel Dregely, Thomas Weiss, Belotelov V.I.* // NATURE COMMUNICATIONS.
- [3] *Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Ермолаев С.А.* // Письма в ЖТФ. 1997. Т. 23. Вып. 3. С. 64–67.
- [4] *Скрипаль А.В., Усанов Д.А.* // Письма в ЖТФ. 1997. Т. 23. Вып. 17. С. 7–10.
- [5] *Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Ермолаев С.А.* // Письма в ЖТФ. 1995. Т. 21. Вып. 22.
- [6] *Усанов Д.А., Постельга А.Э., Бочкова Т.С., Гаврилин В.Н.* // ЖТФ. 2016. Т. 86. Вып. 3. С. 146–148.
- [7] *Мкртчян Л.С., Закирян А.Р., Голота А.Ф., Ищенко В.М.* // Научн. журн. КубГАУ. 2012. № 75(01).
- [8] *Pavlova A.A., Dotsenko V.S., Suslyayev V.I.* // 25-я Междунар. Крымская конф. „СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии“. Севастополь, Крым, Россия: КрыМиКо Севастополь, 2015. С. 964–965.
- [9] *Philip John, Laskar J.M.* // J. Nanofluid. (2012). Vol. 1. P. 3–20.
- [10] *Hornng H.E., Chen C.S., Fang K.L., Yang S.Y., Chieh J.J., Hong C.Y., Yang H.C.* // Appl. Phys. Lett. 2004. Vol. 85. P. 5592.
- [11] *Chieh J.J., Yang S.Y., Hornng H.E., Hong C.Y., Yang H.C.* // Appl. Phys. Lett. (2007). Vol. 90. P. 133505.
- [12] *Vales-Prinzon C., Alvarado-Gil J.J., Medina-Esquivel R., Martinez-Tores P.* // J. Magn. Magnet. Mater. (2014). Vol. 369. P. 114–121.
- [13] *Berejnov V., Raikher Yu., Cabuil V., Bacri J.-C., Perzynski R.* // J. Colloid Interfac Sci. 1998. Vol. 199. P. 215–217.
- [14] *Ткачев А.Г., Блохин А.Н., Бураков А.Е., Рухов А.В., Щегольков А.В.* Электронный ресурс. Режим доступа: <http://минобрнауки.рф/новости/8183/файл/7558/M16-017Техн.pdf>, 2016.