

Министерство образования и науки Российской Федерации

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ
Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра физики твердого тела

МОДУЛЯЦИЯ ПОЛЯРИЗОВАННОГО ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ ЧЕРЕЗ СЛОЙ МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ В
МАГНИТНОМ ПОЛЕ С ИЗМЕНЯЮЩИМСЯ НАПРАВЛЕНИЕМ

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

студента 2 курса 201 группы кафедры физики твердого тела
направления 11.04.04 «Электроника и наноэлектроника»
факультета нано- и биомедицинских технологий
Иголина Семена Владимировича

Научный руководитель
доцент, к.ф.-м.н.

подпись, дата

А.Э. Постельга

Зав. кафедрой
профессор, д.ф.-м.н.

подпись, дата

Д.А. Усанов

Саратов 2017

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1 Основные сведения о магнитных жидкостях	4
2 Явление агломерации в магнитном поле	5
3 Модуляция магнитной жидкостью	7
4 Определение экспериментальной возможности увеличения глубины модуляции поляризованного оптического излучения.....	10
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	13
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	14

ВВЕДЕНИЕ

Модулятор света – устройство, которое можно использовать для контроля мощности, фазы или поляризации оптического излучения. В настоящее время широко разрабатываются магнитооптические модуляторы, основанные на эффекте Фарадея. Преимуществом магнитооптических модуляторов над электрооптическими является на порядок меньшее количество потребляемой мощности. К недостаткам можно отнести невысокое быстродействие, ограниченность выбора материалов в инфракрасном диапазоне.

Для большинства материалов для глубокой модуляции излучения требуются очень сильные (импульсные) магнитные поля. Актуальной проблемой является повышение глубины модуляции в малых магнитных полях. Одним из направлений решения данной проблемы является использование в качестве магнитооптических веществ модуляторов света композитных материалов на основе магнитной жидкости.

Цель работы: определение глубины модуляции поляризованного лазерного излучения при прохождении через слой магнитной жидкости с нанометровыми включениями в виде многостенных углеродных нанотрубок.

Реализация цели работы обеспечивалась решением следующих задач:

- критический анализ литературы, посвященной способам модуляции оптического излучения, конструкций модуляторов света;
- критический анализ литературы, посвященной процессам агломерации и оптическим свойствам магнитной жидкости и композитных материалов на основе магнитной жидкости;
- экспериментальные исследования зависимости интенсивности лазерного излучения, прошедшего через магнитную жидкость и композит, состоящий из магнитной жидкости с нанотрубками, при различных концентрациях многостенных углеродных нанотрубок, от угла между вектором напряженности электрического поля оптического излучения и вектором магнитной индукции внешнего магнитного поля.

1 Основные сведения о магнитных жидкостях

Композитный материал — искусственно созданный неоднородный сплошной материал, состоящий из двух или более компонентов с чёткой границей раздела между ними. В большинстве композитов (за исключением слоистых) компоненты можно разделить на матрицу (или связующее) и включённые в неё наполнители [1]. В качестве матрицы в данной работе использовалась магнитная жидкость, а в качестве наполнителя – нанотрубки.

Магнитные жидкости (МЖ) представляют собой коллоидные растворы магнитных частиц размером от 5 до 50 нм, диспергированных в жидком носителе, который может быть полярным или неполярным. МЖ на основе с размером частиц порядка 1 мкм называются магнитореологическими жидкостями. Их особенностью является резкое увеличение вязкости под воздействием магнитного поля, а в сильных полях они могут полностью «затвердевать». Данное свойство относит их к «умным» материалам с нелинейным откликом на внешнее воздействие.

Для того чтобы избежать агломерации, магнитные частицы необходимо стабилизировать. В зависимости от способа стабилизации различают два вида магнитных жидкостей — поверхностно-активные вещества (ПАВ), содержащие МЖ, и ионные МЖ, в которых стабилизация магнитных наночастиц происходит за счет стерического отталкивания углеводородных цепочек ПАВ или электростатического отталкивания поверхностного заряда, локализованных на поверхности частиц [2].

В настоящее время магнитные жидкости получают физическим или химическим способом. В первом способе, порошок из магнитных частиц микронного размера смешивают с растворителем и диспергирующим веществом, и измельчают в шаровой мельнице в течение нескольких недель. Но наиболее часто используемым способом является химическое осаждение, при котором происходит смешивание хлорида железа II (FeCl_2) и III (FeCl_3) в воде. Совместное осаждение происходит с добавлением гидроксида аммония, а затем система подвергается различным способам пептизации, магнитной

сепарации, фильтрации и, наконец, разведению. Пептизация — это расщепление агрегатов, возникших при коагуляции дисперсных систем, на первичные частицы под действием жидкой среды (например, воды) или специальных веществ — пептизаторов. Магнитная сепарация — технология разделения материалов на основе различия их магнитных свойств и различного поведения материалов в зоне действия магнитного поля, изменяющего гравитационную траекторию материалов.

Магнитные жидкости являются оптически изотропными, но в присутствии внешнего магнитного поля наблюдается эффект двулучепреломления. Данный эффект может быть использован при создании магнитооптических устройств, таких как модуляторы.

2 Явление агломерации в магнитном поле

Явление агломерации при приложении магнитного поля ферри- и феррочастиц в магнитных жидкостях можно наблюдать визуально [12]. Также об образовании агломератов можно судить по характеру рассеяния и прохождения электромагнитного излучения через слой магнитной жидкости [8, 9, 10]. Дифракция света наиболее сильно наблюдалась при ориентации магнитного поля перпендикулярно плоскому слою магнитной жидкости в работе [8]. При рассеянии света на тонком слое магнитной жидкости, помещенной в магнитное поле, ориентированное вдоль границ плоского слоя, возникает характерная для дифракции на квазипериодической решетке полоска света, имеющая чередующиеся максимумы и минимумы интенсивности. Показано [9], что при изменении направления приложенного магнитного поля, лежащего в плоскости слоя, наблюдается поворот продольной оси полоски вслед за поворотом направления магнитного поля. В работе [10] впервые проанализирован характер рассеяния излучения, падающего на тонкий слой магнитной жидкости. При рассеянии линейно поляризованного света на тонком слое магнитной жидкости, помещенной в магнитное поле, ориентированное вдоль границ плоского слоя наблюдается существенное отличие в зависимости интенсивности рассеянного света от

величины магнитного поля для случаев параллельной и перпендикулярной ориентации направления магнитного поля относительно вектора электрического поля поляризованного излучения лазера. Наблюдающееся анизотропное светорассеяние объясняется различием размеров агломератов феррочастиц вдоль и поперек направления вектора электрического поля излучения лазера для различной ориентации вектора напряженности магнитного поля.

В работах [9, 10] рассматривалась лишь параллельная и перпендикулярная взаимная ориентация внешнего магнитного поля и электрической компоненты лазерного излучения.

Следует отметить, что в магнитном поле изменяется характер прохождения через магнитную жидкость излучения не только оптического, но и СВЧ диапазона. В работе [11] наблюдалось изменение коэффициента отражения СВЧ излучения от полубесконечного слоя магнитной жидкости толщиной 7 см в магнитном поле. При параллельной ориентации индукции магнитного поля и электрического вектора СВЧ волны наблюдается увеличение коэффициента отражения, а при перпендикулярной – уменьшение. В работе [13] установлено, что в магнитной жидкости зависимость длины агломератов из магнетитовых наночастиц от величины приложенного магнитного поля имеет три характерных участка:

1. в области слабых магнитных полей — существенное увеличение длины агломератов с ростом поля,
2. с увеличением поля – участок незначительного увеличения средней длины агломератов,
3. с дальнейшим ростом поля — резкое увеличение длин агломератов.

Показано, что увеличение длин агломератов в области сильных магнитных полей происходит за счет сближения соседних агломератов вплоть до их полного объединения. При этом общее количество агломератов уменьшается.

Перечисленные участки можно видеть на графике, представленном на рисунке 1.

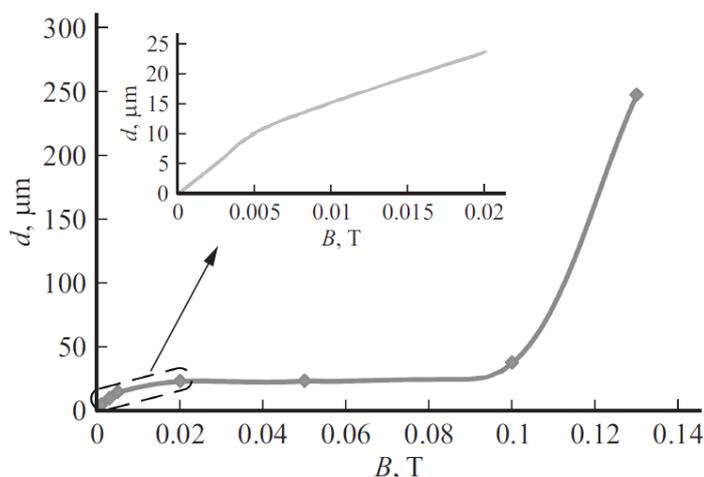


Рисунок 1 – Зависимость длин агломератов от величины магнитного поля в тонком слое магнитной жидкости [13]

3 Модуляция магнитной жидкостью

В настоящее время управление светом посредством магнитного поля является одним из перспективных методов модуляции интенсивности и поляризации света. В работе [9] впервые проанализирован характер рассеяния излучения, падающего на тонкий слой магнитной жидкости. Однако при анализе результатов не рассматривалось влияние взаимной ориентации вектора электрического поля падающего света и приложенного к магнитной жидкости магнитного поля.

Характеристики прохождения и рассеяния поляризованного оптического излучения через магнитную жидкость с различными объемными долями твердой фазы при приложении внешнего магнитного поля подробно описаны в работе [25]. На рисунке 2 представлены характеристики прошедшего неполяризованного оптического излучения от времени для различных величин магнитных полей. Как видно из графиков при приложении магнитного поля интенсивность начинает уменьшаться со временем пока не достигнет минимального значения. После минимума интенсивность снова увеличивается, достигая состояния насыщения.

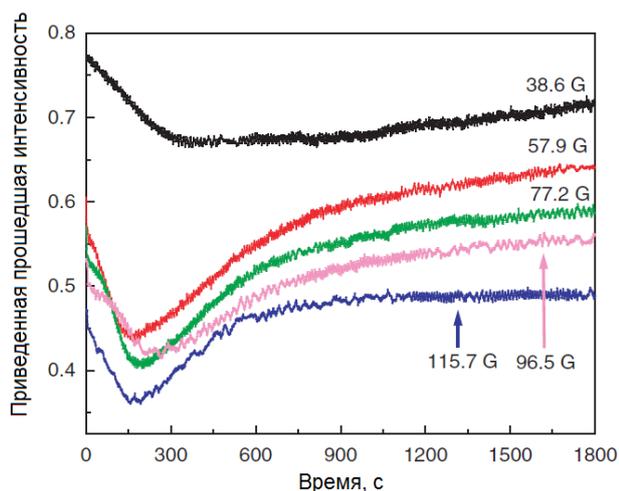


Рисунок 2 – График прошедшего через слой магнитной жидкости оптического излучения с интенсивностью, нормализованной к интенсивности без приложения магнитного поля, как функции времени для различных магнитных полей для объемной доли твердой фазы магнитных частиц 0.089% [25]

Снижение прохождения связано с образованием в магнитном поле агломератов магнитной жидкости, эффективно поглощающих оптическое излучение. Рост прохождения с течением времени связан с еще большей агломерацией, в результате чего между нитями агломератов образуются пустоты, через которые проходит часть оптического излучения.

В работе [26] 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 работе [27]. При приложении магнитного поля наблюдается уменьшение прохождения оптического излучения через оптоволоконный кабель.

В работе [28] 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. Несколько образцов исследованы с

разными концентрациями нанотрубок при параллельной и перпендикулярной ориентации внешнего магнитного поля относительно вектора напряженности электрического поля лазерного излучения. На рисунке 3 приведены графики, из которых видно, что при параллельной ориентации электрической компоненты лазерного излучения и индукции магнитного поля коэффициент прохождения через магнитную жидкость уменьшается, при перпендикулярной ориентации – увеличивается.

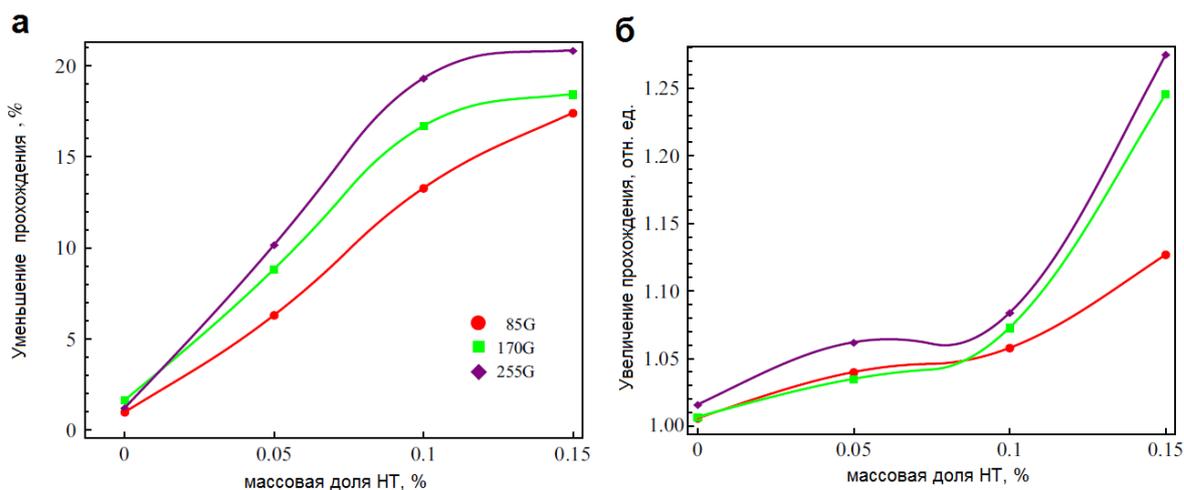


Рисунок 3 – Графики, описывающие поляризационный эффект для суспензии магнитной жидкости с нанотрубками для различных концентраций нанотрубок и магнитных полей: а – уменьшение прошедшего излучения, поляризованного параллельно вектору индукции магнитного поля; б – увеличение прошедшего излучения в случае перпендикулярной ориентации вектора индукции магнитного поля и электрической составляющей лазерного излучения [28]

Таким образом, возникающий поляризационный эффект усиливается с ростом концентрации нанотрубок и величины внешнего магнитного поля.

4 Определение экспериментальной возможности увеличения глубины модуляции поляризованного оптического излучения

Схематическое изображение установки, используемой в экспериментах, показано на рисунке 4. Лазерное излучение от источника 1 направлялось перпендикулярно плоскости кюветы 2 с исследуемой суспензией. Прошедшее через ячейку излучение регистрировалось фотодиодом 3. Кювета располагалась между обкладками электромагнита 4. Величина индукции магнитного поля в области кюветы составляла 200 мТл.

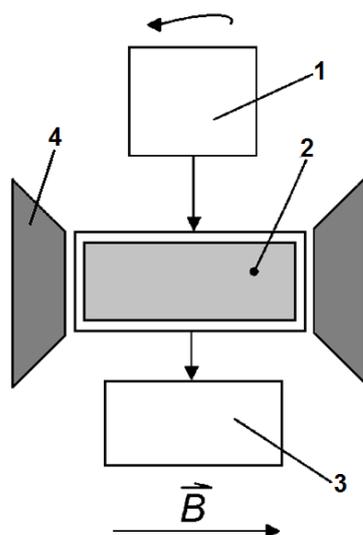


Рисунок 4 – Схема экспериментальной установки для измерения глубины модуляции поляризованного оптического излучения, проходящего через слой магнитной жидкости: 1 – источник лазерного излучения, 2 – ячейка с магнитной жидкостью, 3 – регистрирующая система, 4 – обкладки электромагнита

Кювета представляет собой стеклянную ячейку высотой 100 мкм, состоящая из двух стеклянных подложек площадью 2 см². Изменение угла между электрической компонентой лазерного излучения и индукции магнитного поля осуществлялось поворотом лазерного диода относительно вертикальной оси.

Использовалась магнитная жидкость на основе керосина, стабилизированная олеиновой кислотой, средний диаметр магнетитовых частиц Fe₃O₄ составлял 5 нм, объёмная доля твёрдой фазы $\varphi = 0.1$. В качестве

немагнитных частиц использовались многостенные нанотрубки серии «Таунит» с внешним диаметром 20-70 нм, внутренним диаметром 5-10 нм.

В работе проведены измерения глубины модуляции для трех суспензий: №1 – магнитная жидкость без нанотрубок, №2 – магнитная жидкость с нанотрубками серии «Таунит» с концентрацией 10 г/л, №3 – магнитная жидкость с нанотрубками серии «Таунит» с концентрацией 40 г/л.

На рисунке 6 представлены фрагменты тонкого слоя магнитной жидкости (а) и магнитной жидкости с нанотрубками (б). Образцы получались способом, описанным в работе [13]. Магнитная жидкость наносилась на стеклянную подложку тонким слоем и высушивалась в течении часа в магнитном поле. Вектор индукции магнитного поля располагался параллельно плоскости подложки. Изображения были получены на оптическом микроскопе HIROXKH-7700.

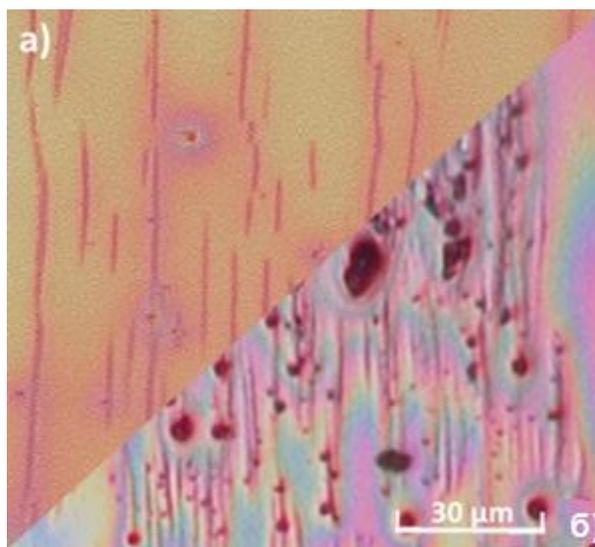


Рисунок 5 – Тонкий слой магнитной жидкости, высушенный в магнитном поле: а – без нанотрубок, б – с нанотрубками

В зависимости от угла поворота лазера изменялась интенсивность прошедшего через ячейку лазерного излучения вследствие образования агломератов ферромагнитных частиц и нанотрубок (рисунок 5). Интенсивность прошедшего излучения определяется взаимным расположением агломератов и вектора электрической компоненты лазерного

излучения. Коэффициент прохождения оптического излучения через магнитную жидкость в отсутствие магнитного поля составил 7%.

На рисунке 6 приведена зависимость интенсивности прошедшего излучения, регистрируемого фотодиодом, от угла между вектором электрического поля лазерного излучения и вектора индукции магнитного поля.

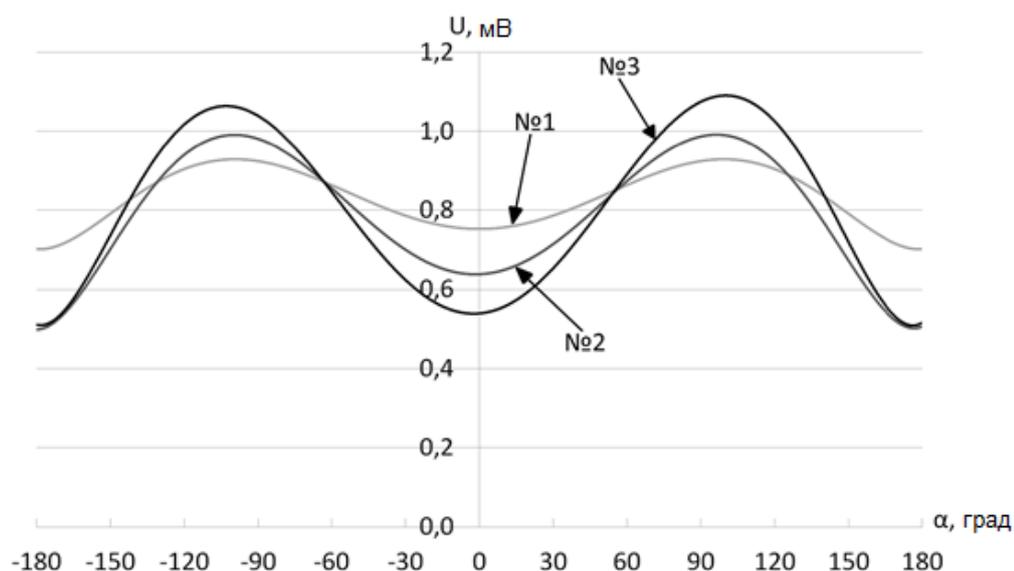


Рисунок 6 – Зависимость напряжения на фотодиоде от угла между вектором электрического поля лазерного излучения и вектором индукции магнитного поля для суспензий с различной концентрацией нанотрубок:

№1 – магнитная жидкость без нанотрубок, №2 – с концентрацией 10 г/л,
№3 – с концентрацией 40 г/л

Минимальное значение напряжения на фотодиоде для всех трех суспензий наблюдалось при параллельной ориентации электрической составляющей лазерного излучения и вектора индукции магнитного поля. С ростом концентрации нанотрубок минимальное значение напряжения уменьшается, а максимальное увеличивается. 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 [29].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проделанной работы проведён критический анализ литературы о способах модуляции оптического излучения. Рассмотрены различные конструкции модуляторов света, такие как электрооптические модуляторы с использованием поляризатора и анализатора на входе и выходе, волоконно-оптические модуляторы на основе интерферометра Маха-Цендера. Среди магнитооптических модуляторов широкое распространение получили модуляторы, основанные на эффекте Фарадея. Однако для большинства материалов для глубокой модуляции излучения требуются очень сильные магнитные поля.

Так же проведен критический анализ литературы, посвященной процессам агломерации и оптическим свойствам магнитной жидкости и композитных материалов на основе магнитной жидкости. Следует отметить, что в магнитном поле в магнитной жидкости наблюдается образование нитевидных агломератов ферро- или ферромагнитных частиц, а введение нанотрубок в магнитную жидкость увеличивает эффект анизотропного поглощения оптического излучения полученным композитом в магнитном поле. В ходе проделанной работы удалось визуально наблюдать агломераты в тонком слое магнитной жидкости и композита магнитная жидкость с нанотрубками с использованием оптического микроскопа.

Проведено экспериментальное исследование влияния внесения многостенных углеродных нанотрубок в магнитную жидкость на глубину модуляции поляризованного оптического излучения. В композите магнитная жидкость с нанотрубками глубина модуляции увеличивается более чем в два раза по сравнению с магнитной жидкостью без нанотрубок – с 22% до 54%. Полученная зависимость интенсивности оптического излучения, прошедшего через слой магнитной жидкости, открывает возможность управления интенсивностью поляризованного излучения. При использовании системы электромагнитов возможно осуществление электрически управляемой модуляции.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Кербер, М. Л. Полимерные композиционные материалы. Структура. Свойства. Технологии. / М. Л. Кербер. СПб.: Профессия, 2008. 560 с.
2. Scherer, C. Ferrofluids: Properties and Applications / C. Scherer, Figueiredo Neto A. M // Brazilian J. Phys. 2005. V. 35. P. 718–727
3. Розенцвейг, Р. Е. Феррогидродинамика / Р. Е. Розенцвейг ; пер. В.В. Кирюшина. М.: Мир, 1989. 356 с.
4. Щукин, Е.Д. Коллоидная химия / Е.Д. Щукин, А.В. Перцов, Е.А. Амелина. М.: Высшая школа, 2004. 445 с.
5. Запольский, А. К. Коагулянты и флокулянты в процессах очистки воды : Свойства. Получение. Применение / А.К. Запольский А.А. Баран. - Л.: Химия : Ленингр. отд-ние, 1987. 203 с.
6. Елецкий, А.В. Углеродные нанотрубки / А.В. Елецкий // Успехи физических наук. 1997. Т. 167, № 9. С. 945–972
7. Langer, L. Quantum Transport in a Multiwalled Carbon Nanotube / L. Langer, V. Bayot, E. Grivei, et. al. // Phys. Rev. Lett. 1996. V. 76, №. 3. P. 479–483.
8. Vacri, J.C. Optical scattering on ferrofluid agglomerates / J.C. Vacri, D. Salin // Journal de Physique Lettres. 1982. V. 43, № 22. P. 771–779.
9. Усанов, Д.А. Дифракция света на агломератах слоя магнитной жидкости в магнитном поле, параллельном плоскости слоя / Д.А. Усанов, А.В. Скрипаль, С.А. Ермолаев // Письма в ЖТФ. 1997. Т. 23, № 3. С. 64–67.
10. Усанов, Д.А. Анизотропное рассеяние поляризованного света в слое магнитной жидкости / Д.А. Усанов, А.В. Скрипаль // Письма в ЖТФ. 1997. Т. 23, № 17. С. 7–10.
11. Усанов, Д.А. Анизотропия отражения СВЧ излучения от ферромагнитной жидкости / Д.А. Усанов, А. В. Скрипаль // Письма в ЖТФ. 1992. Т. 18, № 23. С. 44–45.
12. Усанов, Д.А. Визуальное наблюдение агломератов в объеме магнитной жидкости / Д.А. Усанов, Ал. В. Скрипаль, Ан. В. Скрипаль, С.А. Ермолаев // Письма в ЖТФ. 1995. Т. 22, № 17. С. 82–85

13. Усанов, Д.А. Динамика агломерации наночастиц в магнитной жидкости при изменении магнитного поля. / Д.А. Усанов, А.Э. Постельга, Т.С. Бочкова, В.Н. Гаврилин // ЖТФ. 2016. Т. 86, № 3. С. 146–148.
14. Leona J. Felicia, Magnetorheological properties of a magnetic nanofluid with dispersed carbon nanotubes / Leona J. Felicia, John Philip // Physical review. 2014. V. 89. P. 022310-1 – 022310-9.
15. Кашевский, Б.Э. Магнитореологический эффект в суспензии с активной несущей жидкостью / Б.Э. Кашевский, В.И. Кордонский, И.В. Прохоров // Магнитная гидродинамика. 1988. № 1. С. 35–40.
16. Мкртчян, Л. С. Электрические свойства тонкого слоя магнитной жидкости с графитовым наполнителем в магнитном поле / Л.С. Мкртчян, А.Р. Закинян, А.Ф. Голота, В. М. Ищенко // Научный журнал КубГАУ. 2012. № 75. С. 1–12.
17. Павлова А.А, Доценко В.С., Суслаев В.И. // 25-я Международная Крымская конференция "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии", 6—12 сентября 2015 г., Севастополь, Крым, Россия: КрыМиКо 2015. – Севастополь, 2015. Т. 2, секц. 8/1: Контроль и управление в технологических процессах. С. 964–965.
18. Сидоров, А. И. Основы фотоники: физические принципы и методы преобразования оптических сигналов в устройствах фотоники : учебное пособие / А.И. Сидоров. СПб.: ФГБОУ ВПО «СПб НИУ ИТМО», 2014. 148 с.
19. Розеншер, Э. Оптоэлектроника. / Э. Розеншер, Б. Винтер. М.: Техносфера, 2004. 592 с.
20. Южный федеральный университет. [Электронный ресурс]. : [сайт]. URL: <http://fep.tti.sfedu.ru/russian/kes/subjects/mo/lecture11.pdf> (дата обращения 23.03.2017).
21. Вдовичев С.Н Электронное методическое пособие [Электронный ресурс] : Магнитооптические эффекты. Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского Национальный исследовательский университет.
22. Игнатов, А. Н. Оптоэлектроника и нанопотоника: учебное пособие / А.Н. Игнатов. СПб.: Издательство «Лань», 2011. 544 с.

23. Belotelov, V. I. Plasmon mediated magneto optical transparency. / V. I. Belotelov, L. E. Kreilkamp, I. A. Akimov, et. al. // Nature communications. 2013. DOI: 10.1038/ncomms3128
24. Jessie, Y.C., Nonreciprocal plasmonics enables giant enhancement of thin-film Faraday rotation. / Y. Jessie, T. Steinle, T. Wehlius, et. al. // Nature communications. 2013. DOI: 10.1038/ncomms2609.
25. Philip, J. Optical Properties and Applications of Ferrofluids - A Review / J. Philip, J. M. Laskar // Journal of nanofluids. 2012. V. 1. P. 3–20.
26. Horng, H.E. Tunable optical switch using magnetic fluids / H.E. Horng, C.S. Chen, K.L. Fang, S.Y., et. al. // Appl. Phys. Lett. 2004. V. 85, № 23. P. 5592–5595.
27. Chieh, J.J. Magnetic-fluid optical-fiber modulators via magnetic modulation / J.J. Chieh, S.Y. Yang, H.E. Horng, et. al. // Appl. Phys. Lett. 2007. V. 90, № 13. P. 133505–133509.
28. Vales-Prinzon, C. / C. Vales-Prinzon, J.J. Alvarado-Gil, R. Medina-Esquivel, P. Martinez-Tores // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2014. V. 369, P. 114–121.
29. Бочкова, Т.С. Модуляция поляризованного оптического излучения, проходящего через магнитную жидкость с нанотрубками, при воздействии магнитного поля с изменяющимся направлением / Т.С. Бочкова, В.Н. Гаврилин, С.В. Игонин, Д.А. Усанов, А.Э. Постельга // Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами: Материалы четвертой Всероссийской научной школы-семинара / под ред. проф. Д. А. Усанова.– Саратов: Изд-во «Саратовский источник». 2017. 111 с.