

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра физики твердого тела

**Выявление особенностей взаимодействия электромагнитного излучения
оптического диапазона с формирующимися в магнитном поле
агломератами ферромагнитных наночастиц магнитной жидкости**

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

студентки 2 курса 2251 гр.

направления подготовки 11.04.04 «Электроника и наноэлектроника»

института физики

Бочковой Татьяны Сергеевны

Научный руководитель

к. ф. - м. н., доцент

А.Э. Постельга

должность, уч. степени, уч задание

подпись, дата

инициалы, фамилия

Зав. кафедрой физики твердого тела

д. ф. - м. н., профессор

Ал. В. Скрипаль

должность, уч. степени, уч задание

подпись, дата

инициалы, фамилия

Саратов 2021

Уникальность свойств магнитных жидкостей открыла многообразные возможности их применения в различных отраслях – машиностроении, медицине и технике. В связи с этим изучению магнитных жидкостей уделено достаточно большое внимание отечественных и зарубежных ученых.

Физические свойства магнитных жидкостей во многом определяются взаимодействием ферромагнитных однодоменных наночастиц между собой и с внешними электрическими и магнитными полями, что может приводить к возникновению структурных эффектов, к которым можно отнести агломерацию – объединение ферромагнитных частиц в нитевидные образования.

Одно из перспективных направлений – применение магнитной жидкости в качестве материала, используемого для создания сред, характеристиками которых можно управлять внешними магнитными полями. Это, в свою очередь, открывает перспективы, например, для создания оптоэлектронных приборов с магнитным управлением, в которых амплитудная модуляция линейно поляризованного излучения оптического диапазона достигается изменением направления внешнего магнитного поля.

Известны работы, в которых доказывается возможность применения композиционных материалов с управляемыми характеристиками для создания методов модуляции электромагнитного излучения оптического диапазона. В частности, была показана возможность усиления эффекта Фарадея путем нанесения массивов нанопроволок из золота на тонкие пленки магнитооптического материала, нанесенного на стеклянную подложку. При рассеянии света на тонком слое магнитной жидкости с частицами микронных размеров, помещенной в магнитное поле, ориентированное вдоль границ плоского слоя, возникает характерная для дифракции на квазипериодической решетке полоска света, имеющая чередующиеся минимумы и максимумы интенсивности, поворачивающаяся при изменении направления магнитного поля вслед за его поворотом.

Как уже было отмечено, при приложении внешнего магнитного поля происходит пространственная ориентация магнитных моментов ферромагнитных частиц вдоль направления приложенного поля, а также их объединение в структурные образования со значительной величиной намагниченности, наличие которых может приводить к ряду особенностей физических свойств.

При параллельном расположении нитевидных агломератов, выстроенных вдоль вектора индукции внешнего магнитного поля, и электрической составляющей линейно поляризованного лазерного излучения, наблюдается максимальное взаимодействие поля с поглощающими его энергию агломератами. Если агломераты расположены перпендикулярно электрической компоненте лазерного излучения, то поглощение энергии поля будет минимальным, если вдоль – максимальным. Следовательно, при изменении направления внешнего магнитного поля возможна амплитудная модуляция линейно поляризованного излучения оптического диапазона.

Цель магистерской работы:

Выявление особенностей взаимодействия электромагнитного излучения оптического диапазона с формирующимися агломератами ферромагнитных наночастиц магнитной жидкости во внешнем магнитном поле с переменным направлением.

Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи**:

1. Анализ современного состояния исследований магнитных жидкостей.
2. Экспериментальная реализация способа модуляции интенсивности линейно поляризованного излучения полупроводникового лазера, проходящего через магнитную жидкость, при воздействии магнитного поля с изменяющимся направлением и с величиной, достаточной для формирования агломератов ферромагнитных наночастиц.
3. Экспериментальное определение глубины модуляции интенсивности линейно поляризованного излучения лазеров с различными длинами волн при прохождении через магнитную жидкость с агломератами

ферромагнитных частиц при воздействии магнитного поля с изменяющимся направлением.

Исследование динамики агломерации ферромагнитных частиц в магнитной жидкости при изменении магнитного поля

Исследовался характер динамики длин агломератов наночастиц магнитной жидкости с диаметром феррочастиц $d = 5 \div 10$ нм, стабилизированных олеиновой кислотой, и объемной долей твердой фазы $\varphi = 0,1$ при изменении величины индукции приложенного магнитного поля.

На рис. 1 приведена зависимость длин агломератов ферромагнитных наночастиц от величины магнитного поля в исследуемой магнитной жидкости на основе керосина объемом 0,1мл.

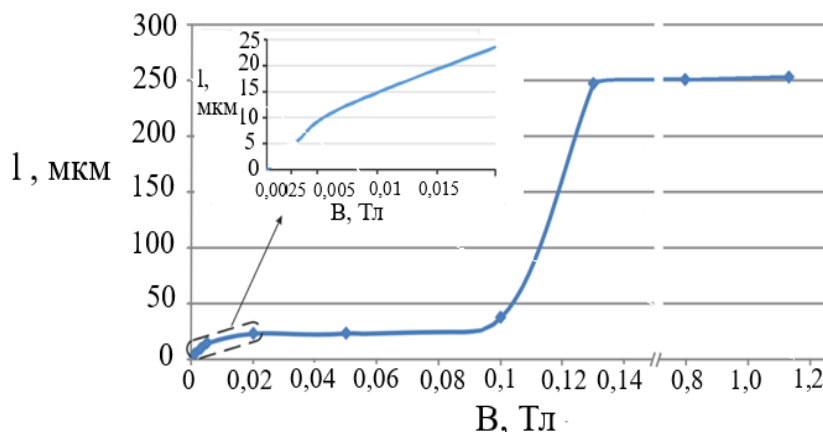


Рисунок 1 Зависимость длин агломератов ферромагнитных наночастиц исследуемой магнитной жидкости от величины индукции магнитного поля от 0 до 1,2 Тл

На вставке к рисунку видно, что при достижении порогового значения индукции магнитного поля 2,5 мТл среднее значение длин агломератов частиц с диаметром $d=5 \div 10$ нм в магнитной жидкости составляло 5 мкм, и они становились различимыми в оптический микроскоп с разрешающей способностью порядка 1 мкм. При дальнейшем увеличении поля размеры агломератов магнитной жидкости увеличивались, и их концентрация изменялась с $4,3 \cdot 10^2$ до $10,0 \cdot 10^2$ мм^{-3} , причем средняя длина агломератов почти не изменялась вследствие того, что при значениях магнитной индукции выше 0,02 Тл подавляющее большинство частиц уже приняло участие в процессе агломерации. Кривая становилась пологой, что можно объяснить ростом

магнитнодипольного взаимодействия при сближении с соседними доменами. При превышении значения индукции магнитного поля 0,1 Тл происходило резкое увеличение длин агломератов, что сопровождалось значительным уменьшением их количества, концентрация агломератов уменьшалась до $0,5 \cdot 10^2 \text{ мм}^{-3}$ ввиду того, что отдельные агломераты объединялись друг с другом: при увеличении магнитного поля соседние агломераты сближались до критических расстояний и полного объединения.

Из рис. 5, согласно результатам гранулометрического анализа, следует, что в диапазоне значений индукции магнитного поля от 0,13 до 1,2 Тл, средние значения длин агломератов практически не изменялись.

Модуляция линейно поляризованного оптического излучения с различными длинами волн, проходящего через магнитную жидкость при воздействии магнитного поля с изменяющимся направлением

В нашем исследовании изучалось прохождение поляризованного оптического излучения через магнитную жидкость при значениях индукции магнитного поля 0,012...0,140 Тл. В качестве источников излучения использовались несколько полупроводниковых лазеров на квантоворазмерных структурах с длинами волн 450, 560, 650 нм и измерения проводились для различных значений индукции магнитного поля. Изменение угла между электрической компонентой лазерного излучения и вектором индукции магнитного поля осуществлялось поворотом на угол 360° лазерного диода серводвигателем относительно вертикальной оси.

Используемая нами в эксперименте магнитная жидкость на основе керосина с магнитными наночастицами, стабилизированными олеиновой кислотой, имела следующие параметры: диаметр магнетитовых частиц $d=5\div 10$ нм, объёмная доля твёрдой фазы $\varphi = 0,1$.

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

лазерного излучения, должно наблюдаться максимальное взаимодействие поля с поглощающими его энергию агломератами. Если агломераты расположены перпендикулярно электрической компоненте лазерного излучения, то поглощение энергии поля должно быть минимальным, если вдоль – максимальным.

Таким образом, изменяя направление вектора индукции воздействующего на магнитную жидкость магнитного поля, возможно модулирование прошедшей через нее мощности лазерного излучения.

На рис.2 представлены фрагменты слоя магнитной жидкости при различных значениях индукции магнитного поля: 0,024...0,140 Тл. Изображения были получены на оптическом микроскопе HIROXKH-7700.

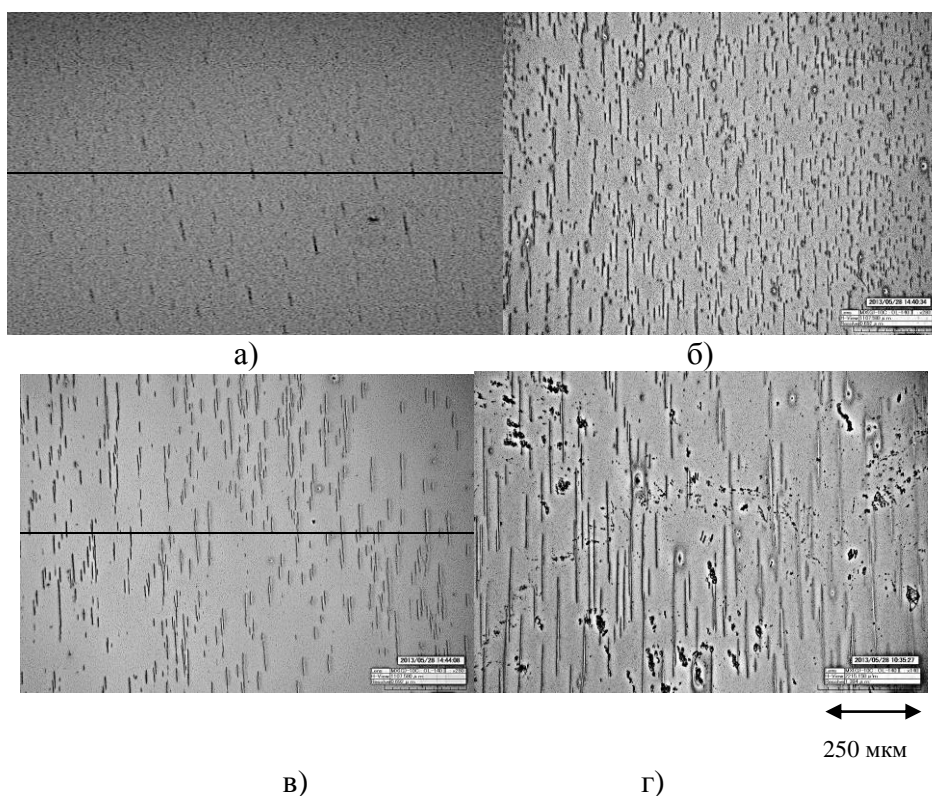


Рисунок 2 Фотографии фрагментов слоя магнитной жидкости при приложении магнитного поля с индукцией: а) 0,024 Тл; б) 0,050 Тл; в) 0,116 Тл; г) 0,140 Тл с использованием оптического микроскопа HIROX KH-7700

Фотографии фрагментов магнитной жидкости при приложении магнитного поля, полученные с использованием оптического микроскопа HIROX KH-7700, также подвергались гранулометрическому анализу в программном пакете Gwyddion для определения длин агломератов. Средние

значения длин соответственно составили 248,0 мкм (0,140 Тл); 38,1 мкм (0,116 Тл); 23,7 мкм (0,050 Тл).

Экспериментальная установка показана на рис. 3. Ячейки с магнитной жидкостью 2, площадь поверхности которых составляла 2 см^2 , высота – 100 мкм, помещались в магнитное поле таким образом, чтобы вектор индукции магнитного поля был параллелен плоскостям кюветы. Источником магнитного поля служил электромагнит на основе катушек Гельмгольца 4. Величина индукции магнитного поля в области магнитной жидкости составляла 0,012...0,140 Тл. Излучение полупроводникового лазера 1 направлялось перпендикулярно плоскости кюветы, прошедшее через кювету излучение регистрировалось фотодиодом 3, помещенным непосредственно под ячейкой. Сигнал с фотодиода регистрировался, оцифровывался и поступал для анализа в компьютер.

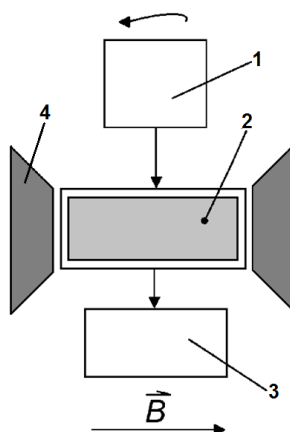
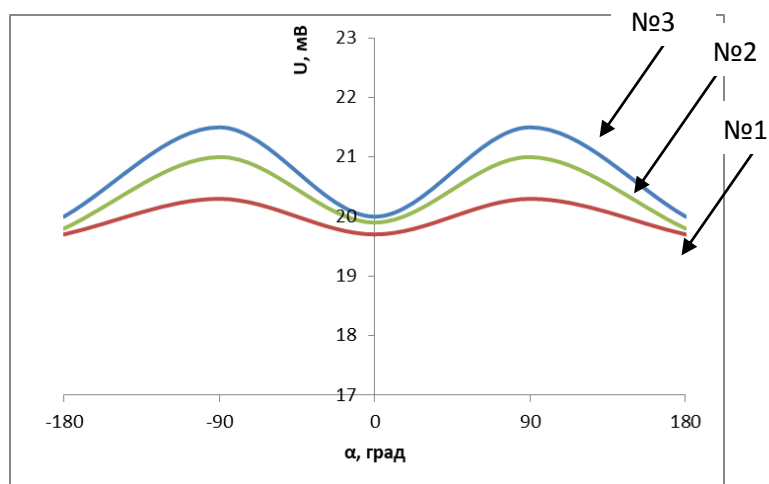


Рисунок 3 Схема экспериментальной установки: 1 – источник лазерного излучения, 2 – ячейка с магнитной жидкостью, 3 – фотодиод, 4 – обкладки электромагнита

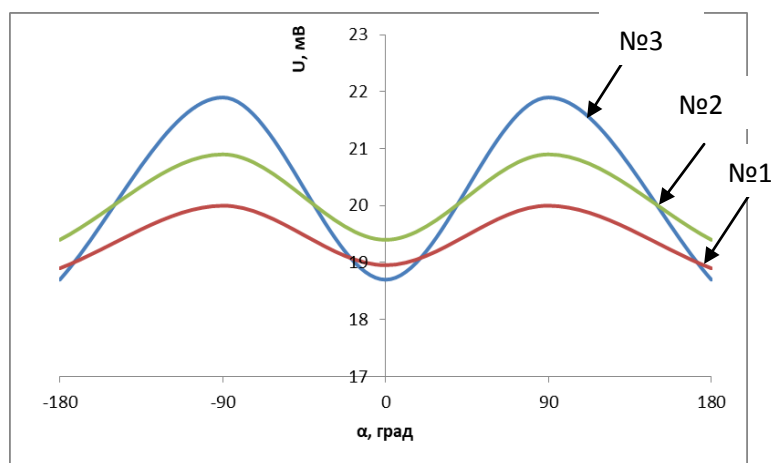
В зависимости от угла поворота лазера изменялась интенсивность прошедшего через ячейку лазерного излучения вследствие изменения ориентации электрической компоненты лазерного излучения относительно агломератов, образованных ферромагнитными частицами магнитной жидкости под действием магнитного поля.

На рис. 4 приведены зависимости интенсивности прошедшего лазерного излучения с длинами волн 450 нм (№1), 560 нм (№2), 650 нм (№3), регистрируемого фотодиодом, от угла α между вектором электрической

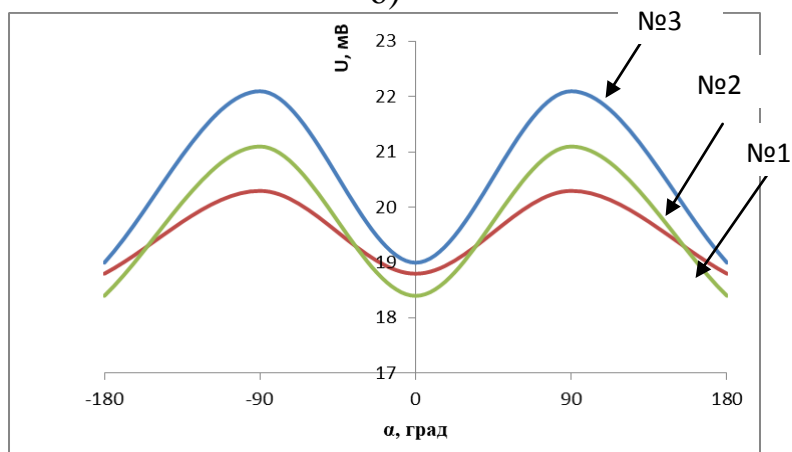
компоненты лазерного излучения и вектором индукции магнитного поля при различных значениях индукции магнитного поля 0,012 Тл...0,140 Тл.



а)



б)



в)

Рисунок 4 Зависимость напряжения на фотодиоде от угла между вектором электрического поля лазерного излучения (№1 – с длиной волны 450 нм, №2 – с длиной волны 550 нм, №3 – с длиной волны 650 нм) и вектором индукции магнитного поля для магнитной жидкости: а) 0,012 Тл; б) 0,100 Тл; в) 0,140 Тл

Глубина модуляции лазерного излучения была вычислена на формуле: $M=(I_{fmax}-I_{fmin})/ I_{fmax}$. Значения глубины модуляции для различных значений индукции магнитного поля представлены в таблице 1.

Таблица 1

Значение индукции магнитного поля, Тл	Глубина модуляции, %		
	450 нм	560 нм	650 нм
0,012	2,9	5,2	7,0
0,024	3,8	7,5	8,8
0,050	4,5	7,5	10,2
0,100	5,2	7,9	14,6
0,116	6,8	8,5	14,7
0,140	7,0	12,8	15,1

На рис. 5 представлена зависимость глубины модуляции интенсивности линейно поляризованного излучения лазеров с различными длинами волн при прохождении через магнитную жидкость с агломератами ферромагнитных наночастиц от величины индукции магнитного поля.

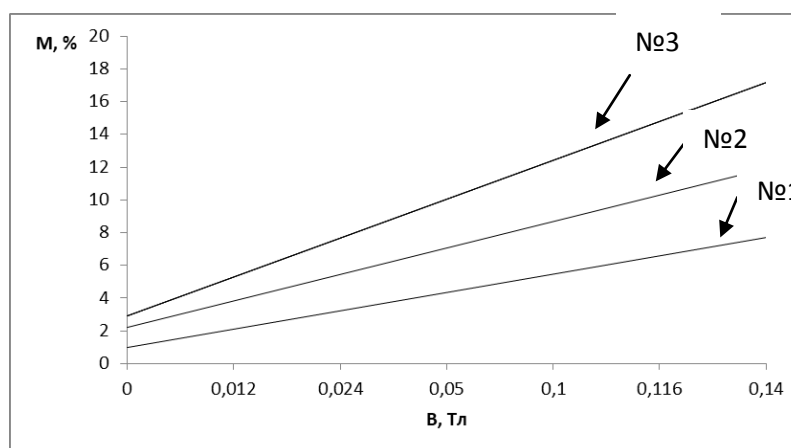


Рисунок 5 Зависимость глубины модуляции интенсивности поляризованного излучения лазера при прохождении через магнитную жидкость с агломератами от индукции магнитного

поля (№1 – с длиной волны 450 нм, №2 – с длиной волны 550 нм, №3 – с длиной волны 650 нм)

Таким образом, при увеличении значения индукции магнитного поля увеличивается глубина модуляции лазерного поляризованного излучения для всех длин волн. Это связано с тем, что при увеличении величины индукции магнитного поля увеличивается результирующая длина и толщина образующихся агломератов ферромагнитных частиц магнитной жидкости. Следовательно, прохождение при параллельной ориентации электрической составляющей линейно поляризованного лазерного излучения и вектора индукции магнитного поля уменьшается, а при перпендикулярной – увеличивается. Уменьшение прохождения связано с образованием в магнитном поле агломератов магнитной жидкости, эффективно поглощающих оптическое излучение.

Также можно сказать, что при увеличении длины волны лазерного излучения глубина модуляции увеличивается. С ростом значения индукции магнитного поля прохождение лазерного излучения с длиной волны 450 нм при перпендикулярной ориентации электрической составляющей линейно поляризованного лазерного излучения и вектора индукции магнитного поля становится меньше, чем прохождение лазерного излучения с длиной волны 650 нм, что объясняется увеличением поглощения вследствие увеличения толщины агломератов. На рис.6 представлена зависимость глубины модуляции интенсивности от длины волны поляризованного излучения.

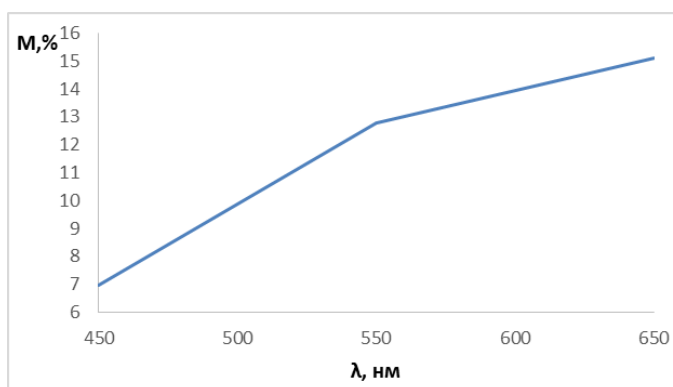


Рисунок 6 Зависимость глубины модуляции интенсивности от длины волны поляризованного излучения

Заключение

1. Проведен критический анализ современного состояния исследований магнитных жидкостей.

2. Экспериментально реализован способ модуляции интенсивности линейно поляризованного излучения полупроводниковых лазеров с различными длинами волн ($\lambda=450$ нм, $\lambda=550$ нм, $\lambda=750$ нм) на квантоворазмерных структурах, проходящего через магнитную жидкость, при воздействии магнитного поля, с изменяющимся направлением вектора индукции магнитного поля и с величиной, достаточной для формирования агломератов ферромагнитных наночастиц.

3. Установлено, что глубина модуляции интенсивности линейно поляризованного оптического излучения, проходящего через магнитную жидкость, при изменении направления вектора индукции магнитного поля с величиной, достаточной для формирования агломератов ферромагнитных наночастиц, с ростом величины индукции увеличивается до 15%.

4. Выявлено, что глубина модуляции интенсивности линейно поляризованного оптического излучения, проходящего через магнитную жидкость, во внешнем магнитном поле с переменным направлением существенно зависит от длины волны лазерного излучения.