

Сведения о выполненных работах в 2019 году
по проекту **«Разработка альтернативной технологии создания перспективных
компонентов терагерцовой электроники на основе магнитных жидкостей»**,
поддержанному Российским научным фондом
Соглашение № 18-19-00268

Руководитель д-р физ.-мат. наук Черепанов Виктор Николаевич

На данном этапе проект был направлен на разработку перспективных фильтров в ТГц диапазоне на основе магнитных жидкостей (МЖ). Для этого необходимо было разработать структурированные магнитопроводы, получить структуры из магнитных и магнитно-диэлектрических частиц, как подвижных, так и “замороженных” полимеризацией в полимерной матрице, изучить пространственную кластеризацию частиц, исследовать электропроводность и диэлектрическую проницаемость композиционных магнитных жидких сред для создания емкостных сенсоров слабых магнитных полей.

Исходя из решаемых задач и предварительного анализа, предварительно была выбрана линейчатая конфигурация магнитопроводов с различным соотношением шага и скважности, т.е. амплитудные дифракционные решетки. Далее были рассмотрены варианты создания дифракционных решеток, работающих на пропускание, выполняющих функцию магнитопроводов в виде полостных фильтров, изготовленных тремя методами: травлением фольгированной меди полиимидной пленки в хлористом железе, методом фотолитографии и лазерной резки. При лазерной резке помимо фольгированной медью полиимидной пленки использовалась никелевая фольга. Было показано, что травление фольгированной меди полиимидной пленки в хлористом железе из-за небольшой ширины вытравливаемой линии меди (100-300 мкм) происходит неравномерное травление, и в результате форма линий становится неровной и приобретает V-образную форму. Данный способ формирования решетчатой структуры приемлем при ширине вытравливаемой линии меди от 500 до 1000 мкм. Данные структуры могут быть использованы при работе от 0,3 до 0,6 ТГц. При использовании лазерной резки на никелевой фольге испарение металла происходит неравномерно, и поэтому проблематично получить линии тоньше 200 мкм. Вместе с тем, термочувствительная полиимидная пленка, фольгированная медью, эффективнее поддается лазерной резке. Однако лучшие результаты достигаются при использовании методов оптической литографии. В этом случае удается получить наилучшие результаты, как по точности воспроизведения размера линий и шага на магнитопроводах-дифрешетках, так и по чистоте линий. Для разработанных магнитопроводов было теоретически смоделировано изменение магнитного поля при их внесении в однородное поле, создаваемое катушками. Установлено, что магнитопроводы вносят изменение в распределение поля на величину 5-10 % непосредственно вблизи своей поверхности, далее поле становится однородным. ТГц спектры полученных дифракционных решеток с различной толщиной линии и шагом свидетельствуют о том, что полученные медные решетки (и без никелевого покрытия) на прозрачной в ТГц полиимидной подложке могут работать в качестве селективирующих

по спектру элементов ТГц оптики. При изменении толщины линий и скважности происходит изменение как положения полосы пропускания/ослабления, так и ее полуширины.

Для исследования структур магнитных и магнитно-диэлектрических частиц были проведены исследования по оптимизации концентрации и вида магнитных частиц наполнителей. Исходя из возможных параметров имеющихся стационарных магнитов (однородное поле до 3000 Гс), можно эффективно использовать частицы от 10-30 нм магнетита и 5БДСР, полученного лазерной абляцией, до 100 нм электровзрывных частиц железа и никеля, а также микронных частиц никеля и 5БДСР, полученных различными методами. Вместе с тем, поле, создаваемое в экспериментальной кювете, ограничено размерами катушек и составляет 30-100 Гс, что позволяет эффективно использовать только ферромагнитные частицы размером от 50 нм. Результаты исследования магнитных свойств различных частиц приведены нами в работах [Svetlichnyi V.A., Shabalina A.V., Lapin I.N., Goncharova D.A., Velikanov D.A., Sokolov A.E. Study of iron oxide magnetic nanoparticles obtained via pulsed laser ablation of iron in air // Applied Surface Science (2018 г.); Светличный В.А., Балашов В.Б., Лапин И.Н., Соколов А.Э., Черепанов В.Н. Исследование магнитных свойств частиц магнитомягких сплавов 5БДСР и 82К3ХСР // Известия высших учебных заведений. Физика (2019 г.)].

Для получения пленок в качестве пленкообразующих материалов использовались фторированные полимеры СКФ-32 (фторсодержащий каучукоподобный сополимер винилиденфторида с трифторхлорэтиленом), Ф-42 (л) и экспериментальный образец Ф-49 (сополимеры винилиденфторида и тетрафторэтилена), растворимые в ацетоне. На основе данных фторированных полимеров готовились пленкообразующие растворы с различной вязкостью в ацетоне. Полученные пленки имели высокое пропускание в исследуемом ТГц диапазоне, которое не зависело от направления пропускания поля. Внесение магнитных наполнителей приводит к направленной кластеризации частиц, что сказывается на пропускании среды в ТГц диапазоне. В отличие от амплитудных дифракционных решеток ориентация наполненных частицами пленок не приводит к селективному пропусканию, что говорит об отсутствии регулярной структуры. Вместе с тем, от ориентации зависит общее пропускание. Полученные результаты подтверждают возможность модулирования излучения при помощи ориентированных магнитных структур в статической полимерной матрице. Лучшие результаты получены для систем на основе электровзрывных частиц железа, ориентированных в полях от 1000 Гс.

Проведенные теоретические исследования магнитных свойств кластеров на основе перовскитов проводились нами в рамках теории функционала электронной плотности (DFT) с использованием базиса плоских волн и ультрамягких псевдопотенциалов. Для расчетов применяли пакет программ Quantum ESPRESSO. В результате расчета перовскитных структур на основе BeTiO_3 было показано появление в них магнитного момента. Таким образом, результат расчета объясняет наблюдаемый в эксперименте рост намагниченности для порошков BeTiO_3 при переходе из октаэдрической в икосаэдрическую фазу. Можно ожидать, что и для других перовскитных нанопорошков

будет наблюдаться рост намагниченности при переходе к икосаэдрической фазе в результате внешнего воздействия, приводящего к структурным дефектам.

Было показано также, что перовскитоподобный материал на основе $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ обладает большой диэлектрической проницаемостью в ТГц области, но в то же время в этой спектральной области сильно возрастает поглощение, что ограничивает его применимость.

При изучении кластеризации структурированных магнитных и магнитно-диэлектрических жидкостей под действием магнитного поля были уточнены параметры жидкостных матриц. На примере 5БДСР показано изменение направления кластеризации при изменении направления линий магнитного поля в плоскости пленки, а также дезориентация кластеров при быстром вращении магнитного поля. При этом остается проблема агломерации частиц после воздействия магнитного поля. Внесение в поле магнитопроводов не приводит к регуляризации кластерной структуры, т.к. неоднородное поле наблюдается только вблизи магнитопровода, в то время как ориентированная структура формируется в плоскости на значительном удалении (до 1-2 см). Наилучшие результаты получены для электровзрывного железа в диапазоне концентраций до 10 масс. %.

В процессе выполнения проекта изучалось также влияние структурной организации магнитных частиц на диэлектрическую проницаемость и на электропроводность МЖ, а также влияние жидкого носителя, размера, формы, концентрации магнитных частиц и т.д. При этом в качестве дисперсной фазы в МЖ использовались следующие магнитные порошки:

1. Наночастицы магнетита Fe_3O_4 , полученные импульсной лазерной абляцией мишени железа в воде и воздухе;
2. Магнитные наночастицы, полученные из магнитомягкого нанокристаллического сплава 5БДСР (на основе железа) методом импульсной лазерной абляцией;
3. Микронные магнитные порошки из магнитомягкого нанокристаллического сплава 5БДСР, полученные помолом в шаровой мельнице;
4. Техническое карбонильное железо.
5. Нанопорошок железа дисперсностью 100 нм.

Исследование влияния магнитного поля на исследуемые величины проводилось в однородном и неоднородном магнитных полях. Проведенные экспериментальные исследования показали, что изменения электрических параметров ячейки с магнитной жидкостью в зависимости от направления и величины магнитного поля обусловлено протекающими в них процессами структурообразования и размерами частиц. Электрические параметры измерительной ячейки, заполненной магнитной жидкостью с разным наполнителем, изменяются на порядок под действием магнитного поля, то есть показывают значительную чувствительность к изменению магнитного поля.

Используемые частицы сплава 5БДСР, полученные помолотом в шаровой мельнице, имеют анизотропную форму (в виде «иголок» или «дисков» в отличие от наночастиц магнетита Fe_3O_4 , полученных импульсной лазерной абляцией карбонильного и наножелеза). Частицы сплава 5БДСР легче поддаются магнитному структурированию, т.е. упорядочению направлений магнитных осей частиц.

Для повышения чувствительности МЖ к внешнему магнитному полю важным является также выбор оптимальных параметров самой МЖ:

1. Магниточувствительная жидкость с частицами из нанокристаллического магнитномягкого материала с $\mu \geq 50000$ продолговатой формы и размеров, лежащих в пределах 1-40 мкм, обуславливает высокую чувствительность к внешнему магнитному полю.
2. 10 % процентное содержание частиц обеспечивает простоту и воспроизводимость приготовления магнитной жидкости.
3. Диапазон размеров частиц 1-40 мкм обусловлен ограничением снизу чувствительностью способа измерения емкости, а сверху сложностью приготовления магнитной жидкости и вязкостью ее основы.

Результатом проведенных исследований было изготовление пилотных образцов фильтров для терагерцового диапазона: кюветы с квадратной апертурой 1,5 и 2 см, толщиной 2 и 5 мм; масла с вязкостью выше 250 мПа•с; магнитные частицы из ферромагнитного микронного (субмикронного) 5БДСР и частиц электровзрывного железа (100 нм). Магнитное поле создавалось двумя ортогональными парами катушек, обеспечивающих однородное магнитное поле до 100 гс площадью до 5 см² при максимальном токе до 500 мА. Пары катушек позволяют ориентировать поле в одной из плоскостей ортогонально пучку ТГц излучения и вдоль поля (для реализации просветляющих режимов фильтров).

Изготовлены пилотные образцы пленочных полимерных фильтров с магнитными наночастицами. Подобран оптимальный полимер и концентрации растворителя, позволяющие создавать однородные пленки. Созданы пленочные структуры толщиной до 100 мкм и чистой апертурой до 2,5 см. Из них изготовлены непосредственно неселективные пленочные ослабители для ТГц диапазона с разной эффективностью ослабления излучения. Для создания ориентированно кластеризованных структур в пленках их формирование проводилось в присутствии магнитного поля от 30 до 100 гс (электромагниты) и от 100 гс до 3000 гс (постоянные магниты). Оптимальные результаты получаются при использовании поля 1000 гс при непосредственном внесении раствора полимера в кювету в присутствии поля.

Помимо этого, полученные в ходе выполнения проекта линейные магнитопроводы, представляющие собой амплитудные дифракционные решетки с шагом, характерным для ТГц диапазона (0,2-1 мм), показали, что их можно использовать в качестве селективных фильтров и поляризаторов ТГц излучения.