

Сведения о выполненных работах в 2022 году
по проекту «**Разработка альтернативной технологии создания перспективных
компонентов терагерцовой электроники на основе магнитных жидкостей**»,
поддержанному Российским научным фондом
Соглашение № 18-19-00268

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

На данном этапе проекта основное внимание было уделено более подробному исследованию свойств метаматериалов для создания полосно-пропускающих фильтров, перестройки частоты, модуляции ТГц излучения и технических условий для их создания, а также поиску новых органических магнитных (парамагнитных) материалов (металлоцено-тиапорфиринов, циклокарбонов).

Для жидкостных фильтров на основе трансмиссионного масла показана возможность управления процессом агломерации магнитных частиц в линейные цепочечные структуры путем изменения силы магнитного поля в пределах от 30 мТл до 190 мТл. Определено, что наиболее однородные линейные цепочки образуются при 90 мТл.

В ходе проведения исследования оптических свойств в ТГц диапазоне различных магнитных жидкостей на основе оксида железа был разработан аттенюатор, предназначенный для плавного понижения (ослабления) интенсивности электромагнитного излучения, поступающего от источника в диапазоне частот от 0,3 до 1,5 ТГц. Также было показано, что магнитная жидкость на основе карбонильного железа представляет собой фильтр нижних частот с полосой пропускания 0,3-0,5 ТГц при 3,5 мТл, 0,3-0,4 ТГц при 6,7 мТл и с частотой пропускания 0,3 ТГц при 13 мТл. Достигнута глубина модуляции 80-100% в спектральном диапазоне 0,3-1,5 ТГц.

Получен макет управляемого полосно-пропускающего фильтра ТГц излучения включающий:

- Немагнитный корпус с толщиной стенок 2 мм и с апертурой на боковых стенках 15 мм. На одной из боковых стенок с внешней стороны размещается метаматериал в специальной оправе, предназначенной для поворота метаматериала вокруг своей оси на 360 градусов.
- Источник магнитного поля в виде катушек индуктивности, расположенных внутри немагнитного корпуса соосно в вертикальной плоскости.
- Кювету с магнитной жидкостью, помещенную между катушками индуктивности в немагнитном корпусе.

Рабочие характеристики полученного полосно-пропускающего фильтра: питание макета – от 0 В до 25 В; ток потребления макета – от 0 А до 1 А; индукция магнитного поля – от 0 мТл до 60 мТл.

Принцип работы макета основан на управлении магнитным полем поведением микрочастиц карбонильного железа (размер частиц 6-10 мкм). Показано, что внешнее магнитное поле величиной до 30 мТл является достаточным для сдвига частоты пропускания ТГц излучения. Получено, что комбинация метаматериала из никелид

титановой нити и магнитной жидкости на основе карбонильного железа позволяет смещать частоту полосы пропускания на 280 ГГц.

Были определены основные технические условия формирования пленочных метаматериалов. Показано, что наиболее подходящей матрицей для формирования пленок является этиленвинилацетат. Установлено, что для создания однородных ориентированных линейных цепочечных структур наилучшими магнитными частицами являются частицы на основе сплава 5БДСР в количестве 5 масс. %, ориентированные под действием магнитного поля 90 мТл. Оптимальная толщина пленок при этом составила 300 мкм. Для этого проведено сравнение плёнок с содержанием частиц 1, 1,5, 2,5, 5, 7,5, 10 масс. % 5БДСР, определено, что наиболее однородные линейные цепочечные структуры образуются при 5 масс. %. Также показано, что на агломерацию в линейные цепочечные структуры влияет величина магнитного поля, плёнки формировались при полях 35 мТл, 90 мТл и 195 мТл, для пленок оптимальное значение также составило 90 мТл.

Добавление металл-органических магнитных молекул на основе меди и диспрозия к жидким и пленочным метаматериалам или не влияет на организацию линейных цепочечных структур, либо приводит к уменьшению однородности жидких и пленочных метаматериалов.

Для удобства использования исследуемых жидких и пленочных поляризационных фильтров были спроектированы устройства автоматизации. Эти устройства позволили управлять состоянием жидкостного фильтра (вкл./выкл.) путем изменения питания катушек от 0 В до 30 В, управляя таким образом величиной магнитной индукции внешнего поля. Имплементация разработанного на предыдущих этапах работы механического миксера позволяет поддерживать жидкие фильтры в работоспособном состоянии на протяжении длительного времени.

Управление же пленочными фильтрами было осуществлено путем изменения положения пленки относительно угла поляризации ТГц излучения, что приводит к изменению пропускания фильтра от минимального до максимальных значений.

Перенастроен используемый THz-TDS спектрометр T-Spec 1000, что позволило регистрировать спектры в диапазоне 0,2-1,8 ТГц с разрешением до 10 ГГц. Для исследования образцов в расширенном спектральном (0,05-2,2 ТГц) и динамических диапазонах (пропускание до $1\text{E-}4$ %) завершена сборка экспериментального ТГц спектрометра с временным разрешением. Это позволило определять свойства исследуемых материалов на частотах выше 1,5 ТГц.

Определены магнитные свойства магнитных ионов ряда лантанидов и переходных металлов ((C₅H₅)₂MP и H₂-(C₅H₅)₂MP, M = V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Mo, Tc, Ru и Rh). Разработан модуль к программному пакету GIMIC для поиска магнитных органических молекул с использованием метода машинного обучения. Сформулирован механизм динамики релаксаций и взаимных ориентаций магнитных частиц во внешнем магнитном поле металлоценов, основанный на делокализации электронной плотности d-электронов, и на этой основе обоснованы мультиреференсные методы расчета спиновой релаксации и ориентации спинов в различных металлоценах, такие как CASPT2, CASSCF.