

Сведения о выполненных работах в 2020 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 определению оптимальных параметров магнитной жидкости, магнитного и магнитно-диэлектрического наполнителя, элементов для создания магнитного поля и управления ТГц излучения, конструкции ячейки и сенсора слабого магнитного поля для изготовления конечных образцов ТГц фильтров различного типа и емкостных сенсоров.

Установлено, что, из всех жидкостей, выбранных в качестве основы магнитных составов, наилучшим образом себя показало синтетическое масло 80W-90. Среди исследуемых магнитных частиц: наночастиц Fe, наночастиц оксида железа Fe₃O₄ и микрочастиц сплава 5БДСР, наибольшую эффективность модуляции поляризованного излучения, в присутствии внешнего магнитного поля, показал фильтр на базе микрочастиц сплава 5БДСР. Основными параметрами магнитной системы ослабляющей ячейки, являются: величина магнитной индукции, которая должна быть достаточна, для ориентации магнитных частиц; размер области, в которой магнитное поле однородно. Разработанная система катушек индуктивности позволяет создавать магнитную индукцию до 100 Гс, в то время как для ориентации выбранных магнитных частиц достаточно уже 20-40 Гс. Диаметр однородного поля, создаваемого катушками, превышает диаметр сечения пучка ТГц спектрометра. Расположение катушек позволяет с высокой скоростью изменять плоскость ориентации магнитных частиц относительно плоскости поляризации ТГц излучения.

Проведенные квантово-химические расчеты магнитных свойств ряда циклических антиароматических органических структур показали перспективность подобных соединений как эффективных парамагнетиков (примером является изо[8]фторин с магнитной восприимчивостью 3532 а.е.), которые могут быть использованы для создания магнитных жидкостей: растворитель + парамагнитные антиароматические органические молекулы, содержащие циклические структуры большого радиуса.

При получении ТГц фильтров были определены основные параметры, влияющие на получение однородных кластерных структур магнитных частиц. При формировании пленочных структур из фторопласта Ф-42Л определена оптимальная вязкость раствора – 0,70 Па·с. Для получения различной толщины пленок, использовался метод послойного нанесения раствора на фторопластовую подложку с различными апертурами. Было установлено оптимальное количество слоев, при котором пленка остается однородной – 2 слоя по 2 мл раствора для апертуры 50 мм, при этом толщина получаемой пленок составляет 145 мкм.

При формировании пленочных структур из расплава этилвинилацетата была подобрана методика для получения однородных по толщине пленок. Установлена

оптимальная толщина пленок 0,3 мм, которая сохраняет пропускающую способность выше 90 % в ТГц диапазоне. При исследовании структур с магнитными частицами установлено, что магнитомягкие частицы 5БДСР на основе Fe со средним размером около 1 мкм лучше диспергируются и ориентируются при подаче магнитного поля в растворе Ф-42Л, в ацетоне и расплаве EVA различной вязкости.

Для измерения магнитного поля разработана конструкция портативного прибора и реализован сам прибор. Прибор работает при напряжении питания 5 В, и потребляет ток не более 0,15 А. Частота измерения емкости составляет 1 кГц. Установлено что, используя в сенсоре магнитные частицы в виде «иголок» - чувствительность прибора выше по сравнению с использованием частиц эллипсоидальной/сферической формы.

В результате исследования спектральных свойств модуляторов на основе ориентированных в поле магнитных частиц магнитных частиц было показано, что полученные на данном этапе выполнения проекта толстые пленки на основе расплава этиленвинилацетата (EVA) не уступают, а при оптимальном синтезе и превосходят характеристики разработанных ранее пленок на основе фторполимера, получаемых из растворов. Композитные плёнки с ориентированными магнитными частицами могут эффективно применяться для ослабления поляризованного ТГц излучения в области 0,4-1,7 ТГц, достигая эффективности ослабления до 25 раз и более. В случае неполяризованного излучения показана эффективность поляризации излучения при помощи скрещенных поляризатора/анализатора выше 90 %.

Помимо использования в ТГц спектрометрах с временным разрешением, предлагается использовать полимерные поляризаторы/ослабители в ТГц спектрометрах на основе ламп бегущей волны и вместе с лабораторными источниками некогерентного ТГц излучения, например, на основе процесса лазерной абляции металлических поверхностей. Дополнительная область применения таких устройств – в лабораторных исследованиях в составе оптических систем преобразования и детектирования ТГц излучения, например, при трассовых измерениях (ТГц лидары различного назначения).

Разработанные жидкостные кюветы с возможностью магнитного управления спектральными свойствами среды в процессе работы, предназначены, преимущественно, для работы в THz-TDS спектрометрах.

В итоге изготовлены конечные образцы ТГц фильтров различного типа и емкостных сенсоров.

- Изготовление образцов фильтров, вырезающих часть спектра ТГц диапазона на основе плоских линейных решеток.

После проверки различных вариантов и материалов для изготовления плоских линейных решеток с требуемой толщиной штрихов и шагом решетки на предыдущем этапе исследований был выбран вариант на основе полиимидной фольгированной пленки, поскольку полиимид достаточно прозрачен в требуемом диапазоне 0,1-3 ТГц и обеспечивает требуемую жесткость тонкой медной решетке. Было показано, что решетка может изготавливаться методом лазерной резки/скрайбирования, однако разогрев материала приводит к оплавлению полиимида и короблению всего изделия, в

итоге высок процент брака при использовании стандартного технологического оборудования на основе волоконных лазеров. Это особенно заметно при увеличении апертуры решетки с 10-15 мм до 40 мм. В итоге на конечном этапе использовался только метод фотолитографии с последующим травлением. Стандартные полупроводниковые технологии позволили изготавливать решетки на выбранных полиимидных фольгированных заготовках с шириной линии после завершения процесса травления от 50 мкм. При этом хорошая воспроизводимость без значимого бокового подтравливания и брака достигается при ширине линии 80-100 мкм. Размер изготавливаемых решеток ограничивается только размерами заготовки и фотолитографической установки. На данном этапе были изготовлены решетки под апертуру размером до 40 мм. Для удобства использования, полученные решетки устанавливались в пластиковую или алюминиевую оправу круглой или прямоугольной апертурой с меткой направления штрихов.

- Изготовление поляризаторов и широкополосных ослабителей.

Для изготовления пленочных композитных поляризаторов и широкополосных ослабителей на основе полимеров, наполненных магнитными частицами, были выбраны два варианта. В первом случае пленки получали методом полива из раствора фторполимера Ф42-л в ацетоне. Выбор полимера и разработка методики были выполнены на двух предыдущих этапах проекта. Наиболее однородные пленки толщиной 200 мкм получаются при двухкратном (двухслойном) поливе. А лучшая ориентация частиц реализуется при заливке формы непосредственно в магнитном поле постоянных магнитов с напряженностью поля от 10 до 100 мТл. В качестве магнитного наполнителя выбраны частицы сплава 5БДСР, поскольку ориентации НЧ железа, магнетита и смеси разных частиц проходит хуже, не формируя протяженные структуры нужных размеров. Методика позволяет изготавливать образцы с апертурой до 40 мм. Далее пленки натягиваются и закрепляются в жесткой оправе из полимера или металла. Во втором случае пленки получали из расплава термопластичного этиленвинилацетата (EVA). Используемый EVA имеет температуру плавления около 70 град. С и превосходную прозрачность. Вязкость расплава достаточно высока – около 10 Па•с, что препятствует ориентации частиц, поэтому использовались магнитные наполнители с максимальное коэрцитивной силой и намагниченностью насыщения и максимальное поле – 100 мТл (1000 Гс). Остывание полимера после ориентации также проводилось в магнитном поле. Данные композиты имели толщину от 200 мкм до 1 мм. Концентрация активного в образцах компонента варьировалась в диапазоне 5-15 масс. %.

- Изготовление образцов устройства для управления параметрами ТГц излучения на основе магнитной жидкости.

Устройство для управления параметрами ТГц излучения на основе магнитной жидкости состоит из кюветы, наполненной магнитной жидкостью, электромагнитов и поворотного корпуса.

Вариант устройства для применения в с ТГц спектрометрами с временным разрешением ограничен размерами приборов и апертурой пучка в приборе, которая в области перетяжки составляет менее 1 см. Кюветы в устройстве были двух типов – стандартная тонкостенная 1-см кварцевая кювета HellmaAnalytics из высококачественного кварца или полимерная кювета апертурой 1 или 2 см и толщиной

0,5 см, изготовленная 3D печатью. В качестве магнитов использовались катушки Гемгольца, которые создают однородное магнитное поле. Максимальная кратковременная напряженность поля в разработанном варианте составляет 10 мТл (100 Гс). Рабочая величина напряженности при стационарной работе до 3,5 мТл при токах не более 500 мА. Размеры катушек, напряженность поля (число витков и др.) рассчитывались для двух размеров катушек и далее реализовывались на 3D принтере. Устройство имело две пары скрещенных катушек Гельмгольца, что позволяет ориентировать частицы в двух направлениях, а также дезориентировать частицы. Для ориентации еще в одном направлении использовалось механическое вращение катушек с держателем кюветы (и, соответственно, кюветы с магнитной жидкостью) в горизонтальной плоскости на фиксированный угол 90 град. Проведенные испытания позволили выбрать магнитную жидкость на основе масла с вязкостью 325 мПа•с (80W-90), наполненного частицами 5 БДСР. Устройство позволяет получать 4 состояния магнитной жидкости (затемнение, просветление, поляризацию вертикальную или горизонтальную) при использовании симметричной кварцевой кюветы или 3 состояния с пластиковой кюветой увеличенной до 2 или 4 см апертурой. В последнем случае не используется вращение платформы с кюветой и катушками.

Устройство также может использоваться с магнитными жидкостями различного типа. Жидкости должны быть прозрачны в ТГц диапазоне и не позволять частицам самопроизвольно осаждаться.

- Изготовление емкостных сенсоров.

Были разработаны, изготовлены и испытаны несколько вариантов емкостных сенсоров:

1. Чувствительная структура представляла ситалловые пластины с нанесенным на них структурой (конденсатор). Толщина ситалловой платины $h = 470$ мкм. Толщина напыления (золото) $h_{\text{нап}} = 6,21$ мкм. Относительное изменение емкости с концентрацией магнитного порошка 40 % вес. составило 13 % при индукции магнитного поля 200 мкТл.

2. Металлический корпус транзистора (без кристалла) заполненный магниточувствительной жидкостью с концентрацией 40 % вес. Относительное изменение емкости составило 4 % при индукции магнитного поля 200 мкТл.

3. Кварцевый капилляр, с внутренним диаметром 0,5 мм, расстояние между электродами 2 мм с концентрацией магнитного порошка 40 % вес. Относительное изменение емкости составило 17 % при индукции магнитного поля 200 мкТл. Следует отметить хорошую повторяемость данного образца.

4. Пластинчатый конденсатор в цилиндрическом корпусе. Площадь пластин $S = 10$ мм², расстоянием между пластинами $d = 3$ мм. Относительное изменение емкости составило 20 % при индукции магнитного поля 200 мкТл.

Для измерения чувствительности данного емкостного сенсора его помещали в экранированную трубу, которая была изготовлена из лент нанокристаллического сплава 5БДСР. Магнитная индукция внутри данной трубы измерялась при помощи микротесламетра МТ-10. Изменение магнитной индукции, равная $\Delta B = 5,9$ мкТл, приводило к изменению емкости сенсора на 1,35 пФ. Чувствительность емкостного сенсора составила 0,228 пФ/мкТл. Измерение емкости проводили на приборе Е7-12.