

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени М.В.ЛОМОНОСОВА»

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

КАФЕДРА МАГНЕТИЗМА

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА:

**«ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ  
ПОВЕРХНОСТНЫХ МАГНИТОИНДУКТИВНЫХ ВОЛН  
В МЕТАМАТЕРИАЛАХ»**

Выполнил студент  
419 группы:  
Вакуленко А.Ю.

---

Научный руководитель:  
доцент Радковская А.А.

---

Допущен к защите 25.05.2016  
Зав. кафедрой магнетизма  
профессор Перов Н.С. \_\_\_\_\_

Москва  
2016

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
ГЛАВА 1 МАГНИТОИНДУКТИВНЫЕ ВОЛНЫ В МЕТАМАТЕРИАЛАХ	5
1.1 Дисперсия МИ волн в линейных метаматериалах	5
1.2 Дисперсия МИ волн в двумерных метаматериалах	7
1.3 Особенности распространения МИ волн в двумерных метаматериалах: отражение, дифракция, собственные моды	10
1.4 Экспериментальное исследование поверхностных МИ волн	12
ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ	15
2.1 Принципиальная схема 2D координатного стола и комплектующие	15
2.2 Сборка экспериментального оборудования	20
ГЛАВА 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ	24
3.1 Двумерный магнитный метаматериал в МГц диапазоне	24
3.2 Проведение эксперимента	26
3.3 Экспериментальные результаты и их обсуждение	28
Глава 4 РАСЧЕТ ВОЗБУЖДЕНИЯ ДВУМЕРНОГО МЕТАМАТЕРИАЛА	32
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	37
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	38
БЛАГОДАРНОСТИ	41
ПРИЛОЖЕНИЕ 1	42
ПРИЛОЖЕНИЕ 2	47
ПРИЛОЖЕНИЕ 3	50
ПРИЛОЖЕНИЕ 4	55

## ВВЕДЕНИЕ

Метаматериалы, созданные из резонансных элементов, искусственные периодические структуры, обладающие необычными электромагнитными свойствами, которые сложно или невозможно получить в природных материалах [1]. Для метаматериалов характерно, что размер элементов (метаатомов) много меньше длины волны падающего электромагнитного излучения, при этом свойства структуры в целом определяются не только свойствами резонансных элементов, но и их взаимодействием.

Магнитные метаматериалы (ММ) состоят из металлических резонансных элементов, реагирующих на магнитное поле электромагнитной волны. Благодаря взаимодействию метаатомов в них могут распространяться магнитоиндуктивные (МИ) волны - это медленные волны токов, наводимых в элементах [2]. Коэффициент взаимодействия элементов может существенно отличаться в зависимости от типа метаатомов и способа их упорядочения. Так в структурах, состоящих из одинаковых элементов, но с различным по знаку взаимодействием, могут распространяться как прямые, так и обратные МИ волны.

Магнитные метаматериалы - это перспективная область исследований, в которой были найдены новые эффекты и явления, в том числе, отрицательное преломление, предсказанное В.Г.Веселаго в 60-ые годы прошлого века [3] и полученное в группе Д.Смита в 2000 году [4]. Актуальность исследования ММ объясняется возможностью их практического применения. Так несомненный интерес представляют: суперлинза, способная преодолевать дифракционный предел [5,6]; так называемая «шапка невидимка», маскирующая небольшую область пространства от электромагнитного излучения [7]; конструируемые из магнитных ММ устройства для беспроводной передачи энергии [8], волноводы и антенны [9,10]. Уже существуют структуры на основе магнитных метаматериалов МГц диапазона используемые для усиления сигнала МРТ [11].

Метаматериалы, используемые во многих из перечисленных устройств, можно рассматривать как плоскую (двумерную) структуру, или же не пренебрегая объемом, как трехмерную, в любом случае для подробного экспериментального изучения отклика на внешнее возбуждение или исследования распространения магнитоиндуктивных волн в таких структурах необходимо производить большое количество измерений сигнала в различных точках структуры. Для этого нужно обладать возможностью фиксировать датчик в пространстве, а так же перемещать его в заданные точки плоскости, для исследования 2D структур, или же объема, для исследования трехмерных ММ. Для этих целей применяют специальное оборудование, в том числе координатный стол.

На кафедре фотоники и физики микроволн физического факультета МГУ совместно с сотрудниками кафедры магнетизма разработана и создана установка для исследования линейных метаматериалов в МГц и ГГц диапазоне, при этом подобные структуры уже довольно хорошо исследованы аналитически [12], численно и экспериментально [13].

Логичным продолжением исследований метаматериалов и распространяющихся в них МИ волн являются исследования 2D структур, однако для этого необходимо иметь возможность двумерного перемещения приемной антенны в автоматическом режиме.

Таким образом, цели данной работы:

- разработка, сборка и отладка двумерного координатного стола, сопряженного с компьютером, управляющим автоматизированной установкой на базе векторного анализатора спектра фирмы Rohde&Schwarz;
- сборка плоской структуры для исследования;
- проведение пробных измерений .

Решение поставленной в дипломной работе задачи расширит исследовательские возможности и позволит проводить на физическом факультете исследование двумерных метаматериалов на современном уровне.

# ГЛАВА 1. МАГНИТОИНДУКТИВНЫЕ ВОЛНЫ В МЕТАМАТЕРИАЛАХ

## 1.1 Дисперсия МИ волн в линейных метаматериалах

Сначала рассмотрим распространение магнитоиндуктивных волн (МИ волн) в линейном метаматериале, который можно представить в виде цепочки отдельных магнитно-связанных  $LC$ -контуров, как это сделано в работе [2]. В простейшем случае можно пренебречь потерями и учитывать взаимодействие только между ближайшими элементами (приближение «ближайших соседей») [14]. Тогда, для токов в соседних элементах, закон Кирхгофа с учетом закона электромагнитной индукции Фарадея и введенных приближений, выглядит как:

$$Z_0 I_n + i\omega M(I_{n-1} + I_{n+1}) = 0, \quad (1)$$

где  $I_n$  - ток в  $n$ -том элементе,  $Z_0$  - собственный импеданс элемента,  $M$  - коэффициент взаимной индукции между элементами,  $\omega$  - частота.

Предполагая решение уравнения (1) в виде волны

$$I_n = I_0 \exp(ikna), \quad (2)$$

где  $k$  - волновой вектор, характеризующий МИ волну,  $a$  - расстояние между центрами элементов, можно получить дисперсионное уравнение

$$\frac{\omega}{\omega_0} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{2M}{L} \cos(ka)}}, \quad (3)$$

где  $\omega_0$  - резонансная частота элемента, а  $L$  - индуктивность. Данное уравнение описывает распространение МИ волн в линейной структуре. Пример дисперсионных кривых, полученных аналитически и экспериментально, приведен на Рис.1 [15].

Дисперсионное уравнение (3) получено без учета внешнего возбуждения. Но его можно учесть, вводя в уравнение (1) соответствующее напряжение [2]. Для одноатомной линии, состоящей из  $N$  резонансных элементов, соотношение между приложенным к элементам напряжением и результирующими токами в них,

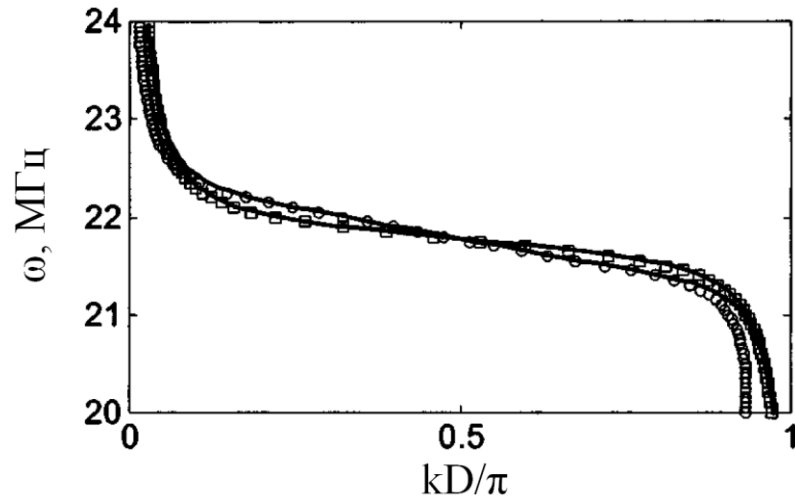


Рисунок 1 – Дисперсионные кривые МИ волн для линейного метаматериала с отрицательным взаимодействием.  $D=sa$ ,  $a$  - расстояние между соседними элементами. Данные, полученные из эксперимента, отмечены символами: кругами для приближения ближайших соседей ( $s=1$ ), квадратами при учете взаимодействия с более удаленными элементами ( $s=2, s=3$ ). Черные линии - теоритические дисперсии [15].

задается также законом Кирхгофа, но теперь в форме:

$$\vec{V} = \mathbf{Z}\vec{I}, \quad (4)$$

где  $\vec{V}$  и  $\vec{I}$  это уже  $N$ -мерные векторы напряжений и токов в элементах,  $Z$  - матрица взаимных импедансов размерности  $N \times N$ . На главной диагонали все значения равны  $Z_0$  и характеризуют импеданс самих элементов, все остальные значения характеризуют взаимоиндукцию между соседними элементами. Они не равны нулю только на диагоналях соседних к главной диагонали

$$\mathbf{Z} = \begin{pmatrix} Z_0 & i\omega M & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ i\omega M & Z_0 & i\omega M & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & i\omega M & Z_0 & i\omega M \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & i\omega M & Z_0 \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Если известны напряжения, действующие на элементы структуры (вектор  $\vec{V}$ ), то распределение токов для каждого элемента можно найти из следующего выражения

$$\vec{I} = \mathbf{Z}^{-1} \vec{V}, \quad (6)$$

где  $\mathbf{Z}^{-1}$  - обратная матрица взаимных импедансов.

Выражение (6) полностью описывает распределение токов в структуре, состоящей из  $N$  связанных контуров, при наличии внешнего возбуждения. Обычно возбуждают один элемент структуры и в этом случае в столбце  $\vec{I}$  только одно значение не равно нулю.

## 1.2 Дисперсия МИ волн в двумерных метаматериалах

Как рассматривалось выше, в одномерном случае матрица импедансов является трехдиагональной, если учитывать взаимодействие только «ближайших соседей». Но в общем случае, когда рассматривается взаимодействие каждого элемента со всеми остальными, нулевых элементов в матрице импедансов нет, и она выглядит на первый взгляд одинаково в одномерном и двумерном случаях. И это легко показать на наглядном примере [16]. Рассмотрим две структуры из четырех элементов: одномерная цепочка и четыре элемента, находящиеся в углах квадрата (Рис. 2) [2].

Для обеих структур матрица импедансов записывается одинаково:

$$\begin{pmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} & Z_{14} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} & Z_{24} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} & Z_{34} \\ Z_{41} & Z_{42} & Z_{43} & Z_{44} \end{pmatrix} \quad (7)$$

Однако значение индексов в матрице для одномерного и двумерного случаев будут несколько отличаться.

Рассмотрим теперь два двумерных метаматериала из одинаковых элементов, но с различным взаимодействием между ними (Рис.3).

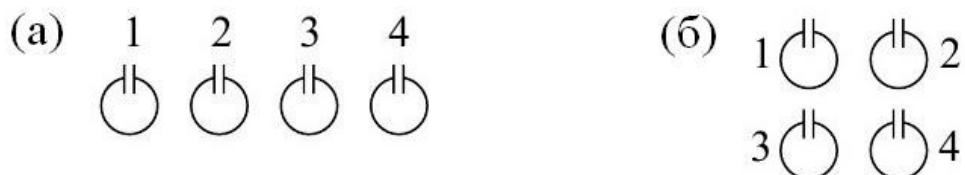


Рисунок 2 - Магнитный метаматериал из 4-х расщепленных кольцевых резонаторов, расположенных в линию (а), в 2 ряда (б) [2].

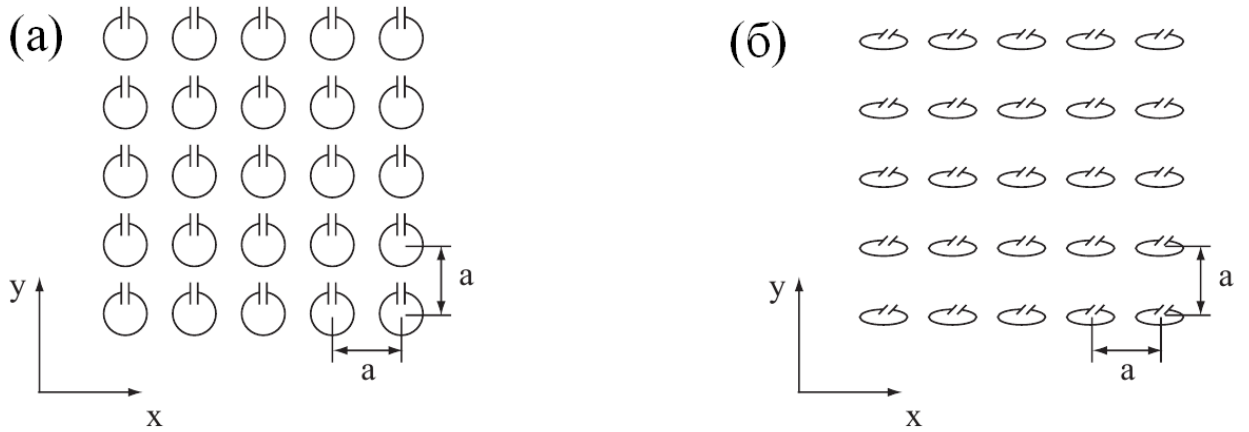


Рисунок 3 - Схематическое изображение структуры из расщепленных колец с впаянной емкостью в планарной конфигурации (а), в планарно-аксиальной конфигурации (б) [16].

Взаимодействие между всеми метаатомами необходимо учитывать редко, для большинства задач достаточно приближения «ближайших соседей». В этом приближении в матрице импедансов для двумерного метаматериала будет уже пять не нулевых диагоналей, а закон Кирхгофа для элемента (m,n) в квадратной решетке можно записать как

$$Z(\omega)I_{n,m} + i\omega M_x(I_{n+1,m} + I_{n-1,m}) + i\omega M_y(I_{n,m+1} + I_{n,m-1}) = 0, \quad (8)$$

где  $I_{n,m}$  – ток в элементе, находящемся в n-том ряду и m-том столбце,  $M_x$  и  $M_y$  – коэффициенты взаимоиндукции в горизонтальном и вертикальном направлениях, соответственно,  $Z(\omega)$  – импеданс элементов. Для планарной конфигурации коэффициенты взаимоиндукции отрицательны и одинаковы в обоих направлениях  $M_x=M_y<0$  (Рис.3а). Для планарно-аксиальной конфигурации  $M_x<0$ , а  $M_y>0$ , при этом  $|M_x| < |M_y|$  если расстояния между центрами элементов одинаково (Рис.3б).

Токи в элементах обычно рассматривают в виде

$$I_{n,m} = I_0 \exp( i(nk_x a + mk_y a) ) \quad , \quad (9)$$

где  $I_0$  – амплитуда тока,  $k_x$  и  $k_y$  – компоненты волнового вектора двумерных МИ волн в соответствующих направлениях. Из выражений (8) и (9) можно получить дисперсионное уравнение МИ волн, распространяющихся в плоскости в виде



$$\frac{\omega}{\omega_0} = \left(1 + \kappa_x \cos(k_x a) + \kappa_y \cos(k_y a)\right)^{-1/2}, \quad (10)$$

где  $\kappa_x$  и  $\kappa_y$ , коэффициенты взаимодействия, равные в МГц диапазоне

$$\kappa_{x,y} = 2M_{x,y}/L. \quad (11)$$

Графически решение уравнения (10) показано в форме линий постоянной частоты  $\omega/\omega_0 = const$ , (где  $\omega_0 = (LC)^{-1/2}$ ) на Рис.4а для планарной и на Рис.4б для планарно-аксиальной конфигурации. Когда  $k_x a \ll 1$ ,  $k_y a \ll 1$ , кривые в центре Рис.4а – окружности, в то время как кривые в центре Рис.4б – гиперболы.

Как показано в работе [16] групповая скорость в двумерном случае задается градиентом зависимостей  $\omega(\mathbf{k})$ . Математически эти кривые могут быть получены в виде:

$$\vec{v}_g = \frac{a\omega_0}{2} \frac{\kappa_x \cos(k_x a) \vec{i}_x + \kappa_y \cos(k_y a) \vec{i}_y}{\left(1 + \kappa_x \cos(k_x a) + \kappa_y \cos(k_y a)\right)^{3/2}}, \quad (12)$$

где  $\vec{i}_x, \vec{i}_y$  - единичные векторы в направлениях  $x$  и  $y$ , соответственно.

Для планарной конфигурации, в случае, когда  $\kappa_x = \kappa_y$ , то есть взаимодействие вдоль различных осей одинаково, и аргументы обеих частей тригонометрических функций малы, можно увидеть, что групповая скорость противоположно направлена фазовой скорости, и МИ волна представляет собой обратную волну. В планарно-аксиальной конфигурации выражение для групповой скорости имеет более сложный вид [16].

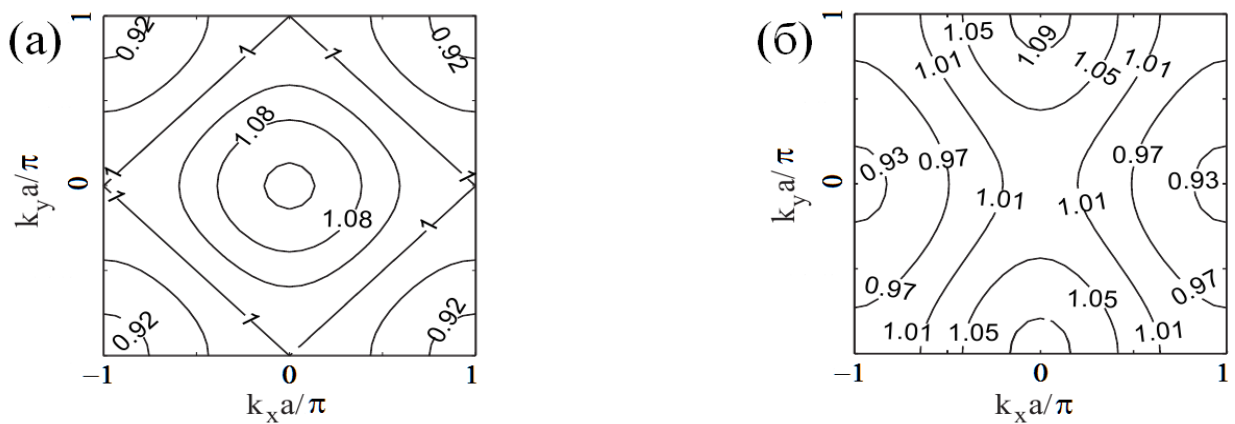


Рисунок 4 - Дисперсионные кривые МИ волн в виде линий постоянной частоты для различных значений  $\omega/\omega_0 = const$  для планарной конфигурации (а) и для планарно-аксиальной конфигурации (б) [16].

### 1.3 Особенности распространения МИ волн в двумерных метаматериалах: отражение, дифракция, собственные моды

Теперь рассмотрим особенности распространения МИ волн в двумерном метаматериале: преломление волны на границах метаматериала; огибание препятствия волной, возникающей из отдельной точки структуры; возникновение различных мод в структуре при разных частотах возбуждения.

Пусть плоские МИ волны распространяются в магнитном метаматериале (ММ), когда один из элементов возбуждается переменным магнитным полем. Задача в данной ситуации заключается в нахождении распределения токов в элементах ММ. Решение можно получить с помощью уравнения (6), в котором вектор напряжения  $\vec{V}$  имеет один ненулевой элемент.

Первый пример - 2D метаматериал, состоящий из  $15 \times 60$  элементов, имеющий квадратную решетку, в котором возбуждается элемент в нижнем левом углу [2]. Получение распределения токов в структуре из 900 метаатомов требует вычисления обратной матрицы из  $900 \times 900$  элементов, что возможно реализовать с помощью современных пакетов программ для численных расчетов. В результате данных вычислений было получено распределение токов, показанное на Рис.5. Здесь хорошо различимо возбуждение в левом нижнем углу, отражение МИ волны на границах и ее последующее затухание.

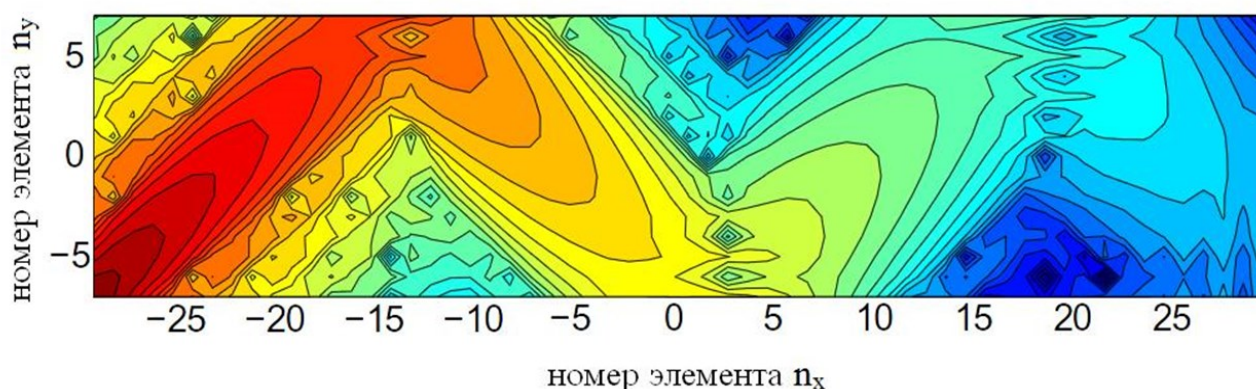


Рисунок 5 - Распределение амплитуды тока в 2D метаматериале из  $15 \times 60$  резонаторов, демонстрирующее распространение и отражение МИ волны [2].

Во втором примере из той же работы квадратная структура  $31 \times 31$  элемент возбуждается в центре, при этом постоянство квадратной решетки нарушено пропуском элемента. Рис.6 показывает картины распространения МИ волн для 3х различных позиций пропущенного элемента, МИ волна явно испытывает дифракцию.

Данные примеры наглядно демонстрируют, что МИ волны проявляют те же свойства, что и другие виды волн.

Третий пример иллюстрирует возникновение различных мод МИ волн в гексагональной структуре, когда снова возбуждается только один центральный элемент [17]. На Рис.7 положение элементов показано черными точками. Отчетливо видно, что распределение токов в структуре сильно изменяется при различных частотах возбуждения. При частоте возбуждения  $\omega/\omega_0 = 1.207$  (Рис.7а) ток наведенный в метаатомах исчезает только на границе структуры. Для двух других частот ближе к резонансной частоте  $\omega/\omega_0 = 1.192$  и  $1.167$  (Рис.7б, в) минимальные значения токов наблюдаются также и внутри структуры, в одном и двух кольцевых слоях, соответственно, что говорит о разных длинах МИ волн, возникающих в метаматериале.

Отметим, что продемонстрированные выше распределения токов получены путем численного решения уравнения (6) с помощью метода обратной матрицы импедансов.

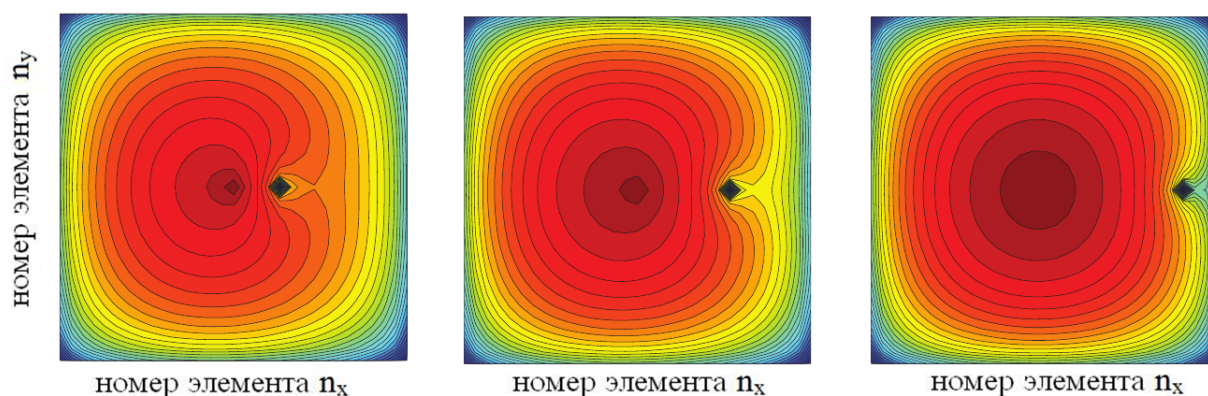


Рисунок 6 - Распределение амплитуд тока в 2D метаматериале из  $31 \times 31$  резонаторов, демонстрирующее дифракцию МИ волны на дефекте, при различных положениях дефекта, изображенного черным квадратом. Метаматериал возбуждается точечным источником в центре [2].

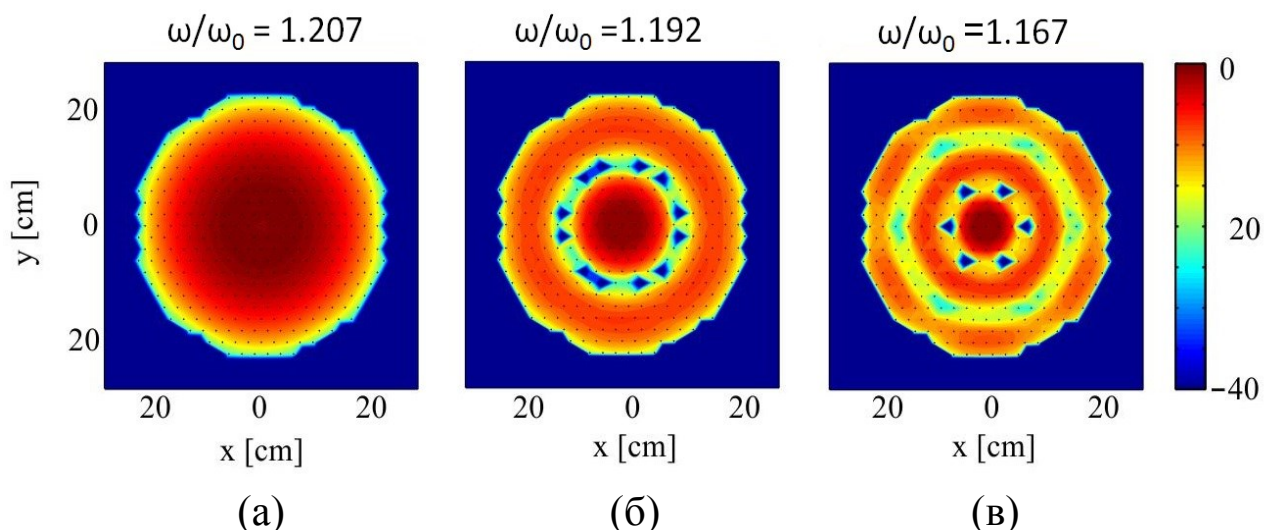


Рисунок 7 - Распределение амплитуд тока в 2D метаматериале с гексагональной структурой, состоящем из 361 резонатора, при различных частотах возбуждения:  $\omega/\omega_0 =$  (а) 1.207, (б) 1.192, (в) 1.167 [17].

Также представляет интерес явление преломления МИ волны на границе раздела сред. Например, на границе двух различных планарно-аксиальных ММ, расположенных определенным образом, наблюдается отрицательное преломление [16]. Несмотря на несомненный интерес, рассмотрение упомянутого явления находится за рамками данной работы.

#### 1.4 Экспериментальное исследование поверхностных МИ волн

Для экспериментального исследования МИ волн, распространяющихся в ММ, используется, как правило, векторный анализатор спектра [18]. Это прибор, который может выводить на излучающую антенну широкополосный сигнал с заданным частотным диапазоном и одновременно с этим получать на один из входов с приемной антенны тот же сигнал, прошедший через исследуемый образец, показывая его амплитудно-частотную характеристику.

Для экспериментального исследования двумерных структур также необходимо специфическое оборудование - двумерный координатный стол. Это оборудование, сопряженное с компьютером, позволяет в автоматическом режиме перемещать приемную антенну в плоскости над изучаемым образцом, и

обеспечивает необходимую точность позиционирования приемной антенны в заранее заданных точках на строго фиксированном расстоянии от ММ.

После запуска программы весь процесс перемещения антенны и измерения сигналов от изучаемой структуры управляется компьютером по предварительно заданному алгоритму. Процесс обработки данных также должен быть автоматизирован в силу большого объема данных. Все это сильно ускоряет и облегчает работу экспериментатора.

Как еще один пример использования выше описанного оборудования можно привести статью [19]. В работе изучается распространение эванесцентных магнитоиндуктивных волн на границе раздела двух метаматериалов с различными параметрами. Экспериментальное исследование распределения токов в такой структуре проводилось с использованием координатного стола (Рис.8).

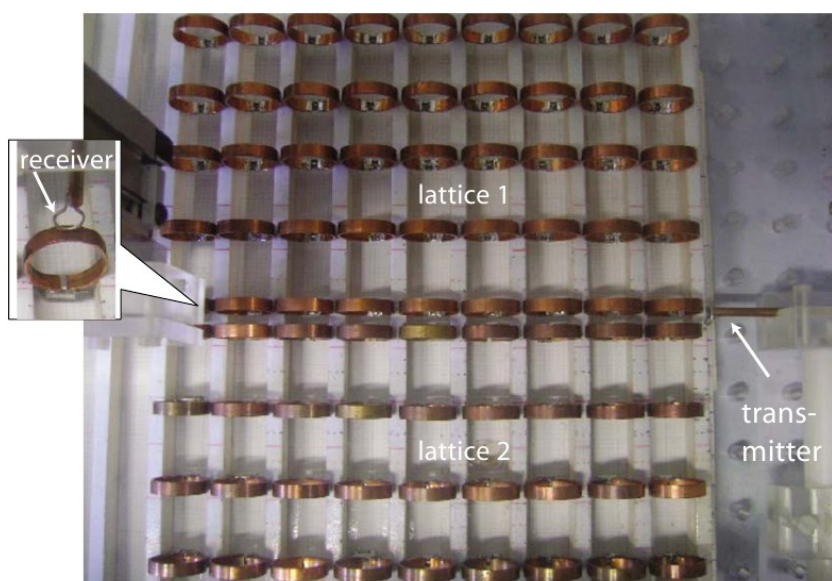


Рисунок 8 - Пример 2D метаматериала, исследованного с использованием двумерного координатного стола [19].

В настоящее время в нашей группе ведутся исследования распространения электроиндуктивных (ЭИ) волн в магнитных метаматериалах в ГГц диапазоне. Уже получены результаты численного моделирования и аналитические результаты [20], которые необходимо проверить экспериментально. Используя координатный стол, можно проводить подробное экспериментальное изучение распределений электромагнитных полей отдельных метаатомов; взаимодействия между ними, для различных конфигураций; и экспериментально исследовать распространение МИ волн в МГц диапазоне и ЭИ волн в ГГц диапазоне в 2D метаматериалах, состоящих из большого количества элементов.

Поэтому целью моего дипломного проекта было:

- разработать техническую документацию для создания двумерного координатного стола;
- произвести сборку и отладку данного оборудования;
- провести пилотные измерения 2D метаматериала;
- сравнить полученные экспериментальные данные с аналитическим расчетом методом обратных матриц импеданса.

## ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Основной целью данной работы является разработка экспериментального оборудования – двумерного координатного стола, о котором было рассказано ранее. В данной главе представлена принципиальная схема устройства, описан процесс сборки и приводятся технические параметры установки.

### 2.1 Принципиальная схема 2D координатного стола и комплектующие

Для позиционирования датчика (приемной антенны) вдоль *одного* направления необходимо прикрепить его на модуль скольжения (каретку), который можно перемещать вдоль направляющих, под управлением двигателя. В настоящее время подобное оборудование сконструировано и используется в практикуме физического факультета по изучению линейных (или 1D) метаматериалов.

Для позиционирования же датчика в плоскости необходимо сделать подвижной всю систему перемещения каретки: присоединить к другой каретке, которая будет перемещаться вдоль другого направления. В итоге получится устройство для позиционирования датчика в плоскости, конечно, при условии, что направления перемещения кареток будут перпендикулярны. Это один из возможных вариантов реализации конструкции данного оборудования.

Изначально планировалось сконструировать установку на базе подвижных частей сканера и принтера: системы перемещения сканирующей каретки из сканера (Рис.9б) и валовой направляющей и модуля скольжения из принтера (Рис.10б). Извлеченная целиком часть сканера состояла из каркаса, каретки (будем называть её верхней), шагового двигателя, и направляющих, по которым на салазках перемещалась, перетягиваемая системой тросов, каретка. Из этой части планировалось сделать основу будущей установки: к каркасу прикрепить ножки, вырезать в его дне отверстие и, через это отверстие, присоединить к верхней каретке сконструированную на основе частей принтера

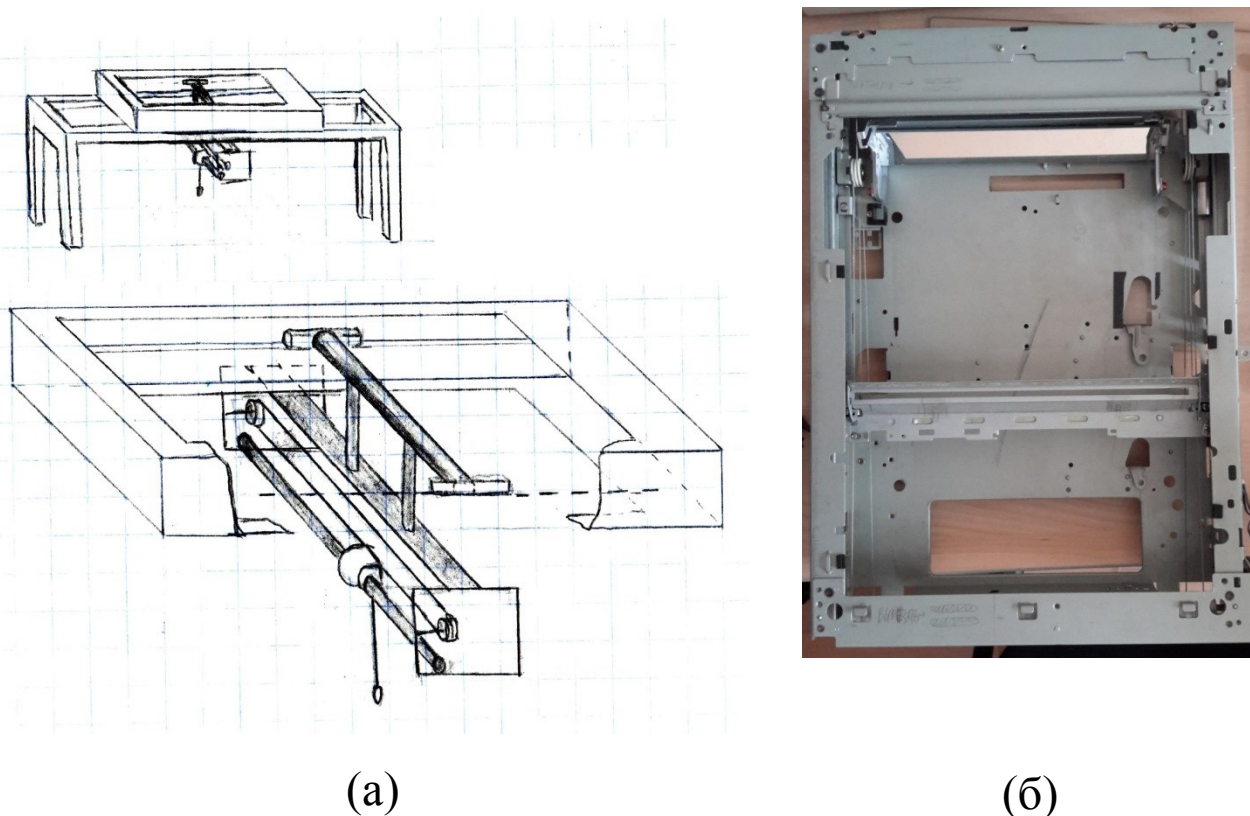


Рисунок 9 - Первая принципиальная схема установки на основе подвижных частей сканера и принтера. (б) Извлеченная из сканера система перемещения сканирующей каретки – предполагаемая основа разрабатываемой установки.

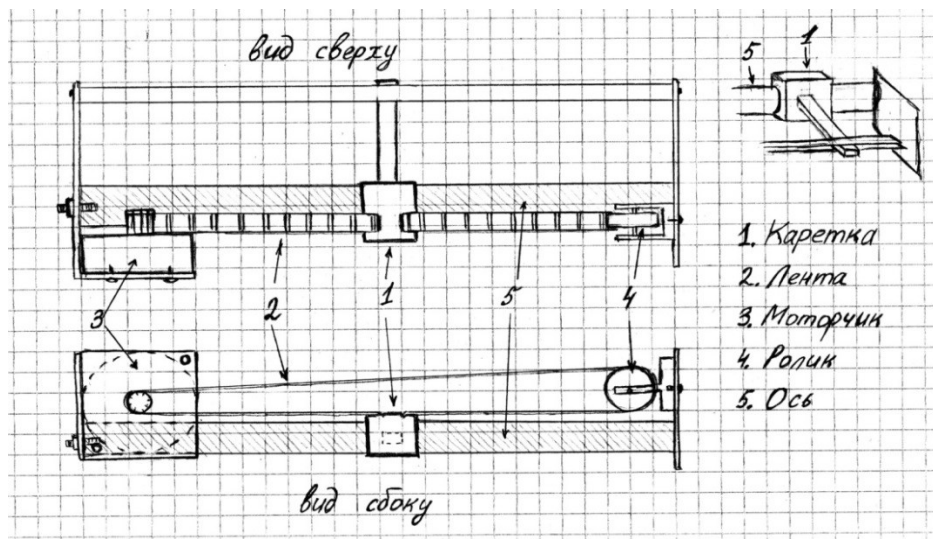
систему перемещения нижней каретки. Принципиальная схема запланированной установки представлена на рисунке (Рис.9а).

В отличие от полностью готовой системы перемещения верхней каретки, для изготовления нижней нужно было продумать и начертить множество узлов и соединений, что частично было выполнено. Схема системы перемещения нижней каретки приведена на Рис.10а. Для перемещения модуля скольжения вдоль направляющей планировалось использовать зубчато-ременную передачу.

Когда значительная часть чертежей уже была готова, настал момент перейти к практической части: изготовлению необходимых деталей, обработке уже имеющихся и последующей сборке оборудования.

На данном этапе возникли проблемы, связанные в основном с точностью перемещения верхней каретки. Изначально установленная система скольжения не предполагала крепления к каретке каких-либо тяжелых подвижных частей,





(а)



(б)

Рисунок 10 - (а) Первоначальная принципиальная схема системы перемещения нижней каретки. (б) Извлеченные из принтера валовая направляющая, модуль скольжения, зубчатый ремень, двигатель.

однако по запланированной схеме к верхней каретке должна была крепиться система перемещения нижней. После продолжительных коллективных размышлений стало понятно, что тривиального решения, предотвращающего нежелательные отклонения каретки от необходимого положения, нет, все предложенные варианты были сопряжены с определенными сложностями. Также установка, собранная из имеющихся деталей, обладала бы довольно небольшой областью сканирования (менее чем  $380 \times 350$  мм).

Поэтому было пересмотрено решение относительно базовых комплектующих и решено приобрести часть деталей, необходимых для изготовления системы перемещения каретки. В качестве поставщика деталей была выбрана компания Purelogic R&D. В процессе составления сметы необходимых комплектующих, в связи с их приемлемой стоимостью, было принято решение использовать новые качественные детали для сборки всей установки.

Окончательная схема координатного стола приведена на Рис.11. По новому плану в качестве направляющих для перемещения верхней каретки

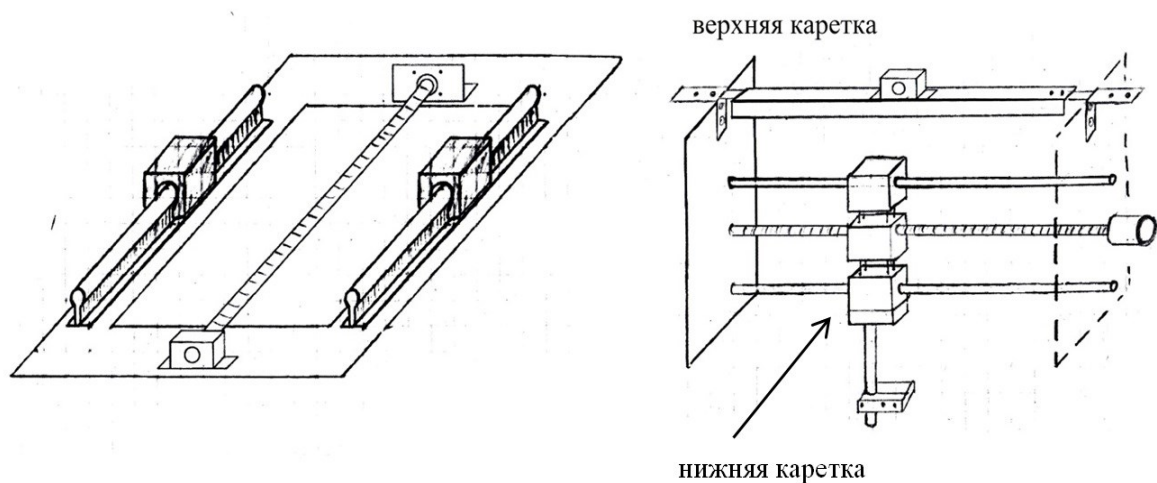


Рисунок 11 - Конечная схема установки, разработанная на основе готовых промышленных деталей фирмы Purelogic R&D [21] и деталей, изготовленных по собственным чертежам.

используются цилиндрические рельсы, которые крепятся к устойчивому каркасу. На рельсы устанавливается верхняя каретка со специальными модулями скольжения. Внешний вид верхней каретки схематически представлен в правой части Рис.11. Как видно на схеме, на верхнюю каретку устанавливается вся система перемещения нижней. Для управления перемещением обеих кареток были выбраны шарико-винтовые передачи с шаговыми двигателями, минимальный шаг, обеспечиваемый данными комплектующими, 12.5 мкм для верхней и 10 мкм для нижней каретки [21].

Нижняя каретка сконструирована на основе следующих деталей: две валовые направляющие, два модуля скольжения, шарико-винтовая передача (ШВП), подшипниковая опора для ШВП, шаговый двигатель (ШД) и две алюминиевые пластины, на которые монтируются выше перечисленные комплектующие, также используются и другие детали, выполненные в мастерской физического факультета по оригинальным чертежам.

В качестве основы для установки был выбран плоский прямоугольный стол 90×70 см из ДСП толщиной 3 см, установленный на ножках с колёсиками (Рис.12). Такой выбор был сделан по нескольким причинам: во-первых, поверхность стола находится в непосредственной близости от области измерений и должна быть слабомагнитной, во-вторых, установка должна

обладать хорошей мобильностью. На данном этапе хочу выразить благодарность Петрову П., который помог автору нести обсуждаемое оборудование с первого на четвертый этаж по лестнице, так как в процессе изготовления не были учтены габариты лифта.

На выше упомянутый стол монтируется каркас, к которому крепятся рельсы. Сам каркас, а также большое количество соединительных деталей, в готовом виде приобрести не представлялось возможным, по этой причине были разработаны чертежи частей каркаса и большей части соединительных элементов (Приложение 1). В процессе выполнения дипломной работы по этим чертежам были изготовлены необходимые детали, в качестве основы использовались, алюминиевые уголки: 1 метр уголка  $100 \times 100$  мм толщиной 10мм и 5 метров уголка  $50 \times 50$  мм толщиной 5 мм.

Когда большая часть деталей была доставлена и изготовлена, можно было приступить к сборке. Стол и детали перед сборкой изображены на Рис.12.

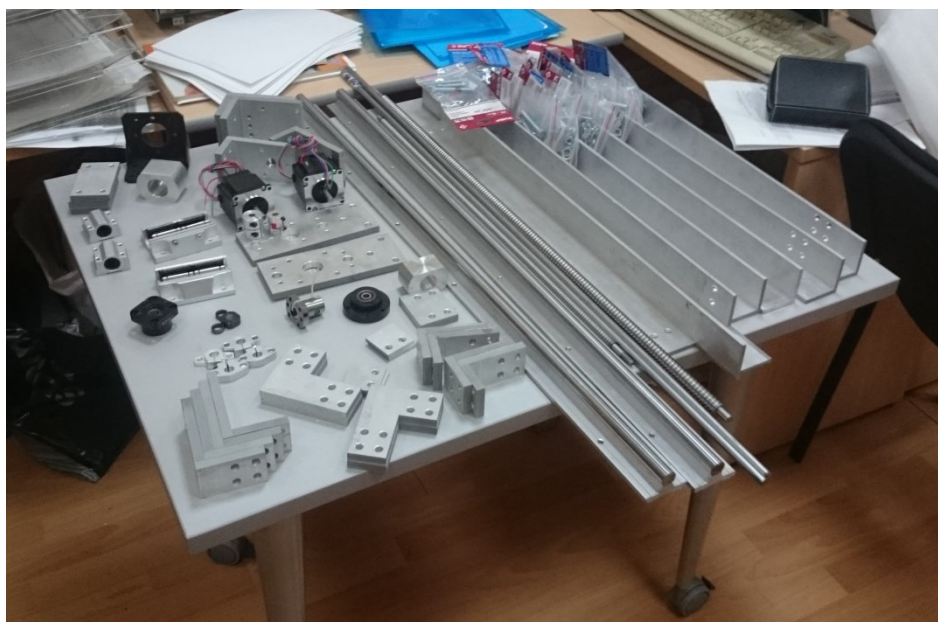


Рисунок 12 - Стол для монтажа оборудования и детали, закупленные и изготовленные по оригинальным чертежам.

## 2.2 Сборка экспериментального оборудования

В этой части кратко будет представлен процесс сборки установки, а также описаны некоторые возникшие трудности и проблемы.

Вначале было необходимо собрать каркас, который в собранном состоянии образует две П-образные рамы (Рис.13). Каркас состоит из 6 частей: 2 горизонтальные перекладины и 4 вертикальные стойки. Стойки крепятся к столу, каждая двумя уголками, а для соединения этих деталей были выбраны латунные болты (из-за непосредственной близости к области измерений).

Выставить стойки строго вертикально оказалось непростой задачей - после попыток выставить их перпендикулярно поверхности стола, стало понятно, что стол имеет несколько изогнутую форму, по этой причине, рамы выставлялись по уровню. За базовую точку была принята середина стола, относительно которой выставлялся горизонтальный уровень перекладин. Также края горизонтальных перекладин были установлены на одинаковом расстоянии от стола.



Рисунок 13 - Две П-образные рамы, закрепленные на столе, и частично собранная верхняя каретка на столе в центре.

После этого была собрана верхняя каретка (Рис.13). В ее основе две параллельные пластины, к которым крепятся два уголка с модулями скольжения, два направляющих вала, а также шаговый двигатель и подшипниковая опора винта, к которым в свою очередь крепится ШВП. Гайка ШВП соединяется болтами с двумя модулями скольжения, надетыми на валы, и пластинами из оргстекла, образуя нижнюю каретку.

Далее рельсы с верхней кареткой присоединялись к каркасу. На этом этапе сложность заключалась в выставлении рельсов перпендикулярно каркасу и параллельно друг другу. В процессе установки было выявлено, что горизонтальная перекладина каркаса имеет немного изогнутую форму, поэтому было измерено необходимое расстояние между рельсами и изготовлен алюминиевый брусок соответствующей длины. С помощью данного бруска, закрепив один рельс струбцинами, второй рельс был выставлен параллельно первому. После этого сжатые струбцинами рельсы и каркас были просверлены и соединены болтами.

Далее на каркас монтировалась шарико-винтовая передача, необходимая для перемещения верхней каретки. Для этого в середине перекладин были просверлены по 4 отверстия, к которым, с одной стороны крепился кронштейн с шаговым двигателем, а с другой - уголок с подшипниковой опорой винта. На данном этапе было необходимо добиться параллельности винта ШВП рельсам, об этом немного подробнее.

Гайка ШВП соединяется с нижней кареткой с помощью уголка, в середине которого было просверлено отверстие, через которое проходит винт. С помощью данного уголка и производилась юстировка винта ШВП. К верхней каретке крепился выше упомянутый уголок, через отверстие которого проходил винт; перемещая каретку, можно было наблюдать изменения положения винта в отверстии, и далее, немного изменяя положение крепежей винта, добиваться его параллельности рельсам.

После завершения юстировки винта, в уголке, соединяющем данный винт с верхней кареткой, были просверлены отверстия для его крепления к гайке ШВП и верхней каретке.

В итоге выше перечисленных манипуляций основная механическая часть установки была собрана.

В этой части установки в процессе её эксплуатации не предполагается каких-либо изменений: разборки, замены детали, закрепления их другим образом и т.п.

Вместе с этим в установке присутствует система крепления приемной антенны. Для фиксации антенны в различных положениях, необходимо обладать возможностью видоизменять данную систему, в соответствии с нуждами экспериментатора – поэтому эта часть установки сделана вариабельной.

При этом система крепления приемной антенны, как и стол, должна быть слабомагнитной, чтобы не влиять на принимаемый сигнал, поэтому она была изготовлена исключительно из текстолита, эбонита и оргстекла. Из текстолита был изготовлен набор стержней различной длины, которые могут соединяться друг с другом шпильками. Они необходимы для изменения высоты расположения приемной антенны над плоскостью сканирования. Из эбонита были сделаны резьбовые шпильки и болты с цилиндрическими головками, из оргстекла - пластины для крепления стержней к каретке, модуль крепления антенны к стержню, пластины, находящиеся между модулями скольжения и гайкой ШВП нижней каретки, и некоторые другие детали.

Изображение законченной на данный момент механической части двумерного координатного стола приведено на Рис.14.

Размер измерительной области составляет приблизительно  $650 \times 710$  мм.

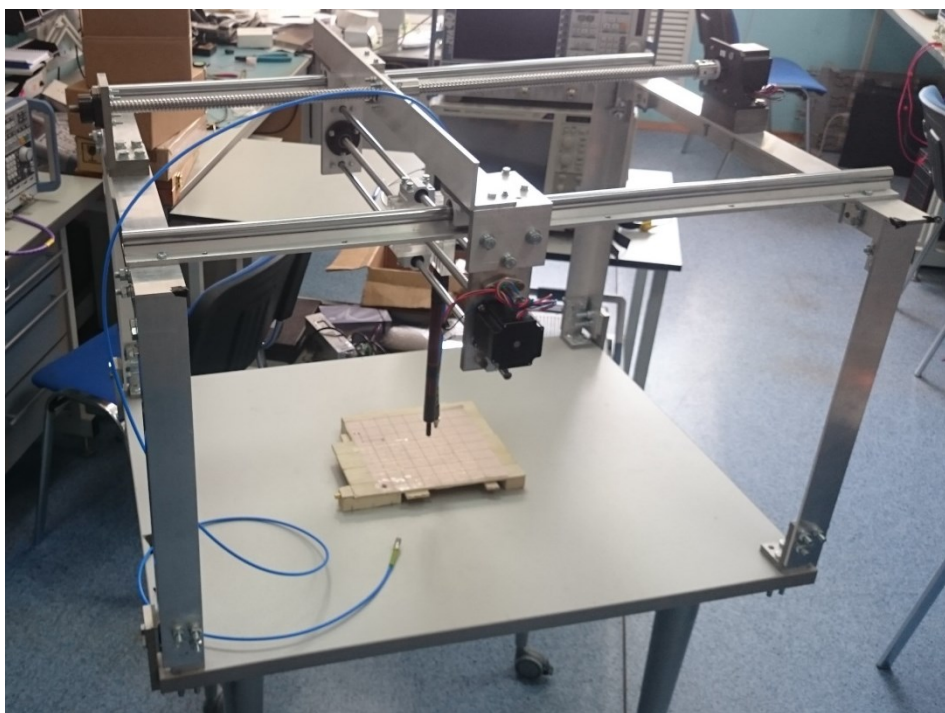


Рисунок 14 - Внешний вид установки, собранной в процессе выполнения проекта.

В дальнейшем предполагается

- установить электронные комплектующие, с помощью которых работой шаговых двигателей будет управлять компьютер для автоматизации установки;
- разработать соответствующее программное обеспечение, которое позволит проводить измерения в автоматическом режиме.

Кроме того, для безопасного проведения дальнейших экспериментов нужно будет установить датчики положения, ограничивающие передвижения кареток вплотную к краям каркаса, в случае возможного введения неправильных данных в автоматическую программу при выполнении эксперимента.

А еще можно сделать возможность перемещения вдоль вертикальной оси (оси Z).

## ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Данная часть дипломной работы посвящена изготовлению двумерного магнитного метаматериала и проведению экспериментального исследования распространения МИ волн с использованием сконструированного оборудования.

### 3.1 Двумерный магнитный метаматериал в МГц диапазоне

Для создания двумерного метаматериала в качестве метаатомов использовались расщепленные кольцевые резонаторы [22] (Рис.15а). Медные кольца с щелью, в зазор которой были впаяны конденсаторы ёмкостью 330 пФ и подстроечные конденсаторы 5-20пФ, что было сделано с целью уменьшения собственной резонансной частоты кольца приблизительно в 40 раз. Резонансные частоты всех используемых для сборки структуры элементов измерялись с помощью векторного анализатора спектра Rohde&Schwarz ZNB20 (Рис.18) [18], и в случае необходимости, проводилась подстройка резонансной частоты путем изменения емкости подстроечного конденсатора, что позволило добиться довольно хорошей точности по частоте. В результате резонансная частота используемых элементов составила  $\omega_0=50.9\pm 0.1$  МГц. Пример резонансной кривой элемента приведен на Рис.15б. Добротность элементов определялась по резонансной кривой и составила  $Q=91\pm 0.1$ .

Из 25 таких элементов – метаатомов – был собран планарный метаматериал в форме квадрата, представленный на Рис.16. Расстояние между центрами элементов составляло 24 мм. При таком расположении элементов коэффициент взаимодействия  $k=-0.1$  [23]. Элементы расставлялись на миллиметровке с начерченной сеткой, точность установки можно оценить как 0.3мм. Элементы фиксировались на подложке тонкой двухсторонней прозрачной клейкой лентой. Для максимального устранения влияния подложки на взаимодействие элементов структуры, в качестве материала для



изготовления подложки был выбран балсовуд. Диэлектрическая проницаемость этого материала близка к диэлектрической проницаемости воздуха [24]. В основание подложки была вмонтирована возбуждающая антенна, на Рис.16б она находится под нижним левым элементом. В качестве возбуждающей и приемной антенны использованы коаксиальные кабели, внутренняя жила которых, образуя кольцо, диаметром 5 мм, запаивалась на обмотку (Рис.17).

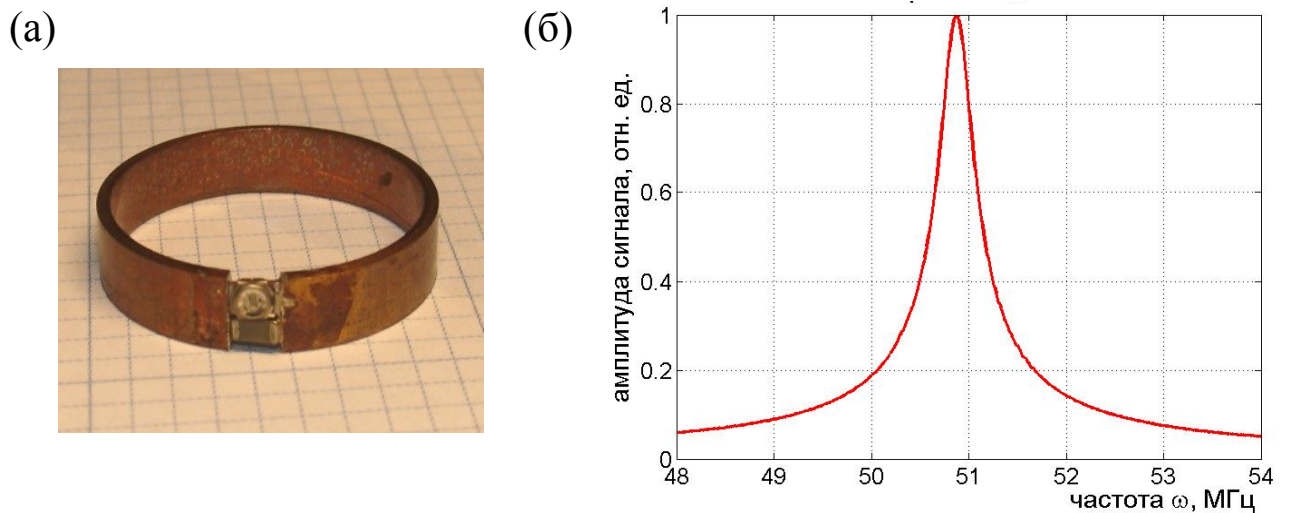


Рисунок 15 - (а) Внешний вид расщепленного кольцевого резонатора с впаянной ёмкостью. Внутренний диаметр - 21мм, толщина - 1мм, высота - 5мм, ширина щели - 1 мм. (б) Резонансная кривая расщепленного кольцевого резонатора  $\omega_0=50.9$  МГц.  $Q=91$ .

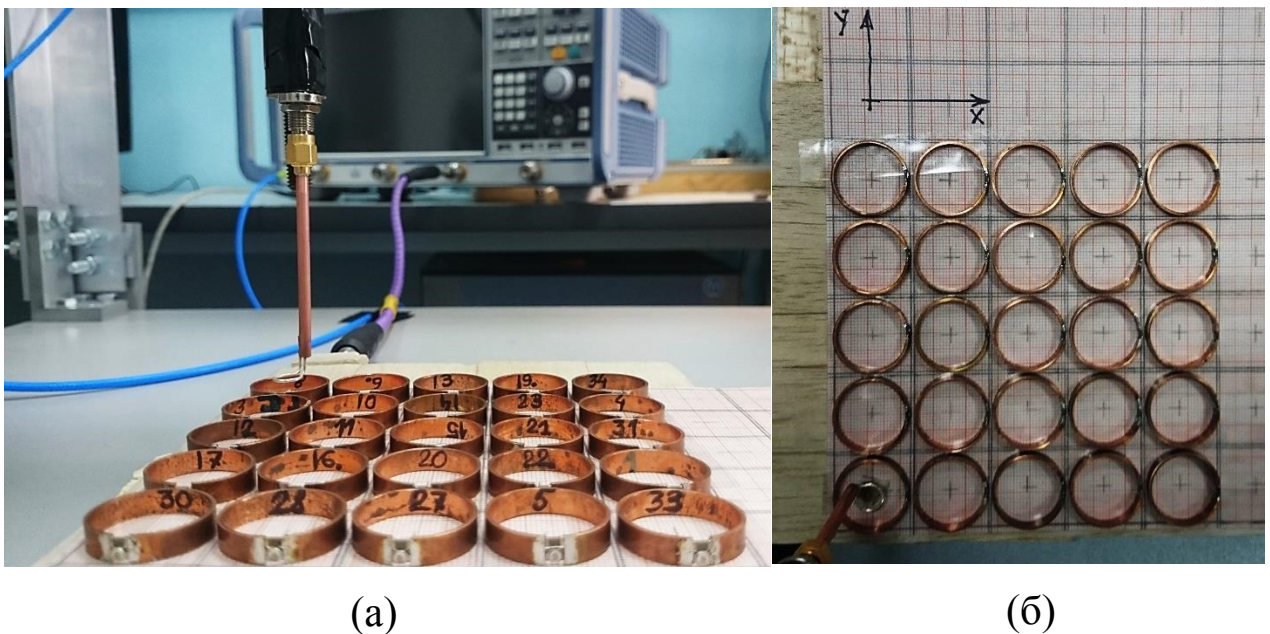


Рисунок 16 - Фотографии проведения эксперимента. Крупным планом 2D магнитный метаматериал в форме квадрата из 25 элементов ( $\omega_0=50.9$  МГц) на подложке из балсовуда. (а) вид сбоку, (б) вид сверху.



Рисунок 17 - Возбуждающая и приемная антенны.

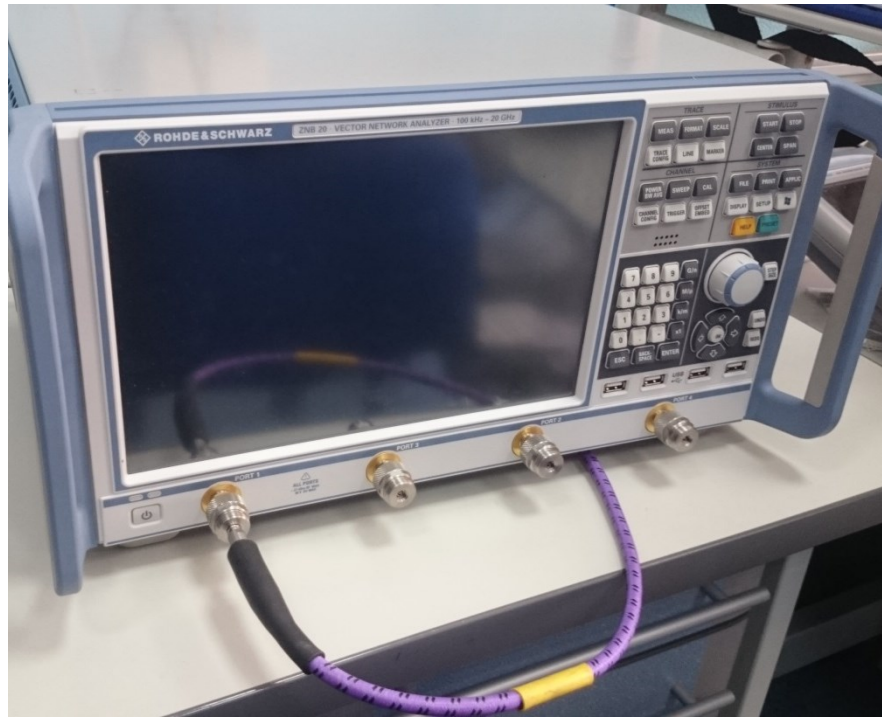


Рисунок 18 - Векторный анализатор спектра Rohde&Schwarz ZNB20.

### 3.2 Проведение эксперимента

Когда собранная структура была установлена на подложку, можно было приступить непосредственно к проведению эксперимента.

Измерения проводились на векторном анализаторе спектра Rohde&Schwarz ZNB20 (Рис.18), в частотном диапазоне 40 – 72 МГц, с шагом 0.02 МГц.

Векторный анализатор спектра, являясь источником возбуждения, позволяет измерить сигнал от элементов ММ и сохранить его в память компьютера (в формате .dat), тогда как собранный координатный стол используется для точного позиционирования приемной антенны в плоскости над исследуемой структурой.

Однако на момент проведения эксперимента электронные комплектующие для управления шаговыми двигателями отсутствовали, поэтому перемещение приемной антенны осуществлялось вручную. Для этого,

учитывая шаг винтов, было определено, что при одном полном обороте верхнего винта, верхняя каретка смещается на 5мм, а при одном обороте нижнего винта, нижняя каретка смещается на 4мм. На основе этого на муфтах, соединяющих винты ШВП с шаговыми двигателями, были сделаны шкалы (Рис19б), цена деления которых соответствовала углу поворота винта, при котором каретка смещалась на 1 мм. С использованием этих шкал позиционирование приемной антенны производилось с точностью 60 мкм.

При проведении эксперимента 2D метаматериал на подложке закреплялся в центре стола (Рис.16а, Рис.19). С целью предосторожности, металлическая рама координатного стола была заземлена. Возбуждающая антенна, вмонтированная в подложку, и приемная антенна, закрепленная на текстолитовом стержне, соединялись с анализатором спектра коаксиальными кабелями. Для проведения измерения центр кольца приемной антенны устанавливался над центром элемента структуры, и полученный сигнал заносился в память компьютера. Таким образом, последовательно снимались сигналы над центром каждого элемента (шаг перемещения антенны составлял 24 мм), после чего в тех же точках записывался уровень фона в отсутствие метаматериала.

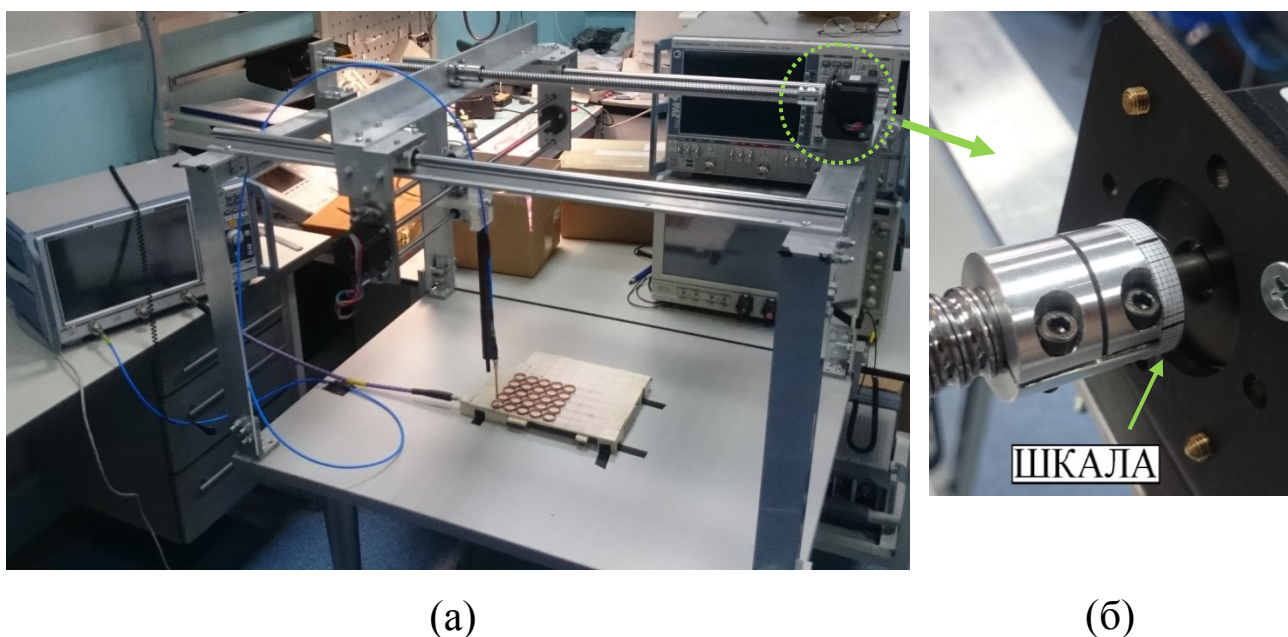


Рисунок 19 – (а) Фотография проведения эксперимента. На переднем плане 2D координатный стол. (б) Крупный план шагового двигателя с закрепленной на муфте шкалой.

### 3.3 Экспериментальные результаты и их обсуждение

В ходе эксперимента были записаны частотные зависимости сигналов каждого элемента метаматериала. Некоторые полученные сигналы, пропорциональные току в элементах, приведены на Рис.20 и Рис.21, остальные приведены в Приложении 2.

При проведении эксперимента элементы структуры условно нумеровались 2-мя цифрами, в соответствии с введенной системой координат (Рис.16б), первая цифра показывала положение элемента вдоль оси X (номер столбца), а вторая, соответственно, вдоль оси Y (номер ряда). Так на Рис.20 красная кривая показывает сигнал от элемента (1;1), под которым находится возбуждающая антенна, а синяя кривая – от элемента (5;5), наиболее удаленного от возбуждающей антенны. Можно видеть, что отличие амплитуды сигнала элемента (5;5) от амплитуды сигнала (1;1) в полосе пропускания в максимумах пренебрежимо мало. Данные зависимости амплитуды сигнала элементов от частоты построены с учетом фона.

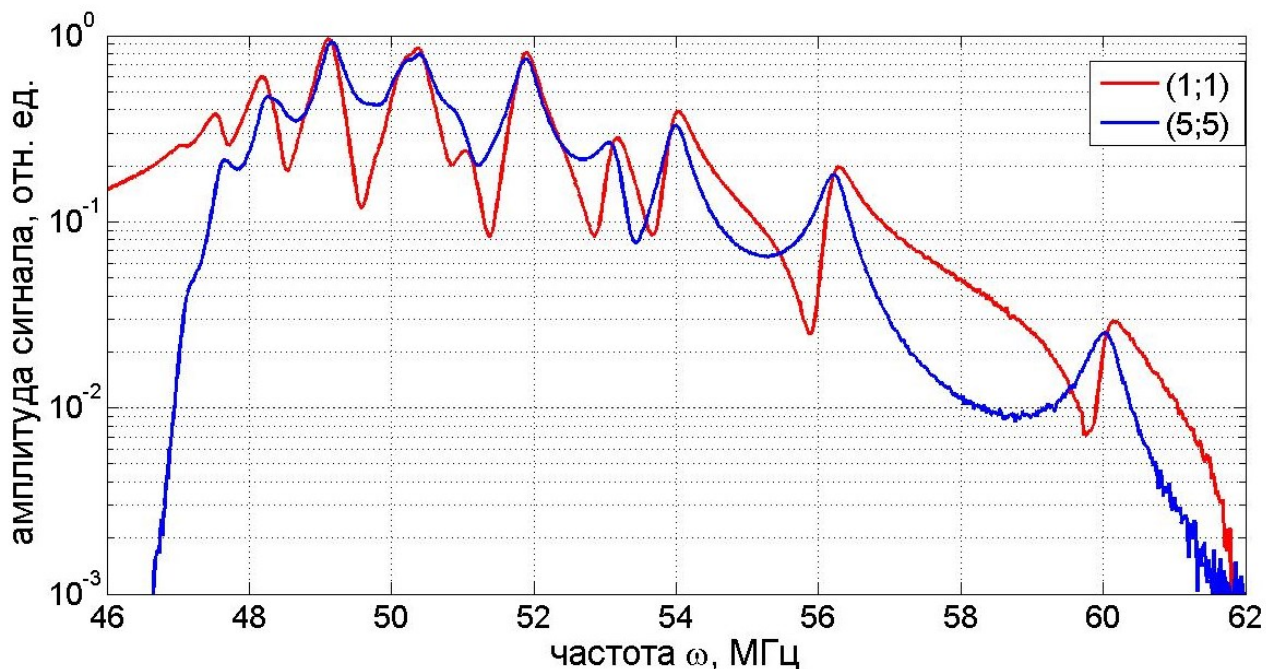


Рисунок 20 - Амплитуда сигнала от частоты возбуждения для элементов (1;1) и (5;5) плоского магнитного метаматериала (5\*5 элементов,  $\omega_0=50.9$  МГц) с учетом фона и нормированные на максимум сигнала элемента (1;1).

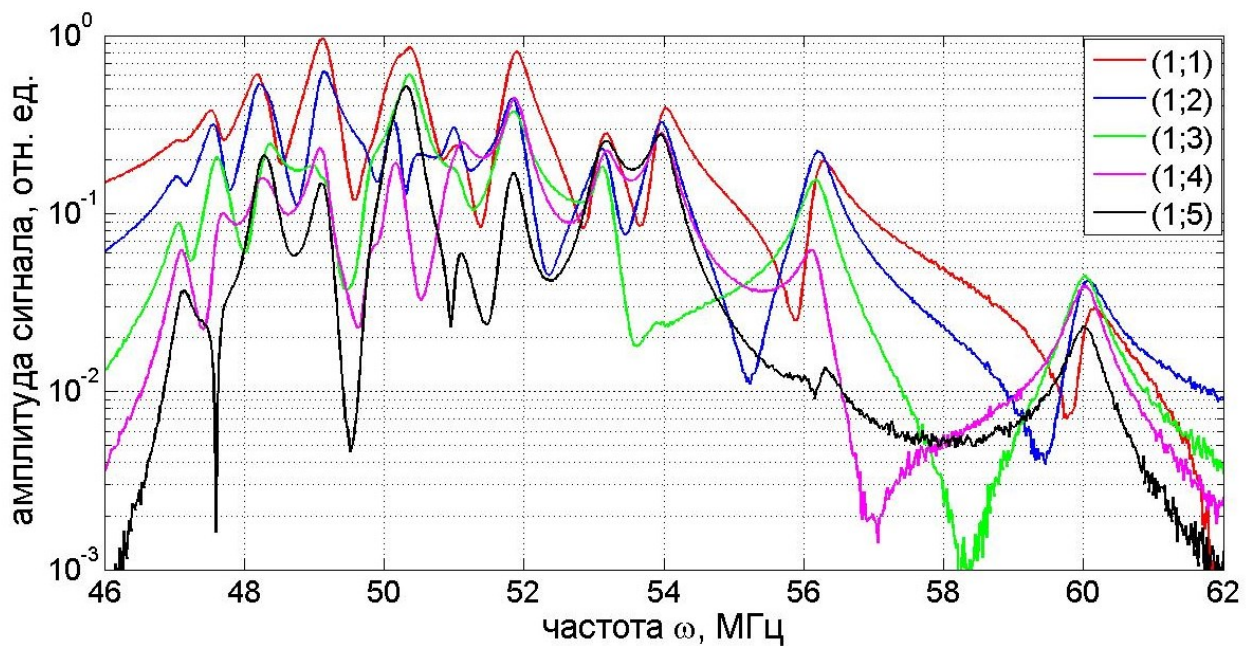


Рисунок 21 - Амплитуды сигнала от частоты возбуждения для элементов первого ряда метаматериала с учетом фона и нормированные на максимум сигнала элемента (1;1).

Полученные от отдельных элементов сигналы для визуализации были обработаны в пакете Matlab. Код программ приведен в Приложении 3. После обработки данных получены экспериментальные распределения амплитуд токов в метаатомах для различных частот возбуждения, соответствующие различным модам магнитоиндуктивных волн, распространяющихся в 2D метаматериале (Рис.22). Правомерно говорить, что получены распределения токов в структуре, поскольку сигналы, получаемые от элементов, пропорциональны току в этих элементах [25]. В процессе обработки значения амплитуд были нормированы на максимальное зарегистрированное значение.

На Рис.22 представлены изображения нескольких мод МИ волн. В этих распределениях присутствует некоторая асимметрия или точнее анизотропия, вызванная возможно небольшими различиями резонансных частот элементов, погрешностями расположения элементов в структуре, но в основном различием взаимодействия между элементами в направлениях X и Y. При сборке структуры из расщепленных кольцевых резонаторов была обнаружена

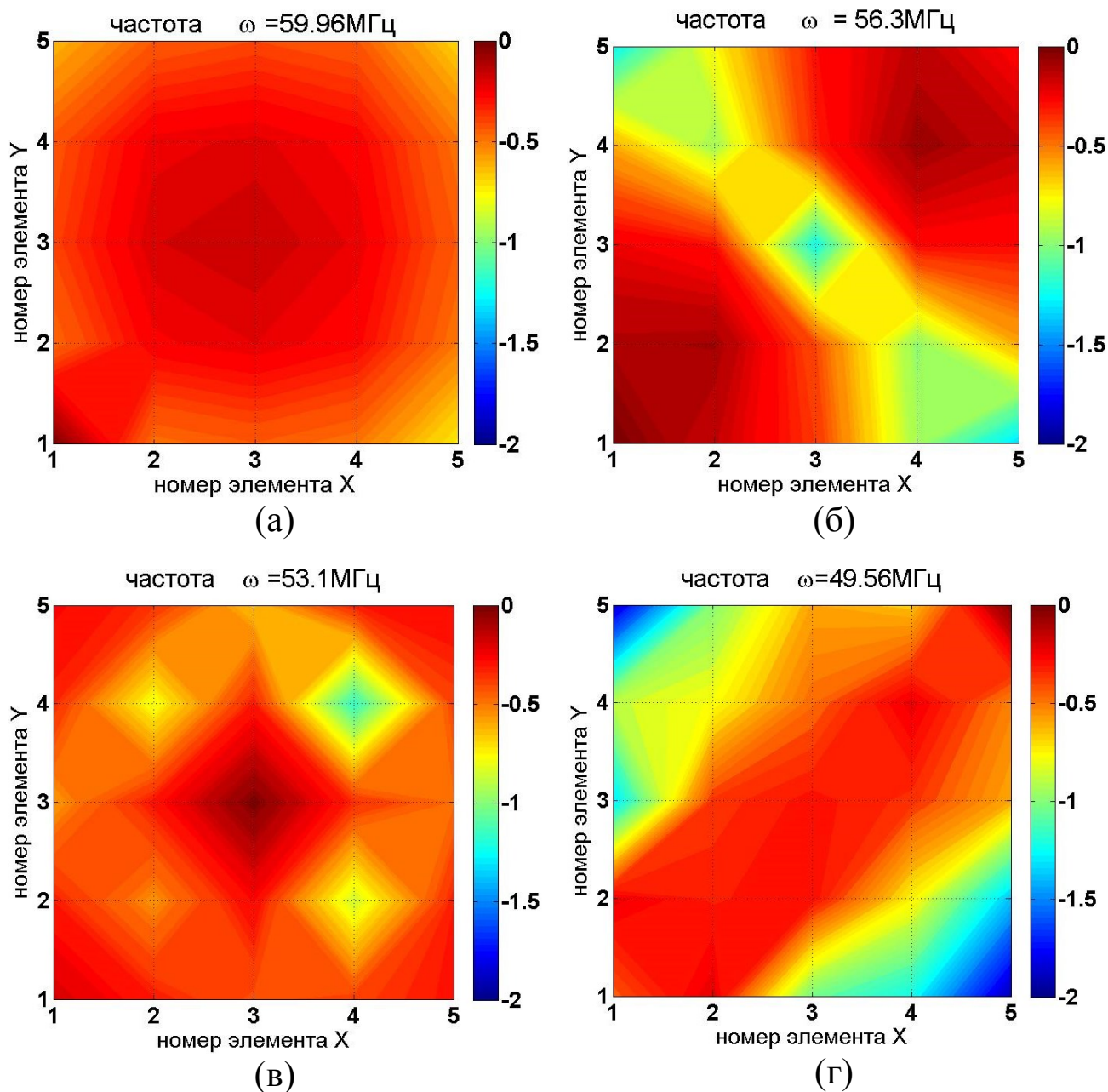


Рисунок 22 - Распределения токов в структуре для различных частот возбуждения, полученные экспериментально.

небольшая деформация элементов, возникшая, по всей видимости, в результате впаивания конденсаторов в щель. Диаметр элемента вдоль направления  $Y$  (Рис.16б) стал приблизительно на 0.5 мм больше, чем вдоль направления  $X$ , что вызвало увеличение взаимодействия между элементами вдоль направления  $Y$ . Даная проблема будет устранена, если расположенные в структуре элементы будут иначе ориентированы, существует несколько вариантов того как

сориентировать элементы для решения упомянутой проблемы, но на момент проведения эксперимента этому не было уделено должного внимания.

Также можно отметить, что поскольку структура пока состоит из довольно небольшого количества элементов, некоторые моды МИ волн, возбуждаемые в метаматериале, плохо различимы. Однако при внимательном рассмотрении можно заметить некоторое логическое соответствие экспериментально полученных распределений тока в квадратной структуре и распределений тока в гексагональной структуре, полученных численно в работе [17]. В обоих случаях на верхней частоте возбуждается вся структура (Рис7а, Рис22а) что соответствует максимальной длине МИ волны, а при приближении возбуждающей частоты к резонансной частоте одного элемента внутри структуры появляются локальные минимумы токов (Рис7б, в) (Рис22б, в), что и демонстрирует упомянутое соответствие результатов.

В дальнейшем планируется провести автоматизацию процесса измерения и исследовать распространение МИ волн в метаматериале, состоящем из большего числа идентичных метаатомов.

## Глава 4 РАСЧЕТ ВОЗБУЖДЕНИЯ ДВУМЕРНОГО МЕТАМАТЕРИАЛА

В завершающей части работы изложен метод расчета возбуждения магнитоиндуктивных волн в плоских метаматериалах. Метод применен к структуре, описанной в Главе 3, и приведено сравнение экспериментальных и аналитических результатов.

Как уже упоминалось в Главе 1, распределение токов в структуре можно получить численным решением уравнения (6) с помощью обратной матрицы импедансов. Но для начала необходимо записать матрицу импедансов для исследуемой структуры.

Для структуры из 25 элементов матрица импедансов будет иметь размер  $25 \times 25$  элементов. На главной диагонали находятся значения собственных импедансов элементов, а содержание остальной матрицы зависит от способа упорядочения элементов и используемых приближений. Для исследованной экспериментально структуры  $5 \times 5$  с квадратной решеткой и в приближении ближайших соседей матрица  $\mathbf{Z}$  импедансов будет записываться следующим образом:

$$\mathbf{Z} = \begin{pmatrix} (1:1) & (*) & 0 & 0 & 0 & (**) & 0 & 0 & 0 & \dots \\ (*) & (1:2) & (*) & 0 & 0 & 0 & (**) & 0 & 0 & \dots \\ 0 & (*) & (1:3) & (*) & 0 & 0 & 0 & (**) & 0 & \dots \\ 0 & 0 & (*) & (1:4) & (*) & 0 & 0 & 0 & (**) & \dots \\ 0 & 0 & 0 & (*) & (1:5) & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ (**) & 0 & 0 & 0 & 0 & (2:1) & (*) & 0 & 0 & \dots \\ 0 & (**) & 0 & 0 & 0 & (*) & (2:2) & (*) & 0 & \dots \\ 0 & 0 & (**) & 0 & 0 & 0 & (*) & (2:3) & (*) & \dots \\ 0 & 0 & 0 & (**) & 0 & 0 & 0 & (*) & (2:4) & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{pmatrix}, \quad (13)$$

где обозначение  $(i:j)$  используется для обозначения импеданса  $Z_0$  элемента  $i$  (направление вдоль оси  $X$ ), находящегося в ряду  $j$  (направление вдоль оси  $Y$ ). Здесь приведён только верхний левый угол матрицы размером  $(9 \times 9)$  элементов. Значения импедансов на главной диагонали в нашем случае все одинаковы по величине в силу идентичности элементов, но они соответствуют определенным элементам  $(i,j)$ , условно пронумерованным в соответствии с введённой ранее



системой (п.3.3). Звездочками (\*) и (\*\*) отмечены ненулевые недиагональные элементы, их значения так же все одинаковы (т.к. взаимодействие вдоль осей X и Y считается одинаковым) и равны  $i\omega M$ , где M коэффициент взаимной индукции между соседними метаатомами. Элементы (\*) на диагоналях, соседних к главной, характеризуют взаимодействие между соседними метаатомами вдоль оси X. При этом можно заметить пропуски, соответствующие отсутствию одного соседнего элемента вдоль направления X у элементов стоящих на границе структуры, например (1:5) и (2:1). Две другие не нулевые диагонали, удаленные от главной диагонали и обозначенные (\*\*) характеризуют взаимодействие между соседними элементами в направлении Y и также равны  $i\omega M$ .

Что касается собственного импеданса элемента  $Z_0$  для случая с потерями его можно записать в виде

$$Z_0(\omega) = i\omega L + \frac{1}{i\omega C} + R, \quad (14)$$

где  $L$  - индуктивность  $C$  – емкость и  $R$  -сопротивление элемента, а  $\omega$  - частота возбуждения. Подставляя  $\omega_0 = (LC)^{-1/2}$  в (14) получаем

$$Z_0(\omega) = \left( \left( \frac{\omega}{\omega_0} \right)^2 - 1 \right) \frac{i}{\omega C} + R, \quad (15)$$

где  $\omega_0$  – резонансная частота элемента.

Записывая импеданс в таком виде, из численного решения уравнения (6) можно исключить параметр  $L$ , записав его через известное значение  $\omega_0$ . В таком случае еще необходимо знать значения сопротивления метаатома и емкость впаянного в него конденсатора (собственной емкостью кольца можно пренебречь).

Так же, для численного решения требуется значения  $M$ , которое можно определить, зная коэффициент взаимодействия  $\kappa$ , по формуле (11).

$$M = \frac{\kappa}{2C\omega_0^2}. \quad (16)$$

Для исследуемых элементов на расстоянии 1мм  $\kappa$  составляет величину порядка  $\kappa \approx -0.1$  [23].

Программа, численно решающая уравнение (6) для исследуемой структуры с  $Z_0$  и  $M$  в виде (15) и (16), была составлена в пакете Matlab, код программы приведен в Приложение 3, также как и обоснование используемых численных параметров.

На Рис.23 и Рис.24 приведены распределения токов в элементах ММ, иллюстрирующие различные моды МИ волн. Слева – результаты, полученные аналитически, а справа приведены результаты, полученные экспериментально, которые наиболее близки к соответствующим теоретическим модам.

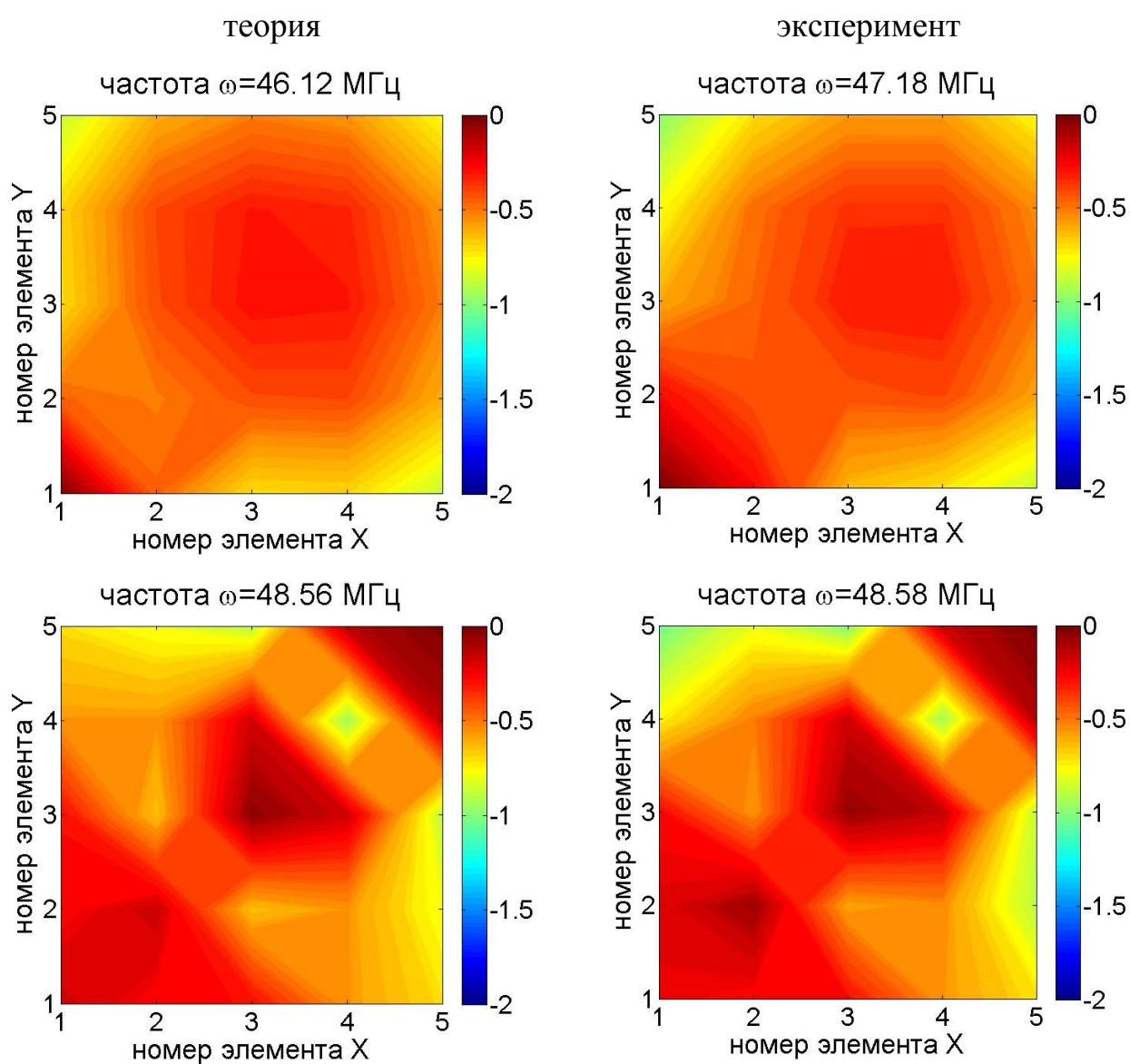


Рисунок 23 - Распределения токов в элементах структуры (5\*5) для различных частот возбуждения, полученные аналитически (слева), и соответствующие распределения, полученные экспериментально (справа).. $\omega_0=50.9$  МГц.

Распределения токов в элементах ММ, полученные аналитически, были довольно сильно приближены к экспериментальным с помощью варьирования параметров  $\kappa$  и  $R$ . Как видно на Рис.22 и Рис.23 некоторые распределения крайне похожи даже при одинаковых частотах возбуждения, однако во всей полосе пропускания определенные моды, полученные экспериментально и аналитически, либо слегка отличаются по частотам, либо отсутствуют.

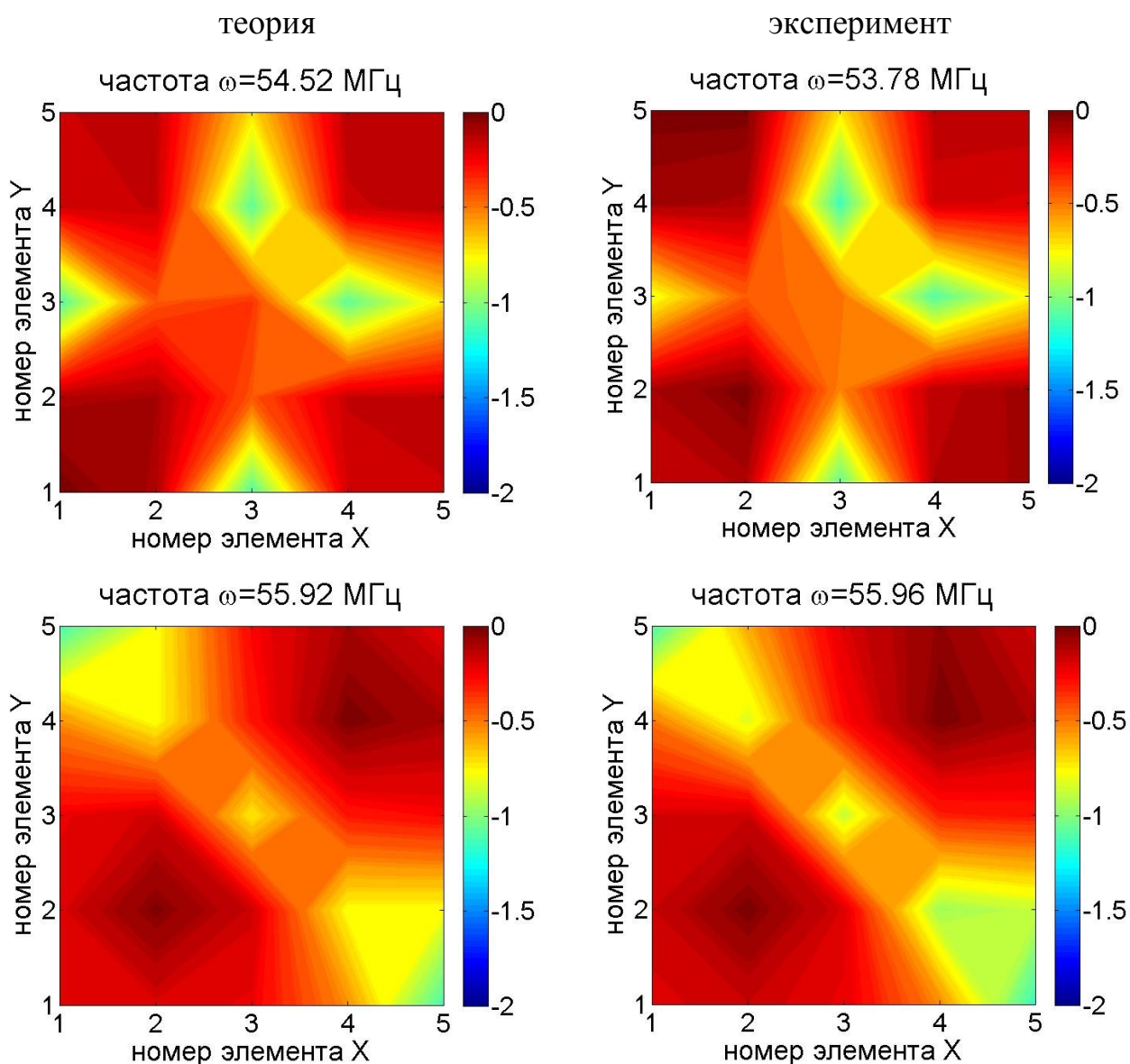


Рисунок 24 - Распределения токов в элементах структуры (5\*5) для различных частот возбуждения, полученные аналитически (слева), и соответствующие распределения, полученные экспериментально (справа).. $\omega_0=50.9$  МГц.

В целом, для данных, полученных экспериментально и аналитически, характер изменения сигнала от частоты одинаков и демонстрирует хорошее качественное соответствие. Для получения численного соответствия данный метод требует более тщательного изучения и внимания от автора. Но даже при таком подходе метод демонстрирует хорошее качественное соответствие теории и эксперимента.

Полученные в работе аналитические результаты не могут претендовать на абсолютно точное численное решение, однако их очевидная корреляция с экспериментальными результатами подтверждает качество полученных экспериментальных данных.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в процессе выполнения работы:

- разработана схема координатного стола для исследования 2D магнитных метаматериалов в МГц и ГГц диапазоне;
- проведена сборка и отладка двумерного координатного стола;
- собран 2D магнитный метаматериал с квадратной структурой из 25 идентичных элементов с резонансной частотой 50.9 МГц;
- экспериментально получено распределение токов в метаатомах в соответствующем частотном диапазоне. Выделены собственные моды магнитоиндуктивных волн;
- методом обратной матрицы импедансов проведен расчет возбуждения магнитоиндуктивных волн в 2D магнитном метаматериале. Получено хорошее согласие с результатами эксперимента.

Решение поставленной в дипломной работе задачи расширит исследовательские возможности и позволит проводить на физическом факультете МГУ имени М.В. Ломоносова исследование двумерных метаматериалов на современном уровне.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Bilotti F., Sevgi L. Metamaterials: Definitions, properties, applications, and FDTD-based modeling and simulation. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, V. 22, Is. 4 p.422–438. 2012.
2. Shamonina E., Solymar L. *Waves in Metamaterials*. Oxf.Uni.Press, 385 p. 2009.
3. Веселаго В.Г. Электродинамика веществ с одновременно отрицательными значениями  $\epsilon$  и  $\mu$ . *УФН*, т. 92, с. 517-522. 1968.
4. Smith D. R., Padilla W., Vier D. C., Nemat-Nasser S. C., Schultz S. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity. *Phys. Rev. Lett.* v. 84, p. 4184-4187. 2000.
5. Wiltshire M. C. K., Pendry J. B., Young I. R., Larkman J., Gildirdale D. J. and Hajnal J. V. Micristructed magnetic materials for radio frequency operation in magnetic resonance imaging (MRI). *Science*, v. 291, p. 849-851. 2001.
6. Sydoruk O., Shamonin M., Radkovskaya A., Zhuromskyy O., Shamonina E., Trautner R., Stevens C. J., Faulkner G., Edwards D. J., Solymar L. J. A mechanism for subwavelength imaging with bi-layered magnetic metamaterials: Theory and experiment. *Appl. Phys.* v. 101, p. 073903-1-8. 2007.
7. Schurig D., Mock J. J., Justice B. J., Cummer S.A., Pendry J. B., Starr A. F., Smith D. R. Metamaterial Electromagnetic Cloak at Microwave Frequencies. *Science*, v. 314, p. 977. 2006.
8. Stevens C. Magnetoinductive waves and wireless power transfer. *IEEE Trans. Power Electron*, v. 30, p. 6182-6190. 2014.

9. Shamonina E. Slow waves in magnetic metamaterials: history, fundamentals and applications. *Phys. Stat. Sol. B*, v. 245, p. 1471–1482. 2008.
10. Вольян О. Д., Кузьмичев А. Ю., Отрицательное преломление волн. Введение в физику и технологию электромагнитных метаматериалов. Аверс, 360 стр. 2012.
11. Syms R. R. A., Floume T., Young I. R., Solymar L., Rea M. Flexible magnetoinductive ring MRI detector: Design for invariant nearest-neighbour coupling. *Metamaterials*, v. 4, p. 1–14. 2010.
12. Sydoruk O., Zhuromskiy O., Radkovskaya A., Shamonina E. Solymar L. Magnetoinductive waves I: Theory, Chapter 36 in *Handbook on Artificial Materials*, F. Capolino (Ed), CRS Press 2009. 36 pp. 2009.
13. Sydoruk O., Zhuromskiy O., Radkovskaya A., Shamonina E. Solymar L. Magnetoinductive waves II: Applications, Chapter 14 in *Handbook on Artificial Materials*, F. Capolino (Ed), CRS Press 2009. 22 pp. 2009.
14. Shamonina E., Kalinin V. A., Ringhofer K. H., Solymar L. Magneto-inductive waveguide. *Electron. Lett.* v.38, p. 371-372. 2002.
15. Wiltsher M. C. K., Shamonina E., Young I. R., Solymar L. Experimental and theoretical study of magneto-inductive waves supported by one-dimensional arrays of ‘Swiss Rolls’. *J.Appl.Phys.*, v. 95, p. 4488-4493. 2003.
16. Syms R. R. A., Shamonina E., Solymar L., Positive and negative refraction of magnetoinductive waves in two dimensions. *Eur.Phys.J. B*, v. 46, p. 301-308. 2005.
17. Zhuromskyy O., Shamonina E., Solymar L. 2D metamaterials with hexagonal structure: spatial resonances and near field imaging. *Opt. Exp.*, v.13, p. 9299-9309. 2005.
18. Сайт Rohde&Schwarz. URL: <https://www.rohde-schwarz.com>

19. Radkovskaya A., Tatartschuk E., Sydoruk O., Shamonina E., Stevens C. J., Edwards D. J., Solymar L. Surface waves at an interface of two metamaterial structures with interelement coupling. *Phys. Rev. B*, v. 82, p. 045430-1-9, 2010.
20. Кирюшечкина С. В. Теоретическое, численное и экспериментальное исследование особенностей взаимодействия элементов магнитных метаматериалов в ГГц диапазоне. Дипломная работа. Физический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова. Москва. 44 стр. 2016.
21. Сайт Purelogic R&D. URL: <http://www.purelogic.ru>
22. Radkovskaya A. A., Prudnikov V. N., Kotelnikova O. A., Palvanova G. S., Prokopjeva V. V., Andreenko A. S., Zakharov P. N., Korolev A. F., Sukhorukov A. P. Experimental Study of Phonon-Like Dispersion in Biatomic Magnetic Metamaterials in the MHz Range. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics*, v. 78, No. 2, p. 136–138. 2014.
23. Radkovskaya A., Sydoruk O., Shamonin M., Shamonina E., Stevens C. J., Faulkner G., Edwards D. J., Solymar L. Experimental study of a bi-periodic magnetoinductive waveguide: comparison with theory. *IET Microw. Antennas Propag.*, v. 1, p. 80–83. 2007.
24. URL:<http://www.rfcafe.com/references/electrical/dielectric-constants-strengths.htm>.
25. Пальванова Г.С. Фононоподобная дисперсия в дискретных магнитных метаматериалах в МГц диапазоне. Дипломная работа. Физический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова. Москва. 50 стр. 2014.



## БЛАГОДАРНОСТИ

В первую очередь, автор выражает благодарность научному руководителю доценту Анне Александровне Радковской за профессиональное руководство, искренний интерес к научным исследованиям, заботливое отношение к своим студентам и неоценимую помощь и поддержку.

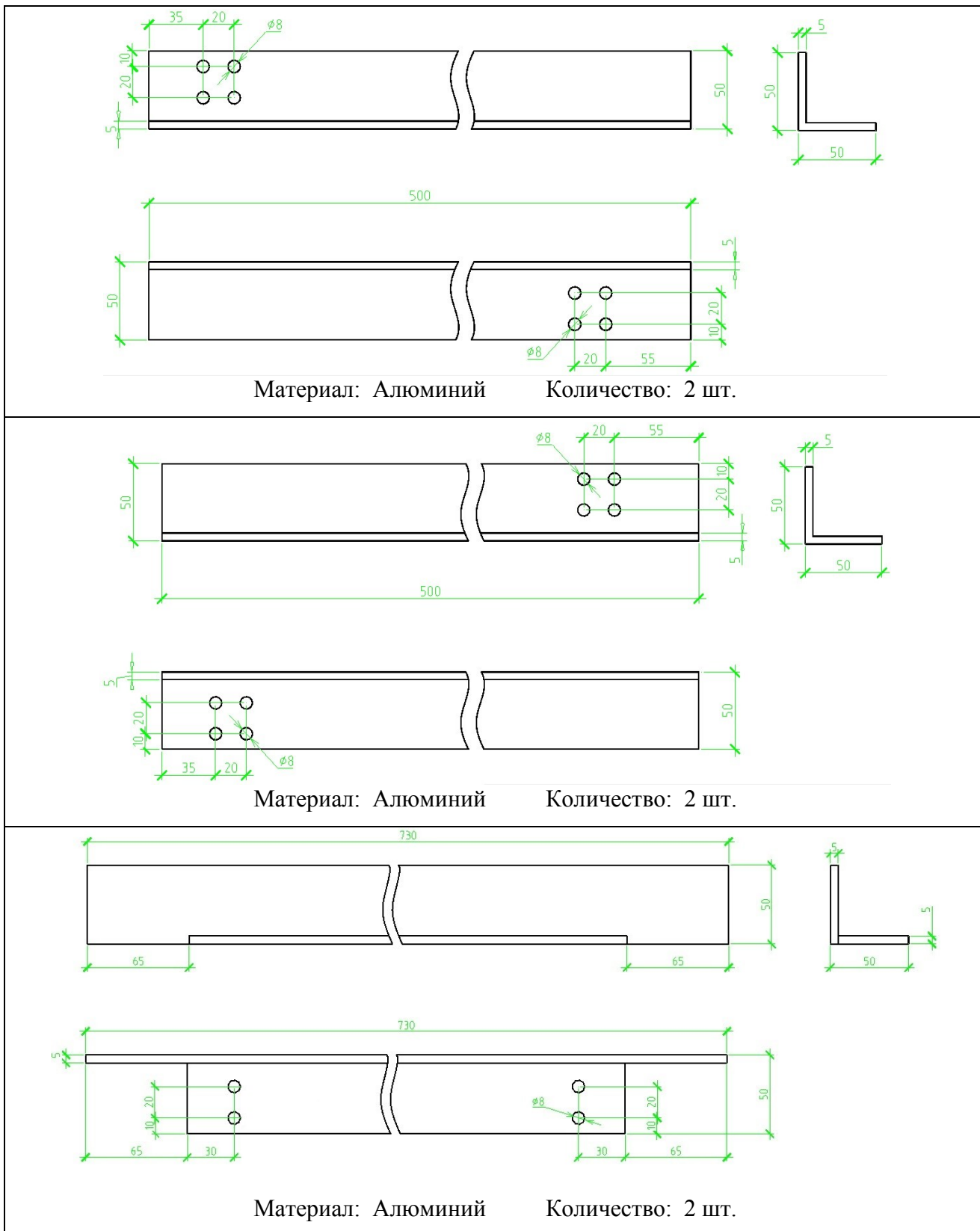
Особую благодарность автор выражает профессору Валерию Николаевичу Прудникову за непосредственное участие в разработке и реализации данного проекта, обеспечение материалами и инструментами, за ценные советы и огромную помощь в решении различных трудностей, постоянно возникавших в процессе сборки экспериментальной установки, а также за рецензирование работы.

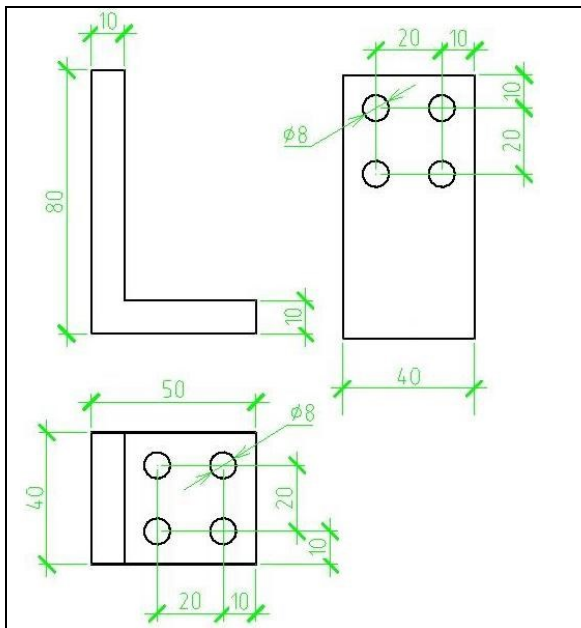
Вместе с этим хочется поблагодарить всех сотрудников кафедры магнетизма за профессиональное обучение в благоприятной атмосфере и отметить участие магистра Петрова Павла и аспиранта Родионова Игоря, которые никогда не отказывались помочь в сложной ситуации.

Автор так же признателен сотрудникам кафедры фотоники и физики микроволн доц. А.Ф.Королеву, доц. П.Н.Захарову и А.А. Белову за возможность проведения экспериментальных исследований с помощью векторного анализатора спектра фирмы Rohde&Schwarz.

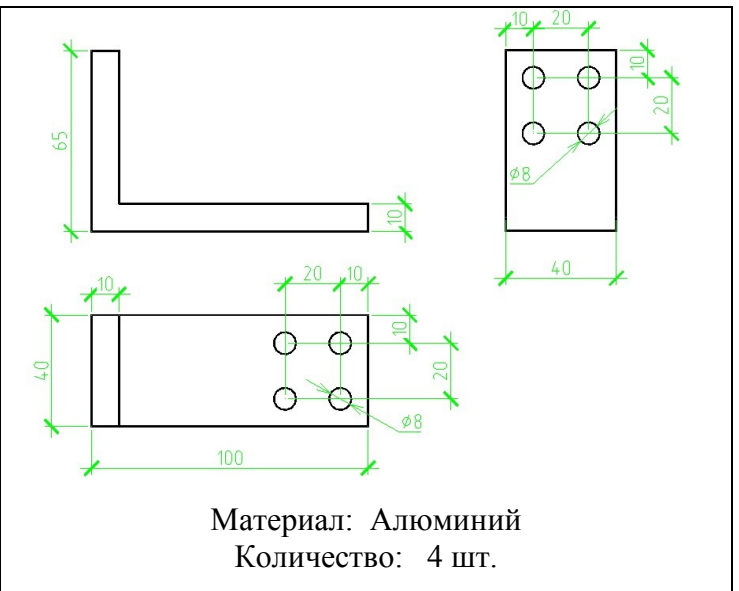
## ПРИЛОЖЕНИЕ 1

В данном приложении приведена часть чертежей деталей, использованных при сборке установки, изготовленных в мастерской физического факультета.

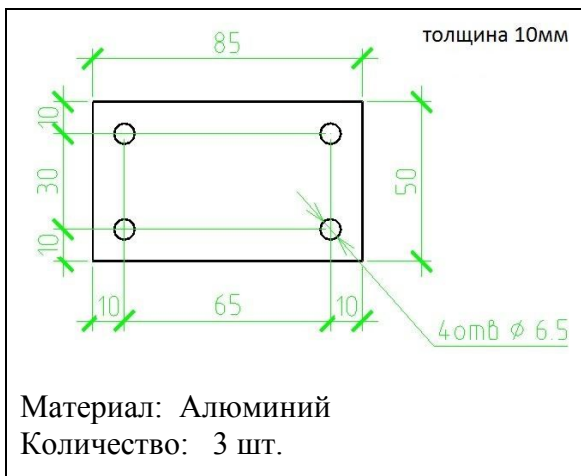




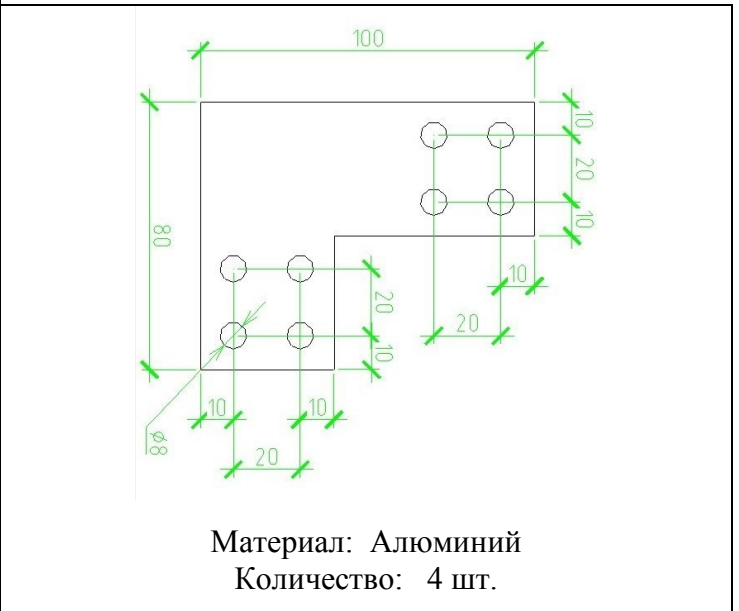
Материал: Алюминий  
Количество: 4 шт.



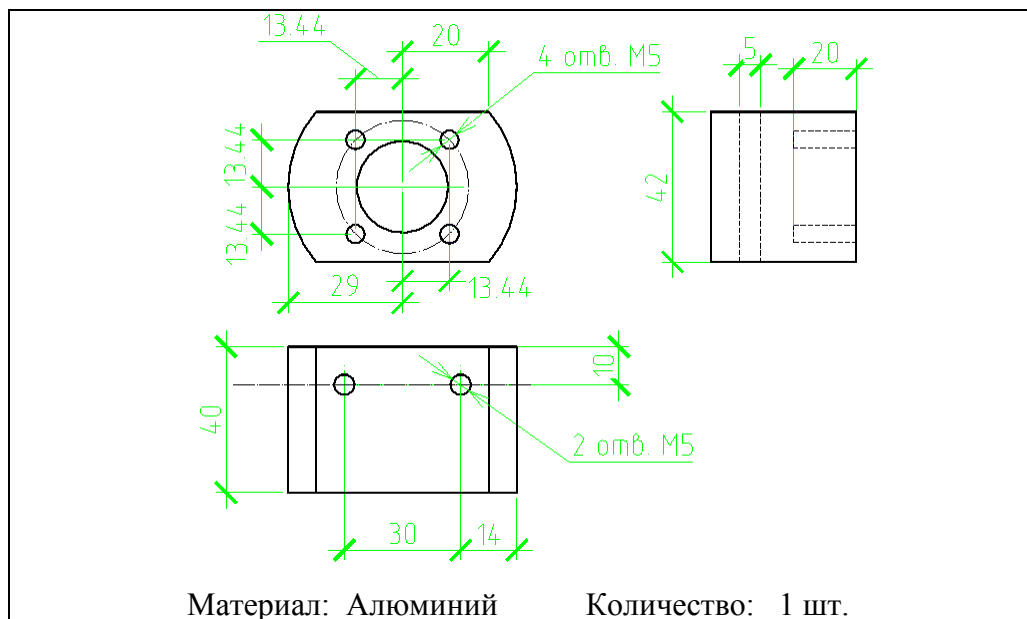
Материал: Алюминий  
Количество: 4 шт.



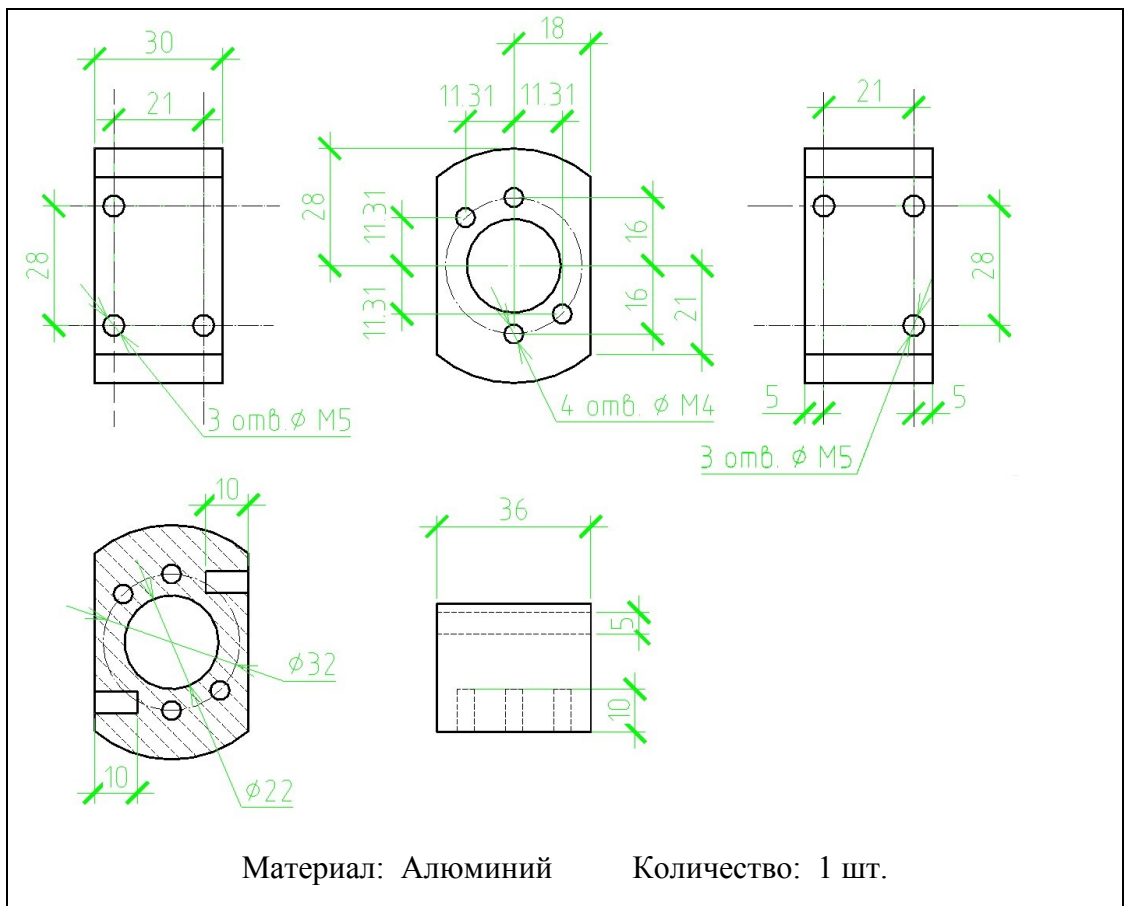
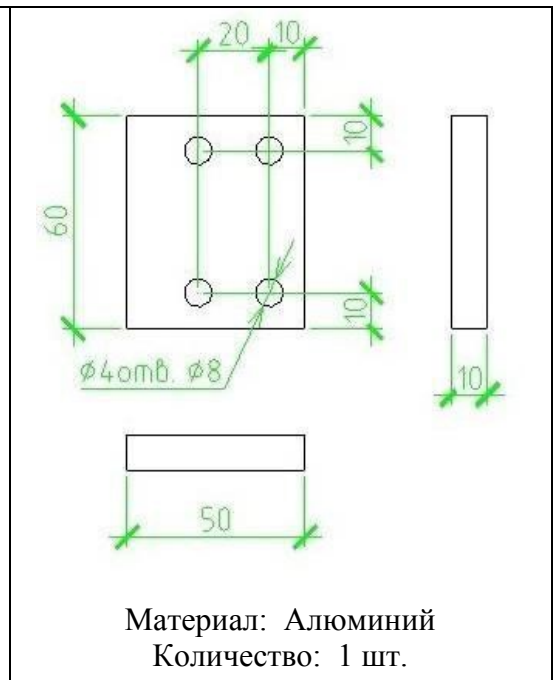
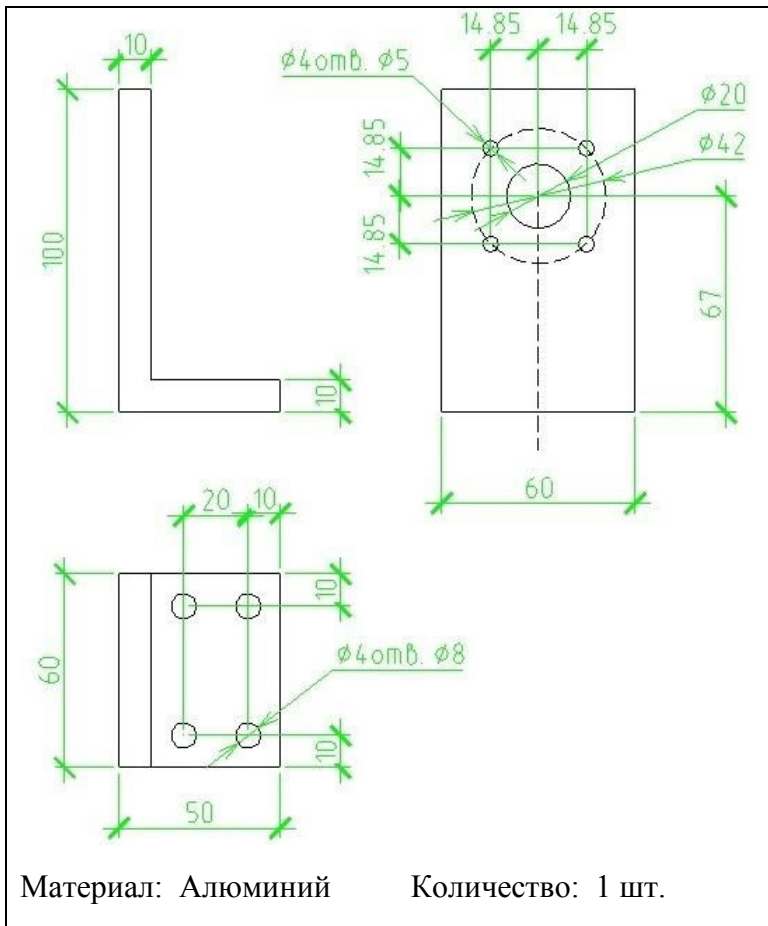
Материал: Алюминий  
Количество: 3 шт.

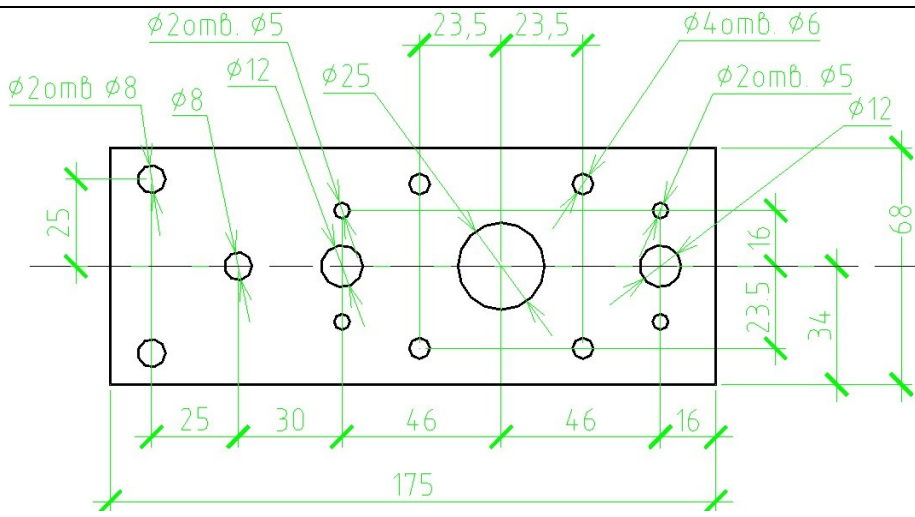


Материал: Алюминий  
Количество: 4 шт.



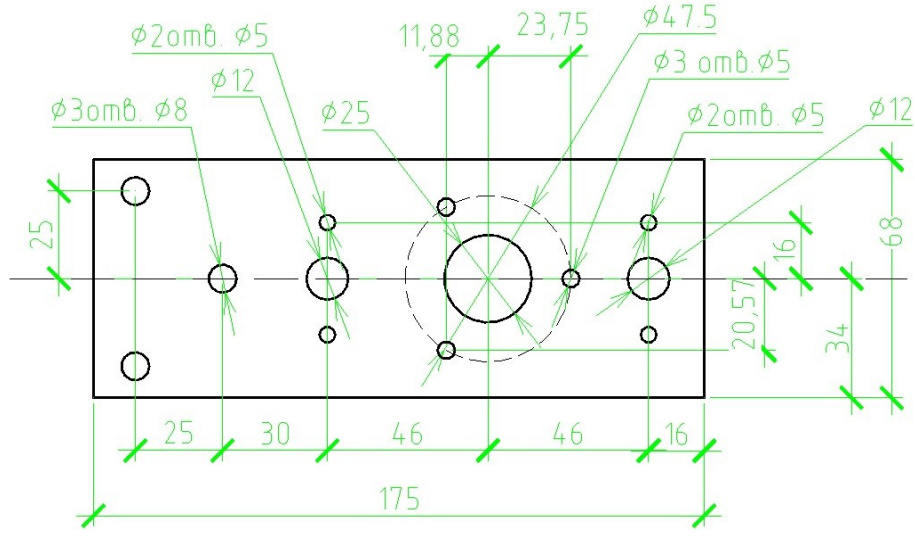
Материал: Алюминий  
Количество: 1 шт.





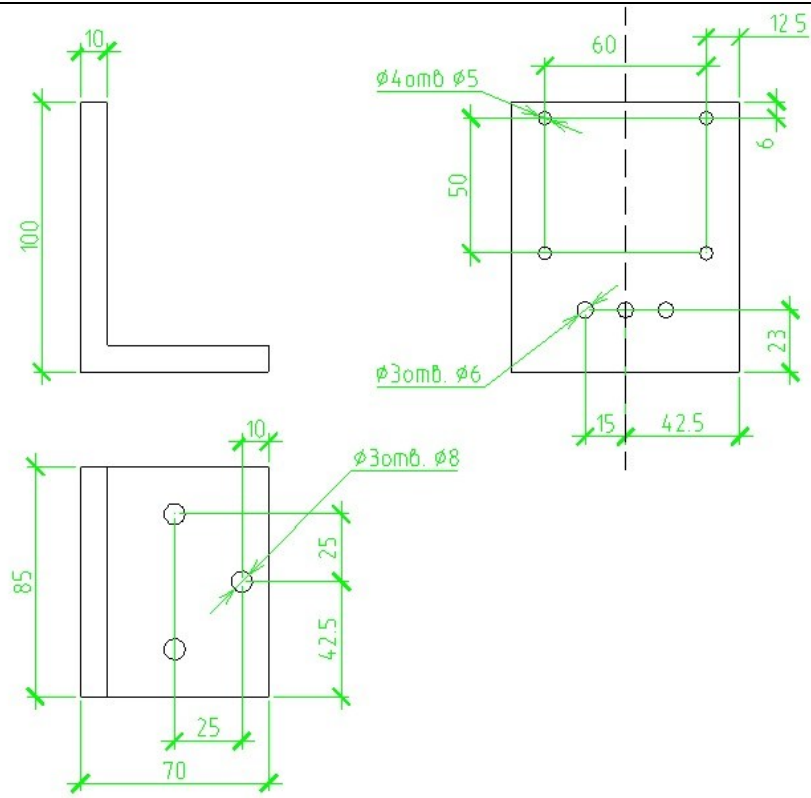
Материал:  
Алюминий

Количество:  
1 шт.



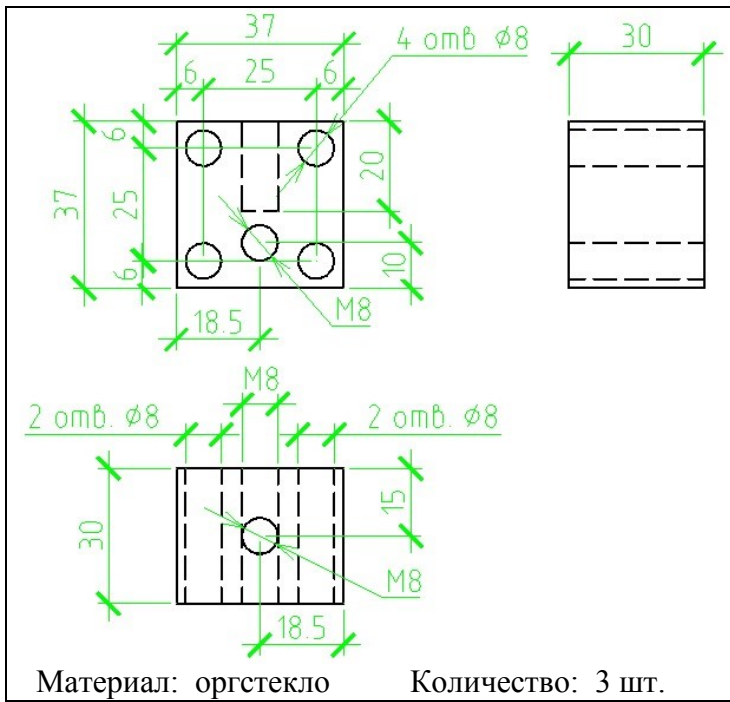
Материал:  
Алюминий

Количество:  
1 шт.

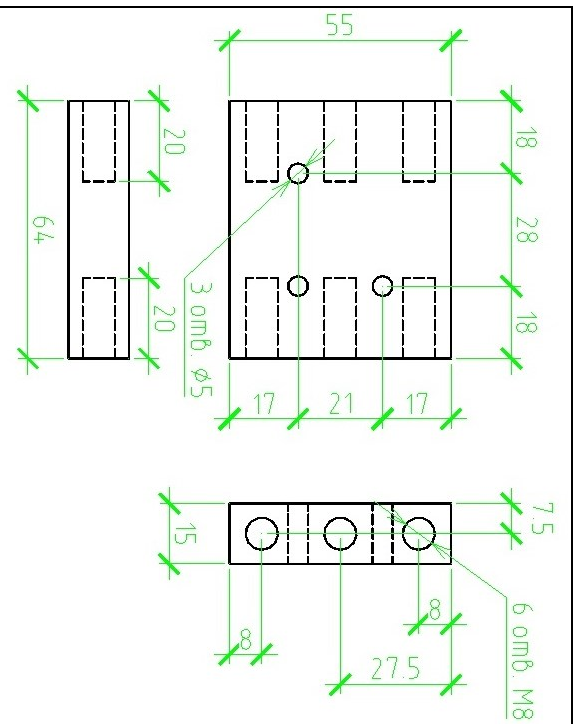


Материал:  
Алюминий

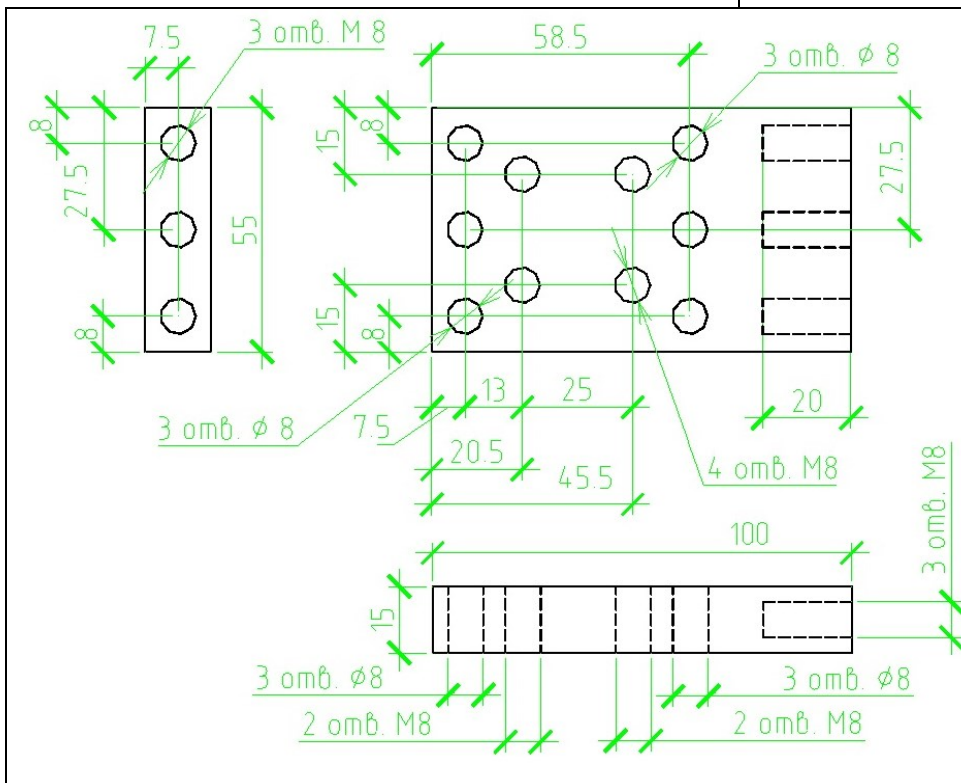
Количество:  
2 шт.



Материал: оргстекло      Количество: 3 шт.

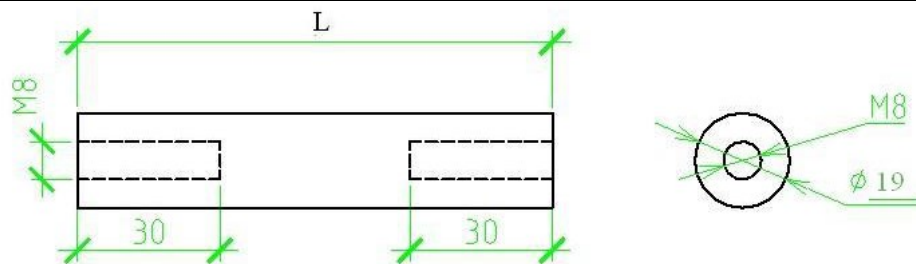


Материал: оргстекло  
Количество: 2 шт.



Материал:  
оргстекло

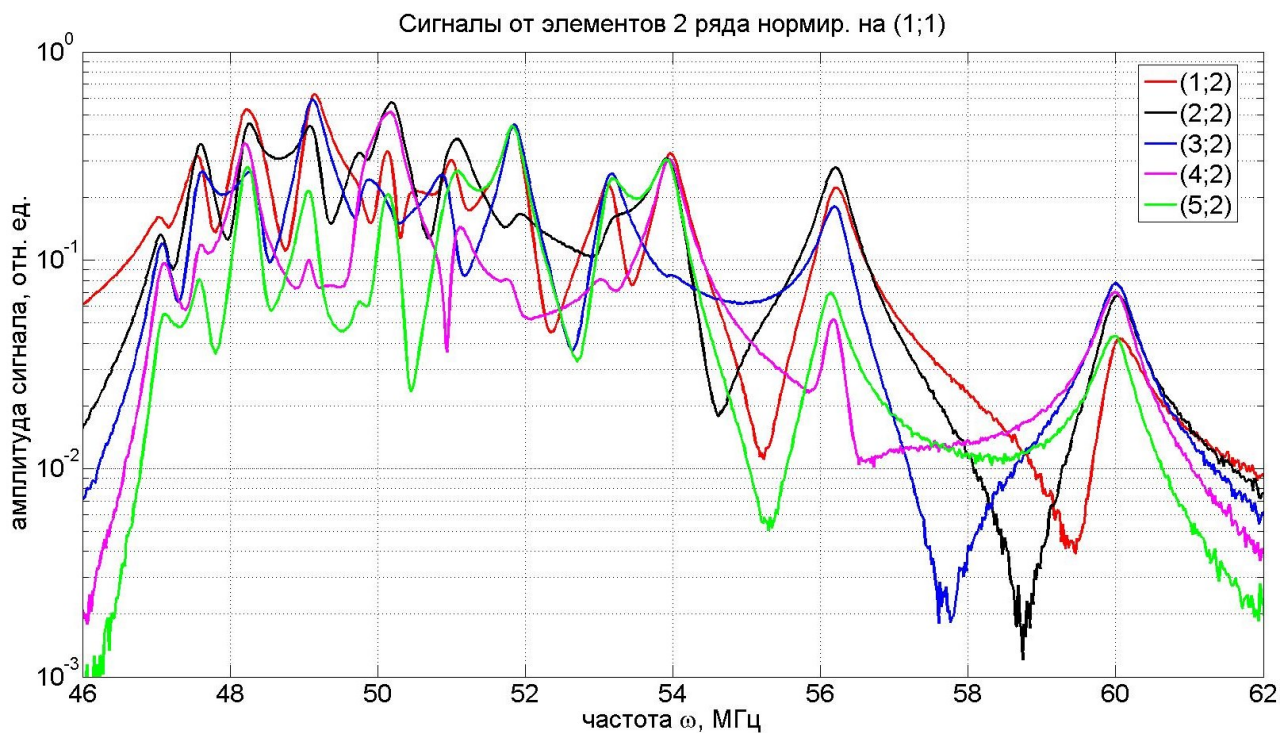
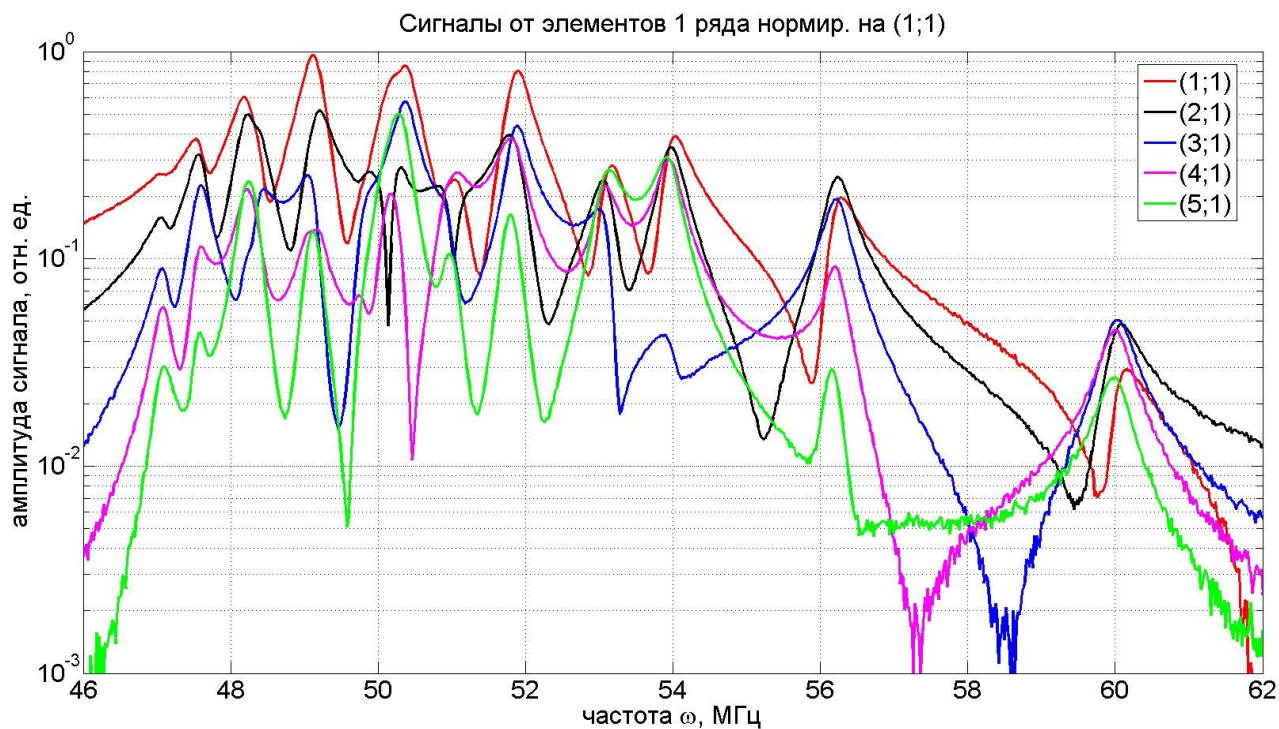
Количество:  
2 шт.

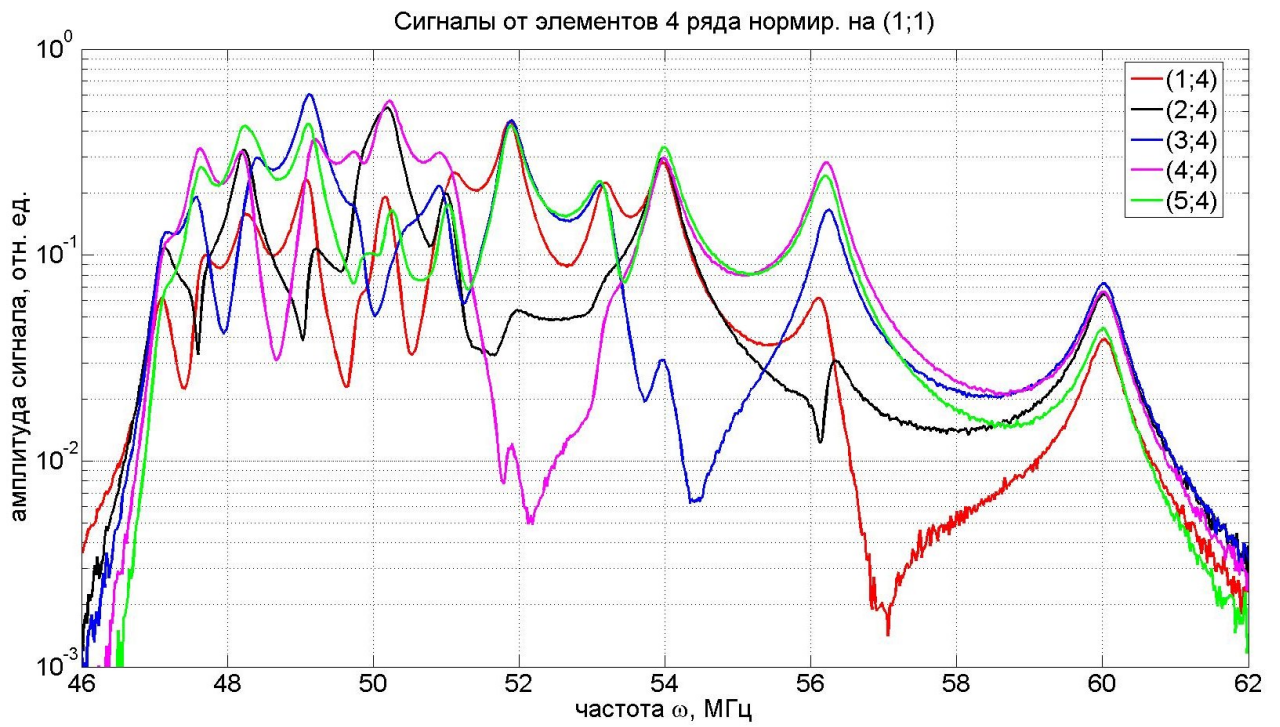
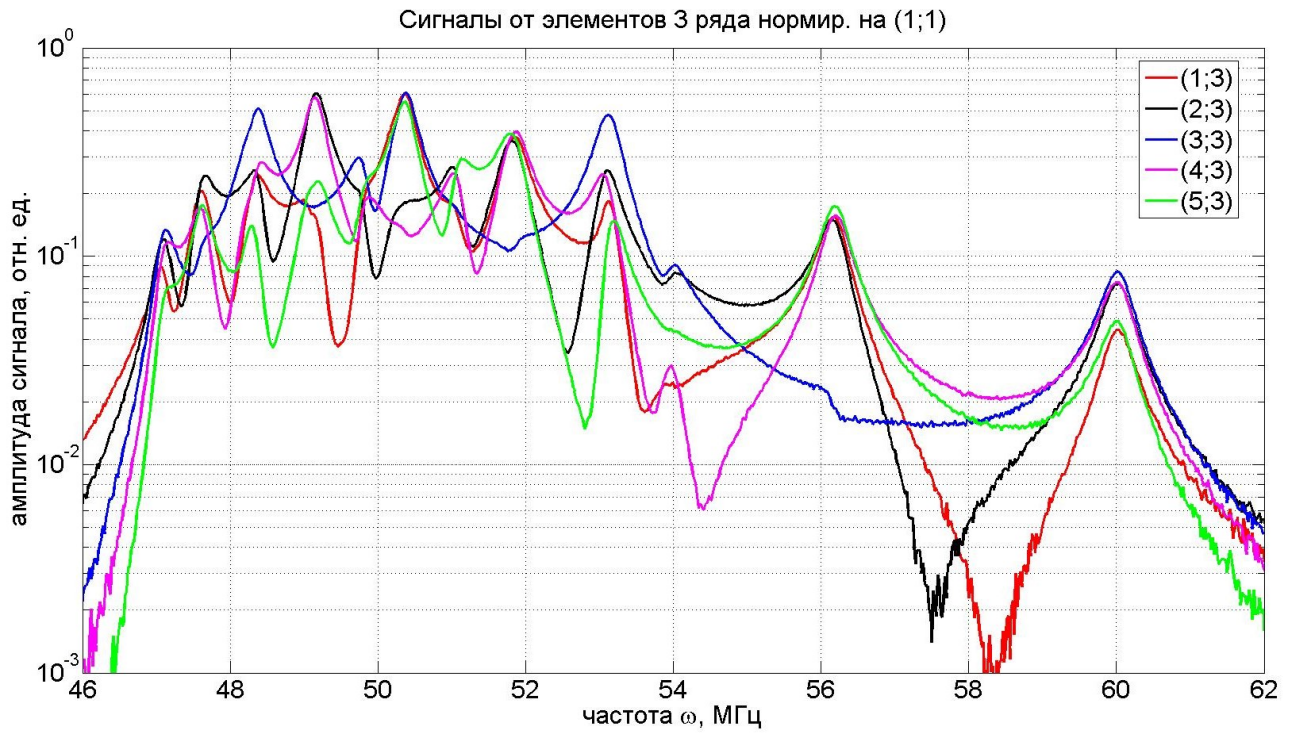


Материал: текстолит      Количество: 2шт. L=100, 1шт. L=150, 1шт. L=200.

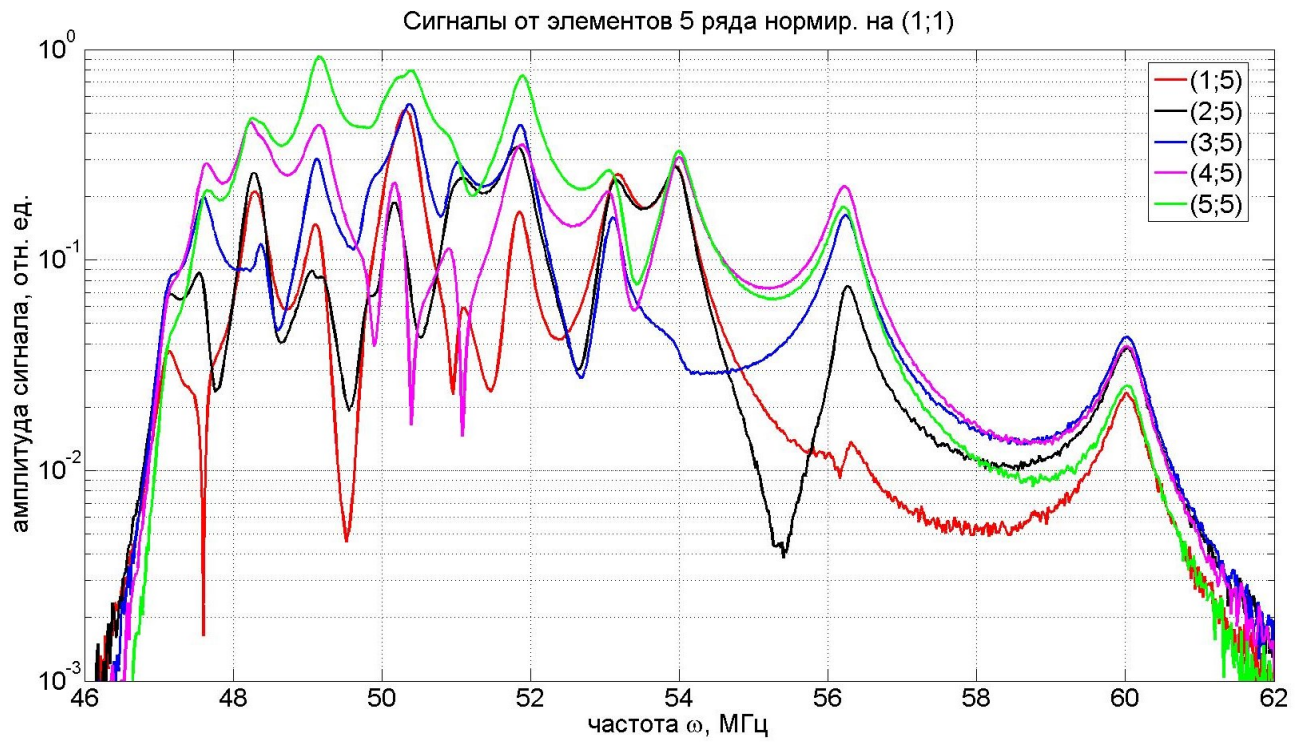
## ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Ниже приведены зависимости амплитуд сигнала от частоты возбуждения для различных элементов плоского метаматериала  $5 \times 5$  с учетом шума и нормированные на максимум сигнала элемента (1;1). На графиках сигналы сгруппированы по 5.









### ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Ниже приведён код программ написанных в пакете MatLab, использованные для считывания, обработки и визуализации экспериментальных данных, полученных с векторного анализатора спектра,

а также код программы для аналитического расчета возбуждения метаматериала.

```
1  %-----
2  %-----
3  %СЧИТЫВАЕТ ДАННЫЕ ИЗ ФАЙЛОВ И СТРОИТ СИГНАЛЫ ОТ ЭЛЕМЕНТОВ ОТДЕЛЬНО
4  %-----
5  %-----
6
7  for ii=1:5
8      for jj=1:5
9
10         file1 = ['data_an_',num2str(ii),'_',num2str(jj),'_'];
11         [I0, f, s] = prac_currents_xy(file1);
12         for nn=1:1601
13             mysignal(ii,jj,nn)=I0(nn);
14             myfreq2(ii,jj,nn)=f(nn);
15         end
16
17         %строит сигналы от всех элементов отдельно
18         figure;
19         semilogy(f,abs(I0)./max(abs(I0)),'k');
20         hold on;
21         grid on;
22         title([file1,' Сигнал элемента']);
23         xlabel('частота \omega, МГц');
24         ylabel('амплитуда сигнала, отн. ед.');
```

```
25
26         file0 = ['data_an_0_',num2str(ii),'_',num2str(jj),'_'];
27         [I0, f, s] = prac_currents_xy(file0);
28         for nn=1:1601
29             myback(ii,jj,nn)=I0(nn);
30             myfreq(ii,jj,nn)=f(nn);
31         end
32     end
33 end
```

```

1  %-----
2  %-----
3  %все сигналы на одном графике нормированные на (1;1) с учетом шума
4  %-----
5  %-----
6
7  col=['rkbmg'],pp=1,kk=1;
8  figure;
9  semilogy(f,squeeze(abs(mysignal(pp,kk,:))-abs(мыback(pp,kk,:)))./
10 max(abs(mysignal(1,1,:))),col(pp))
11 hold on
12 for kk=1:1:5
13     for pp=1:1:5
14         if (kk+pp)==2
15             pp=2;
16         end
17         semilogy(f,squeeze(abs(mysignal(pp,kk,:))-abs(мыback(pp,kk,:)))./
18 max(abs(mysignal(1,1,:))),col(pp))
19     end
20 end
21 grid on
22 title(['Сигналы всех элементов нормир. на (1;1)']);
23 xlabel('частота \omega, МГц'); ylabel('амплитуда сигнала, отн. ед. ');
24 axis([ 46 62 1e-3 1 ])
25
26 %-----
27 %-----
28 %сигналы от элементов одного ряда нормированные на (1;1)с учетом шума
29 %-----
30 %-----
31
32 for kk=1:1:5
33     pp=1
34     figure;
35     semilogy(f,squeeze(abs(mysignal(pp,kk,:))-abs(мыback(pp,kk,:)))./
36 max(abs(mysignal(1,1,:))),col(pp))
37     hold on
38     for pp=2:1:5
39         semilogy(f,squeeze(abs(mysignal(pp,kk,:))-abs(мыback(pp,kk,:)))./
40 max(abs(mysignal(1,1,:))),col(pp))
41     end
42     grid on
43     title(['Сигналы от элементов ',num2str(kk),' ряда нормир. на (1;1)']);
44     xlabel('частота \omega, МГц'); ylabel('амплитуда сигнала, отн. ед. ');
45     axis([ 46 62 1e-3 1 ])
46 end
47

```

```

1  %-----
2  %-----
3  %СТРОИТ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТОКА НА КОНКРЕТНЫХ ЧАСТОТАХ
4  %-----
5  %-----
6
7  pp=1;
8  chast= [ 47.72 48.32 49.2 49.56 50.14 50.26 50.46 50.94 51.08 51.34 51.88
9          52.36 53.1 53.28 53.88 53.4 54.34 54.62 55.3 56.26 56.3 59.96 ]
10
11  for pp=1:1:22
12      figure;
13      ii=int16( 1 + (( double( chast(pp) ) - 40)/0.02) );
14      SIGNORM=mysignal(:, :, ii)-myback(:, :, ii);
15      contourf(log10(abs(SIGNORM) ./max(max((abs(SIGNORM))))), 51); shading flat;
16      colorbar
17      caxis([-2 0])
18      xlabel('номер элемента X'); ylabel('номер элемента Y');
19      title(['частота \omega=', num2str(f(ii)), ' МГц'])
20  end
21
22  %-----
23  %-----
24  %СТРОИТ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТОКА В ОПРЕД. ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ С ПАУЗОЙ ПО ВРЕМЕНИ
25  %-----
26  %-----
27
28  close all
29  figure;
30  ii=1;
31  for ii=400:1:500;
32      SIGNORM=mysignal(:, :, ii)-myback(:, :, ii);
33      contourf(log10(abs(SIGNORM) ./max(max((abs(SIGNORM))))), 51); shading flat;
34      colorbar
35      caxis([-2 0])
36  title(['частота \omega=', num2str(f(ii)), 'МГц'])
37      if ii==450
38          pause
39      else
40          pause(0.01)
41      end
42  end

```

```

1  % -----
2  % -----
3  % Аналитическое распределение токов в структуре
4  % -----
5  % -----
6  clear all
7
8  omega0=50.89*10^6 ;
9  omega=40*10^6 ;
10 C=(340*10^(-12)) ;
11 R=0.41 ;
12 %R=sqrt((C^2*omega0^2)^(-1))/90;
13 M=-0.065/(C*omega0^2);
14 delta_omega=0.02*10^6;
15 omega_nach=omega;
16
17 for kk=1:1:1000
18     kk
19     omega=omega+delta_omega;
20     Z0=sqrt(-1)*((omega/omega0)^2-1)/(omega*C)+R;
21     D=omega*M*sqrt(-1);
22     for x=1:25
23         for y=1:25
24             Z(x,y)=0;
25         end
26     end
27
28     for x=1:25
29         Z(x,x)=Z0;
30         if(x<=20)
31             Z(x+5,x)=D;
32             Z(x,x+5)=D;
33         end
34         if(rem(x,5)~=0)
35             Z(x+1,x)=D;
36             Z(x,x+1)=D;
37         end
38     end
39

```

```

39
40     Z=Z^(-1);
41     freq(kk)=omega;
42     for y=1:5
43         for x=1:5
44             signal(x,y,kk)=Z(1,x+(y-1)*5);
45         end
46     end
47
48 end
49
50
51 figure;
52 for kk=790:1:810;
53     kk
54     contourf(log10(abs(signal(:,:,kk)))...
55     ./max(max((abs(signal(:,:,kk))))),51); shading flat;
56     colorbar
57     caxis([-2 0])
58     title(['частота \omega=' ,num2str(freq(kk)/10^6),' МГц'])
59     xlabel('номер элемента X'); ylabel('номер элемента Y');
60     pause
61 end

```

В качестве численных значений коэффициента взаимодействия выбрано значение близкое к данным из литературы [23]  $\kappa=-0.13$  с учетом измененной за счет впаянных конденсаторов формы колец.

В качестве величины сопротивления выбрано значение  $R=0.41$  Ом. Это значение близко к среднему между измеренным значением  $R=0.1$  Ом и значением, полученным из формулы для добротности  $RLC$ -контура  $Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$ . Выражая индуктивность  $L$  через измеренное значение резонансной частоты  $\omega_0$ , получаем  $R = \frac{1}{Q\omega_0 C} = 0.64$  Ом, где  $C=330$  пФ - емкость конденсатора, впаянного в расщепленное кольцо.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 4

Полученные экспериментально распределения токов в структуре для различных частот возбуждения, демонстрирующие распространение МИ волн.

