

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Физический факультет
Кафедра общей физики

Грибанов Денис Сергеевич

КУРСОВАЯ РАБОТА

Исследование структуры полей в запредельном прямоугольном волноводе, нагруженным поперечным штырём.

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа 20307

_____ к.т.н. Черноусов Ю.Д. _____

Оценка научного руководителя

« _____ » _____ 20__ г.

Преподаватель практикума:

_____ д.ф.-м.н. Терещенко О.Е. _____

Оценка преподавателя практикума

« _____ » _____ 20__ г.

Куратор практикума:

_____ к.т.н. Астрелин В.Т. _____

Итоговая оценка

« _____ » _____ 20__ г.

Новосибирск, 2021 г.

Оглавление

Аннотация.....	3
Введение и постановка задачи.....	4
Теоретическая часть.....	5
Описание экспериментальной установки.....	7
Компьютерное моделирование.....	10
Результаты эксперимента.....	12
Оценка ошибок.....	15
Анализ результатов.....	15
Выводы.....	16
Благодарности.....	17
Источники информации.....	18

Аннотация

Существует частота, называемая частотой отсечки ($\nu_{\text{отс.}}$), ниже которой распространение в волноводе моды с определёнными индексами невозможно. Основной целью данной работы является изучение структуры поля стоячей H_{10} -волны в открытом резонаторе, который представляет из себя открытый с обеих концов отрезок прямоугольного волновода с установленным в центре перпендикулярно широкой стенке поперечным штырём. Ниже частоты отсечки волновода волна в нем не распространяется и электромагнитное поле концентрируется вблизи штыря, в результате на некоторой частоте реализуется резонансный режим «запертой» H_{10} -моды.

В ходе работы изучалась структура поля низшей моды различных волноведущих СВЧ устройств – прямоугольного волновода, нагруженного на согласованную нагрузку, закороченного прямоугольного волновода, резонатора, выполненного из отрезка прямоугольного волновода, коаксиальной линии. После получения соответствующего опыта в конечном итоге была расчетным и экспериментальным путем изучена структура поля в открытом резонаторе – отрезке прямоугольного волновода, нагруженном штырем.

Для изучения структуры поля генератор СВЧ-сигнала подключался к изучаемым устройствам. Внутри устройств помещались измерительные зонды (центральный проводящий штырь коаксиальной линии для изучения электрической компоненты поля и петля для изучения магнитной компоненты поля). В установке были предусмотрены механизмы для перемещения и позиционирования зондов, что позволяло судить об относительной величине электрических и магнитных составляющих поля в данной точке изучаемых устройств. В ходе работы также активно применялось специальное программное обеспечение для моделирования поведения электромагнитных полей «CST Studio Suite 2021» (студенческая версия).

В ходе измерений частота входящего СВЧ-сигнала менялась и снимались зависимости величин поступающих с зондов сигналов от этой частоты (амплитудно-частотные характеристики или АЧХ). В результате определялись резонансные частоты устройств и на выбранной частоте исследовалась структура поля. Результаты хорошо согласуются с теоретическими моделями.

Введение и постановка задачи

«Электромагнитная волна — это распространяющееся в пространстве электромагнитное поле, в котором напряженность электрического (\mathbf{E}) и индукция магнитного (\mathbf{B}) полей изменяются по периодическому закону.» [пункт 3. Раздел «Источники информации»] «ВОЛНОВОД — это канал в неоднородной среде естественного или искусственного происхождения, удерживающий распространяющиеся вдоль него волны от дифракционного распыления.» [пункт 2. Раздел «Источники информации»].

Стоит отметить, что волновод допускает внутри себя существования векторов \mathbf{E} и \mathbf{H} , только в определённых плоскостях. Причём будем рассматривать только те случаи, где плоскости, в которых находятся \mathbf{E} и \mathbf{H} не меняется во времени. Можно разбить волны на 4 класса по признаку наличия в них или отсутствия поперечных компонент \mathbf{E} и \mathbf{H} (см. рис. 1)

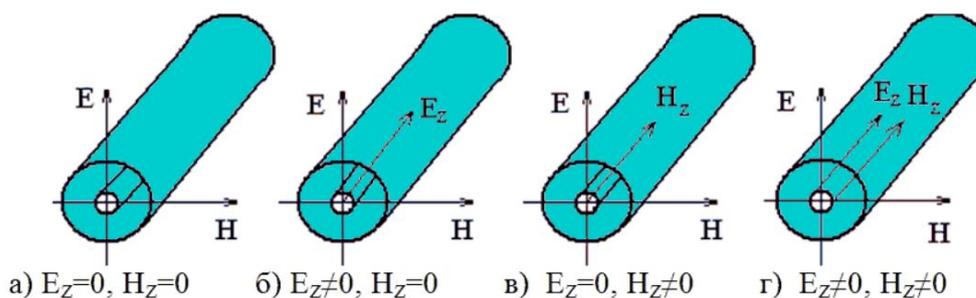


Рис. 1. Классы электромагнитных полей в волноводе

В данной работе исследовались прямоугольный волновод и коаксиальная линия. Волноводы для электромагнитных волн изготавливаются из проводящих стенок, которые экранируют электромагнитные поля, вызывая на **стенках** электрический ток.

Например, на рис. 2 показана картина токов, соответствующая прохождению в прямоугольном волноводе H_{10} волны с продольной магнитной компонентой (H_z) и поперечной электрической (E_y). Поперечное переменное электрическое поле вызывает на стенках электрические токи, а они в свою очередь приводят к появлению переменной продольной магнитной компоненты, и обратно. В данной работе изучалась структура поля именно такой волны. По рис. 2 видно, что токи начинаются и заканчиваются только в определённых точках в верхней и нижней стенках, при этом не замыкаются. Кроме того, все эти точки расположены вдоль образующей волновода на равных расстояниях от боковых стенок. Поэтому мы можем провести

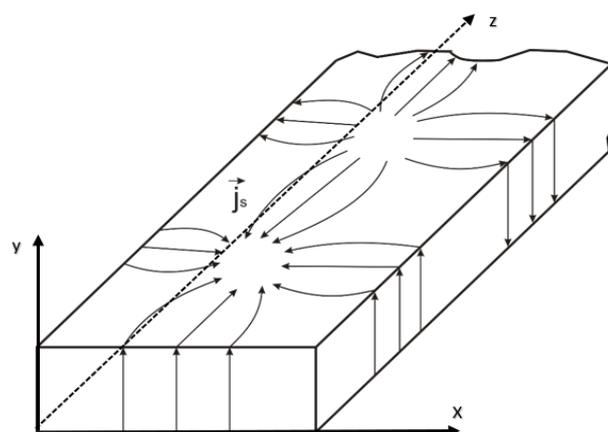


Рис.2 Картина токов в прямоугольном закрытом волноводе, при прохождении через него волны H_{10} .

вдоль образующей продольный паз, который не приведёт к разрыву токов, но позволит запускать передвижные зонды внутрь волновода.

При соблюдении определённых условий – направлении волн навстречу друг другу в закрытом волноводе можно создать стоячую электромагнитную волну.

Изучение структуры полей электромагнитных волн в различных волноводах и является целью этой работы.

Теоретическая часть

Выпишем систему уравнений Максвелла для переменного магнитного поля в среде с плотностью свободных зарядов ρ , диэлектрической проницаемостью ε , магнитной проницаемостью μ , а также при отсутствии токов ($\mathbf{j} = 0$). Такая система уравнений описывает поле электромагнитной волны в данной среде (см. уравнения 1-5).

Для описания электромагнитной волны в волноводе нельзя пренебрегать током \mathbf{j} по стенкам

волновода, поэтому уравнение (4) должно остаться в виде $\text{rot}\vec{H} = \frac{4\pi}{c}\vec{j} + \frac{1}{c}\frac{\partial\vec{D}}{\partial t}$.

Так как в данной работе все эксперименты проводились в воздухе, то можно положить, что $\varepsilon = 1$, $\mu = 1$.

$$\begin{cases} \text{div}\vec{E} = 0 \\ \text{div}\vec{H} = 0 \\ \text{rot}\vec{E} = -\frac{1}{c}\frac{\partial\vec{B}}{\partial t} \\ \text{rot}\vec{H} = \frac{4\pi}{c}\vec{j} + \frac{1}{c}\frac{\partial\vec{D}}{\partial t} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \text{div}\vec{E} = 0 \\ \text{div}\vec{H} = 0 \\ \text{rot}\vec{E} = -\frac{\mu}{c}\frac{\partial\vec{H}}{\partial t} \\ \text{rot}\vec{H} = \frac{\varepsilon}{c}\frac{\partial\vec{E}}{\partial t} \end{cases} \begin{matrix} (1) \\ (2) \\ (3) \\ (4) \end{matrix}$$

$$\text{rot rot}\vec{E} = \text{grad}(\text{div}\vec{E}) - \Delta\vec{E} = -\Delta\vec{E}$$

$$(3) \Rightarrow \Delta\vec{E} = \frac{\mu}{c}\frac{\partial}{\partial t}\text{rot}\vec{H}$$

$$(4) \Rightarrow \Delta\vec{E} = \frac{\mu\varepsilon}{c^2}\left(\frac{\partial^2}{\partial t^2}\vec{E}\right), \text{div}\vec{E} = 0$$

$$\text{Аналогично получаем: } \Delta\vec{H} = \frac{\mu\varepsilon}{c^2}\left(\frac{\partial^2}{\partial t^2}\vec{H}\right), \text{div}\vec{H} = 0$$

Последние два полученных уравнения — это векторные волновые уравнения в свободном пространстве.

Решение этого уравнения можно найти в виде $\hat{E} = E_0 \exp[j(\omega t - \vec{k}\vec{r} + \phi)]$ и $\hat{H} = H_0 \exp[j(\omega t - \vec{k}\vec{r} + \phi)]$ (уравнение бегущей волны), где ω - угловая частота, $|\vec{k}| = 2\pi/\lambda$ - волновой вектор, направленный вдоль распространения волны. Или для случая, когда ось z направлена вдоль прямой распространения волны: $\hat{E} = E_0 \exp[j(\omega t - kz + \phi)]$ и $\hat{H} = H_0 \exp[j(\omega t - kz + \phi)]$.

Подключим генератор к началу волновода (в точку $z=0$). Если на выход волновода (точка z_0) поставить нагрузку с комплексным коэффициентом отражения $\Gamma = |\Gamma| \exp(j\psi)$ (где $|\Gamma|$ и ψ – соответственно модуль и фаза коэффициента отражения нагрузки), то волна отразится от выхода и в волноводе будут распространяться две волны (падающая a_{in} и отражённая a_{ref}), тогда структура полей внутри будет соответствовать суперпозиции полей двух этих волн.

$$a_{in} = a \exp[j(\omega t - kz)]$$

$$a_{ref} = a\Gamma \exp[j(\omega t - k(z_0 - z))] = a|\Gamma| \exp[j(\omega t - k(2z_0 - z) + \psi)]$$

$$a_{\Sigma} = a_{in} + a_{ref} = a \exp[j(\omega t - kz)] (1 + |\Gamma| \exp[j(\psi + k(2z - 2z_0))])$$

Огибающую функции a_{Σ} называют стоячей волной в линии. Зависимость максимальной амплитуды суммарной волны от координаты z :

$$a_{\Omega} = (1 + |\Gamma| \exp[j(\psi + k(2z - 2z_0))])$$

Из последнего уравнения видно, что поля стоячей волны будут иметь максимумы (минимумы) амплитуд каждые $\lambda_g/2$ (это и будет расстоянием между двумя соседними максимумами и минимумами). Таким образом можно измерять длину волны, измерив расстояние между двумя пиками.

Если создать такую конструкцию, при которой волна сможет поступать в волновод, но не сможет из него выходить, а только отражаться от передней и задней стенки, то в точках максимумов будет происходить заметный рост амплитуды, тогда эти точки будем называть *точками резонанса*. Такую систему будем называть *закрытым резонатором*. Подробнее про то как можно создать такую систему написано ниже в пункте «Описание экспериментальной установки». Также можно заметить, что если длина волновода кратна $\lambda_g/2$, то одна из точек резонанса совпадёт с концом волновода. Частоты, для которых выполнено это условие будем называть *резонансными частотами* данного резонатора. Эти частоты хорошо видны на АЧХ на рис.3.

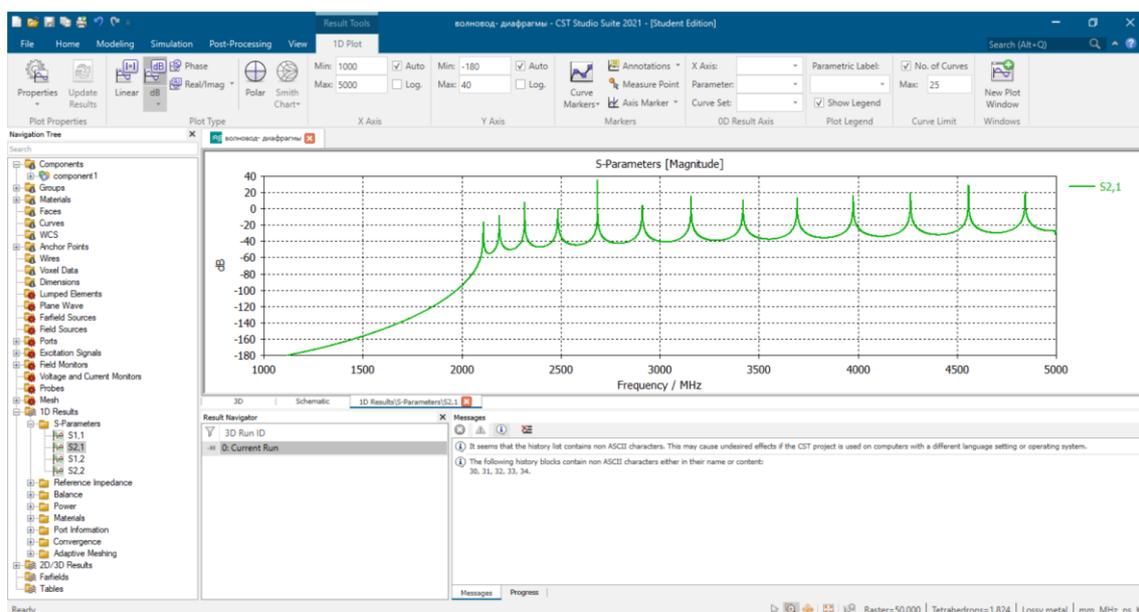


Рис. 3. АЧХ волновода с установленными на концах диафрагмами. График построен с помощью программы CST Studio Suite 2021.

Стоит также отметить, что для длины электромагнитной волны в волноводе для моды H_{10} существует отдельная формула:

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{2a}\right)^2}} \quad (5)$$

Здесь λ_0 - длина волны в свободном пространстве, a - ширина поперечного сечения волновода (в используемом волноводе 72 мм.).

На рис. 2 и из формулы (5) так же хорошо видно, что в волноводе не распространяются частоты с длиной волны ниже определённого критического значения $\lambda_{кр}$, равного удвоенной ширине волновода. Это интуитивно понятно, ведь волны с большей длиной «не помещаются» внутрь.

$$v_{кр} = \frac{\lambda_{кр}}{c} = \frac{2a}{c}$$

Описание экспериментальной установки

1. Общие принципы

В работе использовался анализатор цепей ((NA) Agilent N5230A), с двумя выходами, каждый из которых может работать, как источник СВЧ-волны и как измеритель амплитуд СВЧ сигналов. Структура поля изучалась в различных прямоугольных волноводах, но с одинаковым поперечным сечением (72 X 34 мм), а также в коаксиальной линии. Один из выходов анализатора подключался к входу волновода, а другой либо к зонду (в этом случае на выход волновода ставилась нагрузка, или короткое замыкание), либо к выходу волновода. Соединения производились с помощью отдельных коаксиальных линий.

С помощью зондов из СВЧ тракта извлекался сигнал (часть мощности), который посылался в анализатор цепей (АЦ). Мощность пропорциональна квадрату поля в волноводе. АЦ нормирует измеряемый сигнал на падающую мощность и извлекает квадратный корень. На выход прибор выдаёт относительную амплитуду электрического или магнитного поля.

1. Измерительные зонды

В работе использовалось 2 зонда: зонд-штырь для измерения электрической компоненты и зонд-петля для измерения магнитной компоненты см. рис. 4.

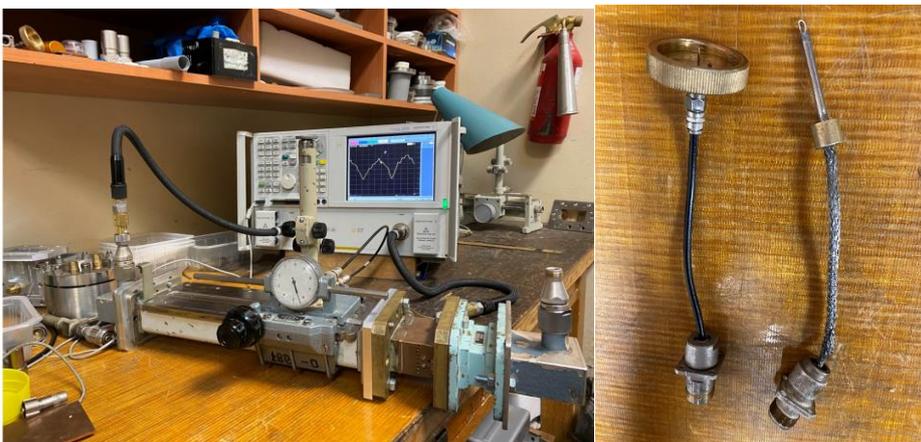


Рис. 4 Измерительные зонды - справа, внешний вид установки - слева.

Для измерения магнитной составляющей электромагнитного поля применялся зонд-петля, для измерения электрической составляющей- зонд-штырь. Переменное электрическое поле, направленное вдоль зонда-штыря, и переменное магнитное поле, проходящее через зонд-петлю, индуцировало на зондах ЭДС.

2. Продольный паз

Наличие электрического поля приводило к протеканию по стенкам волновода переменного электрического тока как показано на рис.2. Как видно из рис. 2 волноводе существует область (находится вдоль образующей волновода), в которой электрический ток равен 0. Поэтому вдоль этой области, был проделан продольный паз, в который и запускались зонды.

3. Измерительная линия

Для максимально точного позиционирования зонда-штыря использовалась *измерительная линия*-отрезок волновода с передвижной кареткой, которая может перемещаться вдоль продольного паза и опускать внутрь волновода зонд-штырь на разную высоту. Для изменения точности к зонду были подключены реактивные элементы с меняющимися параметрами. На измерительной линии был установлен микрометр, позволяющий определять положение каретки с точностью до 10 микрон. Тем не менее такая точность была даже избыточна, поскольку толщина зонда-штыря значительно превышала этот размер.

4. Общий вид используемых установок

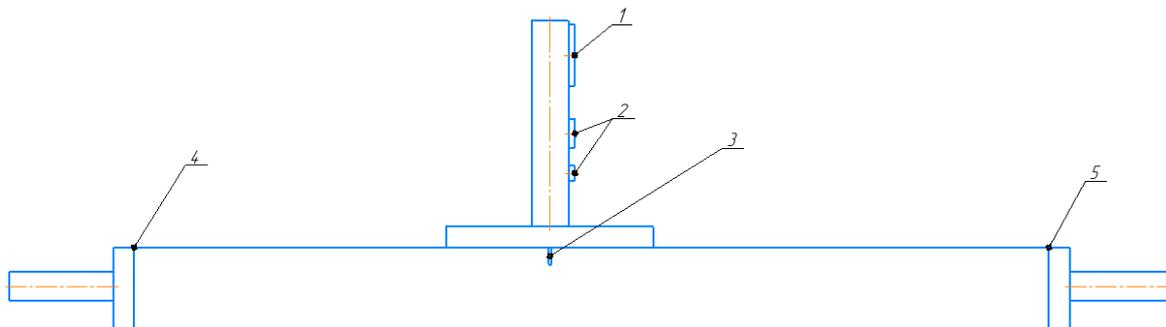


Рис. 5. Схема волновода без поперечного штыря. 1- ручка высоты погружения зонда, 2- реактивные элементы зонда, 3- вход (выход) сигнала, 4 и 5- коаксиально-волновые переходы каналов 1 и 2

Для различных целей использовались волноводы разных конструкций (менялись как геометрические размеры, так и внутреннее устройство). Для этого в установке была предусмотрена возможность добавления или удаления как внутренних объектов, так и отрезков волновода. Например, во всех волноводах были сделаны отверстия для помещения внутрь зонда-петли.

5. Диафрагмы

При изучении структуры полей в закрытом резонаторе в места подключения каналов 1 и 2 (точки 4 и 5 на рис. 5) ставились *диафрагмы* (металлические прямоугольные пластины с отверстием) см. рис. 6. На вход ставилась диафрагма с более широким отверстием, на выход- с менее. Волны входили в резонатор через широкое отверстие и могли отражаться от диафрагм, частично проникая в маленькое отверстие, что позволяло измерять исследуемые сигналы. Расчётная АЧХ для такой конструкции представлена на рис. 3.



Рис. 6 Диафрагмы входа и выхода

Для изучения стоячей волны на выход ставилась нагрузка или короткое замыкание, а свободный канал прибора подключался к зонду.

При изучении структуры полей в открытом резонаторе с поперечным штырём, штырь (цилиндр с диаметром 10 мм. и длиной 28 мм.) прикреплялся с помощью винта к верхней стенке. Диафрагмы при этом убирались.

6. Коаксиальная линия

Помимо структуры полей в прямоугольном волноводе, изучалась так же структура поля в коаксиальной линии (см. рис. 7). Она представляла из себя две параллельные металлические стенки и проводящий стержень между ними.

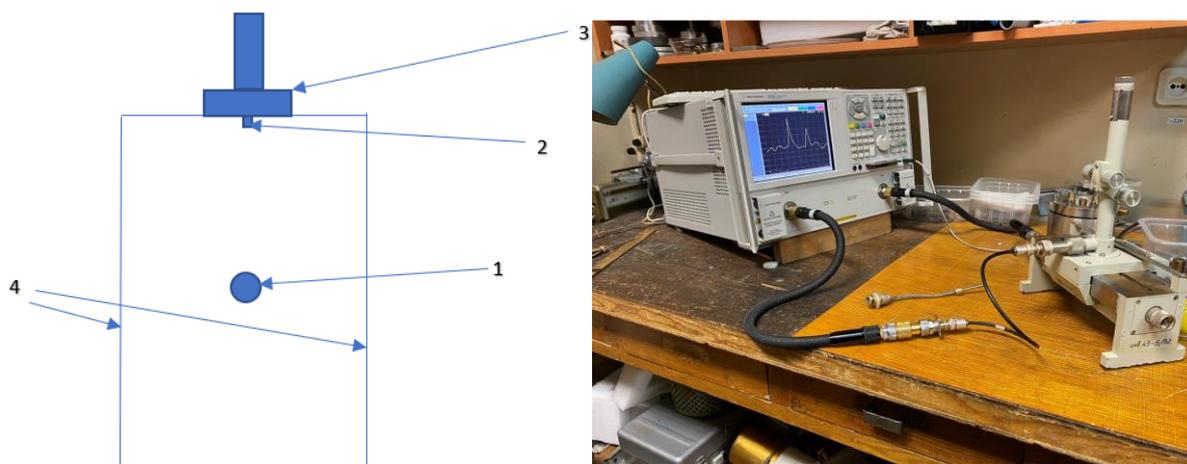


Рис. 7. Схема коаксиальной линии (вид сбоку). 1- проводящий стержень, 2- зонд-штырь, 3- передвижная каретка, 4- проводящие стенки; фотография коаксиальной линии на стенде

Компьютерное моделирование

Для проведения численных расчётов применялась программа *CST Studio Suite 2021*. С её помощью были промоделированы структуры электромагнитных полей во всех используемых экспериментальных установках. Например, на рис. 3 представлена полосовая характеристика закрытого прямоугольного волновода. Ниже представлены остальные результаты моделирования:

Моделирование позволило установить, что при наличии короткого замыкания на одном или обоих концах волновода в нём образуется стоячая волна, при отсутствии коротких замыканий волна-бегущая.

На рис. 8 видно, что в коаксиальной линии, закороченной с одного из концов, присутствует стоячая волна. Причём магнитное поле циркулирует вокруг штыря, а электрические силовые линии соединяют штырь со стенками и перпендикулярны им в точках начала и конца. Хорошо видна периодическая зависимость величины и направления полей от координаты.

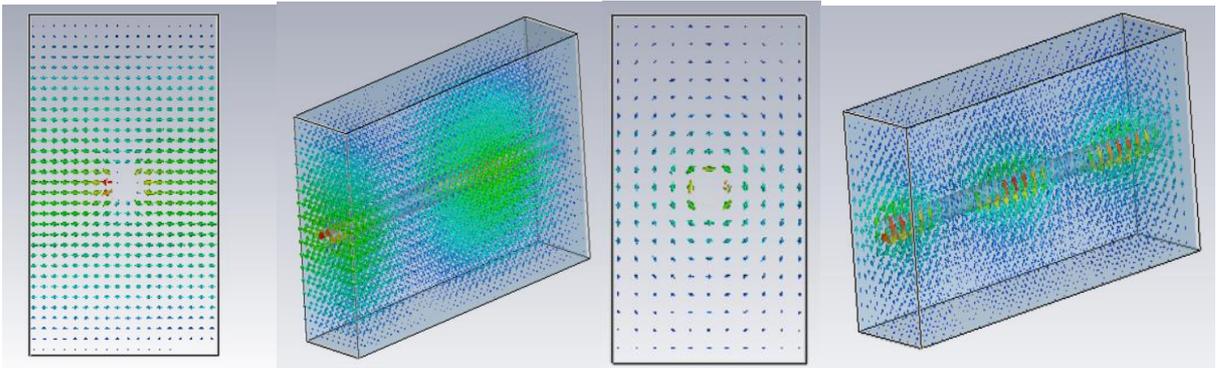


Рис. 8. Структура электрического поля (две картинка слева) и структура магнитного поля (две картинки справа) в коаксиальной линии с коротким замыканием на конце (представлены в разрезе и перспективе)

На рис. 9 можно наблюдать структуру поля стоячей волны в закороченном с одного конца волноводе. Магнитное поле направлено вдоль линии, а электрическое перпендикулярно широким стенкам волновода. Так же, можно заметить, что магнитное поле замкнуто в виде отдельных concentрических «колец», причём направления полей в двух соседних «кольцах» противоположны. На АЧХ рис. 9 можно хорошо видеть частоту отсечки.

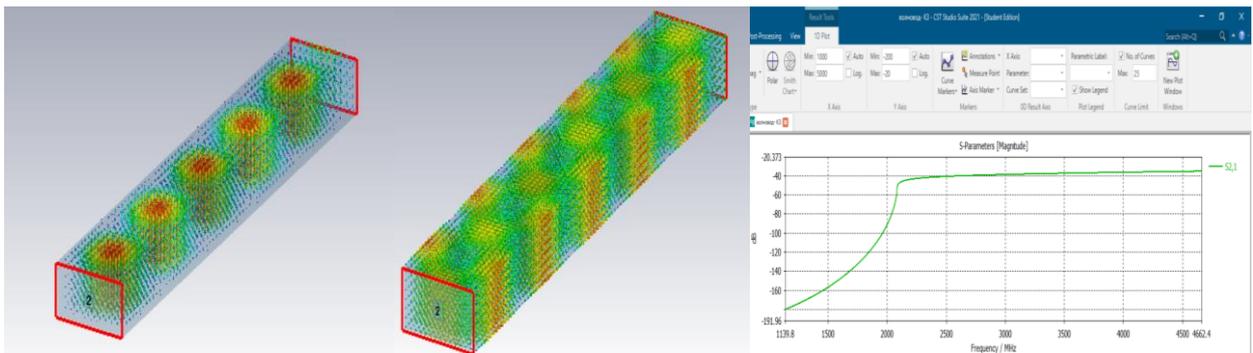


Рис. 9. Структура электрического поля (слева), структура магнитного поля (по середине) и расчётная АЧХ (справа) прямоугольного волновода с коротким замыканием на одном конце.

На рис. 10 изображена структура поля закрытого резонатора. Если сравнить рис. 9 и рис. 10, то можно заметить, что структуры полей стоячих волн почти одинаковы, однако если сравнить АЧХ на этих рисунках, то становится видна разница. На АЧХ рис.10 отчётливо видны резонансные частоты.

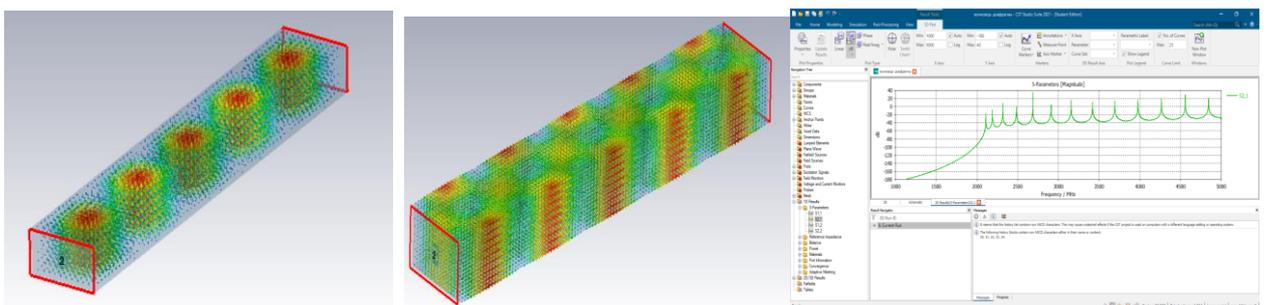


Рис. 10. структура электрического поля (слева), структура магнитного поля (посередине) и расчётная АЧХ (справа) прямоугольного волновода с короткими замыканиями на обоих концах (закрытый резонатор)

Моделирование поперечного штыря в прямоугольном волноводе показало, что в данной системе присутствует резонанс ниже частоты отсечки. На рис. 11 представлен результат моделирования данной системы на частоте этого резонанса. Видно, что поле концентрируется вблизи штыря, а дальше быстро убывает по величине по мере удаления от штыря. Вблизи штыря электрические силовые линии перпендикулярны его поверхности, а магнитные циркулируют вокруг него. При удалении направления силовых линий идентичны тем, которые показаны на рис. 10 и 9.

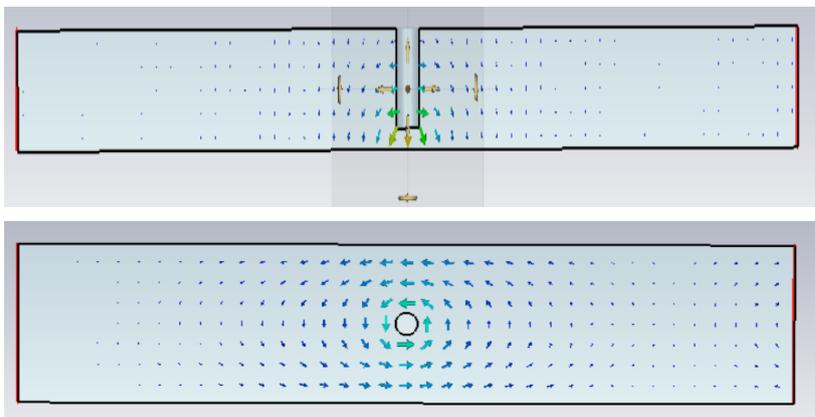
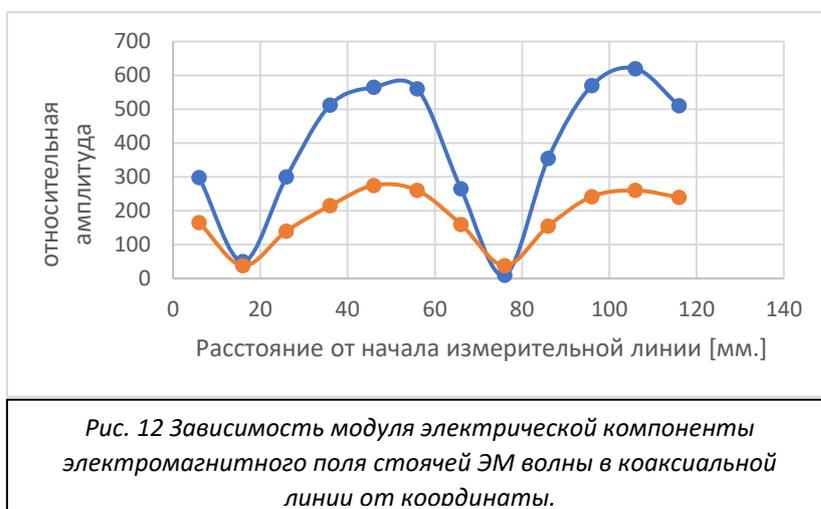


Рис. 11. Структура электрического поля (в разрезе сбоку) и структура магнитного поля (в разрезе сверху) в прямоугольном волноводе с поперечным штырём (открытый резонатор) на частоте прямого резонанса.

Результаты эксперимента

1. Коаксиальная линия и прямоугольный волновод

Вначале была изучена структура полей стоячей волны в коаксиальной линии. Для этого на один её конец подавался сигнал, а второй был закорочен. С помощью помещения внутрь зонда петли, было установлено, что магнитная и электрическая компоненты электромагнитного поля направлены перпендикулярно образующей линии (перпендикулярно распространению волны) и не имеют продольных компонент.



С помощью постепенного перемещения каретки с зондом-штырём была получена зависимость модуля электрической компоненты от координаты z (ось направлена вдоль прямой распространения волны, за ноль принято начало измерительной линии). График зависимости приведён на рис.

12. Из-за несовершенства

конструкции зонда, расхождения в значениях модуля электрического поля в двух сериях измерений

получились довольно значительными, но поскольку измерение модуля поля не является целью этого эксперимента, то этот эффект нам сильно не помешал. Подобная зависимость позволяет судить о наличии в линии стоячей волны.

Точно таким же образом изучалась структура поля в прямоугольном волноводе, закороченном на конце см. Рис. 13

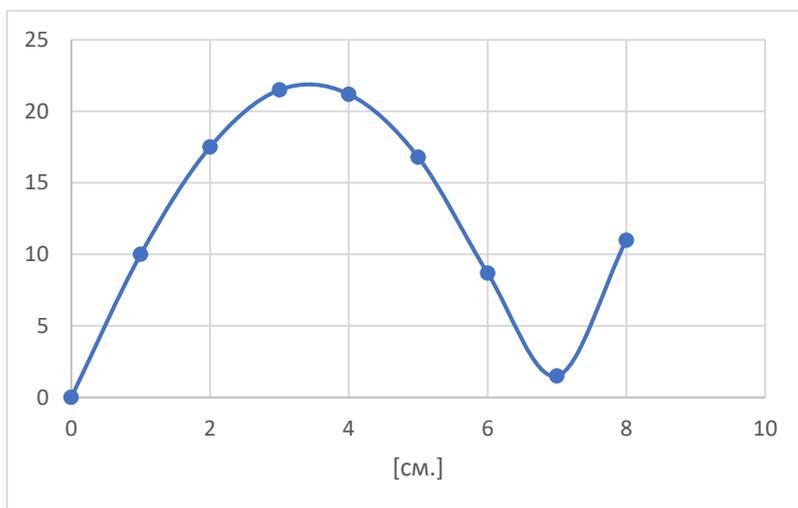


Рис. 13. Зависимость относительной амплитуды электрической компоненты электромагнитного поля стоячей ЭМ волны в прямоугольном волноводе от координаты.

2. Закрытый резонатор

Аналогичная зависимость была снята для прямоугольного закрытого резонатора рис. 14 на двух соседних резонансных частотах (измерены с помощью построения АЧХ рис. 15). Для данного волновода было выбрано две резонансные частоты: 2,68 ГГц и 2,9 ГГц. По формуле (5) было посчитано, что на этих частотах на отрезок волновода длиной 15 см должно уместиться 2 и 3 полуволны соответственно. На рис. 14 видно, что это действительно так. Длина полуволны на первой частоте равна $8 \pm 0,5$ см, на второй $7 \pm 0,5$ см.

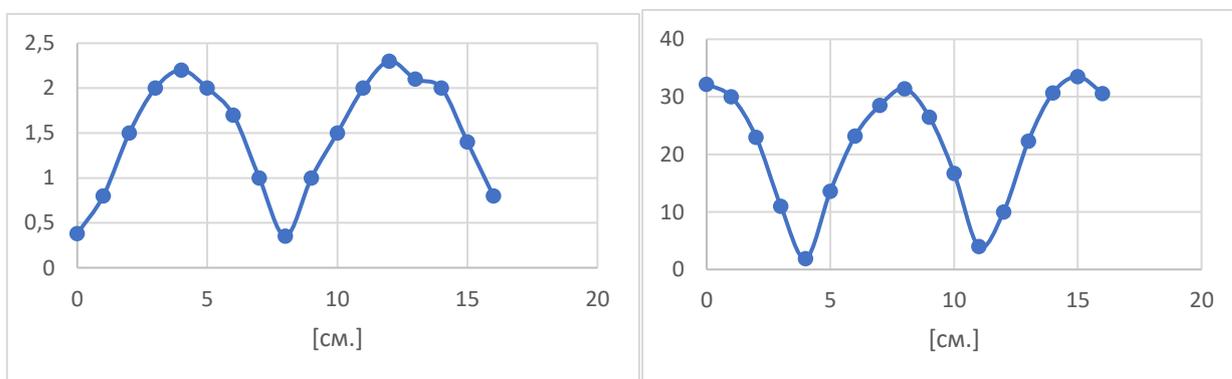


Рис. 14. Зависимость относительной амплитуды электрической компоненты электромагнитного поля стоячей ЭМ волны в прямоугольном волноводе от координаты. На частоте 2,68 ГГц слева и

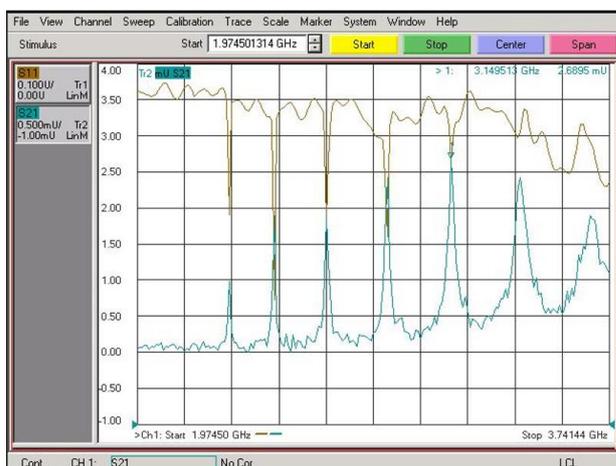


Рис. 15. АЧХ закрытого прямоугольного резонатора.

Измерив с помощью графика на рис. 14 длину волны на частоте 2,68 ГГц и воспользовавшись формулой (5), можно найти скорость распространения волны в воздухе: $2,9 \cdot 10^{10}$ м/с. $\pm 6\%$, что с хорошей точностью равно скорости света в воздухе.

3. Открытый резонатор

Далее в волновод, открытый с обоих концов, был помещён поперечный штырь (теперь эту конструкцию будем называть *открытый резонатор*) см. рис. 17. При снятии АЧХ рис. 16 была хорошо видна частота отсечки, причём выше неё наблюдались отчётливые провалы графика, а ниже одинокий пик на частоте примерно 1,5 ГГц. (этот пик теперь будем называть *прямым резонансом*).

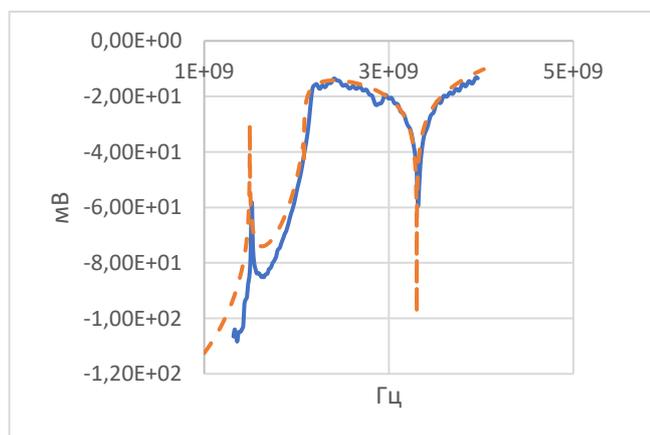


Рис. 16. АЧХ прямоугольного волновода с поперечным штырём – открытым резонаторе.

Пунктиром указана расчётная АЧХ, сплошной линией- экспериментальная. В данной работе изучались свойства резонатора на левом пике АЧХ.

При изучении структуры поля на частоте прямого резонанса было обнаружено, что как слева, так и справа штыря структура поля одинакова: магнитное поле так же направлено вдоль образующей волновода, а электрическое- от нижней стенки к верхней. Путём внесения возмущающего тела из проводящего материалы удалось установить, что в ближней зоне штыря АЧХ меняется сильно, а при удалении от штыря- незначительно. Отсюда можно сделать вывод о том, что электромагнитное поле присутствует только около штыря, а при удалении оно быстро слабеет.



Рис. 17. Поперечный штырь в прямоугольном волноводе

Оценка ошибок

Идеальный зонд для измерения электрического поля представляет из себя бесконечно тонкий идеально проводящий штырь. Идеальный зонд для измерения магнитного поля — это сверхпроводящая петля из бесконечно тонкой проволоки с бесконечно малым радиусом. Однако, в работе использовались зонда с небольшими, но реальными размерами, что делало невозможным абсолютно точное их позиционирование. Поэтому несмотря на большую точность измерительной линии (порядка 10 микрон), она оказывалась излишней.

Из рис.12 видно, что точность определения величин максимумов и минимумов амплитуд стоячей волны была достаточно слабой, из-за несовершенства зондов, но так как это не являлось целью данной работы, то данное обстоятельство сильно не помешало, тем более что положение этих максимумов и минимумов было определено достаточно точно.

Кроме того, были сложности, связанные с определением направления магнитного поля, потому что в волноводе не были предусмотрены механизмы для определения угла поворота зонда-петли, поэтому определять угол приходилось на глаз. С другой стороны, в условиях поставленной задачи (определить плоскость поляризации магнитной компоненты поля) имеющейся конструкции было достаточно.

Анализ результатов

1. Коаксиальная линия

С помощью коаксиальной линии, зонда-штыря и зонда-петли было установлено, что электрическая и магнитная компоненты стоячей электромагнитной волны отстают друг от друга по фазе на π (пик (впадина) магнитной компоненты приходится на впадину (пик) электрической компоненты). Так же при вращении зонда-петли была определена плоскость поляризации магнитной компоненты: она не имеет продольной составляющей. Кроме того, было выяснено, что амплитуда электрической составляющей представляет собой периодическую функцию координаты z .

Это хорошо согласуется с результатами компьютерного моделирования. На рис. 8 видно, что магнитное поле как бы «накручивается» вокруг центральной жилы коаксиальной линии, а электрические силовые линии перпендикулярны центральной жиле и стенкам. Так же на рис. 8 видно, что электрическая и магнитная компоненты отстают друг от друга на π .

2. Прямоугольный волновод

В прямоугольном волноводе, закороченном на выходе, так же была обнаружена структура поля электромагнитной волны. Было выяснено, что в прямоугольном волноводе, электрическая и магнитная компоненты электромагнитной волны так же отстают друг от друга на π , но при этом магнитное поле направлено вдоль образующей волновода. Данная структура так же хорошо описывается компьютерным моделированием см. рис. 9.

3. Закрытый резонатор

В прямоугольном волноводе, закороченном с обоих концов, удалось наблюдать явление резонанса. С помощью АЧХ на рис. 15 удалось определить резонансные частоты, значения которых были с хорошей точностью предсказаны, с помощью моделирования см. рис. 10. Зная структуру поля в прямоугольном волноводе, а также воспользовавшись тем фактом, что ближайшие точки резонанса находятся друг от друга на расстоянии $\lambda_g/2$ и формулой (5), была с хорошей точностью определена скорость света в воздухе, которая в пределах погрешностей совпала с табличной.

4. Открытый резонатор

Оказалось, что в рассмотренной выше конструкции открытого резонатора, на определённой частоте ниже частоты отсечки, существует резонанс (см. рис 16). Была определена структура поля на этой частоте. Удалось выяснить, что поле в данном случае существует только в ближней зоне штыря, а при удалении быстро убывает, что хорошо видно на рис. 11. Магнитная компонента поля при этом имеет только продольную составляющую, и, как видно из рис. 11, вблизи волновода она «накручивается» вокруг штыря. Кроме того, на примере открытого резонатора получилось наблюдать *свойство взаимности*: АЧХ, полученная при запуске волны от канала 1 в канал 2 совпадает с АЧХ, полученной при запуске волны из канала 2 в канал 1 (см. рис.16). Стоит отметить, что свойство взаимности выполнялось даже тогда, когда возмущающее металлическое тело помещалось в точки, находящиеся на разных расстояниях от входа и выхода.

На рис. 16 видно, что теоретическая и расчётная АЧХ исследуемого открытого резонатора совпадают с большой точностью. Различия проявляются только по оси амплитуд, однако при надлежащей калибровке измерительного зонда это различие можно свести к минимуму, но в условиях поставленной задачи в этом не было необходимости.

Выводы

Полученные экспериментальные результаты согласуются с приведенной в пункте «Теоретическая часть» теорией и хорошо предсказываются методами компьютерного моделирования. Были

получены структуры полей в различных пассивных электродинамических устройствах, таких как: коаксиальная линия, прямоугольной волновод, закрытый и открытый резонаторы.

Благодарности

Автор выражает благодарность сотрудникам лаборатории быстропротекающих процессов ИХКиГ СО РАН, за предоставленную ими возможность писать курсовую работу в этой лаборатории. В частности, Юрию Дмитриевичу Черноусову за помощь в написании работы и освоении материала.

Источники информации

1. Волоконно-оптические системы передачи и кабели: Справочник/И. И. Гроднев, А. Г. Мурадян, Р. М. Шарафутдинов и др.— М.: Радио и связь, 1993. — 264 с.: ил.
2. А. П. Сухоруков. Большая Российская энциклопедия: Волновод [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://bigenc.ru/physics/text/1926340>
3. Оптика и волны [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://online.mephi.ru/courses/physics/optics/data/course/2/2.5.html>
4. В.И. Яковлев - Классическая электродинамика. Часть 2 «Электромагнитные волны. Четырёхмерная электродинамика» - Новосибирск 2014 г.
5. Agilent 2-Port PNA-L Microwave Network Analyzer. — N5230A: 300 kHz to 6, 13.5 GHz, 10 MHz to 20, 40, 50 GHz. — Data Sheet. 2008.