

Оглавление

Лабораторная работа № 1	4
ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ИЗЛУЧАТЕЛИ	4
1.1. Описание экспериментальной установки	4
1.2. Элементы теории	6
1.3. Расчетное задание (выполняется каждым студентом)	7
1.4. Экспериментальное задание	8
1.5. Контрольные вопросы	10
Литература	10
Лабораторная работа № 2	11
ОТРАЖЕНИЕ И ПРЕЛОМЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН НА ПЛОСКОЙ ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА ДВУХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СРЕД	11
2.1. Описание экспериментальной установки	11
2.2. Элементы теории	15
2.3. Расчетное задание (выполняется каждым студентом)	17
2.4. Экспериментальное задание	17
2.5. Дополнительное задание (выполняется по указанию преподавателя)	18
2.6. Контрольные вопросы	18
Литература	19
Лабораторная работа № 3	20
ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛНОВОДА ПРЯМОУГОЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ	20
3.1. Описание экспериментальной установки	20
3.2. Элементы теории	21
3.3. Расчетное задание (выполняется каждым студентом)	23
3.4. Экспериментальное задание	24
3.5. Контрольные вопросы	26
Литература	27
Лабораторная работа № 4	28
ИССЛЕДОВАНИЕ ОБЪЕМНОГО РЕЗОНАТОРА, СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ПРЯМОУГОЛЬНОГО ВОЛНОВОДА БЫСТРЫХ ВОЛН	28

4.2. Расчетное задание (выполняется каждым студентом)	29
4.3. Экспериментальное задание	30
4.4. Контрольные вопросы	32
Литература	32
Лабораторная работа № 5	33
ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН В ЗАМЕДЛЯЮЩИХ СТРУКТУРАХ.....	33
5.1. Описание экспериментальной установки	33
5.2. Элементы теории	34
5.3. Расчетное задание (выполняется каждым студентом)	35
5.4. Экспериментальное задание	36
5.5. Контрольные вопросы	37
Литература	37
Лабораторная работа № 6	38
ИССЛЕДОВАНИЕ Н-ОБРАЗНОГО МЕТАЛЛОДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВОЛНОВОДА.....	38
6.1. Описание экспериментальной установки	38
6.3. Расчетное задание (выполняется каждым студентом)	41
6.4. Экспериментальное задание	42
6.5. Контрольные вопросы	43
Литература	44
Лабораторная работа № 7	45
РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН В ГИРОМАГНИТНОЙ СРЕДЕ ПРИ ПРОДОЛЬНОМ НАМАГНИЧИВАНИИ.....	45
7.1. Описание экспериментальной установки	45
7.2. Элементы теории	47
7.3. Расчетное задание (выполняется каждым студентом)	48
7.4. Экспериментальное задание	49
7.5. Контрольные вопросы	49
Литература	51

Лабораторная работа № 8	52
ИССЛЕДОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ.....	52
РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН	52
В ПРЯМОУГОЛЬНОМ ВОЛНОВОДЕ.....	52
8.1. Описание экспериментальной установки.....	52
8.2. Расчетное задание (выполняется каждым студентом)	55
8.3. Экспериментальное задание	57
8.4. Контрольные вопросы	60
Литература	61
Лабораторная работа № 9	62
ИССЛЕДОВАНИЕ КРУГЛОГО ОБЪЕМНОГО РЕЗОНАТОРА	62
9.1. Описание экспериментальной установки.....	62
и методики проведения экспериментов.....	62
9.2. Расчетное задание (выполняется каждым студентом)	66
9.3. Экспериментальное задание	68
9.4.Контрольные вопросы	69
Литература	69
ОСНОВНЫЕ УЗЛЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ УСТАНОВОК	70
Аттенюатор	70
Вентиль.....	70
Направленный ответвитель	71
Согласованная нагрузка.....	72
Волноводный возбудитель	72
Генераторы.....	73
Измерительная линия (ИЛ)	73

Лабораторная работа № 1

ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ИЗЛУЧАТЕЛИ

Целью данной работы является исследование электромагнитного поля элементарных электрического и магнитного вибраторов, а также изучение поляризации излучаемых волн.

1.1. Описание экспериментальной установки

Установка для исследования элементарных электрических вибраторов смонтирована на круглом столе (Рис. 1.1). В центре стола расположен передающий вибратор 1, к которому подводится напряжение от СВЧ генератора. Приемный вибратор 2 (вместе с предварительным СВЧ усилителем и СВЧ детектором) располагается на каретке 3, которая может перемещаться по штанге 4. Штанга 4, в свою очередь, может поворачиваться вокруг оси установки.

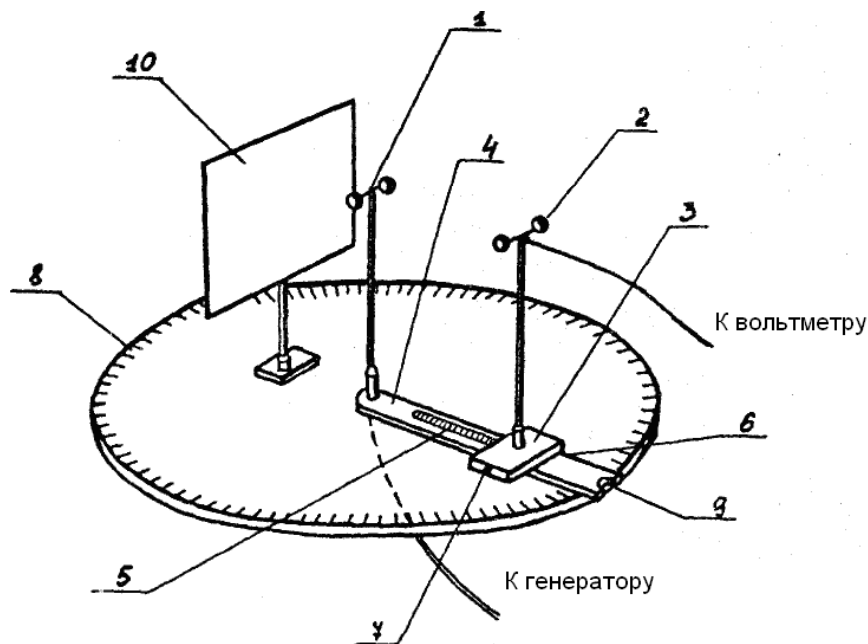


Рис.1.1. Схема измерительной установки с электрическим вибратором.

На штанге расположена линейка 5, а на каретке – визир 6. Они позволяют определить расстояние между передающим и приемным вибраторами. Для снятия диаграммы направленности положение каретки на штанге фиксируется с помощью арретира 7, угол поворота приемного вибратора отсчитывается по шкале 8 с помощью визира 9.

Для того, чтобы снимать диаграмму направленности в разных плоскостях, передающий вибратор выполнен съемным: вместо вибратора, излучающего горизонтально-поляризованную волну, может быть установлен

вибратор, излучающий вертикально-поляризованную волну. При этом должна быть изменена ориентация приемного вибратора.

Для исследования излучения вибратора, расположенного у металлической поверхности, предусмотрен съемный экран – металлический лист 10, который может быть установлен на любом расстоянии от передающего вибратора.

На концах вибраторов расположены металлические шарики диаметром 5 мм, расстояние между центрами которых равно 20 мм ($\lambda_0=10$ см). Благодаря наличию шариков, между концами вибратора имеет место сосредоточенная емкость, в результате чего распределение тока по длине вибратора становится приблизительно равномерным.

При исследовании поля в дальней зоне и снятии диаграммы направленности, к передающему вибратору по коаксиальной линии подводится напряжение от клистронного СВЧ генератора (частота колебаний 3000 МГц).

Приемный вибратор также представляет собой диполь (длиной 60 мм),

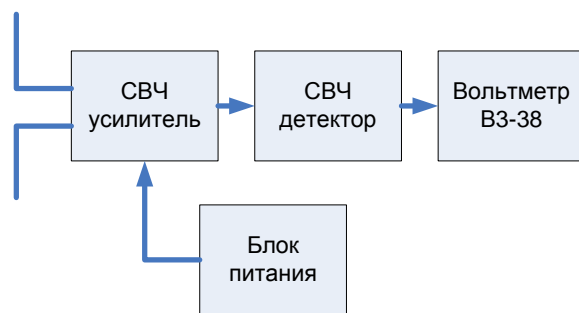


Рис. 1.2. Структура приемной части установки

размещённый в общем блоке с предварительным СВЧ усилителем и СВЧ детектором (рис.1.2). Продетектированный сигнал по коаксиальному кабелю подводится к микровольтметру (например, ВЗ-38). Приемный вибратор может принимать в пространстве вертикальное или горизонтальное положение,

что необходимо для приема сигналов с различной поляризацией. **Детектор приемного вибратора работает в режиме квадратичного детектирования** так, что показания измерительного прибора пропорциональны квадрату напряженности электрического поля. Это обстоятельство необходимо учитывать при обработке экспериментальных данных.

Исследование элементарного электрического вибратора на описанной установке усложняется тем, что излучаемый им сигнал отражается от различных предметов, расположенных в лаборатории. Отраженные сигналы интерферируют с основным сигналом и друг с другом, в результате чего создается своеобразный фон, не позволяющий исследовать поле на большом расстоянии от вибратора. Этот фон, например, хорошо замечен при снятии диаграммы направленности вибратора в экваториальной плоскости при максимальном расстоянии между передающим и приемным вибраторами. Наибо-

лее сильный мешающий сигнал получается в результате отражения от поверхности стола. Чтобы уменьшить влияние отражения от стола, на направляющей штанге между передающим и приемным вибраторами установлена наклонная пластина. Благодаря этой пластине поле, отраженное от стола, не попадает к приемному вибратору. Отражения от других предметов устранить не удастся, поэтому при снятии диаграммы направленности приемный вибратор должен располагаться достаточно близко к передающему вибратору так, чтобы основной сигнал был намного больше отраженных.

Не забудьте, что диаграмму направленности можно снимать только в дальней зоне вибратора (антенны). Поэтому выбирайте расстояние не менее 4-5 длин волн от вибратора.

1.2. Элементы теории

Анализ выражений для поля вибратора, приведенных в [1], показывает, что в общем виде зависимость составляющих поля от расстояния r достаточно сложна, однако можно выделить две зоны, где эта зависимость имеет сравнительно простой вид.

При $\beta r \ll 1$ ($r \ll \lambda/(2\pi)$), что соответствует **ближней зоне** электрического вибратора, приближенные значения для составляющих поля можно записать:

$$\begin{aligned} \dot{H}_{\varphi} &= \frac{\dot{I}_{\vartheta} \cdot l}{4\pi \cdot r^2} \sin \theta \\ \dot{E}_r &= -j \frac{\dot{I}_{\vartheta} \cdot l}{2\pi \cdot r^3 \cdot \omega \cdot \varepsilon_a} \cos \theta \\ \dot{E}_{\theta} &= -j \frac{\dot{I}_{\vartheta} \cdot l}{4\pi \cdot r^3 \cdot \omega \cdot \varepsilon_a} \sin \theta \end{aligned} \quad (1.1)$$

При $\beta r \gg 1$ ($r \gg \lambda/(2\pi)$), что соответствует **дальней зоне** электрического вибратора, составляющие поля H_{φ} и E_{θ} оказываются обратно пропорциональными расстоянию r :

$$\begin{aligned} \dot{H}_{\varphi} &= j \frac{\dot{I}_{\vartheta} \cdot l \cdot \beta \cdot e^{-j\beta r}}{4\pi \cdot r} \sin \theta \\ \dot{E}_{\theta} &= j \frac{\dot{I}_{\vartheta} \cdot l \cdot \beta^2 \cdot e^{-j\beta r}}{4\pi \cdot \omega \cdot \varepsilon_a \cdot r} \sin \theta \end{aligned} \quad (1.2)$$

Диаграммы направленности поля излучения электрического вибратора рассмотрены в [1,2]. Диаграммы направленности обычно исследуются в двух плоскостях: **меридиональной** – плоскость, проходящая через ось вибратора, **экваториальной** – плоскость перпендикулярная оси вибратора

Нормированная диаграмма направленности определяется выражением:

$$F(\theta, \varphi) = \frac{|\dot{E}_\theta|}{|\dot{E}_\theta|_{\max}} = \sin \theta \quad (1.3)$$

Для построения диаграммы направленности передающего электрического вибратора с экраном следует воспользоваться аналитическим выражением

$$F(\theta, \varphi) = \sin \theta \cdot \sin\left(\frac{\beta a}{2} \cdot \cos \varphi \cdot \sin \theta\right) \quad (1.4)$$

Здесь $a/2$ – расстояние между передающим вибратором и металлическим экраном. Выражение получено с использованием метода зеркальных изображений (см. [3], с. 233).

Мощность излучения и сопротивление излучения электрического вибратора определяются следующими выражениями:

$$P_{изл} = |\dot{I}_э|^2 \cdot \frac{R_{изл}}{2} \quad (1.5)$$

$$R_{изл} = \frac{2\pi}{3} \cdot \sqrt{\frac{\mu_\alpha}{\varepsilon_\alpha}} \cdot \left(\frac{l}{\lambda}\right)^2 \quad (1.6)$$

Выражения для составляющих поля магнитного (щелевого) вибратора в ближней и дальней зонах можно получить из (1.1) и (1.2), используя перестановку вида:

$$\dot{\vec{E}} \rightleftharpoons \dot{\vec{H}}, \quad -\mu_\alpha \rightleftharpoons \varepsilon_\alpha, \quad \dot{I}_э \rightleftharpoons \dot{I}_м$$

и положить $\dot{I}_м = 2\dot{I}_щ$ (см. [2]).

1.3. Расчетное задание (выполняется каждым студентом)

1. Определите ближнюю и дальнюю зоны элементарного электрического вибратора при частоте излучаемых колебаний 400 МГц и 3000 МГц. Учтите, что в воздухе $\lambda = c/f$.

2. Рассчитайте и постройте график зависимости амплитуды составляющей E_θ от расстояния r для поля в ближней зоне электрического вибратора при частоте излучаемых колебаний 400 МГц.

Построение графика проводите на участке изменения r от 1,6 до 4 см для модуля комплексной амплитуды \dot{E}_θ в нормированном масштабе, приняв за единицу амплитуду \dot{E}_θ в точке $r_0 = 1,6$ см. При этом пользуйтесь формулой

$$\frac{|\dot{E}_\theta|}{|\dot{E}_\theta(r_0)|} = \left(\frac{r_0}{r}\right)^3.$$

3. Рассчитайте и постройте график зависимости амплитуды составляющей E_θ от расстояния r для поля в дальней зоне вибратора при частоте излучаемых колебаний 3000 МГц.

Построение графика проводите на участке изменения r от 10 до 40 см для модуля комплексной амплитуды \dot{E}_θ в нормированном масштабе, приняв за единицу амплитуду \dot{E}_θ в точке $r_0 = 10$ см. При этом пользуйтесь формулой

$$\frac{|\dot{E}_\theta|}{|\dot{E}_\theta(r_0)|} = \frac{r_0}{r}.$$

Наибольшее значение $r = 40$ см определяется максимально возможным расстоянием, которое устанавливается между передающим и приемным вибраторами в лабораторной установке.

4. Рассчитайте и постройте в полярных координатах диаграмму направленности электрического вибратора в экваториальной и меридиональной плоскостях. Учтите, что в экваториальной плоскости

$$\frac{|\dot{E}_\theta(\varphi)|}{|\dot{E}_\theta(\varphi)|_{\max}} = 1, \quad \varphi \in (0, 360^\circ);$$

в меридиональной плоскости

$$\frac{|\dot{E}_\theta(\theta)|}{|\dot{E}_\theta(\theta)|_{\max}} = |\sin(\theta)|, \quad \theta \in (0, 360^\circ).$$

5. Рассчитайте сопротивление излучения вибратора на частоте 3000 МГц, полагая, что длина вибратора равна 20 мм.

6. Рассчитайте амплитуду напряженности электрического и магнитного поля на расстоянии 1 м от вибратора при $\theta = 90^\circ$, полагая, что излучаемая мощность равна 1 Вт. Учтите, что амплитуда колебания равна модулю комплексной амплитуды этого колебания.

1.4. Экспериментальное задание

1. Убедитесь в том, что установлен передающий горизонтальный вибратор, излучающий горизонтально-поляризованную волну (при необходимости под руководством преподавателя установите такой вибратор).

2. Уясните расположение ортов сферической системы координат в области расположения приемного вибратора и установите штангу с приемным вибратором под углом наблюдения, обеспечивающим максимальную амплитуду регистрируемых колебаний.

3. Включите питание СВЧ генератора и измерительного вольтметра. Установите частоту колебаний 3000 МГц, включите дополнительное усиление вольтметра (тумблер на лицевой панели вольтметра, $K = 100$). Снимите зависимость нормированной амплитуды напряженности электрического поля от расстояния между вибраторами в дальней зоне. Диапазон изменения расстояния и нормировка должны соответствовать домашнему заданию. Учтите, что: а) расстояние между излучающим и приемным вибраторами $r = r_{\text{лин}} + 4 \text{ см}$, где $r_{\text{лин}}$ – показания измерительной линейки; б) в данном и последующих пунктах экспериментального задания детектирование является **квадратичным**, то есть показания вольтметра пропорциональны квадрату амплитуды напряженности электрического поля.

4. Поворачивая приёмный вибратор вокруг своей оси, проверьте поляризацию излучаемой волны. Для этого сравните показания вольтметра при вертикальной и горизонтальной ориентации приемного вибратора (запишите в отчет) и сделайте вывод об ориентации вектора \vec{E} в сферической системе координат.

5. Установив расстояние между приёмным и передающим вибраторами около 20-30 см, снимите диаграмму направленности вибратора в меридиональной плоскости.

6. Установите металлический экран параллельно передающему вибратору на таком минимальном расстоянии от него, при котором амплитуда напряженности электрического при угле наблюдения $\theta = 90^\circ$ близка к нулевой. Измерьте это расстояние, выразите его в долях длины волны.

Примечание. Учтите, что для анализа результата эксперимента действие экрана можно заменить действием зеркального вибратора, расположенного симметрично основному вибратору относительно экрана (метод зеркального изображения). Фаза колебаний тока в зеркальном вибраторе определяется граничными условиями на поверхности металла и равна 180° в данной ориентации.

7. Для полученных условий снимите диаграмму направленности вибратора в меридиональной плоскости.

8. Установите металлический экран на минимальном расстоянии от передающего вибратора, при котором амплитуда напряженности электрического при угле наблюдения $\theta = 90^\circ$ максимальна. Измерьте это расстояние, выразите его в долях длины волны. Для анализа ситуации см. примечание к п.6.

9. Для полученных условий снимите диаграмму направленности вибратора в меридиональной плоскости.

1.5. Контрольные вопросы

1. Как определяется ближняя и дальняя зона элементарных вибраторов?
2. Как определяется мощность излучения?
3. Как зависят амплитуды поля \bar{E} и \bar{H} от расстояния в дальней зоне вибратора?
4. Что такое диаграмма направленности?
5. Получите выражения для составляющих поля щелевого вибратора, если известны выражения для составляющих поля электрического вибратора.
6. В чем состоит принцип перестановочной двойственности?
7. Изобразите силовые линии векторов \mathbf{E} и \mathbf{H} для электрического вибратора.
8. Изобразите силовые линии векторов \mathbf{E} и \mathbf{H} для магнитного вибратора.
9. Рассчитайте сопротивление излучения электрического вибратора.
10. Рассчитайте сопротивление излучения электрического щелевого вибратора.

Литература

1. Баскаков С.И. Электродинамика и распространение радиоволн: Учебное пособие. М.: «ЛИБРОКОМ», 2012. – Глава 13.
2. Крамм М.Н. Сборник задач по основам электродинамики. – СПб.: Изд-во «Лань», 2011. – 256 с. – Глава 8.

Лабораторная работа № 2

ОТРАЖЕНИЕ И ПРЕЛОМЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН НА ПЛОСКОЙ ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА ДВУХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СРЕД

Целью работы является ознакомление с явлениями, возникающими при падении электромагнитных волн на плоскую границу раздела двух диэлектрических сред.

В работе используется диэлектрическое тело в форме полуцилиндра с одной плоской гранью. С помощью специальной направленной антенны формируется почти параллельный пучок радиоволн миллиметрового диапазона (длина волны в вакууме 8 мм). Такой пучок в первом приближении ведет себя как однородная, плоская волна, распространяющаяся в направлении оси симметрии пучка.

Изучаются зависимости углов и коэффициентов отражения и преломления такого пучка на плоской грани полуцилиндра от угла падения. Опыты проводятся при различных поляризациях электромагнитного поля в случаях падения пучка из воздуха в диэлектрик и из диэлектрика в воздух. *При падении из диэлектрика в воздух наблюдается явление полного отражения и постепенное исчезновение этого явления с приближением к границе раздела со стороны воздуха плоской грани призмы из такого же диэлектрика, как полуцилиндр.*

2.1. Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка для исследования отражения и преломления электромагнитных волн при падении на плоскую границу раздела двух диэлектриков изображена на рис. 2.1.

На станине 6 установлен диэлектрический полуцилиндр 7 и три поворотные остронаправленные антенны: передающая 22, приемная отраженной волны 26 и приемная преломленной волны II (обе приемные антенны одинаковы). Полуцилиндр 7 стоит на вращающихся упорах 4 и может быть повернут так, что его плоская грань 8 будет обращена в сторону антенны преломленной волны 11. Между плоской гранью полуцилиндра 8 и упорами 4 может быть установлено металлическое отражающее зеркало.

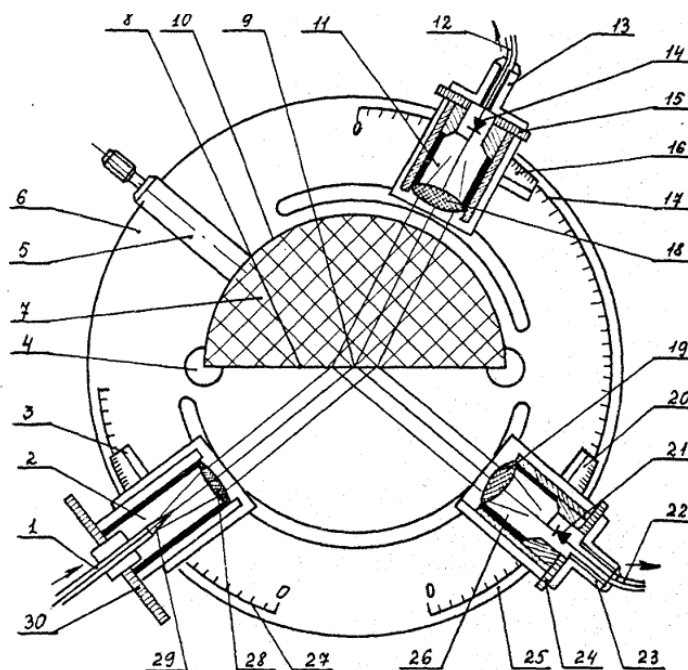


Рис. 2.1. Схема установки

Все антенны вращаются вокруг вертикальной оси симметрии станины 9, совпадающей с осью полуцилиндра и вертикальной средней линией его плоской грани. Направления максимального излучения антенн при их вращении все время проходят через центр плоской грани полуцилиндра. Отсчеты углов падения, отражения и преломления производятся с помощью шкал 27, 25, 17 и прозрачных визиров 3, 20, 16 соответственно. Для удобства отсчета деления на шкалах нанесены через 3° , а на отсчетных визирах – через 1° . Нули всех шкал соответствуют такому положению антенн, когда направления максимального излучения перпендикулярны плоскости полуцилиндра.

Вращение антенн производится с помощью специальных цилиндрических ручек 13 и 23 (у передающей антенны ручка не видна), расположенных в плоскости станины.

Передающая антенна состоит из диэлектрического излучателя 29, являющегося плавным заострением подводящего энергию диэлектрического волновода 1 и линзы из кристаллического кварца 28. Для устранения нежелательных боковых излучений излучатель окружен ребристой трубой из поглощающего материала. Каждая из приемных антенн состоит из фокусирующей кварцевой линзы 19 и 18, детектора в волноводном оформлении 21 и 14. Для улучшения направленности антенн в них также установлены отрезки ребристых труб из поглощающего материала.

Изменение поляризации излучения передающей антенны производится поворотом на 90° диэлектрического волновода вместе с излучателем при по-

мощи кольца 30. При вертикальном расположении широкой грани волновода электрическое поле излучения направлено вертикально, т.е. перпендикулярно плоскости падения (плоскость падения в установке горизонтальна, она проходит через направления максимального излучения антенн). При горизонтальном расположении широкой грани волновода, электрическое поле направлено параллельно плоскости падения.

Изменение поляризационных свойств приемных антенн производится поворотом детектора на 90° с помощью колец 24 и 15. Широкие стенки детекторных волноводов должны быть перпендикулярны направлению электрического поля принимаемой волны. Продетектированный сигнал снимается с антенн коаксиальными кабелями 22 и 12.

Электромагнитные колебания с длиной волны 8 мм подводятся от генератора к установке с помощью прямоугольного диэлектрического волновода I.

Измерение амплитуды сигналов, снимаемых с детекторов, производится измерительным усилителем. Детекторы к его входу подключаются поочередно.

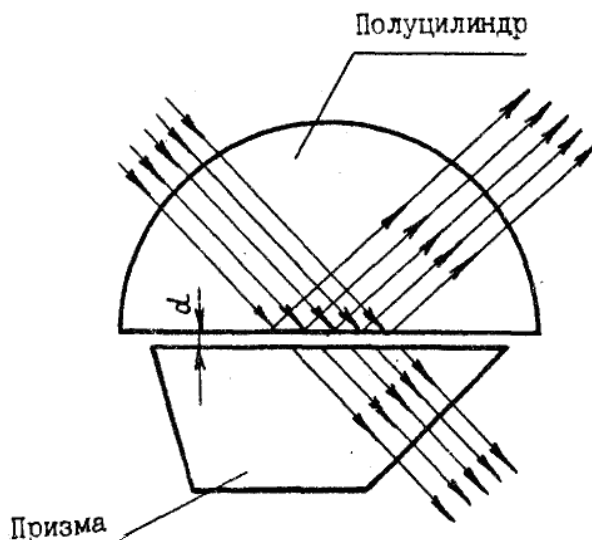


Рис. 2.2.

На станине со стороны антенны преломленной волны предусмотрены упоры для установки диэлектрической призмы (на рис. 2.1 не показаны). При этом одна из боковых граней призмы оказывается параллельной плоской грани полуцилиндра. Расстояние d между ними можно изменять с помощью передвижной каретки 5. Поскольку ось каретки направлена под углом 30° к этим граням, изменение расстояния между гранями ровно вдвое меньше изменения положения каретки, отсчитываемого по ее шкале.

Принцип действия. Благодаря совмещению оси цилиндрической поверхности полуцилиндра и оси вращения антенн, условия преломления электромагнитных волн на этой его границе при повороте антенн не изменяются. Следовательно, наблюдаемые изменения амплитуд сигналов, снимаемых с приемных антенн, являются только функцией угла падения на плоскую грань полуцилиндра.

Характеристики использованных в установке детекторов практически квадратичны, т.е. сигнал на их выходе (показание измерительного усилителя) пропорционален квадрату напряженности поля принимаемой электромагнитной волны. Следовательно, сигнал на выходе приемной антенны, расположенной по одну сторону от границы раздела с передающей, пропорционален квадрату коэффициента отражения, а сигнал на выходе антенны, расположенной по другую сторону от границы, пропорционален квадрату коэффициента преломления.

Определение абсолютной величины коэффициента отражения производится путем деления амплитуды сигнала, отраженного от диэлектрика A_O , на амплитуду сигнала, отраженного от металлического зеркала (A_M) (коэффициент отражения от металлического зеркала близок к единице): $R_E = \sqrt{A_O / A_M}$. Абсолютная величина коэффициента преломления устанавливается совмещением результатов измерений в области углов падения, близких к нормальному ($\varphi \approx 0$), с теоретически вычисленным значением.

При изучении падения волны из диэлектрика в воздух полуцилиндр переворачивается на 180° по отношению к положению, показанному на рис. 2.1. При этом волна от передающей антенны входит в диэлектрик через цилиндрическую боковую поверхность перпендикулярно к ней при любом развороте антенны. При углах падения, больших угла полного отражения, сигнал в антенне преломленной волны исчезает, а сигнал в антенне отраженной волны перестает зависеть от угла падения. Если при этом поднести к плоской грани полуцилиндра металлическое зеркало, отраженный сигнал не изменится. Это говорит о том, что отражение является полным.

Если к плоской грани полуцилиндра приблизить диэлектрическую призму (она тоже изготовлена из органического стекла), отражение становится неполным, и появляется преломленная волна (см. рис. 2.2), Если все антенны при этом установлены под углом 50° , волна, прошедшая через воздушный зазор, падает на выходную грань призмы перпендикулярно ее поверхности и, преломляясь на ней, не изменяет направления распространения. Можно устанавливать угол падения отличным от 50° (в пределах 45° - 60°), но

при этом приемную антенну преломленной волны придется подстраивать до максимума сигнала. Изменяя величину воздушного зазора между призмой и полуцилиндром, можно наблюдать переход от полного отражения (при достаточно широком зазоре) до исчезновения отражения (при достаточно малом зазоре).

2.2. Элементы теории

В данной лабораторной работе используются диэлектрики с одинаковой магнитными проницаемостями ($\mu_1 = \mu_2$). Для этого случая углы отражения $\varphi_{\text{отр}}$ и преломления Ψ , как в случае перпендикулярной (горизонтальной), так и в случае параллельной (вертикальной) поляризации, связаны с углом падения φ соотношением:

$$\varphi = \varphi_{\text{отр}}; \quad (2.1)$$

$$\frac{\sin(\Psi)}{\sin(\varphi)} = \sqrt{\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}}; \quad (2.2)$$

Здесь

ε_1 — относительная диэлектрическая проницаемость среды, из которой волна падает;

ε_2 — относительная диэлектрическая проницаемость среды, в которую волна попадает.

Общие соотношения для коэффициентов отражения R_E и преломления T_E по напряженности электрического поля приведены в [1]. Так как в нашем случае $\mu_1 = \mu_2$, эти выражения можно упростить.

В случае перпендикулярной поляризации выражения для T_{\perp}^E и R_{\perp}^E можно записать в виде:

$$T_{\perp}^E = \frac{2\sqrt{\varepsilon_1} \cdot \cos(\varphi)}{\sqrt{\varepsilon_1} \cdot \cos(\varphi) + \sqrt{\varepsilon_2 - \varepsilon_1 \cdot \sin^2(\varphi)}} \quad (2.3)$$

$$R_{\perp}^E = \frac{\sqrt{\varepsilon_1} \cdot \cos(\varphi) - \sqrt{\varepsilon_2 - \varepsilon_1 \cdot \sin^2(\varphi)}}{\sqrt{\varepsilon_1} \cdot \cos(\varphi) + \sqrt{\varepsilon_2 - \varepsilon_1 \cdot \sin^2(\varphi)}} \quad (2.4)$$

В случае параллельной поляризации выражения для T_{\parallel}^E и R_{\parallel}^E можно записать в виде:

$$T_{\parallel}^E = \frac{2\sqrt{\varepsilon_1 \varepsilon_2} \cdot \cos(\varphi)}{\varepsilon_2 \cdot \cos(\varphi) + \sqrt{\varepsilon_1} \cdot \sqrt{\varepsilon_2 - \varepsilon_1 \cdot \sin^2(\varphi)}} \quad (2.5)$$

$$R_{\parallel}^E = \frac{\varepsilon_2 \cdot \cos(\varphi) - \sqrt{\varepsilon_1} \cdot \sqrt{\varepsilon_2 - \varepsilon_1 \cdot \sin^2(\varphi)}}{\varepsilon_2 \cdot \cos(\varphi) + \sqrt{\varepsilon_1} \cdot \sqrt{\varepsilon_2 - \varepsilon_1 \cdot \sin^2(\varphi)}} \quad (2.6)$$

В работе исследуются явления полного преломления и полного внутреннего отражения ([1], с. 103-108). Угол полного преломления φ_B (угол Брюстера) в нашем случае, когда $\mu_1 = \mu_2$, существует только для параллельной поляризации:

$$\varphi_B = \arcsin\left(\sqrt{\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}}\right) \quad (2.7)$$

Угол полного внутреннего отражения $\varphi_{ПВО}$ определяется формулой:

$$\varphi_{ПВО} = \arcsin\left(\sqrt{\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}}\right) \quad (2.8)$$

При углах падения, больших угла полного внутреннего отражения, коэффициент отражения равен единице, и преломленная волна отсутствует. Строгое решение электродинамической задачи показывает, что в этом случае вместо преломленной однородной плоской волны, распространяющейся под некоторым углом к границе раздела, наблюдается неоднородная плоская волна, распространяющаяся вдоль границы раздела. Амплитуда электромагнитного поля этой волны экспоненциально убывает при увеличении расстояния от границы раздела d :

$$E(d) = E_0 \cdot \exp(-kd) \quad (2.9)$$

Волны, амплитуды которых экспоненциально убывают при удалении от плоской границы, называют поверхностными.

Коэффициент k в (2.9) определяется соотношением:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{n_{12}^2 \cdot \sin^2(\varphi) - 1}, \quad (2.10)$$

где $n_{12}^2 = \varepsilon_1 / \varepsilon_2$ – квадрат относительного коэффициента преломления.

Можно показать, что если в поле этой поверхностной волны окажется какое-либо тело, амплитуда отраженной волны уменьшится, и часть энергии будет проходить через границу. В частности, если это тело будет выполнено из такого же диэлектрика и будет иметь плоскую границу, то в нем пойдет плоская волна под таким же углом, как падающая. Амплитуда этой волны зависит от величины воздушного зазора d . Для коэффициента преломления справедливо соотношение:

$$T_E(d) = \left[1 + \frac{(n_{12}^2 - 1) \cdot sh^2(kd)}{4n_{12}^2 \cdot (n_{12}^2 \cdot \sin^2(\varphi) - 1) \cdot (1 - \sin^2(\varphi))} \right]^{-1/2} \quad (2.11)$$

При стремлении зазора между границами раздела к нулю, коэффициент преломления стремится к единице, а коэффициент отражения – к нулю. Та-

кой результат очевиден, поскольку граница раздела при этом практически исчезает.

При больших d зависимость $T_E(d)$ становится экспоненциальной:

$$T_E(d) = \frac{\sqrt{4n_{12}^2 \cdot (n_{12}^2 \cdot \sin^2(\varphi) - 1) \cdot (1 - \sin^2(\varphi))}}{n_{12}^2 - 1} e^{-kd} \quad (2.12)$$

Экспоненциальный характер зависимости (2.12) связан с экспоненциальным спаданием поля (2.9).

2.3. Расчетное задание (выполняется каждым студентом)

При выполнении задания считайте, что длина волны используемых в работе электромагнитных колебаний $\lambda = 8$ мм. Применяемый в работе диэлектрик – органическое стекло, диэлектрическая проницаемость которого $\varepsilon = 2,6$, для воздуха примите $\varepsilon = 1$.

1. Рассчитайте и постройте график зависимости угла преломления от угла падения для случаев падения из диэлектрика в воздух и из воздуха в диэлектрик. В этом и последующих пунктах расчетного задания используйте формулы из справочного материала задачника [3], стр.65, 66. Учтите, что угол падения $\varphi \in (0, 90^\circ)$.

2. Рассчитайте угол Брюстера и угол полного отражения во всех возможных ситуациях.

3. Рассчитайте и постройте зависимость модуля коэффициента отражения от угла падения из воздуха в диэлектрик: а) при перпендикулярной поляризации волны; б) при параллельной поляризации волны.

4. Рассчитайте и постройте зависимости модуля коэффициентов отражения и преломления от угла падения для данных, указанных в табл. 2.1. Номер задания соответствует номеру лабораторного занятия.

Таблица 2.1

Номер задания	1	2	3	4
Вид поляризации	Параллельная	Перпендикулярная	Параллельная	Перпендикулярная
Параметры сред	$\varepsilon_1 = 1$ $\varepsilon_2 = 2,6$	$\varepsilon_1 = 2,6$ $\varepsilon_2 = 1$	$\varepsilon_1 = 1$ $\varepsilon_2 = 2,6$	$\varepsilon_1 = 2,6$ $\varepsilon_2 = 1$

2.4. Экспериментальное задание

1. Снимите зависимости углов преломления и отражения от угла падения из воздуха в диэлектрик при заданной поляризации волны (см. табл. 2.1). Для регистрации углов преломления и отражения добивайтесь таких положе-

ний приемных антенн, при которых амплитуда сигнала с выхода детектора максимальна.

2. Снимите зависимость коэффициента отражения от угла падения из воздуха в диэлектрик при перпендикулярной поляризации волны. Учтите, что нормировка при экспериментальном определении коэффициента отражения описана в разделе 2.1. «Описание экспериментальной установки», подраздел «Принцип действия».

3. Снимите зависимости коэффициента отражения от угла падения из воздуха в диэлектрик при параллельной поляризации волны.

4. Снимите зависимость угла преломления и коэффициента отражения от угла падения из диэлектрика в воздух при заданной поляризации волны (см. табл. 2.1). При определении коэффициента отражения для нормировки используйте показания вольтметра в секции отраженной волны, полученные при нескольких значениях угла падения, превышающего угол полного отражения (усредните).

2.5. Дополнительное задание (выполняется по указанию преподавателя)

Экспериментально снимите зависимости коэффициентов отражения и преломления от величины воздушного зазора при вертикальной поляризации для угла падения $\varphi = 50^\circ$ в случае падения из диэлектрика в воздух. Для этих же условий с помощью ПК рассчитайте зависимость коэффициента преломления от величины воздушного зазора.

2.6. Контрольные вопросы

1. При какой поляризации наблюдается явление полного преломления в случае сред с одинаковыми магнитными проницаемостями?

2. Волна произвольной поляризации падает на границу раздела двух сред. Магнитные проницаемости сред одинаковы, диэлектрические проницаемости относятся как 1:3. Каков угол падения, если отраженная волна оказывается линейно-поляризованной?

3. В каких случаях фаза волны при отражении: а) не изменяется; б) изменяется на 180° ?

4. Как связаны между собой коэффициенты отражения и преломления по электрическому и магнитному полю?

5. Как формулируются граничные условия для векторов поля на границе раздела двух сред?

6. На границу раздела двух сред падает волна с круговой поляризацией. Каков в общем случае характер поляризации отраженной и преломленной

волн?

7. Плоская электромагнитная волна нормально падает на поверхность идеального металла. Чему равняются коэффициенты отражения по полю E и по полю H ?

Литература

1. Баскаков С.И. Электродинамика и распространение радиоволн: Учебное пособие. М.: «ЛИБРОКОМ», 2012. – Глава 6.

2. Крамм М.Н. Сборник задач по основам электродинамики. – СПб.: Изд-во «Лань», 2011. – 256 с. – Глава 5.

Лабораторная работа № 3

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛНОВОДА ПРЯМОУГОЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ

Целью работы является исследование поля волны H_{10} в прямоугольном волноводе.

3.1. Описание экспериментальной установки

На рис. 3.1 изображена схема установки для исследования поля волны H_{10} в волноводе прямоугольного сечения размером 72x34 мм, которая состоит из измерительной волноводной линии и секций, соединенных фланцами.

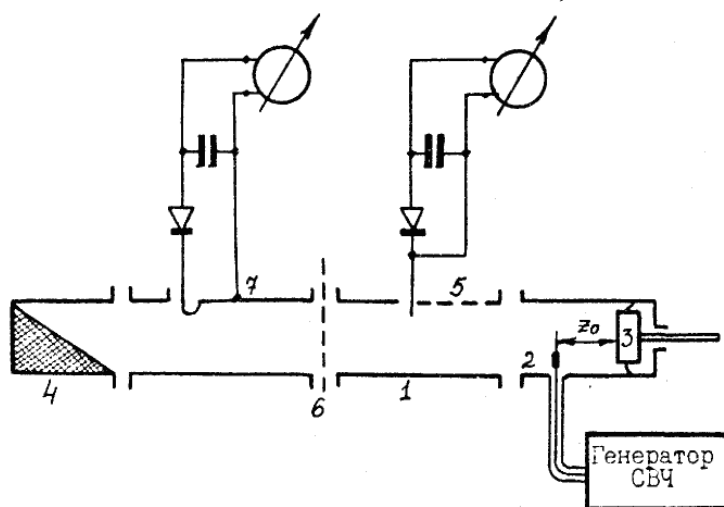


Рис. 3.1.

Источником колебаний в данной работе служит генератор СВЧ, работающий в 10-сантиметровом диапазоне волн. СВЧ колебания по коаксиальному кабелю поступают к штырю 2, являющемуся возбудителем поля в волноводе. Подвижный поршень 3 используется для согласования выгодного сопротивления возбуждающего устройства (штыря) с волноводом. Режим согласования обеспечивает наиболее интенсивное возбуждение волновода. На конец волновода может подключаться закорачивающий металлический поршень (для создания режима стоячей волны) или поглощающая нагрузка 4 (для создания режима бегущей волны). Нагрузка 4 представляет собой отрезок волновода, куда вставлено несколько поглощающих пластинок, расположенных параллельно электрическим силовым линиям поля волны H_{10} . Отрезок волновода I с продольной щелью в широкой стенке, вдоль которой перемещается измерительная головка с зондом 5, проходящим внутрь волновода, является волноводной измерительной линией. Зонд линии через детектор соединен с микроамперметром, благодаря чему оказывается возможным изме-

рять относительные значения напряженности электрического поля в волноводе. В одном из фланцевых соединений сделан специальный зазор 6 для введения в волновод фильтров – металлических решеток, пластины которых идут параллельно широкой или узкой стенке волновода.

Поперечная измерительная линия 7 служит для изучения распределения напряженностей электрического и магнитного полей в поперечном сечении волновода. Так как в широкой стенке прямоугольного волновода с волной типа H_{10} нельзя прорезать поперечную щель, не нарушив распределения поля в волноводе, зонд поперечной линии движется вместе с притертой крышкой в верхней стенке.

Для измерения напряженности электрического поля в качестве зонда используется небольшой штырь, вводимый в волновод, а для измерения напряженности магнитного поля – небольшая петля. Конструктивно электрический и магнитный зонды выполнены в виде отдельных детекторных головок, вставляемых в отверстие в притертой крышке по мере необходимости.

3.2. Элементы теории

Для оценки диапазона волн, в котором волновод может быть применен при использовании волны типа H_{10} в чистом виде, нужно воспользоваться условием единственности существования волны (см. [1], с. 146-150). Для волны H_{10} это условие выглядит так:

$$2a > \lambda > a, \lambda > 2b$$

где $\lambda = \lambda_0 / \sqrt{\mu\epsilon}$ – длина плоской волны в безграничной среде с параметрами μ, ϵ , λ_0 – длина волны генератора.

Критическая длина волны H_{10} $\lambda_{кр} = 2a$; распространение поля данной волны в волноводной системе невозможно при $\lambda \geq \lambda_{кр}$.

Для исследования распределения поля в волноводе необходимо определить составляющие поля. Их можно получить из выражений для поля волн магнитного типа H_{mn} , приведенных в [1] (с. 144-146).

При анализе поля в реальных волноводах выражения для составляющих поля определяют, считая материал стенок идеальным. В действительности, конечная проводимость стенок приводит к тому, что структура поля в реальном волноводе отлична от случая идеального волновода.

Так как проводимость реальных материалов, используемых для волноводов, весьма высока ($\sigma \approx 10^7 \text{ См/м}$), то можно считать, что структура электромагнитного поля волны в реальном волноводе мало отличается от структуры поля в волноводе со стенками из идеального металла.

Построение картин поля в прямоугольном волноводе можно провести по методике, предлагаемой в [1] (с. 150-158).

Для построения картин распределения токов в стенках волновода (п. 4 расчетного задания) необходимо знать вектор поверхностной плотности тока проводимости $\dot{J}_{\text{пов}}$. Величина и направление определяются из граничных условий для тангенциальных составляющих магнитного поля у идеального металла:

$$\dot{J}_{\text{пов}} = [\bar{1}_n \dot{H}], \quad (3.2)$$

здесь \dot{H} – вектор магнитного поля у стенки волновода; $\bar{1}_n$ – нормаль к поверхности, направленная из металла внутрь волновода.

Полученная картина распределения токов позволяет определить тип щели (излучающая или неизлучающая) для волновода с волной заданного типа. Следует помнить, что в волноводной технике щелью называют прямоугольное отверстие, длина которого значительно превосходит ширину. Если щель пересекает линии поверхностного тока, то она излучающая. Если щель прорезана параллельно линиям тока, то она является неизлучающей.

Имея в распоряжении картины силовых линий поля и токов заданного типа волны, можно перейти к исследованию способов возбуждения волны заданного типа в волноводе.

Волну в волноводе можно возбудить:

а) проводником (штырем) с током, расположив его вдоль направления вектора напряженности электрического поля в тех местах, где это поле должно иметь максимальное значение;

б) рамкой (петлей) с током, поместив ее в волноводе там, где напряженность магнитного поля должна быть максимальна. Плоскость рамки необходимо ориентировать перпендикулярно магнитным силовым линиям;

в) щелью, которую необходимо прорезать перпендикулярно силовым линиям тока, протекающего по стенкам волновода. На щели с помощью внешнего источника должно быть создано электрическое поле, силовые линии которого продолжали бы линии тока.

Обычно волновод на одном конце закрывается проводящей стенкой (подвижным поршнем). Благодаря этому, передача энергии происходит только в одну сторону. Величина мощности, отдаваемой источником в волновод (интенсивность возбуждения), зависит от расстояния Z_0 между возбуждающим элементом и поршнем. На установке из-за наличия упора можно установить минимальное значение Z_0 равным 3 см.

Наибольшая интенсивность возбуждения получается, если расстояние $Z_0 = (2m + 1) \cdot \lambda_{H10}/4$, где m – целое число, в том числе и ноль. Согласно теореме взаимности (см. [1], с. 277-279), конструкции устройств, используемых для извлечения энергии из волновода и для возбуждения волн в этом же волноводе, должны быть одинаковыми. Поэтому извлечь энергию из волновода можно с помощью штыря, рамки или щели.

Затухание волн, вызываемое омическими потерями в стенках волновода, невелико. Однако, при достаточно большой длине волноводной линии передачи полное затухание h' может быть весьма ощутимым, поэтому важно знать величину коэффициента затухания (см. [1], с. 208-213).

Для волны H_{10} в прямоугольном волноводе затухание поля на единицу длины выражается зависимостью:

$$h' = \frac{0,091}{\sqrt{\sigma \cdot \lambda_0}} \cdot \frac{1 + \frac{2b}{a} \cdot \left(\frac{\lambda_0}{2a}\right)^2}{b \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{2a}\right)^2}}, \text{ м}^{-1}, \quad (3.3)$$

Мощность, которую можно передать по волноводу в режиме бегущей волны, не должна превышать предельного значения:

$$P_{\text{пред}} = \frac{E_{\text{пред}}^2 ab}{480\pi} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{2a}\right)^2} \quad (3.4)$$

где для волновода, заполненного воздухом, $E_{\text{пред}} = 30 \text{ кВ/см}$.

Практика показывает, что допустимая рабочая мощность должна составлять не более третьей-пятой части $P_{\text{пред}}$, рассчитанной для регулярного волновода в режиме без отражения.

3.3. Расчетное задание (выполняется каждым студентом)

1. Определите, какие типы волн могут распространяться в заполненном воздухом прямоугольном волноводе при длине волны генератора λ_0^* (см. табл. 3.1). Номер задания соответствует номеру занятия, размеры поперечного сечения даны в описании установки. Формулы для критической длины волны возьмите из задачника [2], стр.93.

2. Оцените диапазон длин волн, в котором волновод может быть применен при условии, что распространяется только основной тип волны H_{10} . Рассчитайте длину волны типа H_{10} в волноводе λ_B , если генератор СВЧ работает на частоте 3000 МГц (см. задачник [2], стр.94).

3. Повторите п.2 задания при условии, что волновод заполнен диэлектриком, диэлектрическая проницаемость которого ϵ (см. табл. 3.1).

4. Запишите формулы для составляющих поля волны H_{10} . Рассчитайте и постройте графики зависимости нормированной **амплитуды** (не путать с комплексной амплитудой) всех трех составляющих поля волны типа H_{10} от координаты x . Для нормировки используйте максимальные значения амплитуды соответствующих составляющих. При этом для волны H_{10} :

$$\frac{|\dot{E}_y|}{|\dot{E}_y|_{\max}} = \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right); \quad \frac{|\dot{H}_x|}{|\dot{H}_x|_{\max}} = \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right); \quad \frac{|\dot{H}_z|}{|\dot{H}_z|_{\max}} = \cos\left(\frac{\pi x}{a}\right).$$

5. Рассчитайте и постройте график зависимости $\frac{|\dot{E}_y|}{|\dot{E}_y|_{\max}}$ от $(z - z_1)$ в

режиме стоячей волны, полагая, что в точке $z = z_1$ находится короткозамыкающий металлический поршень. Расчет проведите в диапазоне значений координаты $(z_1 - \lambda_B) \leq z \leq z_1$ в условиях п.2. Используйте формулу:

$$\frac{|\dot{E}_y(z - z_1)|}{|\dot{E}_y|_{\max}} = \left| \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda_B}(z - z_1)\right) \right|.$$

6. Изобразите картину поля и картину распределения токов в стенках волновода в случае волны типа H_{10} . Изобразите на картине токов щели, являющиеся неизлучающими, и щели, являющиеся излучающими (подпишите).

Таблица 3.1

№ задания	1-е занятие	2-е занятие	3-е занятие	4-е занятие
$\lambda_0^*, \text{м}$	0,07	0,075	0,066	0,10
ε	2,0	2,6	3,8	6,0

3.4. Экспериментальное задание

1. Убедитесь, что конфигурация лабораторной установки соответствует рис.3.1. Учитывая роль поглощающей нагрузки, запишите, каков режим работы волновода. Включите генератор СВЧ с частотой колебаний 3 ГГц. Перемещая подвижный поршень 3, добейтесь максимальной интенсивности возбуждения поля в волноводе. Интенсивность возбуждения оценивайте по уровню сигнала, снимаемого с измерительной линии.

2. Снимите и постройте зависимость интенсивности возбуждения волновода от расстояния z_0 между поршнем и возбуждающим штырем (рис.3.1). Вернитесь к положению поршня, обеспечивающему максимальную интен-

сивность. Учтите, что $z_0 = z_{\text{лин}} + 30 \text{ мм}$, где $z_{\text{лин}}$ – показания измерительной линейки на узле перемещения поршня (рис.3.1).

3. Изучите картину поля волны типа H_{10} в прямоугольном волноводе. Для этого в волновод последовательно введите диафрагму с вертикальными щелями и диафрагму с горизонтальными щелями. С помощью зонда-штыря в поперечной измерительной линии определите, изменилась ли интенсивность поля за диафрагмой. Сделайте заключение об ориентации вектора напряженности электрического и магнитного поля. Сделайте вывод, какая диафрагма пропускает волну типа H_{10} , а какая отражает.

4. С помощью измерительной линии измерьте длину волны в волноводе и сравните ее с расчетным значением. Измерение длины волны производится по расстоянию между двумя последовательными минимумами напряженности электрического поля. Это расстояние будет равняться половине длины волны в волноводе. Фиксация минимума напряженности электрического поля на линейке измерительной линии проводится методом вилки (метод двух отсчетов), который показан на рис.3.2. Измерения производятся тогда, когда в волноводе обеспечивается существование режима стоячей волны. Чтобы добиться этого, в щель между продольной и поперечной секциями поместите отражающую диафрагму.

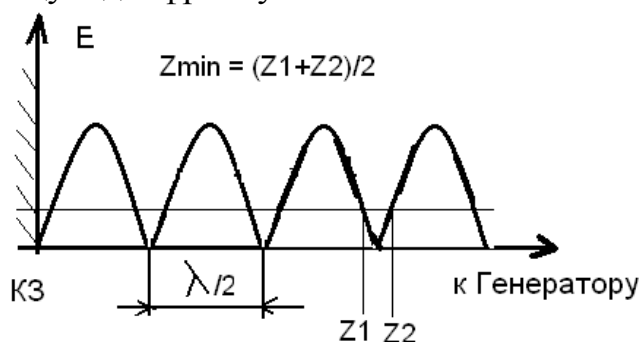


Рис. 3.2.

5. Зафиксируйте и измерьте положение минимума напряженности электрического поля в центральной области линейки измерительной линии. Обозначьте полученную координату зонда как z_1 . Снимите зависимость показаний измерительного вольтметра от координаты зонда измерительной линии в пределах $(z_1 - \lambda_B) \leq z \leq z_1$. Полагая детектирование приближенно квадратичным, на основании проведенных измерений определите зависимость

$\frac{|\dot{E}_y|}{|\dot{E}_y|_{\text{max}}}$ от $(z - z_1)$ и нанесите полученные точки на рассчитанный дома график аналогичной зависимости для стоячей волны в пределах $(z_1 - \lambda_B) \leq z \leq z_1$.

6. Извлеките из волновода отражающую диафрагму. Исследуйте распределение поля в поперечном сечении волновода, для чего с помощью поперечной секции снимите зависимость нормированной амплитуды напряженности электрического поля от координаты x . Нормировка аналогична п.4 домашнего задания. Детектирование считайте квадратичным. В волноводе, как и раньше, сохраняйте режим бегущей волны. Полученные точки нанесите на график, полученный в п.4 домашнего задания.

7. **Дополнительное задание.** Снимите зависимость показаний измерительного вольтметра от координаты зонда измерительной линии в пределах $(z_1 - \lambda_B/4) \leq z \leq z_1$. При этом снимите не менее 10 точек. Для данной области

рассчитайте и постройте зависимость $\sqrt{\frac{U(z - z_1)}{U_{\max}}}$ от $\left| \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda_B}(z - z_1)\right) \right|$.

Проанализируйте эту зависимость и сделайте вывод, является ли детектирование квадратичным, либо вывод, в каком диапазоне напряжений детектирование является квадратичным. Учтите, что при квадратичном детектировании показания вольтметра пропорциональны квадрату амплитуды напряженности электрического поля.

3.5. Контрольные вопросы

1. Как показать, что электромагнитное поле волны H_{10} не может иметь компоненты электрического поля E_x ?
2. Почему фильтр с полосками, параллельными координатной оси y , препятствует распространению волны типа H_{10} в прямоугольном волноводе?
3. Почему наиболее интенсивное возбуждение волновода **получается при** расстоянии между поршнем и штырем, примерно кратным нечетному числу четвертой длины волны в волноводе?
4. Как влияют размеры волновода на длину волны в волноводе при неизменной частоте электромагнитных колебаний?
5. Как изменится затухание волновода, работающего на колебании H_{10} , если увеличить размер a волновода, размер b волновода?
6. Какая волна в прямоугольном волноводе является основной для волн электрического типа и почему? (Положить, что волны магнитного типа не возбуждаются.)
7. Как можно возбудить штырем с электрическим током волну E_{11} в прямоугольном волноводе (или волну H_{01})?
8. Как можно возбудить волну H_{10} рамкой с электрическим током в прямоугольном волноводе? Каково должно быть расстояние между поршнем и рамкой, чтобы интенсивность возбуждения была наибольшей?

9. Как зависит предельная мощность, переносимая волной, от размеров волновода?

Литература

1. Баскаков С.И. Электродинамика и распространение радиоволн: Учебное пособие. М.: «ЛИБРОКОМ», 2012. – Глава 8.
2. Крамм М.Н. Сборник задач по основам электродинамики. – СПб.: Изд-во «Лань», 2011. – 256.с.. – Глава 6.

Лабораторная работа №4

ИССЛЕДОВАНИЕ ОБЪЕМНОГО РЕЗОНАТОРА, СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ПРЯМОУГОЛЬНОГО ВОЛНОВОДА БЫСТРЫХ ВОЛН

Целью работы является исследование свойств поля для колебаний типа Н в объемном резонаторе, созданном на базе прямоугольного волновода.

4.1. Описание экспериментальной установки

Структурная схема экспериментальной установки представлена на рис. 4.1. Источником энергии является генератор СВЧ, работающий в трехсантиметровом диапазоне. Аттенюатор позволяет вводить затухание в тракт, чтобы регулировать уровень сигнала. Вентиль, совместно с аттенюатором, обеспечивает развязку между генератором и резонатором.

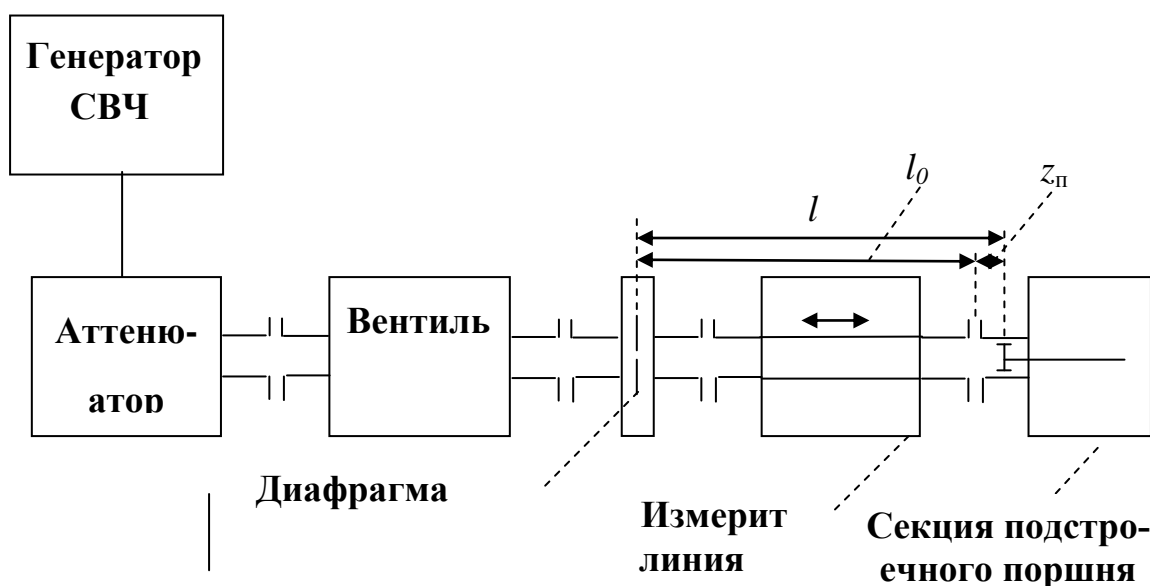


Рис.4.1. Структурная схема экспериментальной установки

Колебания в резонаторе возбуждаются с помощью диафрагмы с прямоугольным отверстием (щелью), которая ориентирована вдоль линий вектора напряженности магнитного поля в возбуждаемом колебании. Резонатор образован отрезком прямоугольного волновода между возбуждающей диафрагмой и подстроечным поршнем. При этом длина резонатора

$$l = l_0 + z_{\text{п}},$$

где l_0 – длина части резонатора без секции с поршнем, $z_{\text{п}}$ – продольная координата поршня в подстроечной секции. Отрезок прямоугольного волновода в резонаторе конструктивно является частью измерительной линии, в которой электрический зонд (штырь) может перемещаться вдоль продольной щели, прорезанной в центре широкой стенки. Зонд соединен с детекторной

головкой, которая подключена к измерительному вольтметру. Поскольку штырь электрического зонда ориентирован вертикально, то с помощью измерительной линии можно снимать продольное распределение амплитуды напряженности электрического поля в резонаторе $|\dot{E}_y(z)|$.

4.2. Расчетное задание (выполняется каждым студентом)

1. Рассчитайте длину резонатора для возбуждения колебаний типа $H_{10(10)}$, $H_{10(11)}$ и $H_{10(12)}$ в резонаторе с размерами поперечного сечения 23мм x 10мм на частоте 11,5 ГГц. Учтите, что для данных типов колебаний индексы $m=1$; $n=0$, а $p=10, 11$ и 12 , соответственно. Используйте справочный материал в задачнике, стр.129. Для каждого значения длины резонатора определите координату подстроечного поршня по формуле $z_{\Pi} = l - l_0$, где $l_0=157,0$ мм. Полученные значения сведите в таблицу, оставив 2 строчки для экспериментальных значений z_{Π} и l .

2. Определите, какому неравенству должна удовлетворять частота генератора, чтобы в резонаторе с размерами поперечного сечения 23мм x 10мм могли возбуждаться колебания: а) типа E_{11P} ; б) типа H_{01P} (считайте, что длину резонатора можно менять в зависимости от выбранного типа).

3. В пределах изменения координаты z от 53 мм до 103 мм рассчитайте значения z , соответствующие положению минимумов и максимумов распределения амплитуды напряженности электрического поля на частоте 11,5 ГГц, тип колебания $H_{10(10)}$. Используйте справочный материал в задачнике, стр.130. Полученные значения координаты z сведите в таблицу (отдельные строчки для координат минимумов и максимумов), оставьте 2 строчки для экспериментальных значений.

4. Для условий п.1 рассчитайте и постройте график зависимости нормированной амплитуды напряженности электрического поля от координаты z в пределах от 53 мм до 103 мм. Нормировку проводите по максимальной амплитуде напряженности электрического поля. По горизонтальной оси откладывайте $z - z_1$, где $z_1 = 51,2$ мм – координата, соответствующая нулевой отметке на линейке измерительной линии. При построении учитывайте точки, полученные в п.3. Используйте следующую расчетную формулу:

$$\frac{|\dot{E}_y(z)|}{|\dot{E}_y|_{\max}} = \left| \sin\left(\frac{p\pi}{l} z\right) \right|.$$

5. Рассчитайте собственную добротность резонатора за счет потерь в стенках для колебаний типа $H_{10(10)}$ и $H_{10(11)}$ при выполнении условий п.1 (формулы на стр. 133 задачника). Считайте, что стенки резонатора покрыты

слоем серебра (удельная проводимость в таблице на стр. 243 задачника [3]). Результаты расчета занесите в таблицу 4.3, где предусмотрите строчки для экспериментальных значений нагруженной добротности, нагруженной полосы пропускания и собственной добротности.

6. Изобразите картины поля (в сечениях) и токов (в объеме) для колебаний типа H_{102} и E_{111} .

7. Определите, как должна ориентироваться поперечная диафрагма в торце прямоугольного резонатора для возбуждения колебания типа H_{10P} .

8. Запишите формулу для определения нагруженной добротности резонатора, если известны собственная добротность и коэффициент связи.

Примечание. Под коэффициентом связи понимают отношение мощности потерь во внешних устройствах, связанных с резонатором, к мощности потерь в самом резонаторе (потери в стенках и в заполняющей среде):

$$K_{\text{св}} = \frac{P_{\text{нагр}}}{P_{\text{пот. собств}}}.$$

В колебательном контуре (курс теории цепей) также вводятся понятия собственной и нагруженной добротности, а коэффициент связи определяется аналогично и рассчитывается, как отношение резонансного сопротивления к шунтирующему контур сопротивлению.

4.3. Экспериментальное задание

1. Включите генератор СВЧ и вольтметр, дайте им прогреться 15 минут. Убедитесь, что на генераторе выставлена частота 11,51 ГГц, которая с учетом погрешности прибора соответствует рабочей частоте 11,50 ГГц, нажата кнопка П|. Учкой “Уров. мощности” установите на стрелочном индикаторе генератора уровень примерно 25 мкА. Убедитесь, что СВЧ колебания подаются от генератора по коаксиальному кабелю к резонатору. На вольтметре установите предел измерений «10 мВ». Переключатель коэффициента усиления установите в положение «K=1». Если стрелка на вольтметре «зашкаливает», увеличьте ослабление аттенюатора.

Установите поршень резонатора в положение $z_{\Pi} = 0.00$ мм. На аттенюаторе установите ослабление 0. Установите зонд измерительной линии в положение на шкале линии $z_{\text{Л}} = z - z_1 = 3$ мм (см. п.4 расчетного задания).

2. Перемещая поршень резонатора, добейтесь возбуждения колебания типа $H_{10(10)}$. Если стрелка измерительного вольтметра «зашкаливает», подберите ослабление аттенюатора, чтобы при установленном пределе измерения вольтметра «10 мВ» (переключатель в положении «K=1») стрелка вольтметра находилась на второй половине шкалы. Запишите полученные значения ко-

ординаты поршня z_{Π} и длины резонатора l в таблицу 4.1 из домашней подготовки. Сравните установленную длину резонатора с расчетным значением. При наличии заметных расхождений проанализируйте ситуацию и определите причину ошибки.

3. Снимите зависимость нормированной амплитуды напряженности электрического поля от координаты z с шагом 2 мм. Условия съема и нормировки должны соответствовать п.4 расчетного задания. Учтите, что **в данном и последующих пунктах** экспериментального задания детектирование является **квадратичным**, то есть показания вольтметра пропорциональны квадрату амплитуды напряженности электрического поля. Полученные точки нанесите на график, построенный при выполнении п.4 расчетного задания. При этом по горизонтали, как в п.4 расчетного задания, откладываете координаты по линейке измерительной линии: $z_{\text{лин}} = z - z_1$, где $z_1 = 52,15$ мм – координата в резонаторе, соответствующая нулевой отметке на линейке измерительной линии

Отдельно зафиксируйте координаты z точек минимальной и максимальной амплитуды ($z = z_{\text{лин}} + z_1$). Занесите эти координаты в таблицу 4.2 из домашней подготовки.

4. Установите зонд измерительной линии в положение одного из максимумов. Исследуйте АЧХ резонатора. Для этого при фиксированной, как и ранее, частоты генератора СВЧ, снимите нормированную зависимость показаний вольтметра (в мВ) от изменения длины резонатора $U = U(l - l_0) = U(z_{\Pi} - z_{\Pi \text{ рез}})$, где $z_{\Pi \text{ рез}}$ – координата поршня при резонансе. При съеме резонансной кривой аккуратно вращайте винт поршня в небольших пределах, в обе стороны от положения резонанса. Постройте снятую кривую и по графику определите изменение длины резонатора в пределах полосы пропускания. Учтите, что уровень $1/\sqrt{2}$ для отсчета границ полосы пропускания соответствует измерению амплитуды колебаний, а в установке показания приборов пропорциональны квадрату амплитуды колебаний. Вычислите нагруженную добротность резонатора и полосу пропускания для колебания $H_{10(10)}$. Результаты занесите в таблицу 4.3 из домашней подготовки.

6. Пользуясь измеренной нагруженной добротностью и собственной добротностью резонатора, рассчитанной дома, найдите коэффициент связи резонатора с внешними устройствами $K_{\text{св}}$ для колебания $H_{10(10)}$ (см. п.8 расчетного задания).

7. Выполните п.2 экспериментального задания для колебания типа $H_{10(11)}$. Перемещая зонд измерительной линии, зафиксируйте координаты z точек минимальной и максимальной амплитуды. Сравните эти координаты с

координатами, полученными в таблице 4.2 из домашней подготовки. Объясните полученный результат в отчете.

8. Измерьте нагруженную добротность резонатора для колебания $H_{10(11)}$ аналогично п.4. Медленно перемещайте поршень резонатора в обе стороны от положения резонанса, зафиксировав координаты поршня на границах полосы пропускания. Вычислите нагруженную добротность резонатора и полосу пропускания для колебания $H_{10(10)}$. Результаты занесите в таблицу 4.3 из домашней подготовки.

7. Повторите п.6 экспериментального задания для колебаний типа $H_{10(11)}$.

Дополнительное задание (выполняется по указанию преподавателя).

8. Выполните п.2 экспериментального задания для колебания типа $H_{10(12)}$.

4.4. Контрольные вопросы

1. При каком типе колебаний резонансная частота прямоугольного объемного резонатора не зависит от его длины?

2. Как изменится резонансная частота прямоугольного объемного резонатора при колебаниях типа H_{101} в случае уменьшения его ширины?

3. Какие граничные условия накладываются при определении поля электрического и магнитного типов в прямоугольном объемном резонаторе?

4. Каково распределение компонент электромагнитного поля внутри резонатора для колебаний типа E_{110} , H_{101} , $H_{10(10)}$?

5. Нарисуйте картину поля и картину токов колебаний типа E_{110} , H_{101} , H_{102} .

6. Нарисуйте зависимость амплитуды поля в резонаторе от частоты при возбуждении поля элементарным вибратором.

7. Каким образом выводятся выражения для добротности объемных резонаторов?

8. Как связана нагруженная добротность с собственной добротностью резонатора?

Литература

1. Баскаков С.И. Электродинамика и распространение радиоволн: Учебное пособие. М.: «ЛИБРОКОМ», 2012. – Глава 12.

2. Крамм М.Н. Сборник задач по основам электродинамики. – СПб.: Изд-во «Лань», 2011. – 256 с. – Глава 7.

Лабораторная работа № 5

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН В ЗАМЕДЛЯЮЩИХ СТРУКТУРАХ

Целью работы является исследование электромагнитного поля поверхностной волны и замедляющих свойств гребенчатой структуры. В качестве замедляющей системы может использоваться и диэлектрическая пластина.

5.1. Описание экспериментальной установки

Все измерения в данной работе проводятся в трехсантиметровом диапазоне волн. Экспериментальная установка, используемая для исследования гребенчатых структур, изображена на рис. 5.1. Источником колебаний в данной работе служит генератор стандартных сигналов. Электромагнитные колебания СВЧ диапазона по коаксиальному кабелю 1 поступают к рупору 2, являющемуся возбудителем поверхностных волн. Объектами исследования являются сменные гребенки 3, которые помещены на станину 4, выполненную из металла с большой проводимостью. Метод измерения замедления фазовой скорости, примененный в данной работе, заключается в измерении длины стоячей волны, образующейся над замедляющей структурой.

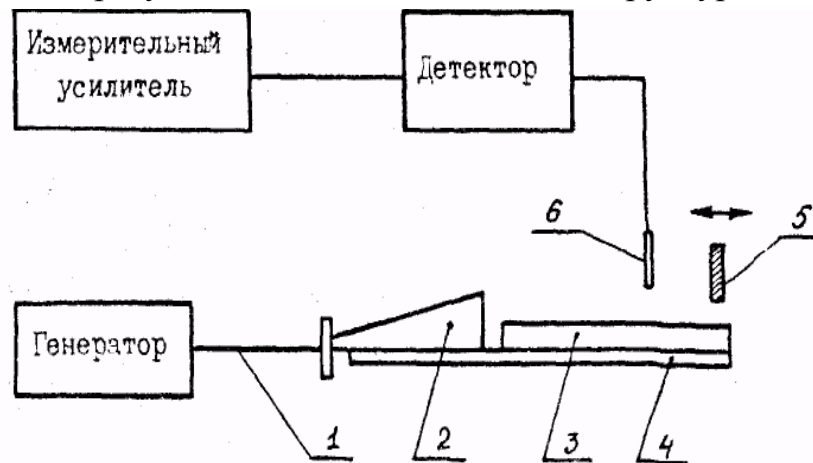


Рис. 5.1

Рис.5.1. Схема установки.

Для изменения фазы отраженной волны служит короткозамыкатель 5, перемещение которого измеряется по шкале с нониусом, Амплитуда СВЧ поля над замедляющей структурой измеряется с помощью зонда 6, который перемещается в вертикальной плоскости микрометрическим винтом. Зонд через коаксиальный кабель соединен со вспомогательным волноводом, который оканчивается детекторной головкой. Отсюда принятый и продетектиро-

ванный сигнал поступает на измерительный усилитель. Из-за квадратичного закона детектирования показания измерительного усилителя пропорциональны квадрату величины электрического поля $|\dot{E}_x|^2$.

Геометрические параметры гребенчатой структуры поясняются рисунком 5.2.

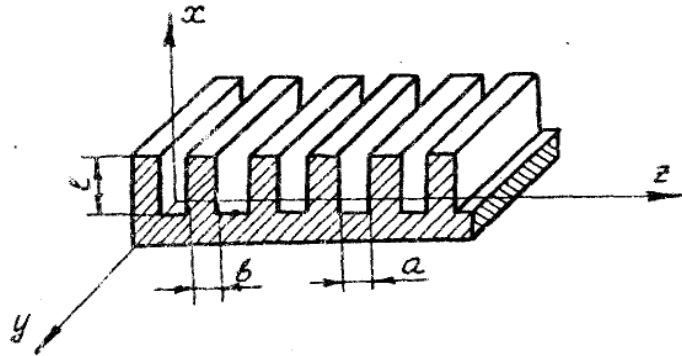


Рис.5.2. Гребенчатая замедляющая структура.

5.2.Элементы теории

Исследование поля гребенчатой замедляющей структуры требует использования решения уравнений электродинамики, записанных для гребенчатого волновода (см. [1], с. 200-207). Теория такого волновода сложна, поэтому при проведении инженерных расчетов вводят некоторые упрощения:

- протяженность волновода вдоль оси y полагается бесконечной;
- поле волны электрического типа над гребенчатым волноводом (область 1, $x \geq l$ на рис. 5.1) определяется преимущественно основной гармоникой, составляющие поля которой можно записать в виде:

$$\begin{aligned}\dot{E}_z &= A_0 \cdot e^{-px} \cdot e^{-jhz} ; \\ \dot{E}_x &= -j A_0 \cdot \frac{h}{p} \cdot e^{-px} \cdot e^{-jhz} ; \\ \dot{H}_y &= -j \frac{\omega \cdot \epsilon_0}{p} \cdot A_0 \cdot e^{-px} \cdot e^{-jhz} ;\end{aligned}\tag{5.1}$$

Здесь A_0 – амплитудный коэффициент, p – поперечное волновое число, $p \geq 0$:

$$p = \beta \operatorname{tg}(\beta l) ;\tag{5.2}$$

h – продольное волновое число:

$$h = \sqrt{\omega^2 \mu_0 \varepsilon_0 + p^2} = \sqrt{\beta^2 + p^2}; \quad (5.3)$$

$\beta = \omega \sqrt{\mu_0 \varepsilon_0} = 2\pi f / c = 2\pi / \lambda_0$, λ_0 – длина волны генератора.

Уравнение (5.2) называют характеристическим уравнением гребенчатой системы. Волны магнитного типа в гребенчатом волноводе не существуют. Поле в канавках "гребенки" можно определить, пользуясь выражениями:

$$\begin{aligned} \dot{E}_{z_{гр}} &= B_0 \sin \beta x; \\ \dot{H}_{y_{гр}} &= -j \frac{\beta}{\omega \mu_0} \cdot B_0 \cos \beta x. \end{aligned} \quad (5.4)$$

При исследовании поля в канавках гребенки, его можно рассматривать как поле стоячей волны в двухплоскостной линии, которая образована ребрами "гребенки", короткозамкнутыми на конце. При сравнении результатов расчета с результатами эксперимента необходимо помнить, что использование в расчетах основной гармоники поля над гребенчатым волноводом возможно, если мал период структуры, и влияние более высоких гармоник на структуру медленной волны невелико.

Приближенное решение дает результаты, достаточно близкие к истинным значениям. Практически, "гребенка" с бесконечно малым шагом неосуществима. В общем случае, когда расстояние между соседними ребрами соизмеримо с длиной волны и толщина ребер не мала, расчет поля в ребристой структуре существенно усложняется.

Важным параметром замедляющих структур является коэффициент замедления:

$$K_{зам} = \frac{v_{\Phi}}{c} = \frac{\beta}{h} = \frac{\lambda_{гр}}{\lambda_0}. \quad (5.5)$$

В соответствии с (5.2), (5.3)

$$K_{зам} = \frac{\beta}{\sqrt{\beta^2 + p^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + (tg \beta l)^2}} = |\cos \beta l| \text{ при } p \geq 0.$$

Поле волны электрического типа над диэлектрической пластиной подробно исследовано в ([1], с 320-324).

5.3. Расчетное задание (выполняется каждым студентом)

1. Постройте график зависимости коэффициента замедления фазовой скорости как функции глубины паза гребенки. В данном и последующих расчетах считайте частоту колебаний генератора равной 9,7 ГГц. Расчет проводите по приближенным формулам для бесконечно частой гребенки в области $l \in (0, \lambda_0/4)$, где $\lambda_0 = c/f$ – длина волны генератора.

2. Рассчитайте длину волны в четырех различных гребенчатых структурах. Параметры гребенок: $a = 1$ мм, $b = 1,15$ мм, l возьмите из табл. 5.1. Каждая бригада рассчитывает один из вариантов задания из табл. 5.1.

Таблица 5.1				
№ гребенки	1-е за- нятие	2-е за- нятие	3-е за- нятие	4-е за- нятие
1	2.0 мм	2.0 мм	2.0 мм	2.0 мм
2	4.0 мм	4.0 мм	4.0 мм	4.0 мм
3	6.0 мм	6.0 мм	6.0 мм	6.0 мм
4	6.5 мм	7.0 мм	5.0 мм	3.0 мм

3. Рассчитайте величины h и p для поверхностной волны над гребенками 2, 3, 4. Результаты расчетов сведите в таблицу 5.2, в которой предусмотрите строчку для экспериментальных значений этих величин.

4. Рассчитайте и постройте графики, характеризующие закон убывания нормированной амплитуды составляющей \dot{E}_x поля поверхностной волны от координаты x для гребенок 2 и 3. Нормировку проведите по амплитуде составляющей \dot{E}_x на расстоянии $l_0 = 0,5$ мм от поверхности гребенки. При этом координата x для этой высоты $x_0 = l + l_0$. Перед проведением расчетов запишите формулу для нормированной амплитуды E_x при $x \geq x_0$:

$$\frac{|\dot{E}_x(x)|}{|\dot{E}_x(x_0)|} = e^{-p(x-x_0)}, \quad x \geq x_0.$$

По горизонтали на графиках откладывайте величину $(x - x_0)$ в пределах от 0 мм до 3 мм. Для обеих гребенок первый график данной зависимости постройте в линейном масштабе, а второй график – в логарифмическом масштабе по вертикальной оси.

5.4. Экспериментальное задание

1. Произвести измерения длин поверхностных волн, существующих над гребенкой 1, а затем над гребенками 2 и 3. Для этого по нониусу короткозамыкателя необходимо измерить расстояние, отделяющее друг от друга два соседних минимума амплитуды напряженности электрического поля. Последнее расстояние будет равняться половине длины волны над гребенкой. По результатам эксперимента определите коэффициент замедления.

Примечание. В связи с эффектами интерференции (продумайте, какие волны могут интерферировать) возможно появление дополнительных минимумов амплитуды поля. Поэтому, перемещая короткозамыкатель, необходи-

мо измерить положение нескольких последовательных минимумов и определить регулярную составляющую для половины длины волны.

2. Снимите зависимость нормированной амплитуды составляющей \dot{E}_x напряженности электрического поля от координаты x для гребенчатой структуры 3. Пределы изменения координаты x и условие нормировки должны соответствовать п. 4 расчетного задания. Учтите, что режим детектирования близок к *квадратичному*, то есть показания вольтметра пропорциональны квадрату амплитуды напряженности электрического поля. Полученные экспериментальные точки нанесите на графики п.4 расчетного задания.

3. Экспериментально исследуйте параметры p и h поверхностных волн для гребенчатой структуры 3. Эти исследования можно провести, используя экспериментальные данные, полученные при выполнении пунктов 1 и 2 экспериментального задания.

4. По указанию преподавателя повторите пп. 2 и 3 экспериментального задания для гребенки 2.

5.5. Контрольные вопросы

1. Какие волны называются поверхностными?
2. Что такое характеристическое уравнение замедляющей гребенчатой системы?
3. Возможны ли поверхностные волны над гребенкой с глубиной паза 40 мм, если длина волны $\lambda_o = 6$ см?
4. Как нужно было бы изменить блок-схему экспериментальной установки для того, чтобы короткозамыкатель мог оставаться неподвижным?
5. Какова структура поля в канавках гребенки? Изобразите примерную картину силовых линий электромагнитного поля.
6. Каковы технические применения замедляющих систем?
7. Что нужно изменить в экспериментальной установке, чтобы снять распределение составляющей поля H_y вдоль оси x ?

Литература

1. Баскаков С.И. Электродинамика и распространение радиоволн: Учебное пособие. М.: «ЛИБРОКОМ», 2012. – Глава 15, раздел 15.2.

Лабораторная работа № 6 ИССЛЕДОВАНИЕ Н-ОБРАЗНОГО МЕТАЛЛОДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВОЛНОВОДА

Целью работы является изучение закономерностей распространения поверхностных волн на примере Н-образного металлодиэлектрического волновода.

6.1. Описание экспериментальной установки

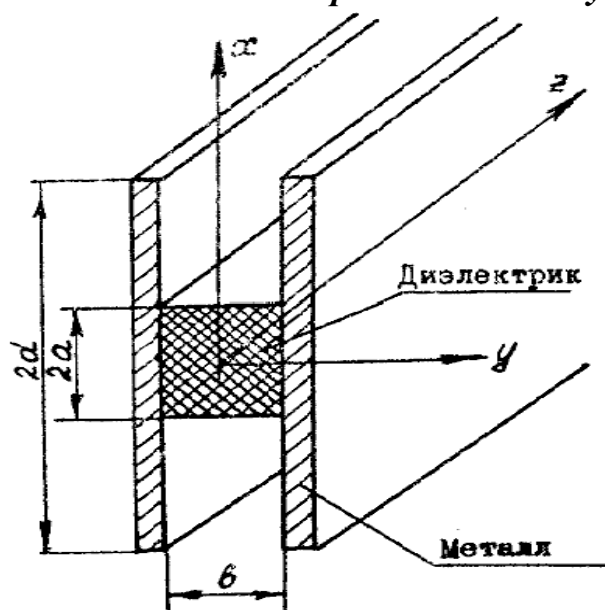


Рис.6.1. Н-образный волновод.

Н-образный металлодиэлектрический волновод представляет собой диэлектрическую пластину, ограниченную с двух сторон металлическими плоскостями, как показано на рис. 6.1.

Схема лабораторной установки изображена на рис. 6.2.

Источником колебаний служит генератор трехсантиметрового диапазона 1, сигнал генератора с помощью коаксиального кабеля 2 и волноводно-коаксиального перехода 3 подается на возбуждатель нужного типа волны 4.

Исследуемый Н-образный волновод 5 расположен на станине измерительной линии. Для измерения распределения поля вдоль линии служит изогнутый зонд 6, регистрирующий составляющую поля E_y . Зонд перемещается вдоль волновода с помощью каретки измерительной линии. Сигнал с зонда поступает на детектор 7 и после детектирования – на измерительный усилитель 8. Снятие распределения поля в поперечном сечении проводится с помощью зонда-петли 9, которая установлена в отверстии подвижной металлической пластины. Данная пластина обеспечивает режим стоячей волны в

волноводе и может перемещаться в поперечной плоскости (плоскость XOY) в направлении оси X .

Все измерения производятся при небольшом уровне мощности сигнала, поэтому оба детектора работают в квадратичном режиме, так, что показания измерительного усилителя пропорциональны квадрату измеряемой напряженности поля.

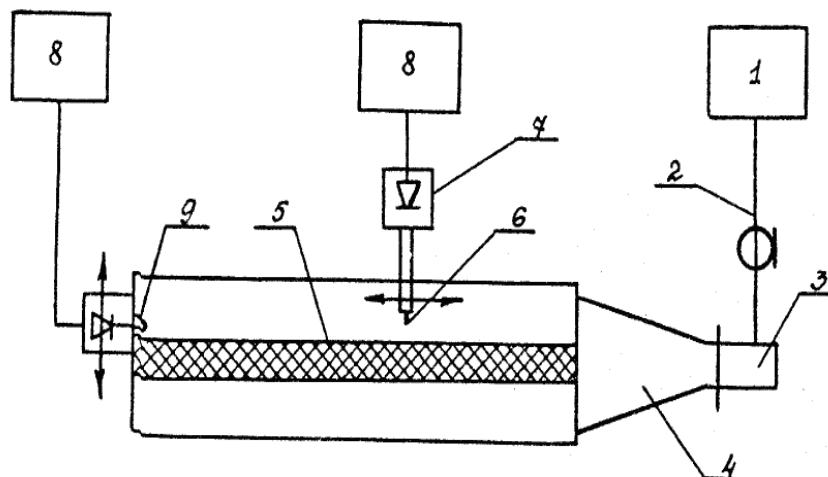


Рис.6.2. Схема установки.

6.2. Элементы теории

В Н-образном волноводе могут распространяться волны различных типов. В данной лабораторной работе исследуются наиболее простые волны магнитного типа H_{mo} , составляющие поля которых не зависят от координаты y , вектор \vec{E} перпендикулярен металлическим пластинам. При этом конфигурация поля и постоянная распространения в Н-образном волноводе оказываются такими же, как в безграничной диэлектрической пластине толщиной $2a$.

Различные типы волн в диэлектрической пластине (см., например, [1]) подразделяются на четные, поперечные составляющие поля, которые являются четной функцией координаты x , и нечетные, поперечные составляющие поля которых описываются нечетной функцией. Например, на рис. 6.3 показано распределение поперечной составляющей вдоль координаты x для волн H_{10} и H_{20} . Вне диэлектрической пластины, т.е. при $|x| > a$, поле убывает по экспоненциальному закону e^{-px} , а внутри пластины изменяется по закону $\cos(gx)$ (для четных волн) или $\sin(gx)$ (для нечетных волн). Число вариаций поля внутри диэлектрической пластины определяет индекс волны m .

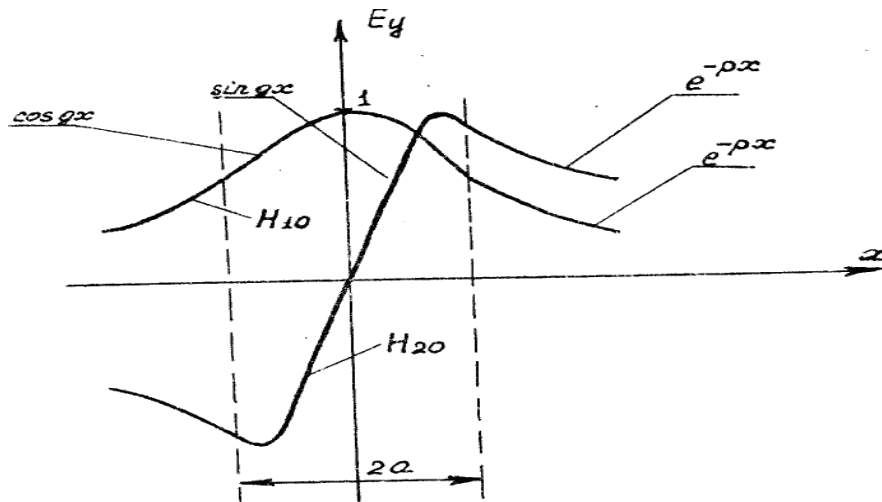


Рис.6.3. Распределение поля волн H_{10} и H_{20}

В качестве материала диэлектрической пластины в данной установке применен полистирол ($\varepsilon = 2,56$), толщина пластины $2a = 19$ мм выбрана таким образом, чтобы в диапазоне волн $2,5 \text{ см} < \lambda < 3,5 \text{ см}$ в Н-образном волноводе могли распространяться только два типа волн: H_{10} и H_{20} . Расстояние между металлическими пластинами b не влияет на параметры распространения волн H_{10} и H_{20} ; из конструктивных соображений оно взято равным 10 мм, что соответствует ширине узкой стенки стандартного прямоугольного волновода 3-сантиметрового диапазона. Ширина металлических пластин $2d = 100$ мм выбрана так, чтобы поле исследуемых типов волн спадало к краям пластин практически до нуля.

Для возбуждения волн H_{10} и H_{20} в Н-образном волноводе используются два сменных возбуждателя. Возбудитель волны H_{10} (рис.6.4а) представляет собой плавный рупорный переход от прямоугольного волновода стандартного сечения $23 \times 10 \text{ мм}^2$ к Н-образному волноводу; внутри рупора расположена клинообразно расширяющаяся диэлектрическая пластина. Возбудитель такого типа обеспечивает плавную трансформацию волны H_{10} прямоугольного волновода в волну H_{10} Н-образного волновода. В возбуждатель волны H_{20} , (рис. 6.4б) сначала в прямоугольном волноводе удвоенной ширины, формируется волна H_{20} прямоугольного волновода, которая затем постепенно трансформируется в волну H_{20} Н-образного волновода.

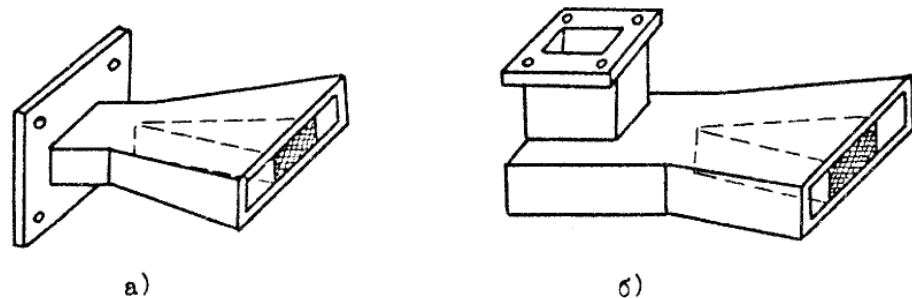


Рис.6.4. Возбудители а – волны H_{10} и б – волны H_{20} .

Расчет полей в диэлектрической пластине начинается с определения поперечных волновых чисел p и g . Для этого составляется трансцендентное характеристическое уравнение (см., например, [1]), решения этого уравнения для волн H_{10} и H_{20} приведены в табл.6.1.

После того, как определены поперечные волновые числа p и g , можно определить продольное волновое число h , а также найти фазовую скорость волны с помощью формул:

$$h = \sqrt{\omega^2 \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \mu_0 - g^2}$$

$$h = \sqrt{\omega^2 \cdot \varepsilon_0 \mu_0 + p^2}$$

$$v_\phi = \omega / h.$$

Важным параметром Н-образного волновода является коэффициент замедления:

$$K_{зам} = \frac{v_\phi}{c} = \frac{\beta}{h} = \frac{\lambda_B}{\lambda_o}.$$

где $\lambda_B = \frac{v_\phi}{f} = \frac{2\pi}{h}$ - длина волны в волноводе, $\lambda_o = \frac{c}{f}$ - длина волны генератора.

6.3. Расчетное задание (выполняется каждым студентом)

1. Пользуясь исходными данными из описания установки и таблицей 6.1, рассчитайте продольное волновое число h , коэффициент p , длину волны и коэффициент замедления фазовой скорости для волн типа H_{10} и H_{20} в Н-образном волноводе при частоте колебаний 10 ГГц. Результаты расчетов сведите в таблицу, предусмотрев строчку для экспериментально найденных значений этих величин.

2. Рассчитайте и постройте график поперечного распределения нормированной амплитуды составляющей H_x волны H_{10} при частоте колебаний 10 ГГц:

$$\frac{|\dot{H}_x|}{|\dot{H}_x|_{\max}} = \cos(gx), \quad |x| \leq a, \quad \text{и} \quad \frac{|\dot{H}_x|}{|\dot{H}_x|_{\max}} = \cos(ga) \cdot e^{-p(|x|-a)}, \quad |x| \geq a.$$

в диапазоне изменения x от -25 мм до $+25$ мм. Предварительно определите, в какой точке оси x амплитуда данной составляющей максимальна.

Примечание. Учтите, что максимальное значение амплитуды достигается внутри диэлектрика, поэтому в формулах амплитудный коэффициент поля в области $|x| \geq a$ определяется из условия равенства нормальных составляющих H_x на границе при $|x|=a$.

3. Аналогично п.2 рассчитайте и постройте график поперечного рас-

пределения составляющей H_x волны H_{20} при частоте поля 10 ГГц:

$$\frac{|\dot{H}_x|}{|\dot{H}_x|_{\max}} = |\sin(gx)|, \quad |x| \leq a, \quad \text{и} \quad \frac{|\dot{H}_x|}{|\dot{H}_x|_{\max}} = \sin(ga) \cdot e^{-p(|x|-a)}, \quad |x| \geq a.$$

Таблица 6.1

Таблица решений характеристического уравнения

$R = \beta a \sqrt{\varepsilon - 1}$	Для волны H_{10}		Для волны H_{20}	
	ga	pa	ga	pa
2,0	1,0298	1,7143	1,8955	0,6381
2,1	1,0483	1,8204	1,9506	0,7786
2,2	1,0654	1,9252	2,0004	0,9165
2,3	1,0814	2,0302	2,0456	1,0516
2,4	1,0964	2,1352	2,0872	1, 1850
2,5	1,1105	2,2398	2,1253	1,3164
2,6	1,1237	2,3439	2,1606	1, 4461
2,7	1,1364	2,4492	2,1933	1,5742
2,8	1,1482	2,5536	2,2239	1,7014
2,9	1,1596	2,6588	2,2523	1,8270
3,0	1,1702	2,7629	2,2790	1,9518

6.4. Экспериментальное задание

1. Убедитесь, что генератор СВЧ включен, и колебания в волновод подаются через возбудитель волны типа H_{10} (рис. 6.4а).

2. Измерьте длину волны в волноводе, работающем на волне типа H_{10} при частоте сигнала 10 ГГц. Рекомендуется определять длину волны по положению минимумов распределения полей в волноводе, работающем в режиме стоячей волны. Для создания режима стоячей волны в установке на конце волновода установлен короткозамыкатель. Положение каждого минимума надо определять методом двух отсчетов (метод «вилки»). Это объясняется тем, что точное определение положения минимума затруднено, поскольку область минимума достаточно широка. Положение минимума может быть определено более точно путем усреднения двух положений, соответствующих двум равным показаниям индикатора по обе стороны от минимума (см. рис 6.5).

3. По полученному значению длины волны в волноводе определите коэффициент замедления и продольное волновое число (см. примечание к п.1. расчетного задания). Занесите полученные экспериментально значения h , λ_B , $K_{зам}$ в таблицу 6.2.

4. Снимите распределение амплитуды составляющей поля H_x волны H_{10} в поперечном направлении. При этом нормировка амплитуды и пределы изменения координаты x должны соответствовать п.2 домашнего задания. Учтите, что значению координаты $x = 0$ соответствуют показания линейки шкалы поперечного перемещения $x_{лин} = 92$ мм. При обработке результатов измерений учитывайте, что детектор зонда работает в квадратичном режиме.

5. Полученные экспериментальные точки нанесите на полученный в расчетном задании график поперечного распределения нормированной амплитуды составляющей H_x . По графику в области $x > a$ определите значение поперечного волнового числа p . Занесите полученное значение в таблицу 6.2.

6. Повторите п.п.1-5 в случае возбуждения в волноводе волны H_{20} . Для этого замените секцию рис. 6.4а на секцию рис. 6.4б. Учтите, что принципиально важно **правильно сориентировать и соединить** секцию рис. 6.4б с возбуждающим ее коаксиально-волноводным переходом, который соединен с коаксиальным кабелем генератора. При съеме поперечного распределения поля зонд 6 измерительной линии должен находиться в точке с координатой на линейке измерительной линии $z_{лин} = 25$ мм.

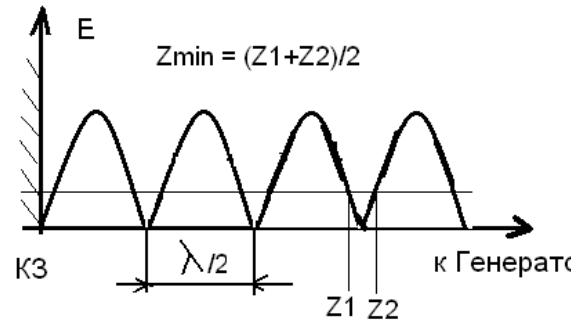


Рис. 6.5. Метод измерения длины волны в волноводе.

6.5. Контрольные вопросы

1. Какие типы волн могут распространяться в H -образном металлодиэлектрическом волноводе?
2. Что такое четные и нечетные типы волн?
3. Как определить $\lambda_{кр}$ в H -образном волноводе?
4. Какой тип волны среди рассматриваемых имеет $\lambda_{кр}$ наибольшее?
5. Что такое характеристическое уравнение? Как его вывести?
6. Каким образом можно возбудить волны типа H_{10} и H_{20} в H -образном волноводе?
7. Как определить фазовую скорость волны в H -образном волноводе?

при заданных размерах волновода и при заданной частоте поля?

8. По какому закону изменяется напряженность поля при удалении от поверхности диэлектрической пластины? Как зависит скорость убывания напряженности поля от толщины пластины и от ее диэлектрической проницаемости?

9. Как зависит коэффициент замедления фазовой скорости от толщины пластины и от ее диэлектрической проницаемости?

10. Какие волны называют поверхностными?

11. Какие линии передачи поверхностных волн кроме исследуемой вам известны?

12. Постройте качественно график поперечного распределения составляющих E_y и H_z волны H_{10} в H -образном волноводе.

13. Постройте качественно график поперечного распределения составляющих E_y и H_z волны H_{10} в H -образном волноводе.

14. Как, используя результаты эксперимента, полученные при выполнении пп. 1,2, определить h и p для волны H_{10} ?

15. Два H -образных металлодиэлектрических волновода работают на волне H_{10} и на одной частоте. Длина волны в первом волноводе в 1,5 раза больше длины волны во втором. Постройте качественно и поясните зависимость $|E_y/E_{y\max}|$ от x (при $|x| \geq a$) для обоих волноводов.

16. В H -образном металлодиэлектрическом волноводе возбуждается волна H_{10} . Постройте качественно зависимость фазовой скорости волны H_{10} от частоты для заданной толщины пластины $2a$ и разных значений диэлектрической проницаемости ε .

17. В H -образном металлодиэлектрическом волноводе возбуждается волна H_{10} . Постройте качественно зависимость фазовой скорости волны H_{10} от частоты для заданного значения диэлектрической проницаемости ε и разных значений толщины пластины a .

Литература

1. Баскаков С.И. Электродинамика и распространение радиоволн: Учебное пособие. М.: «ЛИБРОКОМ», 2012. – Глава 15, раздел 15.1.

Лабораторная работа № 7

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН В ГИРОМАГНИТНОЙ СРЕДЕ ПРИ ПРОДОЛЬНОМ НАМАГНИЧИВАНИИ

Целью работы является изучение явления поворота плоскости поляризации электромагнитных волн ("эффекта Фарадея") при их распространении в гиромагнитной среде вдоль направления намагничивания. Основные вопросы распространения электромагнитных волн в безграничной намагниченной ферритовой (гиромагнитной) среде рассмотрены в [1, гл. 16].

7.1. Описание экспериментальной установки

Структурная схема установки изображена на рис. 7.1. Установка состоит из комплекта стандартной измерительной СВЧ аппаратуры 1-2 и 7-9, волноводных устройств 3-6 для осуществления и измерения поворота плоскости поляризации, а также из устройств 10-12 для создания и контроля необходимого подмагничивающего поля.

В комплект измерительной аппаратуры входят: генератор СВЧ колебаний 1, невзаимное развязывающее устройство – ферритовый вентиль 2, развязывающий аттенюатор 7, детектор СВЧ колебаний 8 и измерительный усилитель 9.

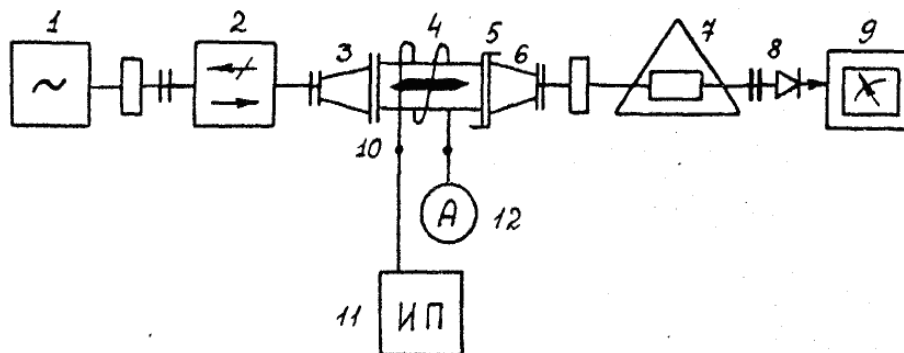


Рис. 7.1.

Устройство для осуществления и измерения поворота плоскости поляризации включает в себя два волноводных переходных элемента – с прямоугольного сечения на круглое 3 и с круглого на прямоугольное 6; секцию круглого волновода 4 с ферритовым стержнем и вращающееся сочленение 5. Благодаря последнему элементы 6-8 можно поворачивать вокруг продольной оси волновода; угол поворота подвижной части установки относительно неподвижной отсчитывается по отсчетному устройству на вращающемся со-

членении. По оси секции круглого волновода 4 расположен ферритовый стержень; концы стержня обработаны на конус с целью уменьшения отражений.

Для создания постоянного магнитного поля, намагничивающего ферритовый стержень вдоль его оси, на секцию со стержнем надет соленоид 10, к которому от стабилизированного источника питания 11 через амперметр 12 подводится постоянный ток.

Установка работает следующим образом. СВЧ колебания от генератора через переходной элемент 3 возбуждают в секции круглого волновода 4 волну H_{11} . При этом в начале секции (до ферритового стержня) волна поляризована так же, как и в возбуждающем прямоугольном волноводе: вектор электрического поля (на оси круглого волновода) направлен вертикально. В выходном конце секции (после ферритового стержня) из-за эффекта Фарадея поляризация волны в общем случае отличается от вертикальной на некоторый угол ψ , называемый углом поворота плоскости поляризации.

Волна, прошедшая через вращающееся сочленение 5 и переходный элемент 6, возбуждает приемный прямоугольный волновод. При этом интенсивность возбуждения приемного волновода зависит от ориентации последнего, т.е. от угла поворота ψ приемного волновода относительно возбуждающего. Пренебрегая возможным незначительным отличием поляризации волны, прошедшей секцию со стержнем, от линейной, можно считать, что напряженность поля в приемном волноводе $E = E_m \cos(\varphi - \psi)$.

Если ферритовый стержень не намагничен, то поляризация волны в выходном конце секции со стержнем остается линейной и вертикальной. В этом случае максимальный сигнал на выходе детектора будет иметь место при таком положении подвижной части установки относительно неподвижной, когда возбуждающий и приемный прямоугольные волноводы ориентированы одинаково ($\varphi_{\max} = 0^\circ$), а минимальный сигнал – когда они взаимно ортогональны ($\varphi_{\min} = \pm 90^\circ$, причем теоретически $E_{\min} = 0$).

Если же ферритовый стержень намагничен, то в секции со стержнем имеет место поворот плоскости поляризации ($\psi \neq 0$). В этом случае максимальный сигнал на выходе детектора будет иметь место при таком положении приемного прямоугольного волновода, когда нормаль к его широким стенкам совпадает с направлением поляризации волны в выходном конце секции ($\varphi_{\max} = \psi$), минимальный сигнал – когда она перпендикулярна этому направлению ($\varphi_{\min} = \psi \pm 90^\circ$). При этом из-за потерь в феррите поляризация волны в выходном конце секции хотя и незначительно, но отличается от линейной, т.е. строго говоря, является эллиптической. ($E_{\min} \neq 0$)

Экспериментальное изучение явления проводится путем измерений поворота плоскости поляризации волны в круглом металлическом волноводе, частично заполненном ферритом, намагниченном вдоль оси волновода.

Угол поворота плоскости поляризации волны в секции с ферритовым стержнем может быть измерен либо по максимуму ($\varphi = \varphi_{\max}$), либо по минимуму ($\varphi = \varphi_{\min} \pm 90^\circ$) сигнала на выходе детектора.

7.2. Элементы теории

Явления в волноводах, целиком или частично заполненных намагниченным ферритом, весьма сложны, однако в качественном отношении они имеют много общего с явлениями в безграничной ферритовой среде. Наибольший практический интерес представляют два частных случая: случай распространения волн вдоль постоянного магнитного поля (случай "продольного" намагничивания) и поперек его (случай "поперечного" намагничивания). В работе исследуется случай "продольного" намагничивания.

При распространении электромагнитной волны с линейной поляризацией в безграничной гиромангнитной среде в случае "продольного" намагничивания имеет место поворот плоскости поляризации на угол, прямо пропорциональный пути, пройденному волной в феррите. Данное явление получило наименование эффекта Фарадея. Среды, в которых проявляется эффект Фарадея, носят название гиротропных (вращающих) сред.

Угол поворота плоскости поляризации определяется по формуле $\psi = \frac{\beta_{\phi 1} - \beta_{\phi 2}}{2} \cdot z$, где z – путь, пройденный волной в феррите, $\beta_{\phi 1} = \frac{\omega}{c} \cdot \sqrt{\epsilon \cdot \mu + b}$; $\beta_{\phi 2} = \frac{\omega}{c} \cdot \sqrt{\epsilon \cdot \mu - b}$ – коэффициенты фазы для двух собственных волн, поляризованных по кругу в противоположных направлениях, которые существуют в анизотропной среде. Здесь μ , a – компоненты тензора относительной магнитной проницаемости среды.

$$\mu = \begin{pmatrix} \mu & -ja & 0 \\ ja & \mu & 0 \\ 0 & 0 & \mu \end{pmatrix}$$

Как следует из теории гиромангнитных сред, при напряжённости постоянного магнитного поля $H_0 \ll \frac{\omega}{\mu_0 \cdot \gamma}$

$$\mu \pm b \approx 1 \pm \frac{\mu_0 \cdot \gamma}{\omega} \cdot M_0$$

Здесь μ_0 – магнитная постоянная, равная $4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м, γ – гиромагнитное отношение, причем для ферритов

$$\frac{\mu_0 \gamma}{2\pi} = 35.2 \frac{\text{МГц}}{\text{кА/м}};$$

M_0 – статистическая намагниченность среды (в направлении распространения волны).

Учитывая, что $M_0 \ll \frac{\omega}{\mu_0 \gamma}$, можно записать

$$\begin{aligned} \psi &= \frac{\omega}{2c} \sqrt{\varepsilon} \left(\sqrt{\mu + b} - \sqrt{\mu - b} \right) \cdot z \approx \\ &\approx \frac{\omega}{2c} \sqrt{\varepsilon} \left(\sqrt{1 + \frac{\mu_0 \gamma M_0}{\omega}} - \sqrt{1 - \frac{\mu_0 \gamma M_0}{\omega}} \right) \cdot z \end{aligned}$$

Так как $M_0 \ll \frac{\omega}{\mu_0 \gamma}$, то $\sqrt{1 \pm \frac{\mu_0 \gamma M_0}{\omega}} \approx 1 \pm \frac{1}{2} \frac{\mu_0 \gamma M_0}{\omega}$ и, следовательно, угол поворота плоскости поляризации

$$\Psi \approx \frac{\mu_0 \cdot \nu}{2\varepsilon} \cdot \sqrt{\varepsilon} \cdot M_0 \cdot z \quad (7.2)$$

Таким образом, при не слишком сильном подмагничивающем поле зависимость $\Psi(H_0)$ подобна кривой намагничивания $M_0(H_0)$. В лабораторной установке параметры волновода и феррита подобраны таким образом, что угол поворота плоскости поляризации можно оценивать по формуле (7.2).

При изменении направления постоянного магнитного поля на противоположное изменяется знак параметра a тензора магнитной проницаемости. Вращение плоскости поляризации в этом случае будет совершаться в обратную сторону. Поле в гиротропной среде не подчиняется принципу взаимности.

7.3. Расчетное задание (выполняется каждым студентом)

1. Рассчитайте и постройте зависимость нормированной амплитуды напряженности электрического поля $E_m / E_{m\max}$ в приемном волноводе от угла поворота φ приемного волновода относительно возбуждающего волновода для двух значений Ψ : для $\Psi = 0$ и для заданного значения Ψ (см. табл. 7.1). Номер задания соответствует номеру занятия. Используйте формулу

$$E_m / E_{m\max} = |\cos(\varphi - \Psi)|.$$

Обе зависимости рассчитайте в диапазоне изменения φ от -120° до $+120^\circ$ и постройте на одном графике.

2. Изобразите предполагаемый характер зависимости угла поворота плоскости поляризации Ψ волны в секции с ферритовым стержнем от на-

пряженности постоянного магнитного поля H_0 , намагничивающего феррит, при изменении H_0 от $+H_{0\max}$ через нуль до $-H_{0\max}$ и обратно.

Таблица 7.1				
	1-е занятие	2-е занятие	3-е занятие	4-е занятие
Ψ	50°	60°	70°	65°

7.4. Экспериментальное задание

1. Убедитесь, что постоянный ток в соленоиде, возбуждающий постоянное магнитное поле вдоль оси соленоида, равен нулю. Снимите зависимость нормированной амплитуды напряженности электрического поля в приемном волноводе от угла поворота φ приемного волновода относительно возбуждающего волновода. Частота генератора СВЧ колебаний равна 3000 МГц. Характеристику детектора считайте квадратичной. Экспериментальные точки нанесите на график, построенный по п.2 домашнего задания.

2. Снимите зависимость угла поворота плоскости поляризации волны в секции с ферритовым стержнем от величины постоянного тока I_0 в соленоиде. Ток I_0 изменяйте сначала от нуля до $+I_{0\max}$ (и обратно), а затем от нуля до $-I_{0\max}$ (и обратно).

3. Выполните п.1 лабораторного задания при постоянном токе в соленоиде, соответствующем заданному углу поворота плоскости поляризации Ψ . (см. табл. 7.1). Обратите внимание на изменение уровня минимальной амплитуды по сравнению с п.1. Объясните явление, основываясь на представлении о распространении собственных волн с круговой поляризацией с различными параметрами в намагниченном феррите.

7.5. Контрольные вопросы

1. В чем заключается причина поворота плоскости поляризации электромагнитной волны при ее распространении в гиромангнитной среде в случае "продольного" намагничивания ("эффект Фарадея")?

2. Как связаны между собой направление намагниченности, направление распространения электромагнитной волны и направление поворота плоскости поляризации?

3. Объясните зависимость угла поворота плоскости поляризации от направления и напряженности подмагничивающего поля.

4. Почему поляризация прошедшей волны при $\psi = 0$ остается линейной, а в общем случае отличается от линейной?

5. Почему угол поворота плоскости поляризации в данной лаборатор-

ной установке зависит от частоты?

6. В поперечно-намагниченном феррите вдоль оси x распространяется необыкновенная волна. Известно, что при $x = 0$ комплексная амплитуда поля $\vec{E} = E_0 \cdot \vec{1}_z$. Запишите выражения для составляющих поля и определите среднее значение вектора Пойнтинга вдоль x и y . Параметры феррита и частота известны.

7. Запишите уравнения Максвелла в скалярной форме в декартовых координатах для волны, распространяющейся в среде, магнитная проницаемость которой $M_a = M_0$, а диэлектрическая проницаемость

$$\vec{\epsilon} = \begin{vmatrix} \epsilon_1 & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_2 & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_3 \end{vmatrix}$$

Будет ли наблюдаться эффект Фарадея? Дайте пояснение.

8. В анизотропном феррите распространяется обыкновенная и необыкновенная волны. Определите составляющие поля обыкновенной и необыкновенной волны. Какова поляризация векторов обыкновенной и необыкновенной волны? Как в этом случае направлено постоянное магнитное поле по отношению к направлению распространения волны? Дайте пояснение.

9. При продольном распространении волн в феррите в точке $z_1 = 0$ вектор \vec{H} направлен вдоль оси x . Как будет направлен вектор \vec{H} , если волна прошла расстояние, равное 1 м? Постоянная Фарадея $\theta_0 = \pi/2$. Как изменится ответ, если изменить направление постоянного магнитного поля? Дайте пояснения.

10. В поперечно-намагниченном феррите вдоль оси x распространяется электромагнитная волна. Известны фазовые постоянные обыкновенной волны и необыкновенной волны: $\beta_{об} = 2\pi \text{ м}^{-1}$; $\beta_{ноб} = 1,5\pi \text{ м}^{-1}$. При $x = 0$ комплексные амплитуды вектора E обыкновенной и необыкновенной волн одинаковы. Частота $f = 10^8$ Гц. Запишите мгновенное значение вектора \vec{E} в точке x_0 , где поляризация вектора \vec{E} будет круговой. Дайте пояснение.

11. В среде существуют две волны с круговой поляризацией: одна левого вращения, другая правого. Будет ли наблюдаться эффект, если фазовые скорости этих волн одинаковы? Дайте пояснение.

12. В продольно-намагниченном феррите вдоль оси z распространяется линейно-поляризованная волна по вектору \vec{H} . Амплитуды поля \vec{H} лево-поляризованной и право-поляризованной волны одинаковы и равны H_0 . Определите амплитуды поля E для лево-поляризованной и право-поляризованной волн. Какова поляризация вектора E ? Будет ли изменяться

поляризация вектора E при распространении волны? Известно, что для левополяризованной волны $\beta_{\phi 2} = 1,5\pi \cdot \text{м}^{-1}$. Частота $f = 10^8$ Гц. Диэлектрическая проницаемость феррита $\varepsilon_a = \varepsilon_o$.

13. В поперечно-намагниченном феррите распространяются обыкновенная и необыкновенная волны. Определите фазовую скорость этих волн. Параметры феррита и частота известны. Как изменится фазовая скорость, если изменить направление подмагничивающего поля на обратное?

Литература.

1. Баскаков С.И. Электродинамика и распространение радиоволн: Учебное пособие. М.: «ЛИБРОКОМ», 2012. – Глава 16.

Лабораторная работа № 8

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН В ПРЯМОУГОЛЬНОМ ВОЛНОВОДЕ

Целью работы является исследование основных закономерностей распространения электромагнитных волн СВЧ диапазона в прямоугольном металлическом волноводе.

8.1. Описание экспериментальной установки

Структурная схема установки для исследования процессов распространения электромагнитных волн в прямоугольном металлическом волноводе изображена на рис. 8.1.

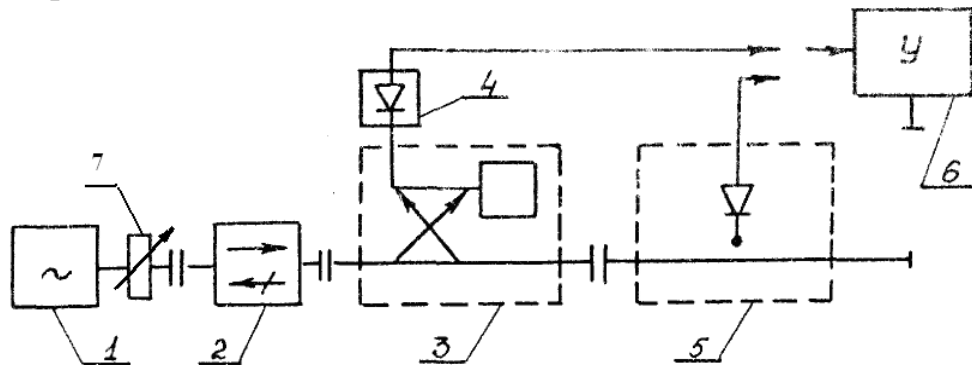


Рис.8.1. Структурная схема лабораторной установки.

В состав данной установки входят следующие СВЧ устройства:

1 – транзисторный генератор трёхсантиметрового диапазона волн с блоком питания и волноводный СВЧ аттенюатор.

2 – невзаимное развязывающее устройство: ферритовый вентиль, который обеспечивает передачу электромагнитных волн с малым ослаблением в прямом направлении (от генератора в измерительную часть установки) и практически полное поглощение волн, распространяющихся в обратном направлении.

3 – направленный ответвитель, который обеспечивает ответвление из основного волновода во вспомогательный волновод части СВЧ мощности волны, распространяющейся в основном волноводе в обратном направлении (от нагрузки после ответвителя).

4 – детекторная секция, подключенная к вспомогательному волноводу ответвителя.

5 – измерительная линия с продольной щелью в широкой стенке волновода для снятия распределения электрического поля вдоль оси прямоугольного металлического волновода.

6 – измерительный прибор, необходимый для усиления и регистрации продетектированного сигнала.

7 – аттенюатор, позволяющий регулировать уровень мощности в тракте.

С помощью установки, изображенной на рис. 8.1, можно измерять распределение поля в прямоугольном волноводе, а также оценивать напряжённость поля при подключении к выходу измерительной линии различных оконечных устройств.

В состав оконечных устройств входят следующие узлы СВЧ:

8 – отражающий металлический фланец (рис. 8.2); он подсоединяется к концу прямоугольного волновода с целью создания в волноводе режима стоячей волны (короткозамкнутая нагрузка).

9 – поглощающая нагрузка (рис. 8.3). Это отрезок волновода, частично заполненный поглощающим материалом; используется для создания в волноводе режима бегущей волны.

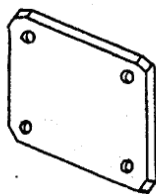


Рис.8.2. Короткозамкнутая нагрузка.

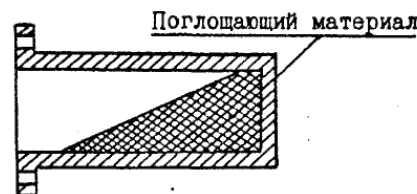


Рис.8.3. С согласованная нагрузка.

10 – прямоугольный металлический желоб (рис. 8.4), который **вводится в волновод измерительной линии основанием вниз**. После в измерительной линии образуется прямоугольный волновод уменьшенного профиля поперечного сечения размерами $a_1 = 12,5$ мм, $b_1 = 5,5$ мм. На рабочей частоте 10 ГГц заполненный воздухом волновод сечением 12,5мм×5,5мм является заперённым для волны H_{10} ($f < f_{крH10}$). При перемещении зонда измерительной линии вдоль оси такого волновода можно зарегистрировать экспоненциальное ослабление амплитуды поля.

11 – секция для исследования поля в поперечном сечении волновода. Она представляет собой отрезок волновода стандартного сечения (23×10)мм, в поперечном сечении которого перемещаются или диэлектрическая пластина 11 (см. рис. 8.5), или стержень с закреплённым на них пассивным электрическим зондом в виде отрезка медного провода. Перемещение отмечается с помощью или отсчётной линейки, или микрометрического винта.

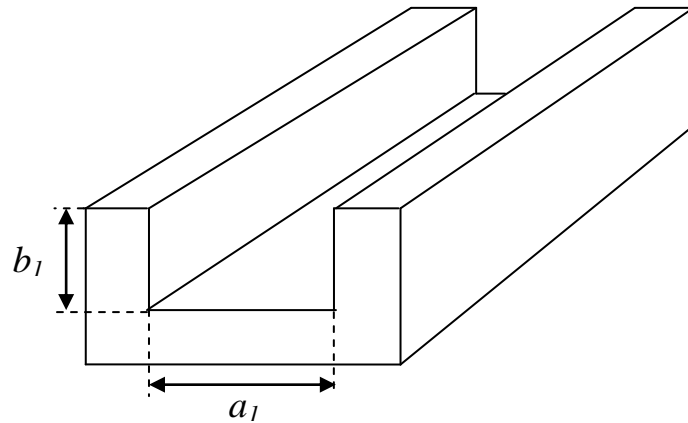


Рис. 8.4. Прямоугольный металлический желоб для создания запердельного волновода

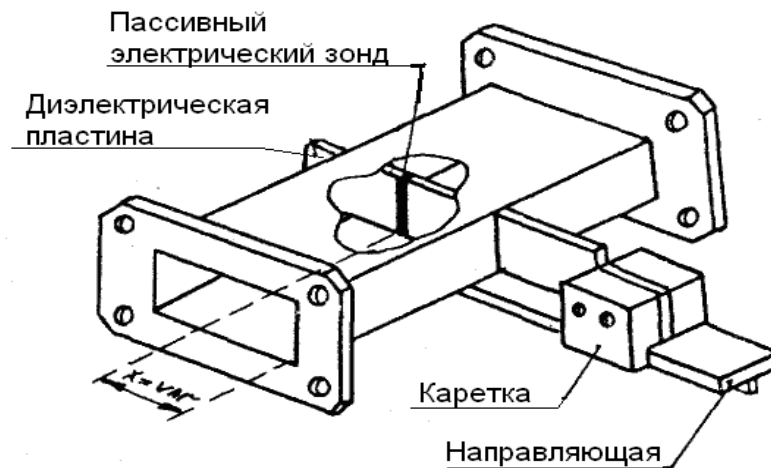


Рис. 8.5. Секция для исследования поля в поперечном сечении волновода

Если в отсутствии зонда в волноводе получен режим бегущей волны, то при введении зонда в поперечное сечение волновода появляется отражённая волна. Анализ показывает, что при перемещении зонда амплитудный коэффициент отраженной волны изменяется практически по закону $\sin^2(\pi x/a)$, т.е. пропорционально квадрату амплитуды электрической составляющей волны H_{10} в точке расположения зонда. Отмеченное обстоятельство используется в данной работе для измерения распределения электрического поля в поперечном сечении волновода.

12, 13 – металлические диафрагмы с прорезанными в них щелями различной ориентации (рис. 8.6). Они могут закрепляться в каретке секции 10 и вводиться в поперечное сечение волновода с целью исследования влияния ориентации щелей на прохождение волны через диафрагму.



Рис. 8.6. Диафрагмы: а – с горизонтальными щелями;
б – с вертикальными щелями.

14 – секция для исследования возможности излучения из различных щелей в волноводе (рис. 8.7) Во избежание СВЧ излучения в пространство, окружающее лабораторную установку, каждая щель окружена запердельным отрезком круглого волновода (т.е. отрезком волновода, в котором волна не распространяется, а экспоненциально затухает).

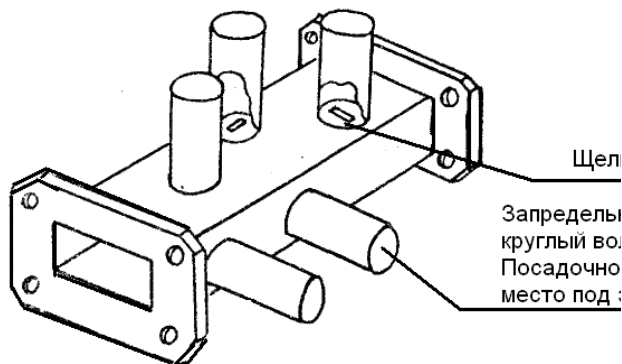


Рис. 8.7. Секция с различно ориентированными щелями.

15 – секция для исследования поляризации вектора \vec{H} в волноводе. Она аналогична секции 14 за исключением того, что вместо щелей в широкой стенке волновода сделаны круглые отверстия.

16 – детекторная секция для индикации излучения из различных щелей или отверстий в волноводе. Она пред-

ставляет собой латунную втулку с заглушкой, которую «одевают» на отрезок запердельного волновода. В поперечном сечении данной секции укреплен СВЧ диод, в котором индуцируется высокочастотный ток. Колебания этого тока детектируются. Амплитуда колебаний индуцированного тока пропорциональна амплитуде проекции электрического поля в запердельном волноводе на ось диода. Величина и ориентация этого поля определяются величиной и ориентацией тока смещения, возбуждаемого в щели (отверстии) волной в основном волноводе. В свою очередь токи смещения в щели замыкают электрические поверхностные токи в стенке основного волновода, они ориентированы перпендикулярно вектору \vec{H} на стенке основного волновода в области щели.

Индикация осуществляется при размещении СВЧ диода у щели (отверстия).

8.2. Расчетное задание (выполняется каждым студентом)

1. Изучите основные положения и выводы теории распространения

электромагнитных волн в прямоугольном металлическом волноводе. Изучите описание экспериментальной установки.

2. Запишите формулы для комплексных амплитуд составляющих электромагнитного поля для волны типа Н в прямоугольном металлическом волноводе (см. справочный материал в задачнике [3], стр 95). Запишите формулы для амплитуд составляющих электромагнитного поля для волны типа Н (Учтите, что амплитуда колебания – это модуль комплексной амплитуды этого колебания).

3. Рассчитайте длину волны типа H_{10} в волноводе на частоте 10 ГГц. Внутренние размеры поперечного сечения волновода: $a = 23$ мм; $b = 10$ мм. Рассчитайте частотный диапазон (и диапазон длин волн генератора), в котором может распространяться волна типа H_{10} , а волны высших типов распространяться не могут (см. справочный материал в задачнике [3], стр 93-94).

4. Рассчитайте и постройте зависимость нормированной амплитуды составляющей электрического поля от продольной координаты z для волны H_{10} в запердечном волноводе с воздушным заполнением. Используйте формулу

$$\frac{|\dot{E}_y|}{|\dot{E}_y|_{\max}} = e^{-\alpha_z \cdot z}, \text{ где } \alpha_z = \frac{2\pi f}{c} \sqrt{\mu\epsilon} \sqrt{\left(\frac{f_{\text{кр}}}{f}\right)^2 - 1} \text{ при } f < f_{\text{кр}}.$$

Частота генератора $f = 10$ ГГц. Внутренние размеры поперечного сечения запердечного волновода: $a_1 = 12,5$ мм, $b_1 = 5,5$ мм. Постройте два графика: в первом масштаб по оси $E_y/E_{y \max}$ – логарифмический, по оси z – линейный ($z = 0 \div 20$ мм), во втором – линейный по обеим осям.

5. Изобразите картины силовых линий электрического и магнитного полей в прямоугольном волноводе для типов волн, заданных в табл. 8.1. Номер задания соответствует номеру занятия.

6. Рассчитайте и постройте зависимость нормированной амплитуды составляющей электрического поля E_y от поперечной координаты x для волны H_{10} :

$$\frac{|\dot{E}_y|}{|\dot{E}_y|_{\max}} = \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right), \quad x \in (0, a) \dots$$

Внутренние размеры поперечного сечения волновода такие же, как и в п.3.

7. Изобразите картину силовых линий токов в стенках волновода для волн заданного типа (см. табл. 8.1). Покажите на этих рисунках щели в стенках, являющиеся излучающими и неизлучающими.

8. Определите, какая из показанных на рис. 8.6 диафрагм с щелями лучше фильтрует («пропускает») волну типа H_{10} .

9. Рассчитайте и постройте график зависимости коэффициента эллиптичности вектора \bar{H} в волне типа H_{10} от поперечной координаты x . Внутренние размеры поперечного сечения волновода такие же, как и в п.2. Определите, при каких значениях поперечной координаты поляризация вектора \bar{H} является круговой.

Примечание. В данном случае коэффициент эллиптичности равен отношению амплитуды продольной составляющей к амплитуде поперечной составляющей вектора \bar{H} :

$$k_{\text{эл}} = \left| \text{ctg}\left(\frac{\pi x}{a}\right) \right|, x \in (0, a).$$

Таблица 8.1

	1-е за- нятие	2-е за- нятие	3-е за- нятие	4-е за- нятие
Тип волны	H_{10} H_{01}	H_{20} H_{10}	H_{10} E_{11}	E_{21} H_{10}

8.3. Экспериментальное задание

1. Включите генератор СВЧ.

Примечание. В режиме передачи СВЧ мощности от генератора в волноводную линию на выходе линии должно быть подключено то или иное оконечное устройство. При смене оконечного устройства во избежание СВЧ излучения в окружающее пространство должен быть введен полностью СВЧ аттенюатор в волноводном тракте.

2. Измерьте длину волны H_{10} в волноводе при частоте 10 ГГц. Для этого создайте в волноводе режим стоячей волны, подсоединив к выходу измерительной линии отражающий фланец 7. Подсоедините кабель от измерительной линии ко входу измерительного усилителя. С помощью измерительной линии определите расстояние между соседними минимумами электрического поля; положение каждого минимума определяйте методом двух отсчетов (см. рис. 8.8)

3. Исследуйте затухание поля в запердечном волноводе. Для этого, введя ослабление аттенюатора, отсоедините отражающий фланец. **Под руководством преподавателя** ввести в волновод измерительной линии прямоугольный желоб **ОСНОВАНИЕМ ВНИЗ!!!** Установите зонд измерительной линии в положение с координатой $z_{\text{д}} = 0$ на линейке измерительной линии. Вывести затухание аттенюатора, чтобы уровень сигнала вольтметра измерительной линии составил около 10 мВ при выключенном усилении вольтметра. Снимите распределение нормированной амплитуды напряженности элек-

трического поля вдоль координаты z . При этом координату зонда z изменяйте в пределах от 0 до 20 мм с шагом 2 мм. Нормировка аналогична п.3 расчетного задания. Учтите, что детектирование является **квадратичным**: в данном и следующих пунктах задания показания вольтметра пропорциональны квадрату амплитуды напряженности электрического поля. Экспериментальные точки нанесите на график, полученный в п.3 расчетного задания.

4.Исследуйте фильтрующие свойства диафрагм с различной ориентацией щелей. Для этого к выходу секции 10 (рис.8.5) подсоедините детекторную секцию 4.б (аналог секции 4), находящуюся в ящике с комплектующими узлами.

Продетектированный сигнал от данной секции подавайте с помощью кабеля на вход измерительного вольтметра. Поочередно закрепляйте в каретке секции 10 диафрагмы 12 и 13 и вводите их в волновод. Сравните экспериментально фильтрующие свойства диафрагм 12 и 13. Сопоставьте полученный результат с результатом п.7 расчётного задания.

5.Снимите распределение поля в поперечном сечении волновода. Для этого к выходу измерительной линии подсоедините секцию с микрометрическим винтом, в которой пассивный электрический зонд (штырь, направлен вдоль оси Y) перемещается в направлении поперечной координаты x при вращении винта. К выходу секции 10 подсоедините поглощающую нагрузку 8. Для измерения величины поля, отражённого от зонда, подключите кабель от детекторной секции 4 направленного ответвителя к входу измерительного вольтметра. Изменяйте положение зонда в волноводе, плавно перемещая стержень с зондом с помощью микрометрического винта, и фиксируйте при этом показания измерительного вольтметра. Экспериментальные точки, после соответствующей обработки, наносите на построенный дома график $E_y/E_{y\max} = f(x)$.

Примечание. При обработке результатов измерений учитывайте следующие факторы:

1.Уровень поля в волне, отраженной от пассивного электрического зонда (штыря), равен произведению амплитуды поля в падающей волне на коэффициент отражения от штыря, пропорциональный амплитуде поля в падающей волне. В итоге получается квадратичная зависимость:

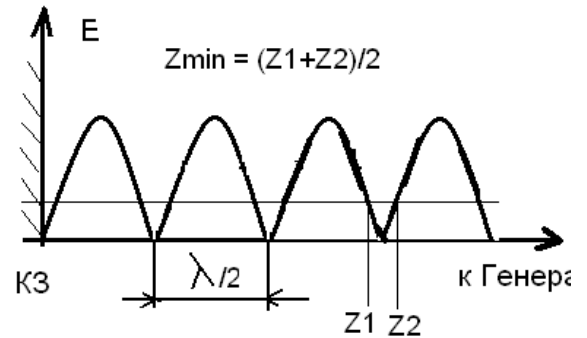


Рис. 8.8.Метод измерения длины волны в волноводе.

$$E_{\text{му отр}} = k \sin^2\left(\frac{\pi x}{a}\right) = k \cdot f^2(x) . ,$$

где k – коэффициент пропорциональности; $f(x)$ – зависимость нормированной амплитуды напряженности электрического поля в падающей волне, рассчитанная в п.5 домашнего задания.

2. Помимо волны, отраженной от штыря, имеется постоянный уровень отраженного поля E_{m0} , вызванный несовершенством оконечного поглотителя и отражением от элементов внутреннего тракта измерительной линии, несовершенством сочленений, направленного ответвителя и пр.

3. Детектирование является квадратичным, т.е. показания прибора пропорциональны квадрату амплитуды измеряемого поля.

В результате показания измерительного прибора, подключенного к детектору отраженной волны, определяются в случае падающей волны типа H_{10} следующим соотношением:

$$U = A + B \cdot f^2(x)^2 ,$$

где A и B – коэффициенты пропорциональности. Поскольку в силу граничных условий на боковых стенках волновода $E_y = 0$, то $f(0) = f(a) = 0$. При этом

$U(0) = U(a) = A^2$. Так как с учетом нормировки $f_{\max} = 1$, то $U_{\max} = (A + B)^2$. Из записанных уравнений следует, что экспериментальное поперечное распределение поля по координате x определяется выражением

$$f(x) = \sqrt{\frac{\sqrt{U_n(x)} - \sqrt{U_n(0)}}{1 - \sqrt{U_n(0)}}}$$

Здесь $U_n(x) = \frac{U(x)}{U_{\max}}$ – нормированные показания вольтметра. Пользуясь дан-

ным выражением, определите точки экспериментального распределения по показаниям измерительного вольтметра в секции отраженной волны. Нанесите полученные точки на график $f(x)$, построенный в расчетном задании.

6. Исследуйте излучение из различных щелей в волноводе. Для этого к выходу измерительной линии подсоедините секцию 14. К выходу секции 14 подсоедините поглощающую нагрузку 8. Отсоедините кабель от детекторной головки секции 9 и подсоедините его к детекторной секции 16. Другой конец кабеля подсоедините к входу измерительного усилителя. Детекторную секцию 16 поочередно "одевайте" на запредельные отрезки круглого волновода. Величина излучаемого щелью поля фиксируется при таком угле поворота детекторной секции, когда показания измерительного прибора максимальны. Сравните и объясните результаты измерений.

Примечание. Учтите, что показания измерительного прибора пропорциональны квадрату амплитуды составляющей электрического поля в запердельном волноводе, параллельной оси диода. Величина и ориентация этого поля определяются величиной и ориентацией тока смещения, возбуждаемого в щели (отверстии) волной в основном волноводе.

7. Исследуйте поляризацию вектора \vec{H} в волне типа H_{10} . Для этого к выходу измерительной линии подсоедините секцию 15. К выходу секции 15 подсоедините поглощающую нагрузку 8. Поочередно «одевайте» детекторную секцию 16 на отрезки запердельного круглого волновода. Для каждого отрезка определите отношение показаний измерительного вольтметра при поперечной и продольной ориентации СВЧ диода в секции 15. Пользуясь этим отношением и учтя квадратичный режим детектирования, найдите коэффициент эллиптичности вектора \vec{H} для различных положений отверстий (см. описание секции 16). Полученные значения коэффициента эллиптичности нанесите на график, построенный в п.8 расчетного задания. При нанесении точек учтите, что поперечная координата центра отверстий в секции 15 последовательно принимает значения: $x_1 = 2,5$ мм; $x_2 = 5,5$ мм; $x_3 = 8,5$ мм и $x_4 = 11,5$ мм.

8.4. Контрольные вопросы

1. Чем отличается структура волны типа Е от структуры волны типа Н в прямоугольном металлическом волноводе?
2. Что характеризует критическая частота, от каких параметров она зависит?
3. Почему волна H_{10} называется волной основного типа в прямоугольном металлическом волноводе?
4. Какова характерная особенность электромагнитного поля волны в запердельном волноводе?
5. Как связана картина силовых линий токов в стенках волновода с картиной силовых линий поля волны?

6. Как зависят от частоты фазовая скорость и длина волны в волноводе?

7. Чем отличаются распределения амплитуды поля вдоль оси волновода (например $E_y(z)$) в двух случаях: а) в волноводе создан режим бегущей волны; б) в волноводе создан режим стоячей волны?

8. На рис. 9.9 изображен прямоугольный волновод, в котором прорезаны узкие щели. Поясните, какие из показанных щелей при облучении их внешним полем позволяют возбудить волну типа H_{10} . Как изменится ответ на данный вопрос при возбуждении волны E_{11} ?

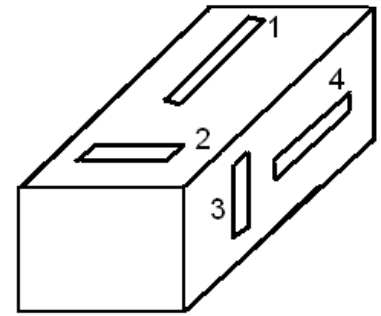


Рис. 9.9. Щели на прямоугольном волноводе.

9. Волна типа H_{20} возбуждается в полубесконечном волноводе прямоугольного сечения с размерами $a \times b$ системой двух элементарных электрических излучателей. Величины токов I_0 и длин l_0 обоих излучателей одинаковы. Частота колебаний ω . Определите координаты расположения излучателей и разность фаз между их токами, обеспечивающие возбуждение волны типа H_{20} с наибольшей амплитудой. При этом требуется, чтобы волна типа H_{10} не возбуждалась.

10. Укажите оптимальное расположение штыря для возбуждения волны H_{10} в прямоугольном волноводе при условии, что волновод с одной стороны закорочен проводящей плоскостью (полубесконечный волновод).

11. Укажите оптимальное расположение петли для возбуждения волны H_{10} в полубесконечном прямоугольном волноводе.

Литература

1. Баскаков С.И. Электродинамика и распространение радиоволн: Учебное пособие. М.: «ЛИБРОКОМ», 2012. – Глава 8

2. Федоров Н.Н. Основы электродинамики: Учебное пособие для вузов. М.: Высш. шк. 1980. 399 с.

3. Крамм М.Н. Сборник задач по основам электродинамики. – СПб.: Изд-во «Лань», 2011. – 256 с. – Глава 6.

Лабораторная работа № 9

ИССЛЕДОВАНИЕ КРУГЛОГО ОБЪЕМНОГО РЕЗОНАТОРА

Целью работы является исследование свойств колебаний электромагнитного поля в объемном резонаторе, созданном на базе круглого волновода быстрых волн.

9.1. Описание экспериментальной установки и методики проведения экспериментов

Продольное сечение установки для исследования колебаний в круглом объемном резонаторе изображено на рис. 9.1. Резонатор выполнен как закрытый толстостенный цилиндр из алюминия и имеет следующие внутренние размеры: длина $l = 123$ мм; радиус $r_0 = 40$ мм. Координата z изменяется вдоль оси резонатора, при этом для внутренних поверхностей торцевых стенок приняты координаты $z = 0$ и $z = l$.

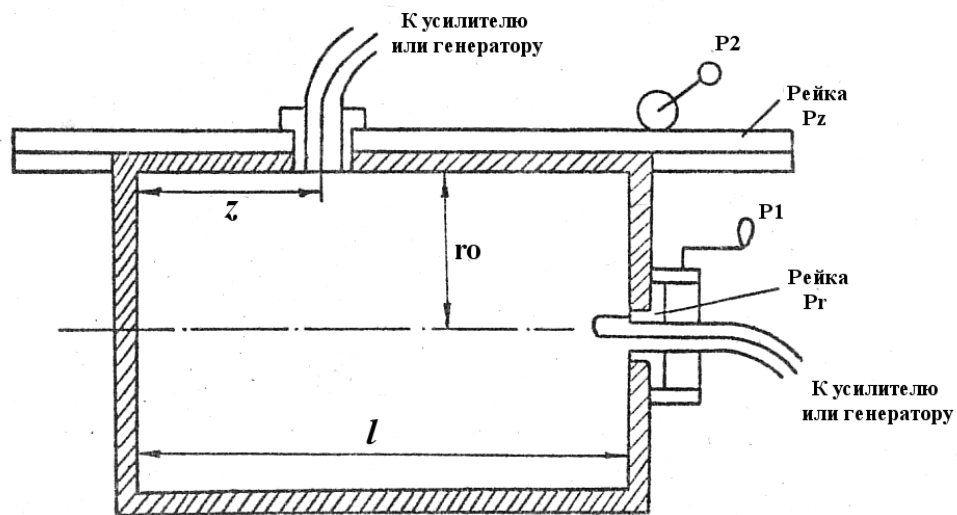


Рис.9.1. Вид экспериментальной установки в продольном сечении

9.1.1. Возбуждение и съем колебаний электромагнитного поля осуществляются с помощью зондов электрического типа (штырь) и магнитного типа (петля). В качестве примера, на рис.9.1 показан электрический зонд на боковой цилиндрической поверхности резонатора (в верхней части рисунка) и магнитный зонд на правой торцевой поверхности резонатора. Если конкретный зонд через кабель подключить к генератору СВЧ колебаний, то он позволяет возбуждать электромагнитное поле. Если зонд подключить через детектор к измерительному устройству (милливольтметр), то можно измерить амплитуду колебаний электромагнитного поля (про измерения см. ниже).

Экспериментальная установка снабжена четырьмя зондами: электрическим и магнитным для возбуждения высокочастотных колебаний; электрическим и магнитным для регистрации электромагнитного поля. В результате имеется возможность, например, возбуждать электромагнитное поле с помощью зонда на боковой поверхности резонатора, и снимать распределение поля по радиальной координате – с помощью приемного зонда на торцевой поверхности резонатора. Поменяв зонды местами, можно возбуждать колебания с торцевой поверхности, а снимать распределения поля на боковой цилиндрической поверхности резонатора.

Зонд электрического типа (штырь) позволяет регистрировать проекцию вектора \vec{E} , **параллельную штырю**, или возбуждать электромагнитное поле, имеющее эту проекцию. Зонд магнитного типа (петля) позволяет регистрировать проекцию вектора \vec{H} , **перпендикулярную плоскости петли**, или возбуждать электромагнитное поле, имеющее эту проекцию.

9.1.2. Измерение амплитуды напряженности поля. Генератор создает СВЧ колебания, которые промодулированы по амплитуде с частотой 1 кГц. Это дает возможность, подключив к приемному зонду диодный детектор, подавать на измерительное устройство (милливольтметр) низкочастотные колебания с частотой модуляции 1 кГц. Достоинства такого способа измерения связаны с простотой измерительного устройства, а также с возможностью подавления помех с помощью полосового фильтра, настроенного на частоту модуляции. **Измерения рекомендуется проводить при достаточно слабом уровне сигналов, не превышающем величину 30-50 мВ.** Тогда можно считать, что детектор работает в квадратичном режиме, **и амплитуда продетектированного сигнала прямо пропорциональна квадрату амплитуды напряженности поля** – электрического поля (электрический приемный зонд) или магнитного поля (магнитный приемный зонд).

9.1.3. Съём пространственных распределений векторов поля. Для съема пространственных распределений в боковой поверхности установки (рис.9.1) сделан продольный паз (прорезь), а на торцевой поверхности установки сделан радиальный паз, проходящий по диаметру торца. Зонды устанавливаются в металлических рейках P_z и P_r , которые при вращении ручек P_1 и P_2 через зубчатые передачи могут перемещаться вдоль пазов. Важно, что при этих перемещениях рейки все время закрывают пазы, чтобы не нарушить граничные условия на поверхности резонатора.

Перед началом съема пространственного распределения подстройте частоту колебаний генератора в резонанс с исследуемым типом колебаний, ориентируясь на рассчитанную дома резонансную частоту данного типа колебаний. При резонансе уровень сигнала на измерительном приборе будет

максимальным. Регулировка частоты генерируемых колебаний предусмотрена на передней панели генератора.

При съеме пространственного распределения, необходимо перемещать приемный зонд и записывать показания измерительного прибора. Так, например, установив приемный электрический зонд на боковой поверхности резонатора, можно снять зависимость $E_r(z)$ при $r = r_0$. При этом в случае колебаний типа E_{012} ожидаемая зависимость амплитуды напряжения с выхода детектора от координаты показана на рис.9.2.

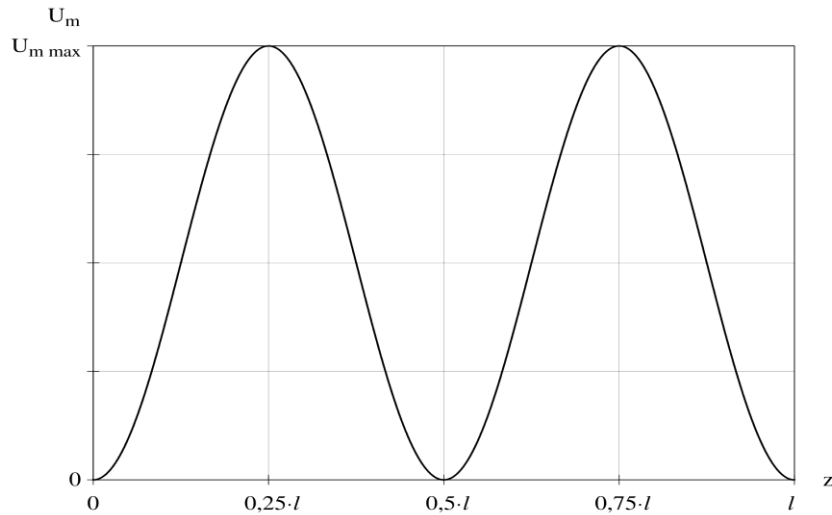


Рис.9.2. Зависимость амплитуды напряжения с выхода детектора от координаты z

Важно, что перед записью показаний вольтметра **необходимо предварительно** перемещать приемный зонд во всем диапазоне изменения координаты, но, не доходя до стенок примерно на 5 мм. При этом Вы визуальнo определяете количество глобальных максимумов и минимумов амплитуды по измерительному прибору, а также оцениваете уровень сигнала в максимумах. Если этот уровень превышает 30 – 50 мВ, то нужно уменьшить выходной уровень колебаний генератора путем регулировки мощности на передней панели генератора. Если уровень в максимумах заметно меньше 30 – 50 мВ, то нужно вначале убедиться, что Вы действительно настроились в резонанс, а потом при необходимости увеличить уровень колебаний генератора регулировкой мощности генератора. Выберите шаг по координате, с которым будете снимать пространственное распределение. При этом ориентируйтесь на такое количество экспериментальных точек, чтобы на каждую вариацию поля (область изменения амплитуды от минимума до следующего минимума или от максимума до следующего максимума) приходилось достаточное количество точек (10 – 20).

При построении графика нормированного пространственного распределения учитывайте, что детектирование является квадратичным, то есть ам-

плитуда измеряемого напряжения U_m прямо пропорциональна квадрату амплитуды напряженности поля. Поэтому нормируйте измеренные уровни напряжения на максимальное значение $U_{m \max}$, а затем извлекайте из полученных значений квадратный корень. Так, например, при исследовании зависимости $E_r(z)$, стройте график функции:

$$f(z) = \frac{|\dot{E}_r(z)|}{|\dot{E}_r|_{\max}} = \sqrt{\frac{U_m(z)}{U_{m \max}}},$$

9.1.4. Измерение добротности объемного резонатора. Установите возбуждающий и приемный зонд так, чтобы можно было исследовать колебание заданного типа в объемном резонаторе. Изменяя частоту колебаний СВЧ генератора, настройтесь в резонанс с заданным типом колебаний электромагнитного поля: добейтесь максимального уровня сигнала $U_{m \max}$ на измерительном приборе. Этот уровень не должен превышать 30-50 мВ (при необходимости уменьшите мощность генератора). Пользуясь шкалой частот на передней панели генератора, запишите полученное экспериментальное значение резонансной частоты. Изменяя частоту колебаний генератора, определите такие значения частоты $f_{\text{верхняя}}$ и $f_{\text{нижняя}}$, на которых измерительный прибор показывает $U_m = U_{m \max} / 2$. Обратите внимание, что за счет квадратичного режима детектирования на частотах $f_{\text{верхняя}}$ и $f_{\text{нижняя}}$ амплитуда колебаний напряженности поля уменьшается в $\sqrt{2}$ раз по сравнению с резонансным значением. Запишите значение полосы пропускания $\Pi = f_{\text{верхняя}} - f_{\text{нижняя}}$. Основываясь на известной в радиотехнике формуле, связывающей полосу пропускания и добротность колебательного контура, определите добротность объемного резонатора для используемого типа колебаний.

Пример эксперимента по измерению добротности отображен на рис. 9.3

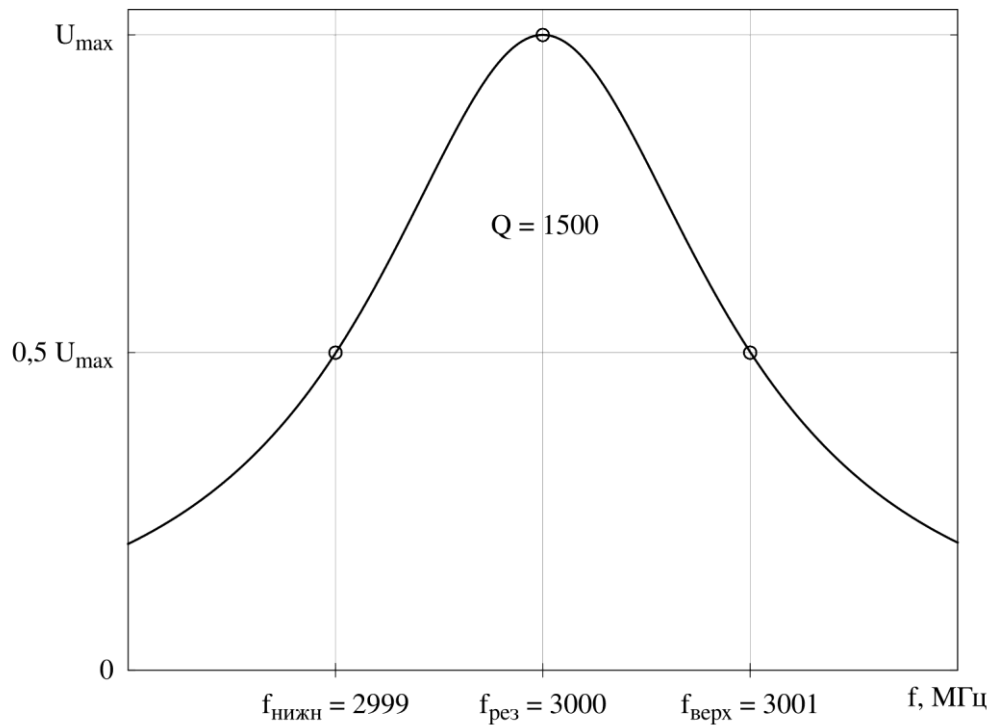


Рис.9.3. АЧХ резонатора в окрестности одной из резонансных частот

В соответствии с данным рисунком получаем (рисунок поясняющий, график при эксперименте строить не требуется):

$$Q = \frac{3000 \text{ МГц}}{(3001 \text{ МГц} - 2999 \text{ МГц})} = 1500.$$

Следует иметь в виду, что описанный способ измерения добротности дает величину **нагруженной добротности**, учитывающей дополнительные потери мощности за счет связи резонатора с генератором, элементами регистрации и возможные потери на излучение при неплотном прилегании скользящих контактов со стенками резонатора. Зная найденную экспериментально нагруженную добротность и собственную добротность, рассчитанную по известным формулам, можно найти коэффициент связи резонатора с внешними устройствами, пользуясь формулой:

$$Q_{\text{нагр}} = \frac{Q_{\text{собств}}}{1 + K_{\text{связи}}}$$

9.2. Расчетное задание (выполняется каждым студентом)

1. Ознакомьтесь с теорией круглого объемного резонатора (Литература [1], [2]). Уясните понятия: а) тип колебания в круглом резонаторе (E_{mnp} или H_{mnp}), что означают индексы m, n, p ; б) резонансная частота, от чего она зависит; в) собственная и нагруженная добротности, чем они определяются.

2. Ознакомьтесь с экспериментальной установкой и методиками проведения экспериментов (см. п. 9.1).

3. Рассчитайте резонансную частоту для следующих типов колебаний: E_{011} , E_{012} , H_{111} , H_{112} (внутренние размеры резонатора см. в п. 9.1, используйте справочный материал в задачнике [3], стр. 129).

4. Запишите формулы для **амплитуды** составляющих E_r , E_z , H_φ при возбуждении колебания типа E_{01p} и составляющих E_r , E_z , H_φ при возбуждении колебания типа H_{11p} (рекомендуется воспользоваться задачиком [3], стр. 130-131). Учтите, что амплитуда колебания равна модулю комплексной амплитуды этого колебания.

5. **Рассчитайте и постройте** графики зависимости нормированной амплитуды составляющих поля от координаты в соответствии с таблицей заданий. Нормировку проводите по максимальной амплитуде конкретной составляющей поля. Так, например, для колебания типа E_{01p} ($p = 1$ для E_{011} , $p = 2$ для E_{012})

$$\frac{|\dot{E}_r(z)|}{|\dot{E}_r(z)|_{\max}} = \left| \sin\left(\frac{p\pi}{l}z\right) \right|, \quad z \in (0, l).$$

Для колебания H_{11p}

$$\frac{|\dot{H}_z(z)|}{|\dot{H}_z(z)|_{\max}} = \left| \sin\left(\frac{p\pi}{l}z\right) \right|, \quad z \in (0, l);$$

$$\frac{|\dot{H}_r(r)|}{|\dot{H}_r(r)|_{\max}} = \frac{J_1'\left(\frac{\mu_{11}}{r_0}r\right)}{J_1'(0)}, \quad r \in (-r_0; r_0);$$

$$\frac{|\dot{E}_\varphi(r)|}{|\dot{E}_\varphi(r)|_{\max}} = \frac{J_1'\left(\frac{\mu_{11}}{r_0}r\right)}{J_1'(0)}, \quad r \in (-r_0; r_0).$$

Здесь $J_1'(x) = \frac{dJ_1(x)}{dx}$; диапазон расчета графика $r \in (-r_0; r_0)$ связан с экс-

периментальными условиями съема зависимости по диаметру резонатора. Учтите, что в пакете Mathcad допустимы записи типа $J_1(x)$ и dJ_1/dx .

6. Рассчитайте собственную добротность резонатора для типа колебаний, приведенного в таблице заданий (рекомендуется воспользоваться задачиком [3], стр. 133-134). Стенки резонатора выполнены из металла с удельной проводимостью $3 \cdot 10^7$ См/м (алюминий).

Таблица 9.1

Расчет	1-е за- нятие	2-е за- нятие	3-е за- нятие	4-е за- нятие
Тип ко- лебания, зависи- мость	E_{011} $E_r(z)$	H_{111} $E_r(z)$	E_{011} $E_r(z)$	H_{111} $E_\phi(z)$
Тип ко- лебания, зависи- мость	H_{112} $H_z(z)$	E_{012} $E_r(z)$	H_{112} $E_r(z)$	E_{012} $E_r(z)$
Тип ко- лебания, зависи- мость	H_{112} $H_r(r)$	H_{111} $E_\phi(r)$	H_{111} $H_r(r)$	H_{112} $E_\phi(r)$
Доброт- ность для ти- пов:	E_{011} H_{112}	E_{012} H_{111}	E_{012} H_{112}	E_{011} H_{111}

9.3. Экспериментальное задание

1. Включите СВЧ генератор и вольтметр, дайте им прогреться 10 минут.

2. Установите электрический возбуждающий зонд на торцевой поверхности резонатора. Установите такой приемный зонд на боковой поверхности, чтобы можно было снимать зависимость $E_r(z)$ (см. методику в п.9.1.1, используйте эту методику в остальных пунктах экспериментального задания). Плавно меняя частоту колебаний СВЧ генератора, добейтесь возбуждения колебания типа E_{011} . По методике, изложенной в пп. 9.1.2, 9.1.3, снимите пространственное распределение $E_r(z)$; используйте эту методику в остальных пунктах экспериментального задания. Если в задании был предусмотрен расчет добротности для колебания типа E_{011} , то по методике п. 9.1.4 проведите измерение нагруженной добротности и определите коэффициент связи резонатора с внешними устройствами.

3. Плавно меняя частоту колебаний СВЧ генератора, добейтесь возбуждения колебания типа E_{012} . Снимите пространственное распределение $E_r(z)$. Если в задании был предусмотрен расчет добротности для колебания

типа E_{012} , то проведите измерение нагруженной добротности и определите коэффициент связи резонатора с внешними устройствами.

4. Убедитесь, что на боковой поверхности резонатора установлен электрический возбуждающий зонд. Установите такой приемный зонд на торцевой поверхности, чтобы можно было снимать зависимость $H_r(r)$. Плавно меняя частоту колебаний СВЧ генератора, добейтесь возбуждения колебания типа H_{112} . Снимите пространственное распределение $H_r(r)$. Если в задании был предусмотрен расчет добротности для колебания типа H_{112} , то проведите измерение нагруженной добротности и определите коэффициент связи резонатора с внешними устройствами.

5. Если в задании был предусмотрен расчет добротности для колебания типа H_{111} , то, плавно меняя частоту колебаний СВЧ генератора, добейтесь возбуждения колебания типа H_{111} . Проведите измерение нагруженной добротности и определите коэффициент связи резонатора с внешними устройствами.

9.4. Контрольные вопросы

1. При каком типе колебаний резонансная частота круглого объемного резонатора не зависит от его длины?

2. Как изменится резонансная частота круглого резонатора при колебаниях типа E_{010} в случае уменьшения его радиуса.

3. Какие граничные условия накладываются при определении поля электрического и магнитного типов в круглом резонаторе?

4. Как компоненты электромагнитного поля внутри резонатора для колебаний типа H_{011} , H_{012} зависят от координат r , z и φ ?

5. Нарисуйте картину поля и картину токов для колебаний типа E_{011} , E_{012} , H_{111} , H_{112} .

6. Нарисуйте зависимость амплитуды поля в резонаторе от частоты при возбуждении поля элементарным вибратором.

7. Каким образом выводятся выражения для добротности объемных резонаторов?

8. Как определяется добротность в резонаторе в случае заполнения его диэлектриком с проводимостью отличной от нуля?

Литература

1. Баскаков С.И. Электродинамика и распространение радиоволн: Учебное пособие. М.: «ЛИБРОКОМ», 2012. – Глава 12.

3. Крамм М.Н. Сборник задач по основам электродинамики. – СПб.: Изд-во «Лань», 2011. – 256.с.. – Глава 7.

ОСНОВНЫЕ УЗЛЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ УСТАНОВОК

В лаборатории электродинамики используются устройства и узлы СВЧ, которые более подробно изучаются в других учебных курсах. Поэтому, мы дадим только краткое их описание.

Аттенюатор



Рис.1. Внешний аттенюатора.

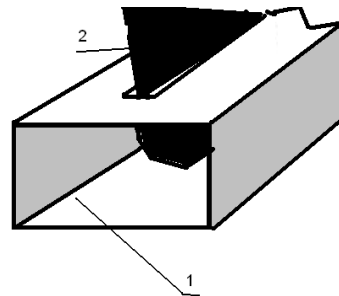


Рис.2. Принцип действия аттенюатора.

1- волновод, 2 -поглотитель

Атте

(рис.1,2) – пассивное устройство, предназначенное для ослабления проходящего через него сигнала в заданное число раз.

Принцип дейст-

вия аттенюатора следующий: пластина из

поглощающего материала вносится в область максимума электрического поля внутри волновода параллельно вектору \vec{E} , в результате чего часть мощности электромагнитного поля волны поглощается в пластине и уровень мощности на выходе устройства уменьшается. Частично помещая материал в поле, можно добиться нужного коэффициента затухания.

Существуют аттенюаторы, работающие на других физических принципах. Например, аттенюатор на запердечном волноводе.

Назначение: ослабление поля в требуемое число раз.

Вентиль

Вентиль СВЧ (рис.3,4) - пассивное устройство, которое хорошо пропускает электромагнитные волны в одном направлении и поглощает их в обратном, улучшая тем самым согласование различных элементов цепи. Их эффективность определяется вентильным отношением V , т. е. отношением

ослаблений обратной и прямой волн, выраженным в децибелах: $V = \alpha_{\text{обр}} / \alpha_{\text{пр}}$,



Рис.3. Вентиль СВЧ.

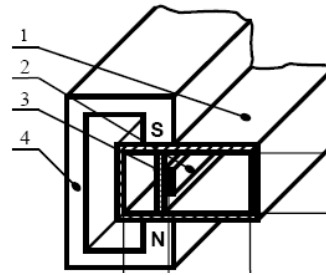


Рис.4. Принцип действия вентиль. 1 – прямоугольный волновод; 2–тонкая ферритовая пластина; 3 – диэлектрическая пластина; 4 – постоянный магнит

где α – коэффициенты затухания обратной и прямой волны.

Принцип действия вентиля основан на том, что намагниченная ферритовая пластина является невзаимной средой. То есть, при прямом прохождении волны вектор ее поляризации поворачивается из положения A в положение A' , а при обратном прохождении, он не возвращается в исходное положение A , и волна не может распространяться в новых условиях.

Наиболее широко применяются вентили трех типов: резонансные, со смещением поля и фарадеевские.

Назначение: защита генератора.

Направленный ответвитель



Рис.5. Направленный ответвитель

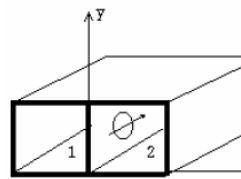


Рис.6. Принцип действия направленного ответвителя. 1,2 – волновод, 3 – отверстие.

Направленный ответвитель (рис.5,6) – пассивное многоплечее устройство, которое позволяет производить деление мощности электромагнитного поля в волноводных плечах требуемым образом. В отличие от других

волноводных устройств обладает возможностью создания развязанных плеч.

Принцип действия. Направленный ответвитель состоит из двух (или более) отрезков волновода, которые имеют на определенном участке общую тонкую стенку (широкую или узкую). В стенке, разделяющей волноводы, сделаны отверстия, служащие элементами связи, через которые ответвляется небольшая часть мощности из первичного волновода во вторичный. Количе-

ство отверстий, их форма и размеры определяют характеристики ответвителя. Направленное распространение во вторичном волноводе достигается в результате интерференции возбуждённых в нём волн, которые, складываясь, в одном направлении взаимно гасятся, а в другом – образуют результирующую ответвленную волну.

Назначение: развязывающее устройство, делитель мощности.

Согласованная нагрузка



Рис.7. Согласованная нагрузка

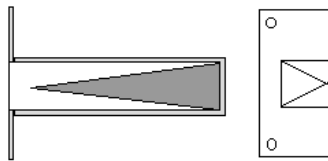


Рис.8. Принцип действия Согласованной нагрузки.

Согласованная нагрузка (рис.7,8) – это пассивное устройство, которое в значительной степени поглощает электромагнитное поле падающей

волны, практически не создавая отраженной волны.

Принцип действия. Бегущая волна, приходящая из линии, полностью поглощается в согласованной нагрузке, за счет свойств диэлектрика. Поэтому отражение волны обратно в линию отсутствует.

Входной импеданс линии, нагруженной на согласованную нагрузку, равен волновому сопротивлению линии.

Волноводный возбуждатель

Волноводный возбуждатель (рис.9,10) – пассивное устройство для перехода с одного типа длинной линии на другой. Существуют три основных вида волноводных возбуждателей (рис.10): *а* – штыревой, *б* – петля, *в* – щелевой.



Рис.9. Возбудитель.

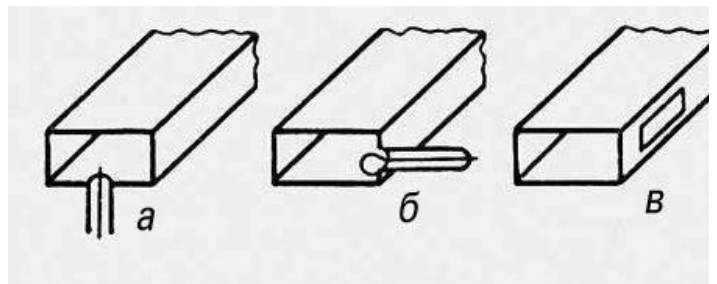


Рис.10. Принцип действия возбуждателя

Генераторы

В наших лабораторных работах используются транзисторные **генераторы СВЧ** 3- и 10-сантиметрового диапазона длин волн. Генераторы настроены на одну постоянную частоту. Модулируются внутренним генератором с частотой модуляции 1 кГц. Есть возможность модулировать с внешнего генератора.

В лабораторной работе №4 используется клистронный генератор с возможностью управления частотой.

Измерительная линия (ИЛ)

Измерительная линия (рис.11,12) состоит из трех основных узлов: отрезка передающей линии с продольной узкой щелью, зондовой головки и каретки с механизмом для перемещения зондовой головки вдоль линии. Зондовая головка представляет собой резонатор, возбуждаемый зондом – тонкой проволокой, погруженной через щель во внутреннюю полость волновода.



Рис.11. Измерительная линия.

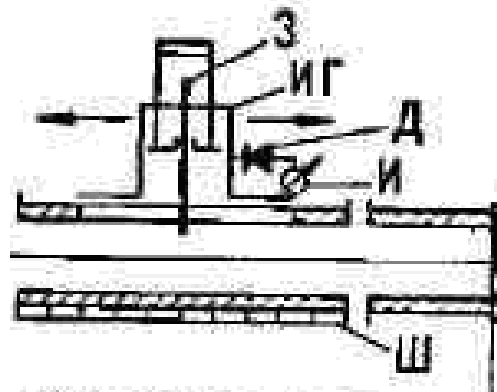


Рис.12. принцип действия ИЛ. З – зонд, Д – детектор, ИГ – резонатор и каретка, Ш – шкала.

Глубину погружения зонда в линии регулируют специальным винтом, расположенным сверху зондовой головки. Внутри резонатора помещен полупроводниковый детектор, связанный с индикаторным прибором. При перемещении зонда вдоль линии, внутри которой имеется электромагнитное поле, в зонде наводится электродвижущая сила, пропорциональная напряженности поля в сечении расположения зонда. Эта ЭДС возбуждает резонатор, создавая в нем электромагнитные колебания. Объемный резонатор зондовой головки настраивают в резонанс с частотой электромагнитных колебаний. Это нужно для уменьшения искажающего действия зонда на электромагнитное поле в линии и повышения чувствительности линии.

Назначение: измерение длины волны в длинной линии.