

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение
высшего профессионального образования
«Томский государственный университет систем управления и
радиоэлектроники»

Кафедра электронных приборов

Микроволновая электроника

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В КРУГЛОМ ВОЛНОВОДЕ

Методические указания к лабораторной работе
для студентов направления
210100.62 – Электроника и наноэлектроника

2014

Башкиров, Александр Иванович

Исследование электромагнитного поля в круглом волноводе = Микроволновая электроника: методические указания к лабораторной работе для студентов направления 210100.62 – Электроника и наноэлектроника / А.И. Башкиров; Министерство образования и науки Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Кафедра электронных приборов. - Томск: ТУСУР, 2014. - 17 с.

Целью настоящей работы является изучение свойств круглого волновода, методики расчета параметров, характеризующих режим работы линии передачи, исследование конфигурации электромагнитного поля направляемых волн в круглом волноводе.

В ходе выполнения работы у студентов формируются:

- способность использовать основные законы естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности, применять методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования (ОК-10);
- способность осуществлять сбор и анализ исходных данных для расчета и проектирования электронных приборов, схем и устройств различного функционального назначения (ПК-9);
- способность аргументировано выбирать и реализовывать на практике эффективную методику экспериментального исследования параметров и характеристик приборов, схем, устройств и установок электроники и наноэлектроники различного функционального назначения (ПК-20).

Предназначено для студентов очной, очно-заочной и заочной форм, обучающихся по направлению 210100.62 – «Электроника и наноэлектроника» по дисциплине «Микроволновая электроника».

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Томский государственный университет систем управления и
радиоэлектроники»

Кафедра электронных приборов

УТВЕРЖДАЮ
Зав.кафедрой ЭП
_____ С.М. Шандаров
« ___ » _____ 2014 г.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ
В КРУГЛОМ ВОЛНОВОДЕ

Методические указания к лабораторной работе
для студентов направления 210100.62 – Электроника и
наноэлектроника

Разработчик:
доцент каф. ЭП
_____ А.И. Башкиров
« ___ » _____ 2014 г

Томск 2014

Содержание

1 Введение.....	5
2 Теоретическая часть.....	6
2.1 Основные понятия.....	6
2.2 Е – волны.....	7
2.3 Н – волны	11
2.4 Контрольные вопросы	14
3 Экспериментальная часть.....	14
3.1 Задание	14
3.2 Содержание отчета.....	15
Список литературы	15

1 Введение

Различные направляющие системы получили широкое распространение благодаря интенсивному развитию микроволновой электроники. Особое место занимают здесь полые волноводы. Полый волновод круглого сечения представляет собой один из видов линии передачи в диапазоне сантиметровых волн.

Целью данной работы является изучение свойств круглого волновода, методики расчета параметров, характеризующих режим работы линии передачи, исследование конфигурации электромагнитного поля направляемых волн в круглом волноводе.

В ходе выполнения работы у студентов формируются:

- способность использовать основные законы естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности, применять методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования (ОК-10);

- способность осуществлять сбор и анализ исходных данных для расчета и проектирования электронных приборов, схем и устройств различного функционального назначения (ПК-9);

- способность аргументировано выбирать и реализовывать на практике эффективную методику экспериментального исследования параметров и характеристик приборов, схем, устройств и установок электроники и наноэлектроники различного функционального назначения (ПК-20).

2 Теоретическая часть

2.1 Основные понятия

Теория круглых волноводов микроволнового диапазона рассмотрена в том числе в учебной и методической литературе. В данном пособии использованы материалы, касающиеся круглых волноводов, изложенные в [1 - 3].

Устройства, ограничивающие область, в которой распространяются электромагнитные волны, и направляющие движение электромагнитной энергии в заданном направлении, называются направляющими системами. К их числу относятся всевозможные линии передачи, основными типами которых являются проводные линии, коаксиальные линии, металлические волноводы, полосковые линии.

Классификация направляемых волн проводится по признаку наличия у них продольной составляющей электрического или магнитного поля. Принято называть H – волнами (магнитными) или поперечно-электрическими волнами, обозначаемыми символом TE (Transversion Electric - поперечно-электрические) такие волны, у которых $H_z \neq 0$. Если $E_z \neq 0$, то такие волны называются E – волнами (электрическими) или поперечно-магнитными волнами, обозначаемые символом TM (Transversion Magnetic - поперечно-магнитные). В некоторых линиях передачи, таких как коаксиальная или полосковая, могут быть равны нулю продольные составляющие и электрического, и магнитного поля одновременно. Такие волны, для которых $H_z = 0$ и $E_z = 0$ называют T – волнами (поперечными) или поперечно-электромагнитными волнами, обозначаемыми символом TEM (Transversion Electro-Magnetic). В направляющих системах могут также существовать смешанные (гибридные) волны, у которых отличны от нуля все компоненты электромагнитного поля.

Круглые волноводы представляют собой металлическую трубу круглого сечения радиусом a (рис. 2.1), в которых также как в прямоугольных волноводах распространяются E - и H - волны, и не распространяются волны типа T .

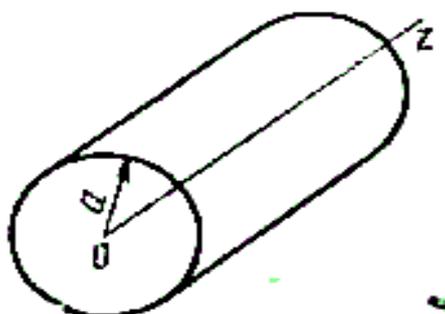


Рисунок 2.1

2.2 E – волны

При анализе круглого волновода удобно использовать цилиндрическую систему координат r, φ, z , при этом ось z совмещена с осью волновода (рис. 2.1). Уравнение Гельмгольца для продольной компоненты вектора напряженности электрического поля в цилиндрической системе координат имеет вид (2.1):

$$\frac{\partial^2 \dot{E}_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \dot{E}_z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \dot{E}_z}{\partial \varphi^2} + \chi_{\perp}^2 \dot{E}_z = 0. \quad (2.1)$$

Для решения формулы (2.1) применим метод разделения переменных, что приводит к двум независимым дифференциальным уравнениям

$$\frac{d^2 \Phi}{d\varphi^2} + m^2 \Phi = 0, \quad (2.2)$$

$$\frac{d^2 R}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dR}{dr} + \left(\chi_{\perp}^2 - \frac{m^2}{r^2} \right) R = 0. \quad (2.3)$$

Решение уравнения (2.2) имеет вид

$$\Phi(\varphi) = A \sin m\varphi + B \cos m\varphi,$$

где $A_1 = \sqrt{A^2 + B^2}$; $\varphi = \arctg \frac{A}{B}$, m – целое число ($m=0,1,2 \dots$).

Функция Φ должна быть четной относительно угла φ . Поэтому, постоянная $A = 0$ и

$$\Phi(\varphi) = B \cos m(\varphi - \varphi_0). \quad (2.4)$$

Уравнение (2.3) является уравнением Бесселя, его решение хорошо известно и может быть представлено в виде

$$R(r) = C' J_m(\chi_{\perp} r) + D' N_m(\chi_{\perp} r),$$

где $J_m(\chi_{\perp} r)$ и $N_m(\chi_{\perp} r)$ – функции Бесселя m -го порядка первого и второго рода, функцию $N_m(\chi_{\perp} r)$ называют также функцией Неймана m -го порядка; C' , D' – произвольные постоянные.

Функция Бесселя второго рода при $r \rightarrow 0$ стремится к бесконечности. Так как напряженность поля в любой точке волновода

должна быть ограничена, то необходимо наложить условие $D' = 0$. Таким образом, получаем продольную компоненту электрического поля в виде

$$\dot{E}_z = E_{0z} J_m(\chi_{\perp} r) \cos m(\varphi - \varphi_0) e^{-j\gamma z}, \quad (2.5)$$

где $E_{0z} = A_1 C'$ - амплитуда продольной составляющей электрического поля.

Подставляя выражение для \dot{E}_z из формулы (2.5) в соотношения, связывающие поперечные и продольные компоненты электромагнитного поля, определяем поперечные составляющие поля.

Составляющие векторов поля волны типа E_{mn} в круглом волноводе имеют вид

$$\begin{aligned} E_r &= -j \frac{\gamma}{\chi_{\perp}} E_0 J_m'(\chi_{\perp} r) \cos(m\varphi) \exp(-j\gamma z), \\ E_{\varphi} &= j \frac{\gamma m}{\chi_{\perp}^2 r} E_0 J_m(\chi_{\perp} r) \sin(m\varphi) \exp(-j\gamma z), \\ E_z &= E_0 J_m(\chi_{\perp} r) \cos(m\varphi) \exp(-j\gamma z), \\ H_r &= -j \frac{\omega \epsilon_a}{\chi_{\perp}^2 r} m E_0 J_m(\chi_{\perp} r) \sin(m\varphi) \exp(-j\gamma z), \\ H_{\varphi} &= -j \frac{\omega \epsilon_a}{\chi_{\perp}} E_0 J_m'(\chi_{\perp} r) \cos(m\varphi) \exp(-j\gamma z), \\ H_z &= 0. \end{aligned} \quad (2.6)$$

В уравнениях (2.6) штрих означает дифференцирование по всему аргументу функций Бесселя. Чтобы найти χ_{\perp} , надо воспользоваться граничным условием

$$E_{z/r=a} = 0.$$

Подставляя его в уравнения (2.6), получаем

$$J_m(\chi_{\perp} a) = 0. \quad (2.7)$$

Значения аргумента, при которых функция Бесселя равна нулю называются корнями функции Бесселя. Обозначая n -й корень функции Бесселя m -го порядка через v_{mn} из последнего уравнения получаем

$$\chi_{\perp} a = v_{mn} \quad (2.8)$$

где $m = 0, 1, 2, 3, \dots$ – порядок функции Бесселя,

$n = 1, 2, 3, \dots$ – номер корня в порядке возрастания.

Нумерация E_{mn} – волн, отличающихся друг от друга по структуре поля в плоскости поперечного сечения, волновода, осуществляется в соответствии с порядковым номером корня уравнения (2.7). Например, корню v_{01} соответствует волна E_{01} , корню v_{13} – волна E_{13} и т.д. Индекс m – соответствует числу стоячих волн поля, укладывающихся по окружности волновода, т.е. число вариаций поля по угловой координате поля φ , а индекс n – число вариаций по радиальной координате r .

Из уравнения (2.8) определяем χ_{\perp} и находим $\lambda_{кр}$. Для волн типа E_{mn} в круглом волноводе критическая длина волны определяется выражением (2.9):

$$\lambda_{кр} = \frac{2a\pi}{v_{mn}}, \quad (2.9)$$

где a — радиус волновода; v_{mn} — n -й корень уравнения $J_m(x) = 0$.

Выражения, определяющие длину волны в волноводе и фазовую скорость волны, имеют такой же вид, как и в теории прямоугольного волновода

$$v_{\phi} = \frac{c}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{\text{кп}}}\right)^2}}, \quad (2.10)$$

$$\Lambda = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{\text{кп}}}\right)^2}}, \quad (2.11)$$

где Λ – длина волны в волноводе,
 λ – длина волны в свободном пространстве.

2.3 Н – волны

Решение уравнения Гельмгольца для продольной компоненты вектора напряженности магнитного поля в цилиндрической системе координат имеет вид (2.12):

$$\frac{\partial^2 \dot{H}_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \dot{H}_z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \dot{H}_z}{\partial \varphi^2} + \chi_{\perp}^2 \dot{H}_z = 0. \quad (2.12)$$

Дальнейшее решение аналогично проведенному для электрических волн. В результате получаем выражение (2.13) для продольной составляющей магнитного поля:

$$\dot{H}_z = H_{0z} J_m(\chi_{\perp} r) \cos m(\varphi - \varphi_0) e^{-j\gamma z}. \quad (2.13)$$

Подставляя выражение для \dot{H}_z из (2.13) в соотношения, связывающие поперечные и продольные компоненты электромагнитного поля,

определяем поперечные составляющие поля.

Выражения для составляющих векторов поля волн типа H_{mn} в круглом волноводе имеют вид (2.14):

$$\begin{aligned}
 E_r &= j \frac{\omega \mu_a}{\chi_{\perp}^2 r} m H_0 J_m(\chi_{\perp} r) \sin(m\varphi) \exp(-j\gamma z), \\
 E_{\varphi} &= j \frac{\omega \mu_a}{\chi_{\perp}} H_0 J'_m(\chi_{\perp} r) \cos(m\varphi) \exp(-j\gamma z), \\
 E_z &= 0, \\
 H_r &= -j \frac{\gamma}{\chi_{\perp}} H_0 J'_m(\chi_{\perp} r) \cos(m\varphi) \exp(-j\gamma z), \\
 H_{\varphi} &= j \frac{\gamma m}{\chi_{\perp}^2 r} H_0 J_m(\chi_{\perp} r) \sin(m\varphi) \exp(-j\gamma z), \\
 H_z &= H_0 J_m(\chi_{\perp} r) \cos(m\varphi) \exp(-j\gamma z).
 \end{aligned} \tag{2.14}$$

В уравнениях (2.14) штрих означает дифференцирование по всему аргументу функции Бесселя. Для определения поперечного волнового числа χ_{\perp} воспользуемся граничным условием $\frac{\partial H_z}{\partial n} = 0$. Учитывая, что в круглом волноводе дифференцирование по нормали соответствует дифференцированию по радиусу, можно получить трансцендентное уравнение (2.15):

$$J'_m(\chi_{\perp} a) = 0. \tag{2.15}$$

Отметим, что при выполнении равенства (2.15) согласно (2.14) касательная к стенкам волновода составляющая \dot{E}_{φ} электрического поля равна нулю на поверхности стенок волновода. Обозначив корни уравнения (2.15), число которых бесконечно, через μ_{mn} находим поперечное волновое число волн H_{mn} :

$$\chi_{\perp} \cdot a = \mu_{mn}.$$

Для волн типа H_{mn} в круглом волноводе критическая длина волны равна

$$\lambda_{кр} = \frac{2a\pi}{\mu_{mn}}, \quad (2.16)$$

где μ_{mn} — n -й корень уравнения $J'_m(x) = 0$.

Выражения, описывающие длину волны в волноводе и фазовую скорость, остаются такими же, как и для электрических волн (2.10), (2.11).

Несмотря на конструктивные преимущества, круглые волноводы используют значительно реже, чем прямоугольные. Это обусловлено поляризационной неустойчивостью основной волны типа H_{11} в круглом волноводе. Поляризационная неустойчивость образуется из-за симметрии круглого волновода. Например, если на входе некоторой волноводной системы волна типа H_{11} поляризована вертикально, то под влиянием различных случайных деформаций волноводной линии колебания на линии имеют уже другое направление плоскости поляризации. Так как возбуждающие устройства работают, как правило, лишь с колебаниями вполне определенной поляризации, круглые волноводы с волной H_{11} не используют в качестве линии передачи СВЧ- сигналов. Однако если в круглом волноводе возбудить волны H_{11} ортогональные друг другу и сдвинутые по фазе на $\pm 90^\circ$, то суммарное поле будет волной с круговой поляризацией. Такие линии находят применение.

Ценным практическим свойством круглого волновода является возможность распространения в нем симметричных типов колебаний. На основе этих волн работает так называемое вращающееся волноводное сочленение, предназначенное для передачи энергии от передатчика к

антенне радиолокационной станции.

2.4 Контрольные вопросы

1. Какие типы волн существуют в круглых волноводах?
2. Какой физический смысл имеют символы m и n , обозначающих тип волны в круглом волноводе.
3. Дайте определение длины волны в волноводе.
4. Дайте определение критической длины волны в волноводе.
5. Дайте определение фазовой скорости в волноводе.
6. Какая волна в волноводе называется основной? Записать условие одномодового режима в волноводе.
7. Какая волна является основной в круглом волноводе?
8. Записать условие, при котором в круглом волноводе будет распространяться только основная волна.

3 Экспериментальная часть

3.1 Задание

1. Изучить настоящее методическое руководство (ОК-10, ПК-9).
2. Согласовать с преподавателем параметры круглого волновода, тип волны для исследования электромагнитного поля (ОК-10, ПК-9).
3. Рассчитать граничные частоты одномодового диапазона для заданного волновода (ОК-10, ПК-9).
4. Для данного типа волны найти критическую длину волны, рассчитать и построить зависимость длины волны в волноводе от частоты возбуждающих колебаний $\lambda_v(f)$ (ПК-9, ПК-20).
5. Построить распределение компонент поля заданного типа волны по координатным осям поперечного сечения волновода. Построить

силовые линии электрического магнитного полей в заданных преподавателем сечениях волновода (ПК-9, ПК-20).

3.2 Содержание отчета

Отчет должен содержать:

- 1) краткий конспект раздела теории круглых волноводов (ОК-10, ПК-9);
- 2) эскиз круглого волновода с привязкой к системе координат (ОК-10, ПК-9);
- 3) графическую зависимость длины волны в волноводе от частоты возбуждающих колебаний (ОК-10, ПК-9);
- 4) графики распределение компонент поля заданного типа волны по координатным осям волновода (ПК-9, ПК-20);
- 5) графическое изображение силовых линий электрического и магнитного полей в заданных сечениях круглого волновода (ПК-9, ПК-20);
- 6) ответы на контрольные вопросы (ОК-10, ПК-9).

Список литературы

1. Григорьев А.Д. Электродинамика и микроволновая техника: учебник. 2-е изд. – СПб.: Изд-во "Лань", 2007. – 704 с. ISBN: 978-5-8114-0706-4. http://e.lanbook.com/books/element.php?p11_cid=25&p11_id=118.
2. Боков Л.А., Замотринский В.А., Мандель А.Е. Электродинамика и распространение радиоволн: учебное пособие. - Томск: ТУСУР, 2012. - 301 с., <http://edu.tusur.ru/training/publications/738>.

3. Замотринский В.А., Шангина Л.И. Устройства СВЧ и антенны. Часть 1. Устройства СВЧ: учебное пособие. – Томск: ТУСУР, 2012. – 223 с., <http://edu.tusur.ru/training/publications/712>

4. Никольский В.В., Никольская Т.И. Электродинамика и распространение радиоволн. – М.: Наука, 1989. – 543 с.

Учебное пособие

Башкиров А.И.

Исследование электромагнитного поля в круглом волноводе

Методические указания к лабораторной работе
по дисциплине «Микроволновая электроника»

Усл. печ. л. Препринт
Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники
634050, г.Томск, пр.Ленина, 40