

Э. М. ЛАЗИЕВ, А. Г. ТАМАНЯН

ВОЛНА H_{10} В ПРЯМОУГОЛЬНОМ ВОЛНОВОДЕ
СО СЛОИСТЫМ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ЗАПОЛНЕНИЕМ

В статье рассматривается прохождение электромагнитной волны через волновод с периодически неоднородным диэлектриком. Дисперсионные характеристики волновода исследуются с помощью диаграммы Маттье. Приводятся блок-схема установки и экспериментальные результаты для основного типа волны H_{10} в прямоугольном волноводе.

§ 1. Дисперсионные характеристики волновода со слоистым диэлектрическим заполнением

Свойства волноводов, заполненных мелкослоистой диэлектрической средой подробно исследованы в работах Н. А. Хижняка [1,2], где показано, что подобный волновод эквивалентен, с точки зрения дисперсионных свойств, волноводу, заполненному анизотропным диэлектриком с некоторыми эффективными диэлектрическими постоянными.

Ниже рассматриваются свойства прямоугольного волновода, заполненного слоистым диэлектриком с произвольными толщинами слоев.

Рассмотрим прямоугольный волновод со сторонами a , вдоль оси x и b — вдоль оси y . Предположим, что диэлектрическая проницаемость заполнения является периодической функцией координаты z с периодом l .

Как известно, решение уравнений Максвелла для неоднородной среды с $\varepsilon(x, y, z)$ приводит к следующим дифференциальным уравнениям для полей $\vec{E}$ и $\vec{H}$:

$$\Delta \vec{H} + \frac{\omega^2}{c^2} \varepsilon \vec{H} = -\frac{1}{\varepsilon} [\text{grad } \varepsilon \times \text{rot } \vec{H}],$$

$$\Delta \vec{E} + \frac{\omega^2}{c^2} \varepsilon \vec{E} = -\text{grad} \left(\frac{1}{\varepsilon} \vec{E} \text{ grad } \varepsilon \right). \quad (1)$$

В уравнениях (1) предполагается, что потери в среде и стенках волновода отсутствуют, а $\mu=1$. Будем также считать, что свойства среды в поперечном сечении остаются неизменными. Спроектируем уравнения (1) на оси координат и рассмотрим компоненту E_y . В работе [3] показано, что при $\partial/\partial y = 0$ могут иметь место два независимых случая поляризации поля с компонентами E_x^1, E_z, H_y и H_x, H_z, E_y . Поскольку в дальнейшем предполагается исследовать распространение основного типа волны в рассматриваемом волноводе, то выполняется условие $\partial/\partial y = 0$, так как вариации поля по координате y не будет при соответствующем выборе предельного размера b .

Уравнение для компоненты E_y имеет вид

$$\Delta_{x,z} E_y + \frac{\omega^2}{C^2} \varepsilon E_y = 0, \quad (2)$$

где $\varepsilon = \varepsilon(z) = \varepsilon(z + L)$.

Произведя разделение переменных, положив

$$E_y = \varphi(x) \psi(z), \text{ где } \varphi(x) = A_1 \exp(\pm k_{\perp} x),$$

получаем следующее уравнение для $\psi(z)$:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} + \frac{1}{\varepsilon} \frac{d\varepsilon}{dz} \frac{\partial \psi}{\partial z} + (k_0^2 - k_{\perp}^2) \psi = 0, \quad (3)$$

где $k_0^2 = \frac{\omega^2}{c^2} \varepsilon_0$ — волновое число, а $k_{\perp}$ — поперечное волновое число.

Под ε_0 понимается среднее значение диэлектрической проницаемости.

В случае произвольного периодического закона зависимости $\varepsilon(z)$ уравнение (3) является уравнением Хилла. Для простоты будем полагать, что эта зависимость гармоническая:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \left(1 + \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon_0} \cos 2\pi \frac{z}{L} \right), \quad (4)$$

и тогда уравнение (3) можно будет записать в виде

$$U'' + (\eta + 2q \cos 2\xi) U = 0,$$

положив

$$\pi z/L = \xi, \text{ а } U(\xi) = \psi(z). \quad (5)$$

Уравнение (5) является канонической формой уравнения Маттье, а через η и q обозначены

$$\eta = (k_0^2 - k_{\perp}^2) \frac{L^2}{\pi^2} = H^2 \frac{L^2}{\pi^2}, \quad (6)$$

$$2q = k_0^2 \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon_0} \frac{L^2}{\pi^2}, \quad (7)$$

h — компонента волнового вектора в направлении оси z в среде, диэлектрическая проницаемость которой равна ε_0 , а $k_0 = |\vec{k}_0|$.

Уравнение (5) для случая безграничной среды с $\varepsilon(z)$ и $\mu(z)$ было исследовано в работе [3]. Его решение в общем виде записывается следующим образом [4]:

$$U = A e^{\gamma \xi} \sum_n C_{2n} e^{i 2 n \xi} + B e^{-\gamma \xi} \sum_n C_{+2n} e^{-i 2 n \xi}, \quad (8)$$

где $n = \dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots$, а γ — является постоянной распространения вдоль оси ξ . Постоянная распространения γ является однозначной функцией пары значений η и q . Совершенно ясно, что волна будет распространяться, если γ будет мнимой величиной. При $\gamma^2 > 1$ в волноводе будет существовать затухающая волна.

Исследование уравнения (5) будем проводить с помощью диаграммы Маттье [5]. Из выражений (6) и (7) видно, что η и q пропор-

циональны ω^2 , следовательно исследование частотных характеристик сводится к перемещению изображающей точки вдоль прямой [6]

$$q = \frac{1}{2} \left(\gamma + \frac{L^2}{a^2} \right) \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon_0} \quad (9)$$

для заданных значений L/a и $\Delta \varepsilon/\varepsilon_0$. Если изображающая точка попадает в заштрихованную область, то среда прозрачна, если же она попадает в незаштрихованную область, то среда непрозрачна.

Для прямоугольного волновода сечением $a \times b$ поперечное волновое число $k_{\perp} = \frac{\pi}{a}$ (волна H_{10}).

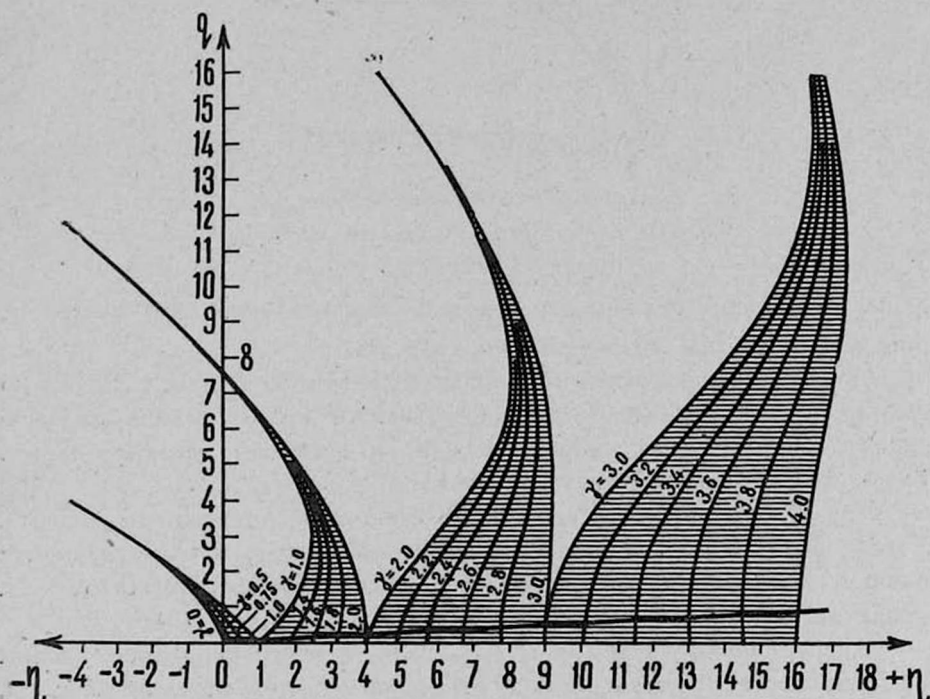


Рис. 1. Диаграмма Матье. Прямая построена для следующих значений параметров: $l/a = 0,652$, $\Delta \varepsilon/\varepsilon_0 = 0,36$.

На рис. 1 приведена диаграмма Матье, на которой построена прямая (9) для $l/a = 0,652$ и $\Delta \varepsilon/\varepsilon_0 = 0,360$. Заштрихованные области соответствуют полосам прозрачности, а незаштрихованные — непрозрачности.

Этот метод позволяет достаточно точно определить дисперсионные характеристики волновода с периодически неоднородным заполнением.

На рис. 2 приведена зависимость $(\lambda_{gr}^\circ/\lambda_{кр}) \varepsilon_0^{-1/2}$ от L/a для различных значений $\Delta \varepsilon/\varepsilon_0$. Здесь λ_{gr}° — длина волны в свободном пространстве, соответствующая частотам среза, $\lambda_{кр}$ — критическая длина волны незаполненного волновода со сторонами a и b .

Кривые, объединенные в группу (а), определяют зависимость критической длины волны волновода с заполнением (4), иначе говоря, нижнюю границу первой полосы прозрачности. Легко видеть, что в рассматриваемом случае эта граница соответствует большей длине

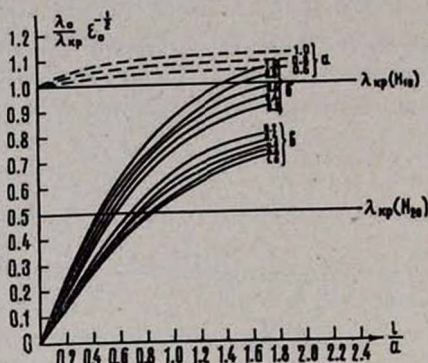


Рис. 2. Зависимость граничных частот $\lambda_{гр}^{\circ} \varepsilon_0^{-1/2}$ волновода со слоистым заполнением от l/a для различных значений $\Delta\varepsilon/\varepsilon_0$.

волны, чем критическая для волновода с однородным заполнением ε_0 , приведенная на том же рисунке (прямая $\lambda_{кр}^{Н_0}$).

Кривые, объединенные в группы (б) и (в), определяют верхнюю границу первой полосы прозрачности (или, что то же самое, нижнюю границу первой полосы непрозрачности) и верхнюю границу первой полосы непрозрачности соответственно.

Кривые, приведенные на рис. 2, позволяют определить частоты среза волновода с периодически неоднородным заполнением с большой точностью и могут быть полезны при расчете фильтрующих характеристик волноводных фильтров.

Дисперсионные характеристики, т. е. зависимость длины волны λ_b в волноводе с периодически неоднородным заполнением от частоты, определяются из рис. 1 как точки пересечения прямой (9) с кривыми, соответствующими различным значениям параметра γ . Частота определяется из абсциссы точки пересечения.

§ 2. Экспериментальная установка и результаты измерений

Описываемая ниже экспериментальная установка предназначена для исследования дисперсионных характеристик волновода со слоистым заполнением. Блок-схема установки приведена на рис. 3. СВЧ мощность от клистронного генератора 1, работающего в непрерывном режиме, через переменный аттенуатор 5 поступает на вход усилителя мощности 8 (ЛБВ) с помощью соединительных элементов 6 и 7, обеспечивающего выходную мощность порядка 200 мвт. С блока 3 подается питание на ЛБВ, а блок модулятора 4 осуществляет ампли-

тудную сеточную модуляцию выходного сигнала с частотой 1500 ц. С выхода ЛБВ сигнал через ферритовый вентиль 9 и измерительную линию 10 поступает на барабанный переключатель 12, который позволяет менять каналы прохождения волны.

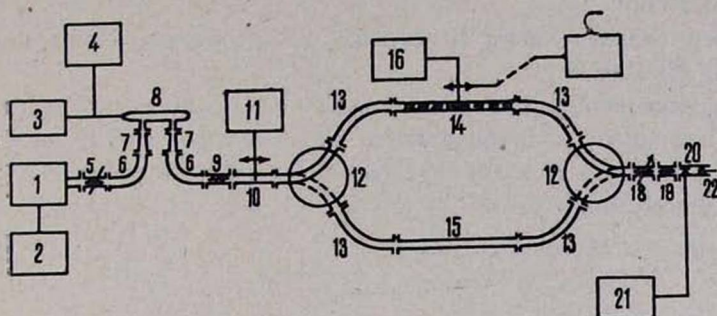


Рис. 3. Блок-схема установки для исследования дисперсионных характеристик волновода со сложным заполнением.

Один канал состоит из двух волноводных изгибов 13 и участка прямолинейного волновода 15. Этот канал служит для калибровки начального уровня мощности, измеряемого настраиваемой детекторной головкой 20.

Поворот переключателей 12 позволяет изменить каналы и направить электромагнитную волну через исследуемый волновод 14, являю-

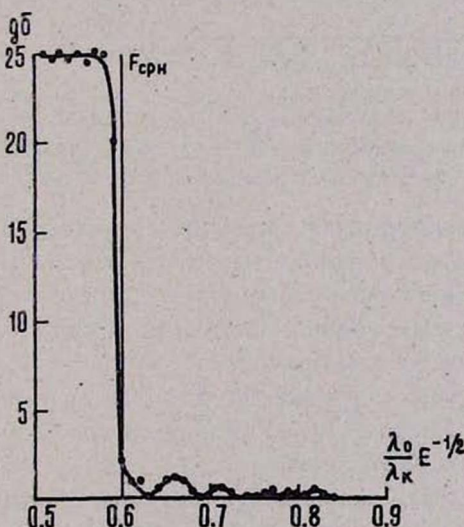


Рис. 4. Зависимость затухания волновода со сложным заполнением от длины волны ($l/a=0,652$, $\Delta\epsilon/\epsilon_0=0,36$, $\zeta^0=1,24$).

щийся одновременно измерительной линией. Перемещение каретки линии осуществляется с помощью моторного привода.

Сигнал с зонда измерительной линии подается на усилитель и линейный детектор, далее на регистрирующее устройство 16, представляющее собой шлейфовый осциллограф, скорость протяжки ленты которого синхронизирована со скоростью перемещения каретки измерительной линии.

Измерительная линия 10 служит для проверки симметрии первого и второго каналов.

Во время эксперимента измерялись следующие параметры: затухание с помощью калиброванного аттенюатора 18; длина волны и распределение поля в волноводе со слоистым диэлектриком с помощью измерительной линии (14).

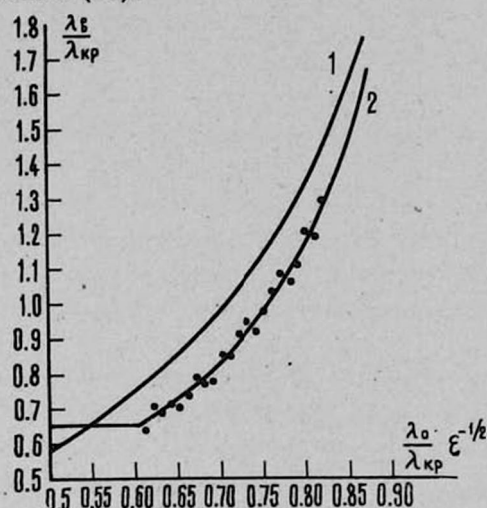


Рис. 5. Зависимость длины волны в волноводе от длины волны в свободном пространстве. 1—однородное заполнение; 2—слоистое заполнение (расчет); 3—результаты измерений.

Периодически неоднородная среда представляет собой чередующиеся слои воздуха и фторопласта. Фторопластовые пластины имели в середине щель шириной около 1 мм для беспрепятственного перемещения зонда вдоль волновода. Расстояние между пластинами устанавливалось специальными калибрами.

Была проведена серия измерений для различных значений l/a , $\Delta\epsilon/\epsilon_0$ и ϵ_0 в диапазоне частот 7,0–11,0 ГГц и получены результаты, хорошо совпадающие с расчетными.

На рис. 4 приведена зависимость величины затухания в дБ от длины волны для следующих значений параметров: $l/a=0,652$, $\Delta\epsilon/\epsilon_0=0,360$, $\epsilon_0=1,24$. (Здесь под $\Delta\epsilon/\epsilon_0$ понимается коэффициент первой гармоники разложения в ряд Фурье слоистой среды). На том же рисунке приведена граничная частота среза, определенная из диаграммы Матье.

Зависимость длины волны в волноводе со слоистым диэлектриком от частоты приведена на рис. 5 ($l/a=0,652$, $\epsilon_0=1,24$). На том же

рисунке приведена зависимость $\lambda/\lambda_{кр}$ от частоты для волновода с однородным заполнением ϵ_0 . Видно хорошее совпадение расчетных и экспериментальных результатов.

Авторы признательны Г. Г. Оксюзяну за обсуждения.

Ереванский физический институт

Поступила 24.V.1968

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Н. А. Хижняк, Труды Радиофиз. ф-та Харьк. гос. ун-та 1, 44 (1959).
2. Н. А. Хижняк, Радиотехн. и электрон. 5, 3, 413 (1960).
3. Э. М. Лазиев, Известия АН АрмССР, сер. физ.-мат. наук 17, 136 (1964).
4. Л. Бриллюэн, М. Пароди, Распространение волн в периодических структурах, М., ИЛ, 1959.
5. Н. В. Мак-Лахлан, Теория и приложения функций Маттье, М., ИЛ, 1953.
6. T. Tamir et al., IEEE Transactions, MTT-12, 323—325, № 3, 1964.

H_{10} ԱԼԻՔԸ ՇԵՐՏԱՑԻՆ ԴԻԷԼԵԿՏՐԻԿԱԿԱՆ ՄԻՋԱՎԱՅՐՈՎ ՈՒՂՂԱՆԿՅՈՒՆ ԱԼԻՔԱՏԱՐՈՒՄ

Է. Մ. ԼԱԶԻԵՎ, Ա. Գ. ԹԱՄԱՆՅԱՆ

Աշխատանքում ուսումնասիրվում է էլեկտրամագնիսական ալիքի անցումը պարբերական անհամասեռ դիելեկտրիկով լցված ալիքատարի միջով: Ալիքատարի դիսպերսիոն բնութագրերը ուսումնասիրվում են Մաթյեի դիագրամի օգնությամբ: Բերված են սարքավորման բլոկ-սխեման և փորձնական տվյալները ուղղանկյուն ալիքատարում ալիքի հիմնական տիպի համար:

H_{10} —WAVE IN THE RECTANGLE WAVEGUIDE WITH LAMINAR DIELECTRIC MEDIUM

E. M. LAZIEV and A. G. TAMANIAN

The passage of the electromagnetic wave through the waveguide with periodical unhomogeneous dielectric is considered. The dispersion characteristics of the waveguide is studied using the Mathieu's diagram. The results for the fundamental type of the waveguide are given.