

З. Е. Еременко, Е. С. Кузнецова

Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины

12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина

E-mail: zoya_erenenko@gmail.com

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ВОЛН В ДВУХСЛОЙНОМ ЗАПРЕДЕЛЬНОМ ВОЛНОВОДЕ С СИЛЬНО ПОГЛОЩАЮЩЕЙ СРЕДОЙ В ДИАПАЗОНЕ 5...30 ГГц

Методы определения комплексной диэлектрической проницаемости сильно поглощающих жидкостей востребованы в различных областях науки и техники. Рассмотрено распространение электромагнитных волн в круглом двухслойном металлическом волноводе с центральным диэлектрическим стержнем с малыми диэлектрическими потерями, окруженным сильно поглощающей жидкостью, в СВЧ-диапазоне. Исследована зависимость комплексной постоянной распространения волны от частоты и толщины слоя жидкости. Наличие сильно поглощающей жидкости, окружающей диэлектрический стержень, позволяет расширить диапазон рабочих длин волн от миллиметрового до сантиметрового диапазона. При этом значение постоянной затухания остается сравнительно малым. Благодаря сильно поглощающей среде данная волноводная структура не имеет фиксированной величины частоты отсечки. Обнаружено аномально малое значение постоянной затухания электромагнитной волны в сантиметровом диапазоне длин волн для определенных частот и толщин слоя жидкости. Предложенная структура может быть применима в качестве измерительной ячейки для определения комплексной диэлектрической проницаемости сильно поглощающих жидкостей в малом объеме. Ил. 12. Библиогр.: 16 назв.

Ключевые слова: миллиметровые волны, сантиметровый диапазон длин волн, круглый слоистый волновод, комплексная диэлектрическая проницаемость, постоянная затухания, сильно поглощающая жидкость, частота отсечки.

Разработка методов получения информации о физических показателях качества водосодержащих веществ в настоящее время является актуальным направлением исследований. Комплексная диэлектрическая проницаемость (КДП) является одним из таких показателей. Методы и технологии измерения КДП сильно поглощающих жидкостей в микроволновом диапазоне частот используются в различных областях науки и техники [1–9]. В микроволновом диапазоне частот мнимая и действительная части КДП воды и водных растворов существенно зависят от частоты, а их отношение составляет $\varepsilon'' / \varepsilon' \sim 1$.

Волноводные структуры применяются для передачи энергии на сверхвысоких частотах (СВЧ), а когда их поперечные размеры меньше критических значений, они теряют свойства направляющей системы и становятся запределными. Такие волноводы применяются в качестве элементов различных микроволновых датчиков для измерения КДП жидкостей, протекающих в трубопроводах [10].

Сантиметровый и миллиметровый диапазоны длин волн представляют особый интерес, так как в них располагается область максимума частотной дисперсии КДП многих водных растворов. Поэтому изучение диэлектрических свойств с помощью электромагнитных волн, а именно определение КДП биологических тканей с высоким содержанием воды [1], продуктов питания (фруктовые и овощные соки, вино) [9, 11, 12] проводят в СВЧ-диапазоне. Для этих целей широко применяются резонаторные и волноводные методы, позволяющие проводить измерения как на фиксированной частоте [12], так и в диапазоне частот [13]. Например, КДП измерена для ряда

жидких образцов, таких как вода, метанол, этанол и др., в зависимости от толщины слоя волноводным методом [12].

Следует отметить, что ранее нами был разработан волноводно-дифференциальный диэлектрометр для определения КДП сильно поглощающих жидкостей [9, 11]. Измерительная ювета этого диэлектрометра состоит из двух открытых емкостей, в которых установлены диэлектрические цилиндры, например, кварцевые. Емкости заполняются опорной и тестовой жидкостями. Принцип действия ячеек юветы основан на зависимости постоянной распространения электромагнитной волны, возбуждаемой в цилиндре, от диэлектрических свойств окружающей жидкости. Измеряется разность постоянных распространения (фазовой и затухания) в ячейках измерительной юветы. Постоянная затухания волны, распространяющейся вдоль кварцевого цилиндра, погруженного в воду, сравнительно мала (~10 дБ/см), а влиянием стенок полости можно пренебречь при исследовании водных растворов. Эти обстоятельства создают благоприятные условия для конструирования измерительной юветы открытого типа с целью проведения прецизионных экспресс-измерений КДП сильно поглощающих жидкостей. Диэлектрометр настроен на одну рабочую частоту (31,82 ГГц) для улучшения точности измерений.

Однако представляет интерес расширить диапазон рабочих частот для более полного исследования физических свойств сильно поглощающих жидкостей в сторону сантиметрового диапазона длин волн. Например, в работе [12] показано, что в сантиметровом диапазоне длин волн зависимости постоянных распространения и

затухания становятся немонотонными при исследовании слоистой волноводной измерительной ячейки с сильно поглощающей жидкостью (водой). Такой характер зависимостей объясняется тем, что данная измерительная ячейка для сантиметрового диапазона является фактически запрещенной, но при этом электромагнитная волна продолжает распространяться. Также известно, что в сантиметровом диапазоне соотношение между действительной и мнимой частями КДП воды существенно изменяется по сравнению с КДП воды в миллиметровом диапазоне. Это представляет дополнительный интерес для исследования измерительной ячейки нашего диэлектromетра.

1. Геометрия измерительной ячейки.

В данной работе в СВЧ-диапазоне исследовано распространение электромагнитных волн в круглом двухслойном волноводе с центральным диэлектрическим стержнем, окруженным сильно поглощающей жидкостью (рис. 1). Первый слой – это цилиндрический диэлектрический стержень радиусом $a = 0,25$ см с комплексной диэлектрической проницаемостью $\varepsilon_1 = \varepsilon_1' + i\varepsilon_1''$, $\varepsilon_1''/\varepsilon_1' \ll 1$. Второй слой – сильно поглощающая жидкость с комплексной диэлектрической проницаемостью $\varepsilon_2 = \varepsilon_2' + i\varepsilon_2''$, $\varepsilon_2''/\varepsilon_2' \sim 1$, заполняющая пространство $d = (b - a)$, где b – внешний радиус волноводной слоистой структуры.

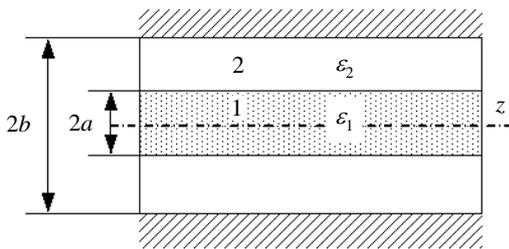


Рис. 1. Продольное сечение двухслойного круглого волновода с центральным диэлектрическим стержнем (1), окруженным исследуемой жидкостью (2)

Решение краевой задачи для структуры (рис. 1) получено методом разделения переменных в цилиндрической системе координат (r, φ, z) [2, 5, 14]. Магнитные проницаемости обоих слоев μ_1 и μ_2 равны единице. Все расчеты выполнены для двух видов цилиндрического диэлектрического стержня – плавленого кварца ($\varepsilon_{\text{кварц}} = 3,8 + i0,0001$) и тefлона ($\varepsilon_{\text{тефлон}} = 2,1 + i0,0001$), в качестве поглощающей жидкости рассматривалась вода и водно-спиртовые растворы при температуре 23 °С.

Выполняем граничные условия на границах раздела сред, т. е. приравниваем тангенциальные компоненты полей в каждой среде. В результате получаем линейную алгебраическую

систему однородных уравнений относительно комплексной постоянной распространения h .

При условии равенства определителя системы нулю получаем характеристическое уравнение:

$$(\varepsilon_2 f^e - \varepsilon_1 F)(\mu_2 f^m - \mu_1 F) = \frac{n^2 h^2 (k_1^2 - k_2^2)^2}{k_0^2 k_1^4 k_2^4 a^4}. \quad (1)$$

Здесь

$$f^e = \frac{N'_n(k_2 a) J_n(k_2 b) - J'_n(k_2 a) N_n(k_2 b)}{k_2 a [N_n(k_2 a) J_n(k_2 b) - J_n(k_2 a) N_n(k_2 b)]};$$

$$f^m = \frac{J'_n(k_2 a) N'_n(k_2 b) - N'_n(k_2 a) J'_n(k_2 b)}{k_2 a [J_n(k_2 a) N'_n(k_2 b) - N_n(k_2 a) J'_n(k_2 b)]};$$

$$F = \frac{J'_n(k_1 a)}{k_1 a J_n(k_1 a)},$$

где $k_1 = \sqrt{k^2 \varepsilon_1 \mu_1 - h^2}$ – поперечное волновое число в диэлектрическом цилиндре и $k_2 = \sqrt{k^2 \varepsilon_2 \mu_2 - h^2}$ – в окружающей жидкости; $h = h' + ih''$ – продольное волновое число; $J_n(z)$, $N_n(z)$ – функции Бесселя и Неймана; n – азимутальный индекс волноводной моды. Потерями в металлических стенках резонатора пренебрегаем, так как они много меньше, чем потери в сильно поглощающей жидкости.

Для $n = 0$ (азимутально-однородные поля) уравнение (1) распадается на два независимых уравнения, что равносильно наличию в исследуемой структуре волноводных волн электрического (E_{0m}) и магнитного (H_{0m}) типов, для которых индекс $m = 1, 2, \dots$ означает количество вариаций поля по радиусу цилиндра a . Для всех других мод структуры равенство тангенциальных компонент электрического и магнитного полей на границе диэлектрического цилиндра $r = a$ может быть обеспечено только в классе гибридных волн HE_{nm} - или EH_{nm} -типа, у которых все шесть компонент электромагнитного поля отличны от нуля.

Вычисление корней комплексного трансцендентного характеристического уравнения (1) производилось с помощью специально разработанной компьютерной программы в среде *Borland Builder 6.0* на языке *C++*, алгоритм которой кратко описан в [15]. Зная комплексные корни h_{nm} характеристического уравнения и параметры структуры, можно вычислить КДП исследуемой сильно поглощающей жидкости. Мы ограничились вычислением корней трансцендентного уравнения, у которых $h''_{nm} < 200$ дБ/см в диапазоне частот 5...40 ГГц. Разработан алгоритм и программа численного решения характеристического уравнения, позволяющие находить КДП исследуемых веществ по измеренным значениям постоянных распространения и затухания.

Аналогичная волноводная структура ранее предложена в качестве измерительной ячейки для определения КДП сильно поглощающих жидкостей в миллиметровом диапазоне длин волн в одномодовом режиме работы (волна типа H_{11}) [9]. Ячейка является главным элементом волноводно-дифференциального диэлектromетра [11].

2. Комплексная постоянная распространения. Зависимость действительной и мнимой частей КДП воды от частоты приведена на рис. 2. В диапазоне частот от 0 до 20 ГГц действительная часть КДП воды больше мнимой, а для частот больше 20 ГГц – действительная часть КДП воды становится меньше мнимой части, что существенно влияет на распространение электромагнитной волны в такой среде.

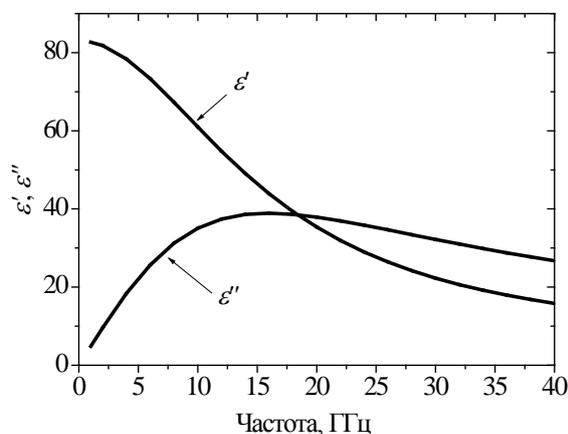


Рис. 2. Графики зависимости действительной и мнимой частей КДП воды от частоты

На рис. 3 представлены частотные зависимости постоянной распространения h' и затухания h'' волн в круглом двухслойном волноводе радиусом $b = 1$ см с цилиндрической кварцевой вставкой радиусом $a = 0,25$ см и слоем воды $d = (b - a)$. Для сравнения показаны моды круглого металлического волновода радиусом $a = 0,25$ см, заполненного кварцем (тонкие пунктирные линии) [12].

Дисперсионные зависимости для каждой из волн двухслойного волновода на высоких частотах совпадают с дисперсионными зависимостями для волн круглого волновода, заполненного кварцем (рис. 3). Это позволяет нам идентифицировать волны круглого двухслойного волновода с кварцевым стержнем и сильно поглощающей жидкостью аналогично классификации волн в металлическом волноводе, заполненном кварцем.

Частотные зависимости постоянной распространения h' для всех мод в сантиметровом диапазоне длин волн области имеют немоно-

ное поведение, а зависимости постоянной затухания возрастают, не имея фиксированных значений частот отсечки мод. При этом ряд волн имеют приемлемую величину постоянной затухания $h'' < 60$ дБ/см. Это относится, например, к волне HE_{11} круглого двухслойного волновода (рис. 3, кривая 3).

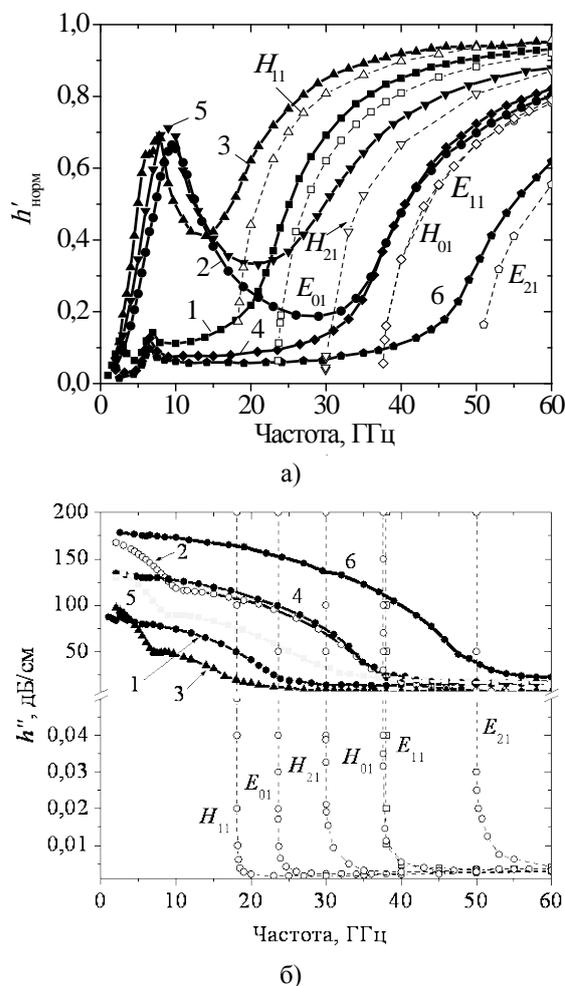


Рис. 3. Графики зависимости нормированной постоянной распространения $h'_{\text{норм}} = h' / (k \sqrt{\epsilon'_1})$ (а) и постоянной затухания h'' (б) от частоты для ряда мод круглого двухслойного волновода (кварцевый стержень радиусом $a = 0,25$ см, слой воды $d = 0,75$ см): 1 – E_{01} ; 2 – H_{01} ; 3 – HE_{11} ; 4 – EH_{11} ; 5 – HE_{21} ; 6 – EH_{21}

Причиной изменения дисперсионных характеристик волны HE_{11} – немоноотного поведения зависимостей постоянной распространения и отсутствия фиксированной частоты отсечки – является присутствие сильно поглощающей жидкости в круглом двухслойном волноводе. Такая особенность исследуемой структуры дает возможность расширения области определения КДП от миллиметрового в сторону сантиметрового диапазона длин волн.

3. Аномально малое затухание волн HE_{11} . На рис. 4 представлены графики зависимости постоянного распространения и затухания волны HE_{11} в круглом двухслойном волноводе. Каждой зависимости соответствует фиксированное значение частоты от 7 до 30 ГГц. Зависимости имеют периодический характер. Есть три области резкого изменения постоянной распространения и затухания с периодом, равным приблизительно четырем длинам волн в воде. Обнаружено аномально малое значение постоянной затухания электромагнитной волны в сантиметровом диапазоне длин волн, наблюдаемое при определенных значениях толщин слоев жидкости (вертикальные пунктирные линии) и определенных частотах. Наряду с волной HE_{11} возможно распространение неосновных типов возбуждаемых волн в круглом двухслойном волноводе.

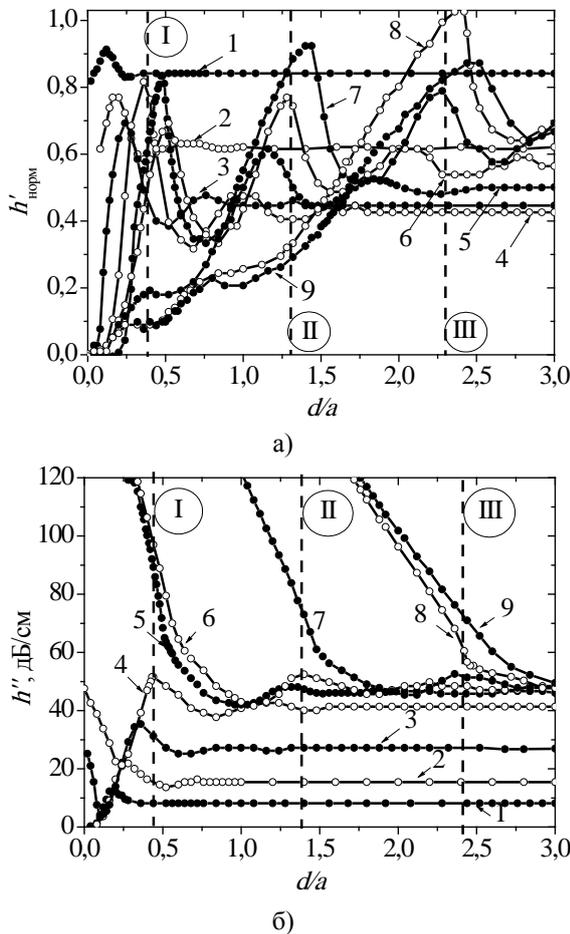


Рис. 4. Графики зависимости нормированной постоянной распространения $h'_{\text{норм}} = h' / (k\sqrt{\epsilon'_1})$ (а) и постоянной затухания h'' (б) волны HE_{11} от нормированной толщины слоя жидкости d/a для частот в ГГц: 1 – 30; 2 – 20; 3 – 16; 4 – 12; 5 – 10; 6 – 9; 7 – 8; 8 – 7,5; 9 – 7

На рис. 5 и 6 приведены графики зависимости постоянных распространения и затухания

волн HE_{11} (рис. 4, диапазон $d/a = 1...2$) и HE_{12} двухслойного волновода для частот 8,2954 и 8,29541 ГГц от изменения толщины слоя жидкости. Появление аномально малого затухания волны HE_{11} на низких частотах также можно объяснить ее взаимодействием с другим типом волны, которую мы обозначили как HE_{12} .

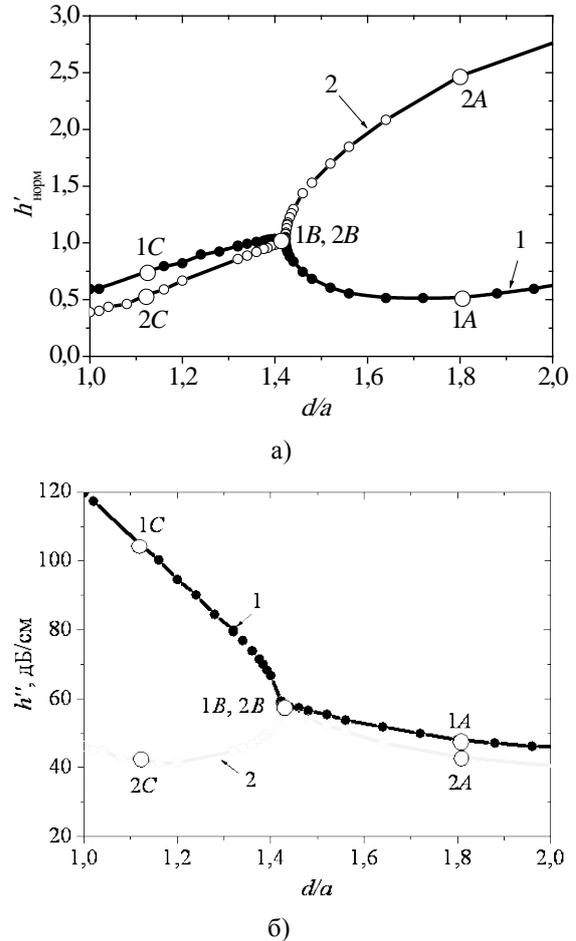


Рис. 5. Графики зависимости нормированной постоянной распространения $h'_{\text{норм}} = h' / (k\sqrt{\epsilon'_1})$ (а) и постоянной затухания h'' (б) волн HE_{11} (кривая 1) и HE_{12} (кривая 2) от нормированной толщины слоя d/a для частоты 8,2954 ГГц

После точки взаимодействия величина постоянной затухания волны HE_{11} существенно не изменяется для зависимости с частотой 8,29541 ГГц при уменьшении слоя сильно поглощающей жидкости (рис. 6, кривая 1), а для зависимости с частотой 8,2954 ГГц – резко увеличивается. В интервале значений $d/a = 1,42276...1,42272$ наблюдается взаимодействие волн HE_{11} и HE_{12} . Величина затухания волны HE_{11} резко меняется, сравнивая зависимости постоянной затухания для двух значений частот, отличающихся всего на 10 кГц, для частот 8,2954 и 8,29541 ГГц.

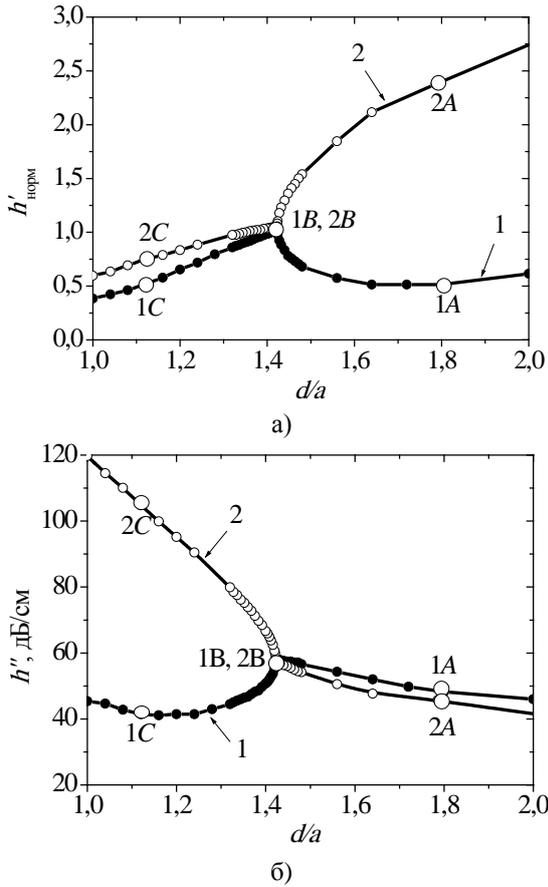


Рис. 6. Графики зависимости нормированной постоянной распространения $h'_{\text{норм}} = h' / (k \sqrt{\epsilon_1'})$ (а) и постоянной затухания h'' (б) волн HE_{11} (кривая 1) и HE_{12} (кривая 2) от нормированной толщины слоя жидкости d/a для частоты 8,29541 ГГц

4. Распределение электромагнитного поля в двухслойном волноводе. Рассмотрим распределение структуры поля волн вдоль радиуса двухслойного волновода при различной толщине слоя жидкости. Расчет амплитуд полей выполнен по формуле:

$$E_\alpha = \sqrt{\text{Re}^2\{\hat{E}_\alpha(r, \varphi, z)\} + \text{Im}^2\{\hat{E}_\alpha(r, \varphi, z)\}}, \quad (2)$$

где $\hat{E}_\alpha(r, \varphi, z)$ – комплексные амплитуды полей, индекс α принимает значения r, φ, z . Для составления алгоритма расчета полей необходимо применить метод сортировки по главному элементу столбца матрицы, составленной из коэффициентов линейной системы уравнений, из которой получено характеристическое уравнение (1).

На рис. 7 изображено распределение азимутальной электрической $E_\varphi(r)$ компоненты поля волн HE_{11} и HE_{12} для частот 8,2954 и 8,29541 ГГц при изменении толщины слоя жидкости d/a : 1,8 – 1A, 2A; 1,42476 – 1B, 2B; 1,12 – 1C, 2C. Толщины слоя жидкости d/a взяты из рис. 5 и 6 в местах: до (1A, 2A), в точке (1B, 2B) и после (1C, 2C) взаимодействия волн HE_{11} и HE_{12} . Структура

электромагнитного поля волны HE_{11} для двух близких частот существенно изменяется с уменьшением толщины слоя d/a в месте взаимодействия волн. До точки взаимодействия волн HE_{11} и HE_{12} распределение $E_\varphi(r)$ компоненты поля (рис. 5 и 6 от A до B) имеет одинаковый вид на частотах 8,2954 и 8,29541 ГГц. Максимум азимутальной компоненты электрической составляющей поля волны HE_{11} сосредоточен в кварцевом стержне для больших внешних радиусов (1A). Такое распределение поля волны HE_{11} в кварцевом стержне подобно распределению поля волны H_{11} круглого однородного волновода.

При дальнейшем уменьшении слоя жидкости происходит взаимодействие волн HE_{11} и HE_{12} , в точках 1B и 2B – наблюдается область расщепления зависимостей постоянной затухания. Для этих точек (1B и 2B) структуры полей волн HE_{11} и HE_{12} для двух близких частот имеют одинаковый вид. В диэлектрическом стержне наблюдается первый максимум, второй и третий максимумы смещены в слой жидкости.

С уменьшением внешнего радиуса вид распределения полей волн HE_{11} и HE_{12} (1C и 2C) отличается. Максимум поля волны HE_{11} на частоте 8,2954 ГГц (1C) перестает быть ярко выраженным в кварцевом стержне и смещается в слой жидкости в случае, когда зависимость постоянной затухания возрастает (рис. 5, кривая 1). Для частоты 8,29541 ГГц (1C) энергия поля волны сосредоточена в кварцевом стержне. Энергия поля волны HE_{12} на частоте 8,2954 ГГц (2C) переходит в диэлектрический стержень, величина постоянной затухания уменьшается и волна распространяется с достаточно малым затуханием (рис. 6, кривая 1). При этом энергия поля волны HE_{12} на частоте 8,29541 ГГц (2C) сосредоточена в слое жидкости. Полученные результаты распределения поля волны HE_{11} мы попытались сравнить с уже известными результатами других авторов. Например, распределение поля гибридной волны HE_{11} имеет вид поля волны H_{11} однородно заполненного круглого экранированного волновода на высоких частотах (1A) [16].

При расщеплении зависимостей постоянной затухания структура поля волны HE_{11} для двух близких частот при $d/a = 1,42276$ имеет одинаковый вид (1B). Одной из причин является возбуждение неосновных типов волн на низких частотах. Максимум энергии поля волны больше концентрируется в слое жидкости по сравнению со случаем, когда толщина слоя $d/a = 1,8$ (1A). С уменьшением d/a , после расщепления зависимостей постоянной затухания, структура поля волны HE_{11} претерпевает принципиальные изменения: максимум энергии поля находится в кварцевом стержне для частоты 8,29541 ГГц (1C), или в слое жидкости – для частоты 8,2954 ГГц (2C).

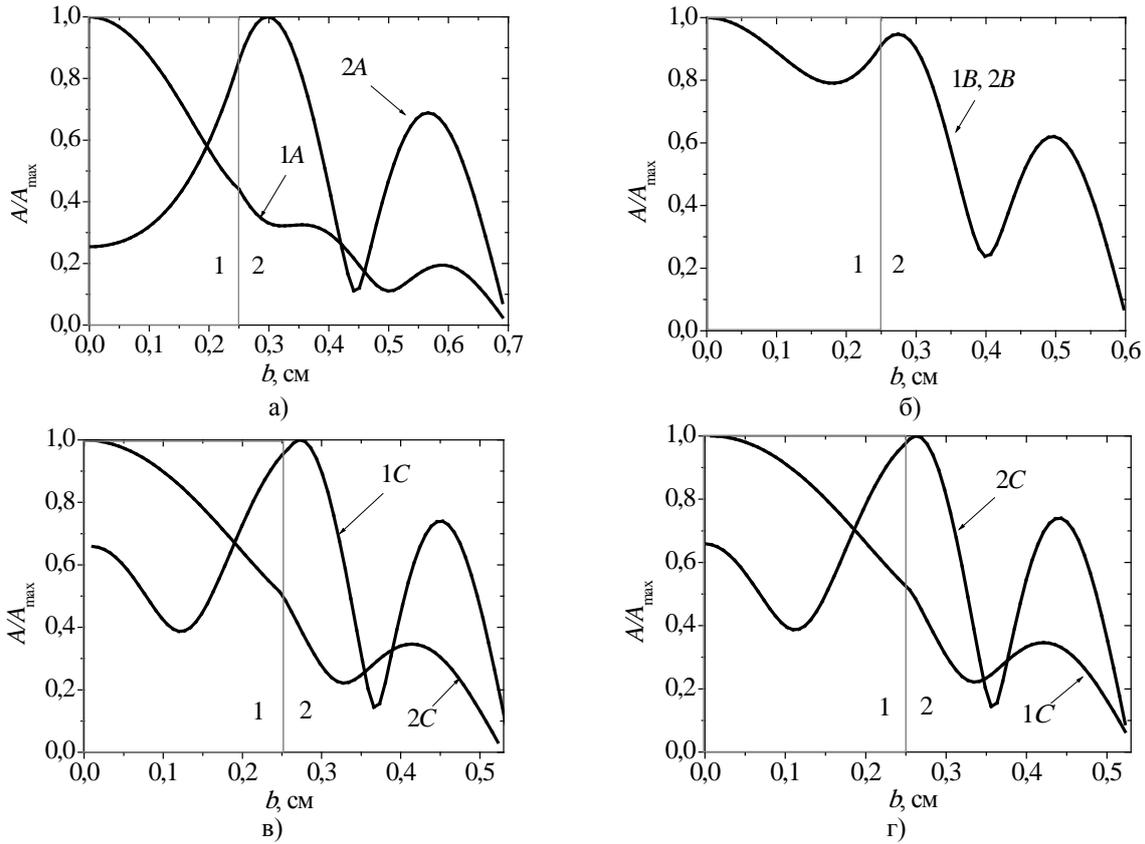


Рис. 7. Распределение $E_\varphi(r)$ компоненты электромагнитного поля волн HE_{11} (1A, 1B, 1C) и HE_{12} (2A, 2B, 2C). Частоте 8,2945 ГГц соответствуют изображения (а, б, в), частоте 8,29451 ГГц – изображения (а, б, г). Область 1 – кварцевый стержень; 2 – слой жидкости

На рис. 8 приведен вид распределения поперечной составляющей $E_{r\varphi}(r)$ электрического поля волны HE_{11} в круглом двухслойном радиально-симметричном волноводе на частоте 12 ГГц для различных толщин слоев жидкости (рис. 4, кривая 4).

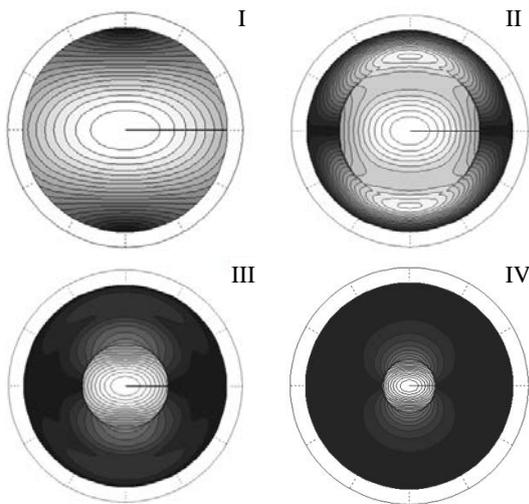
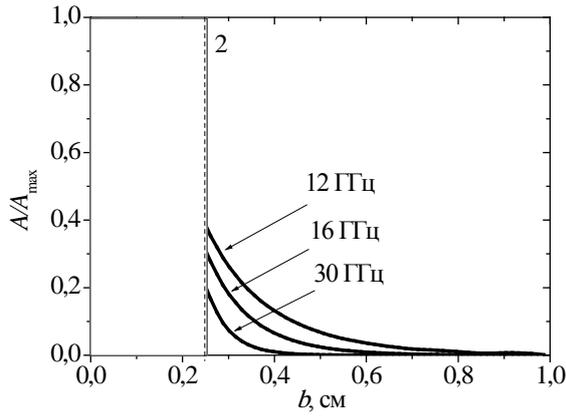


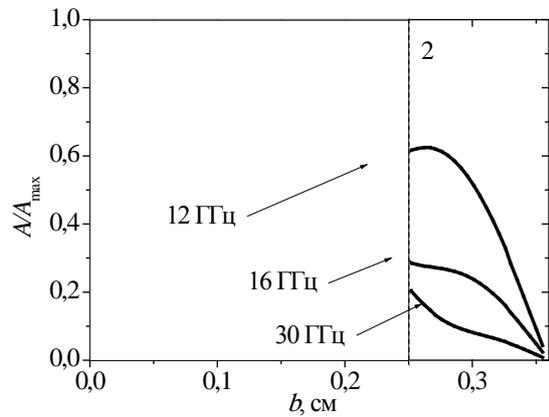
Рис. 8. Нормированное распределение поперечной $E_{r\varphi}(r)$ -компоненты поля волны HE_{11} на частоте 12 ГГц при изменении нормированной толщины жидкости d/a : I – 0; II – 0,76; III – 1,4; IV – 3,0

Амплитуда поля волны HE_{11} имеет одинаковый вид в кварцевом стержне для различных толщин слоев жидкости, а на границе с жидкостью наблюдается скачок. При достаточно большом слое жидкости (IV), который составляет 0,75 см, волна практически затухает, не доходя до внешней металлической границы двухслойного волновода. В этом случае максимум энергии поля находится в кварцевом стержне. При меньшей толщине слоя жидкости волна переотражается от кварцевого стержня и металлического экрана (II – III) и энергия поля все больше концентрируется в жидкости. В предельном случае, для «структуры кварцевый стержень в металле» (I), распределение поля волны HE_{11} имеет вид поля волны H_{11} однородного волновода.

На рис. 9 приведено распределение $E_\varphi(r)$ компоненты поля волны HE_{11} для ряда частот для двух значений нормированного слоя жидкости d/a . Показано, что для слоя жидкости толщиной 0,75 см амплитуда поля максимальна в кварцевом стержне, а за его пределами в жидкости спадает практически до нуля (рис. 9, а). Чем меньше слой поглощающей жидкости, например 0,11 см, тем больше энергии поля сосредотачивается в слое жидкости (рис. 9, б). С уменьшением частоты максимум амплитуды поля волны больше концентрируется в слое жидкости.



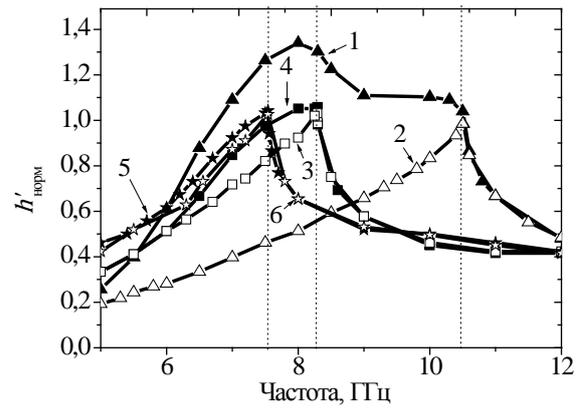
а)



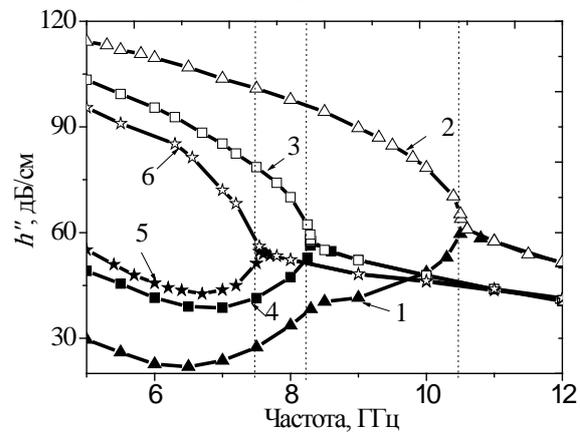
б)

Рис. 9. Нормированное радиальное распределение $E_\phi(r)$ -компоненты поля волн HE_{11} от слоя жидкости 0,75 см (а) и 0,11 см (б) для ряда частот. Область 1 – кварцевый стержень; 2 – слой жидкости

На рис. 10 приведена зависимость постоянных распространения и затухания волны HE_{11} в диапазоне частот 5...12 ГГц для четырех значений толщины слоя d/a . Максимумы постоянной распространения h' соответствуют точкам расщепления кривых постоянной затухания h'' . Видно, что зависимость постоянной затухания имеет три области, для которых величина затухания резко меняется при уменьшении частоты. Такое поведение дисперсионных зависимостей аналогично зависимости постоянной затухания от изменения слоя жидкости (рис. 4, а). Величина постоянной затухания волны HE_{11} резко уменьшается (зависимости 1, 4, 5) с изменением частоты и имеет значения $h'' < 60$ дБ/см. Тогда как зависимости постоянной затухания при другом наборе d/a – характеризуются резким возрастанием значений постоянной затухания волны. Точные значения нормированного слоя сильно поглощающей жидкости d/a , представленные на рис. 10, взяты из зависимостей на рис. 4, где они отмечены пунктирными вертикальными линиями.



а)



б)

Рис. 10. Графики зависимости нормированной постоянной распространения $h'_{\text{норм}} = h' / (k\sqrt{\epsilon'_1})$ (а) и постоянной затухания h'' (б) волны HE_{11} от частоты ($a = 0,25$ см, $T = 23$ °С) для ряда значений d/a : 1 – 0,47396; 2 – 0,474; 3 – 1,42272; 4 – 1,42276; 5 – 2,42804; 6 – 2,42808

Аналогично исследовано поведение комплексной постоянной распространения волны HE_{11} в круглом двухслойном волноводе, в котором первый слой – это тефлоновый стержень радиусом $b = 0,25$ см, второй – слой поглощающей жидкости, в сантиметровом диапазоне длин волн. На рис. 11 приведены зависимости постоянных распространения и затухания от изменения нормированного слоя жидкости d/a для ряда частот в диапазоне 7...30 ГГц в круглом двухслойном волноводе с центральным тефлоновым стержнем.

Изменения зависимостей постоянных распространения и затухания имеют аналогичный вид для волноводной структуры с центральным кварцевым стержнем. Для зависимости постоянной затухания в приведенной области изменения слоя жидкости обнаружено наличие трех областей, при которых величина постоянной затухания электромагнитной волны HE_{11} резко меняется.

Области расщепления зависимостей постоянной затухания для двухслойного волновода

с центральным диэлектрическим стержнем, как тефлоновым, так и кварцевым, и слоем сильно поглощающей жидкости, имеют место при одних и тех же частотах/слоях жидкости.

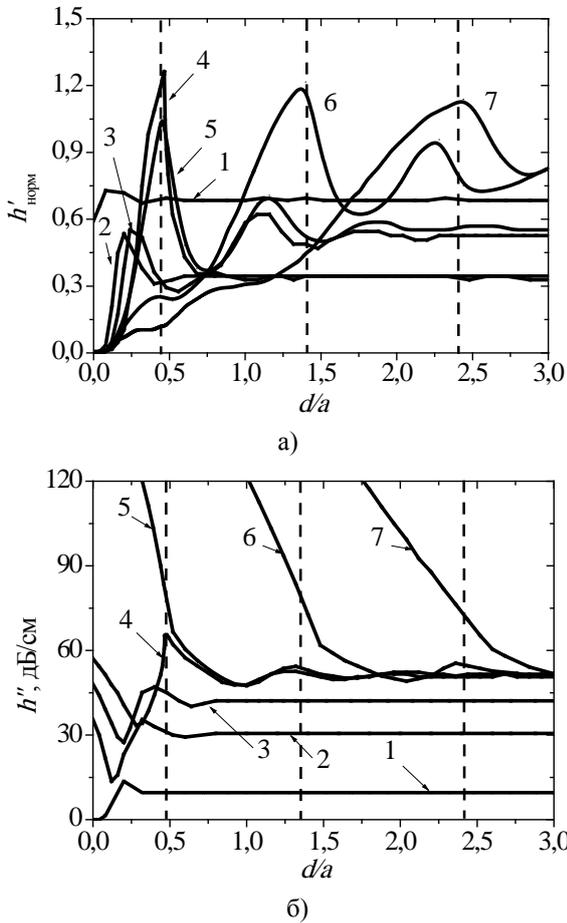


Рис. 11. Графики зависимости нормированной постоянной распространения $h'_{\text{норм}} = h' / (k \sqrt{\epsilon'_1})$ (а) и постоянной затухания h'' (б) волны HE_{11} от изменения толщины жидкости d/a для частот (в ГГц): 1 – 30; 2 – 20; 3 – 16; 4 – 10,51776; 5 – 10; 6 – 8; 7 – 7. Тефлоновый стержень радиусом $a = 0,25$ см с $\epsilon_{\text{тефлон}} = 2,1 + i0,0001$

5. Чувствительность метода определения комплексной диэлектрической проницаемости. Выполнена оценка чувствительности метода определения КДП с помощью выбора оптимальной толщины слоя водно-спиртового раствора. Зависимость постоянных распространения и затухания волны HE_{11} от толщины слоя $(b-a)$ водно-спиртового раствора на частоте 15 ГГц показана на рис. 12. Чем больше изменение постоянных распространения и затухания при изменении концентрации спирта от 0 до 60 %, тем выше чувствительность определения КДП. Максимальное изменение постоянных распространения и затухания наблюдается при малых слоях водно-спиртового раствора (область максимальных значений постоянной распространения на рис. 12).

Для предельных случаев – больших и малых слоев жидкости – чувствительность минимальна.

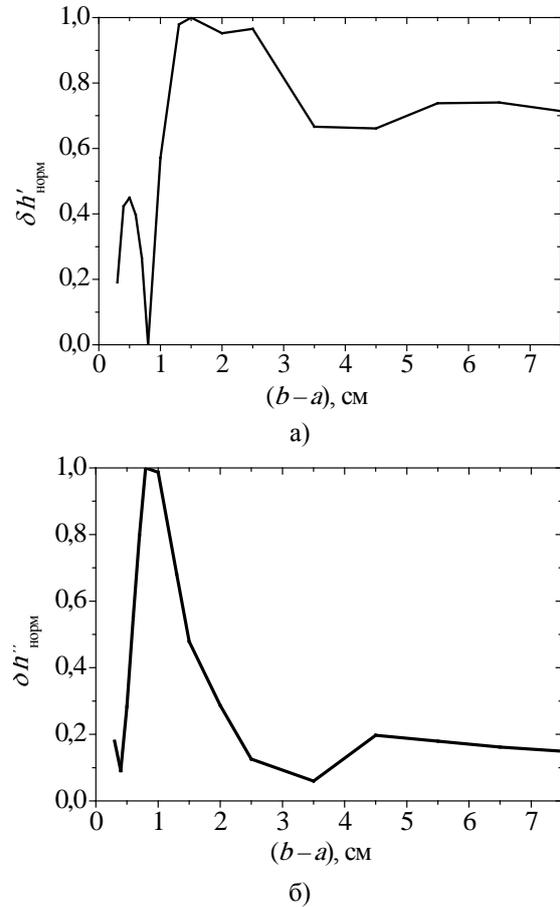


Рис. 12. Графики зависимости нормированных постоянных распространения и затухания от толщины слоя водно-спиртового раствора $(b-a)$ на частоте 15 ГГц

Выводы. Круглый двухслойный волновод с центральным диэлектрическим стержнем и слоем сильно поглощающей жидкости может быть использован для определения комплексной диэлектрической проницаемости такой жидкости в достаточно небольшом объеме как в миллиметровом, так и в сантиметровом диапазонах длин волн. Обнаружено, что сильное поглощение в жидкости приводит к отсутствию фиксированных частот отсечки мод, присущих однородным волноводам. Обнаружена область периодического изменения постоянных распространения и затухания волны в сантиметровом диапазоне длин волн. Период изменения соответствует четырем длинам волн в воде. При больших внешних радиусах ($b = 1,0$ см) максимум электромагнитного поля волны HE_{11} в основном сосредоточен в кварцевом стержне и имеет вид поля волны H_{11} однородного волновода. Определены оптимальные значения толщин слоев жидкости для обеспечения максимальной чувствительности определения КДП сильно поглощающей жидкости.

Библиографический список

1. *Alekseev S. I.* Millimeter wave reflectivity used for measurement of skin hydration with different moisturizers / S. I. Alekseev, I. Szabo, M. C. Ziskin // *Skin Res. Technol.* – 2008. – 14, Iss. 4. – P. 390–396.
2. *Квазиоптические* твердотельные резонаторы / А. Я. Кириченко, Ю. В. Прокопенко, Ю. Ф. Филиппов, Н. Т. Черпак. – К.: Наук. думка, 2008. – 296 с.
3. *Мериакри В. В.* Контроль влагосодержания в средах и материалах с помощью миллиметровых волн / В. В. Мериакри, М. П. Пархоменко, Е. Е. Чиграй // *Радиотехника.* – 1996. – № 21. – С. 98–101.
4. *Kaatz U.* A new automated waveguide system for the precise measurement of complex permittivity of low-to-high-loss liquids at microwave frequencies / U. Kaatz, R. Pottel, A. Wallush // *Meas. Sci. Technol.* – 1995. – 6, N 8. – P. 1201–1207.
5. *Krupka J.* Frequency domain complex permittivity measurements at microwave frequencies / J. Krupka // *Meas. Sci. Technol.* – 2006. – 17, N 6. – P. R55–R70.
6. *Two-layered* disc quasi-optical dielectric resonators: electro-dynamics and application perspectives for complex permittivity measurements of lossy liquids / A. A. Barannik, N. T. Cherpak, Yu. V. Prokopenko et al. // *Meas. Sci. Technol.* – 2007. – 18, N 7. – P. 2231–2238.
7. *Gatash S. V.* Very high frequency dielectrometer for the study of dynamical properties in disperse water systems / S. V. Gatash // *Радиофизика и электрон.: сб. науч. тр. / Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины.* – 1999. – 4, N 1. – С. 129–132.
8. *Afsar M.* A novel open-resonator system for precise measurement of permittivity and loss-tangent / M. Afsar, H. Ding // *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement.* – 2001. – 50, N 2. – P. 402–405.
9. *Complex Permittivity Measurement of High Loss Liquids and Its Application to Wine Analysis* / Z. E. Eremenko, V. N. Skresanov, A. I. Shubnyi et al. // *Electromagnetic Waves* / ed. by V. Zhurbenko. – Rijeka: Publ. InTech., 2011. – Chap. 19. – P. 403–422.
10. *Nyfors E. G.* Cylindrical Microwave Resonator Sensors for Measuring Materials under Flow: diss. ... Dr. Sci. in Technol. / E. G. Nyfors; Helsinki University of Technology. – Espoo, 2000. – 181 p.
11. *Improved* differential Ka band dielectrometer based on the wave propagation in a quartz cylinder surrounded by the high loss liquid under test // V. N. Skresanov, Z. E. Eremenko, V. V. Glamazdin, A. I. Shubnyi // *Meas. Sci. Technol.* – 2011. – 22, N 6. – P. 065403 (10 p.).
12. *Circular Layered Waveguide Use for Wideband Complex Permittivity Measurement of Lossy Liquids* / V. N. Skresanov, Z. E. Eremenko, E. S. Kuznetsova // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement.* – 2014. – 63, N 3. – P. 694–701.
13. *Wang Y.* Measurement of complex permittivity of liquids using waveguide techniques / Y. Wang, M. N. Afsar // *Progress in Electromagnetic Research (PIER).* – 2003. – 42. – P. 131–142.
14. *Вайнштейн Л. А.* Электромагнитные волны / Л. А. Вайнштейн. – М.: Радио и связь, 1988. – 440 с.
15. *Eremenko Z.E., Ganapolskii E.M., Vasilchenko V.V.* Exact-calculated Resonator Method for Permittivity Measurement of High Loss Liquids at Millimeter Wavelength / Z. E. Eremenko, E. M. Ganapolskii, V. V. Vasilchenko // *Meas. Sci. Technol.* – 2005. – 16, N 8. – P. 1619–1627.
16. *Раевский А. С.* Комплексные волны / А. С. Раевский, С. Б. Раевский. – М.: Радиотехника, 2010. – 224 с.

Рукопись поступила 13.05.2016.

Z. E. Eremenko, K. S. Kuznetsova

WAVE PROPAGATION IN A CIRCULAR BELOW CUTOFF TWO-LAYERED WAVEGUIDE WITH HIGH LOSS LIQUID AT FREQUENCY RANGE 5...30 GHz

Methods for determination of complex permittivity of high loss liquids are essential in various fields of science and technology. The propagation of electromagnetic waves in a circular two-layer metal waveguide with a central low loss dielectric rod, surrounded by high loss liquid in the microwave range has been studied. The dependencies of the complex wave propagation constant on frequency and the magnitude of the liquid layer were obtained. The presence of high loss liquid surrounding the dielectric rod, allows expanding the range of operating wavelengths from the millimeter to centimeter range. The value of the decay constant is relatively small. Thanks to a high loss medium, this waveguide structure does not have a fixed value of the cutoff frequency. An anomalous low value of the attenuation constant of the electromagnetic wave has been detected at the centimeter wavelength range for certain operating frequencies and liquid layers. The proposed structure can be applied as a measuring cell for the determination of the complex permittivity of high loss liquids in small volumes.

Key words: millimeter wave, centimeter wave range, circular layered waveguide, complex permittivity, attenuation coefficient, high loss liquid, cutoff frequency.

З. Е. Еременко, К. С. Кузнецова

ПОШИРЕННЯ ХВИЛЬ У ДВОШАРОВОМУ ПОЗАМЕЖНОМУ ХВИЛЕВОДІ З СИЛЬНО ПОГЛИНАЮЧОЮ РІДИНОЮ В ДІАПАЗОНІ 5...30 ГГц

Методи визначення комплексної діелектричної проникності сильно поглинаючих рідин затребувані в різних галузях науки і техніки. Розглянуто поширення електромагнітних хвиль в круглому двошаровому металевому хвилеводі з центральним діелектричним стрижнем з малими діелектричними втратами, який оточений сильно поглинаючою рідиною у НВЧ-діапазоні. Досліджено залежність комплексного коефіцієнта розповсюдження хвилі в двошаровому хвилеводі від частоти і товщини шару рідини. Наявність сильно поглинаючої рідини, що оточує діелектричний стрижень, дозволяє розширити діапазон робочих довжин хвиль від міліметрового до сантиметрового діапазону. При цьому значення сталої загасання залишається порівняно малим. Завдяки сильно поглинаючому середовищу така хвилевідна структура не має фіксованої величини частоти відсічки. Виявлено аномально мале значення коефіцієнта загасання електромагнітної хвилі в сантиметровому діапазоні довжин хвиль для певних частот і товщини шару рідини. Запропонована структура може бути застосована в якості вимірювальної комірки для визначення комплексної діелектричної проникності сильно поглинаючих рідин у малому об'ємі.

Ключові слова: міліметрові хвилі, сантиметровий діапазон довжин хвиль, круглий шаруватий хвилевід, комплексна діелектрична проникність, стала загасання, сильно поглинаюча рідина, частота відсічки.