

В. Н. Скрасанов, З. Е. Еременко

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

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

E-mail: z_erenenko@ire.kharkov.ua

КЮВЕТА ДИЭЛЕКТРОМЕТРА С ПОВЫШЕННОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬЮ НА ОСНОВЕ КРУГЛОГО ВОЛНОВОДА С ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ВСТАВКОЙ ДЛЯ СИЛЬНО ПОГЛОЩАЮЩИХ ЖИДКОСТЕЙ

Значение комплексной диэлектрической проницаемости сильно поглощающих жидкостей (например, воды и водных растворов различных веществ) необходимо знать в различных областях науки и техники, где используются такие жидкости. Ранее нами была предложена измерительная кювета волноводного типа, представляющая собой диэлектрический (кварцевый) цилиндр, погруженный в исследуемую жидкость, а также разработан высокочувствительный диэлектрометр 8-мм диапазона с использованием такой кюветы. Теоретический и численный анализ предложенной кюветы был проведен без учета внешней границы кюветы, что было предметом обсуждения при сравнении его с результатами эксперимента. В данной работе мы устранили этот недостаток, и провели исследование электродинамических параметров кюветы диэлектрометра с учетом ее внешней границы. При этом кювета образована круглым металлическим волноводом 8-мм диапазона с коаксиально расположенной цилиндрической вставкой из диэлектрика с малыми потерями. Исследуемая жидкость заполняла пространство между вставкой и волноводом. Для повышения чувствительности кюветы к изменению концентрации веществ в исследуемой сильно поглощающей жидкости использован достаточно тонкий ее слой (четверть длины волны), в котором наблюдается эффект интерференции волн. В результате показано, что кювета диэлектрометра со слоем поглощающей жидкости, при котором глубина проникновения поля в жидкость соизмерима с толщиной ее слоя, обладает повышенной дифференциальной чувствительностью. Предложенная структура имеет преимущества при использовании в кюветах прецизионных диэлектрометров сильно поглощающих жидкостей по сравнению с известными техническими решениями. Ил. 4. Библиогр.: 14 назв.

Ключевые слова: диэлектрометрия, металлический волновод, диэлектрическая проницаемость, сильно поглощающая жидкость, интерференция волн.

Измерение комплексной диэлектрической проницаемости (КДП) жидкостей востребовано в различных областях науки и техники. Например, в обзоре [1] даны многочисленные примеры практического использования результатов измерений КДП поглощающих жидкостей, к которым в первую очередь относятся вода и водные растворы различных веществ. Отметим неслабевающий интерес к исследованию диэлектрических свойств биологических жидкостей [2–4]. Мы развиваем метод диэлектрометрии для решения проблемы контроля натуральности жидких продуктов. В частности, было показано, что метод диэлектрометрии более эффективен по сравнению с известными методами выявления разбавлений вин и соков водой [5, 6]. Те или иные области применения диэлектрометров накладывают специфические требования к измерительным кюветам. Основным требованием при контроле натуральности жидких продуктов является высокая дифференциальная чувствительность прибора, т. е. способность различать малые количества добавленных веществ в водные растворы.

Можно рассчитать КДП $\varepsilon = \varepsilon' + i\varepsilon''$ среды, если измерены фазовая постоянная G' и коэффициент затухания G'' электромагнитной волны в продольно-однородной волноводящей структуре, полностью или частично заполненной исследуемой средой. Для этого должна быть установлена связь между КДП и комплексной постоянной распространения $\Gamma = G' + iG''$ волны вдоль структуры. Например, для полностью за-

полненного средой полого волновода эта связь представляется простым соотношением [7]

$$\Gamma = G' + iG'' = k_0 \sqrt{\varepsilon' - (\chi/k_0)^2 - i\varepsilon''}, \quad (1)$$

где $k_0 = 2\pi f/c$ – волновое число свободного пространства; f – частота; c – скорость света в вакууме; χ – поперечное волновое число (для низшего H_{10} -типа волны прямоугольного волновода $\chi = \pi/d$, d – ширина волновода).

В работе [8] кювета на основе прямоугольного волновода использовалась для прецизионных измерений КДП тяжелой воды. Следует отметить, что основная проблема при разработке подобных кювет состоит в большой величине коэффициента затухания в волновод. Например, при заполнении волновода водой с температурой 23°C на частоте $f = 31,82$ ГГц $\varepsilon = 22,23 + 30,29i$. Таким образом, длина кюветы не может превысить несколько миллиметров даже при использовании современных анализаторов СВЧ-цепей с динамическим диапазоном до 100 дБ. Различные неоднородности в торцевых плоскостях кювет влияют на погрешность измерений тем сильнее, чем тоньше кювета, поскольку при расчете КДП требуются погонные величины затухания и набега фазы. В работе [8] указанная проблема решена созданием волноводной кюветы с переменной длиной.

КДП поглощающих жидкостей, которые, как правило, относятся к классу полярных жидкост-

тей, сильно зависит от температуры, поэтому прецизионные измерения должны выполняться с применением термостатов. Очевидно, что использование кювет с подвижными элементами в термостате существенно усложняет технику измерений [8]. Уменьшение потерь достигают, используя капилляры, устанавливаемые между широкими стенками прямоугольного волновода [9]. Такие измерения предполагают, однако, проведение процедуры калибровки кюветы по жидкости с известной КДП и не пригодны для абсолютных измерений.

Нами была предложена кювета волноводного типа, представляющая собой диэлектрический (кварцевый) цилиндр, погруженный в исследуемую жидкость, а также разработан высокочувствительный диэлектрометр 8-мм диапазона с использованием такой кюветы [5]. Продольно-однородная часть ячеек дифференциальной кюветы представляла собой цилиндрический канал в поглощающей среде. Основным преимуществом предложенной структуры является сравнительно малое значение коэффициента затухания электромагнитной волны. Например, для воды он составил 8,8 дБ/см на частоте 31,82 ГГц. Этот факт предопределил возможность разработки дифференциальной кюветы с длинами ячеек в несколько сантиметров и, как следствие, возможность прецизионных измерений комплексной постоянной распространения водных растворов различных веществ в автоматизированном режиме. Кювета относится к классу кювет, комплексная постоянная распространения волны в которых может быть точно рассчитана.

Диэлектрический цилиндр в поглощающей жидкости представляет собой открытую электродинамическую структуру, в которой волны, распространяющиеся вдоль цилиндра, преломляются в жидкость и затухают в ней по мере распространения. Очевидно, что влиянием стенок емкости, в которую залита жидкость, можно пренебречь, если они отстоят от поверхности цилиндра на расстояние, равное нескольким глубинам проникновения волны в жидкость. Из таких соображений сконструирована измерительная кювета в диэлектрометре [5]. Для ряда жидкостей глубина проникновения оказывается достаточно большой, что неоправданно увеличивает габариты кюветы и объем жидкости, требующейся для проведения анализа. Мы предлагаем устранить этот недостаток, окружив диэлектрический цилиндр близко расположенным металлическим экраном, при этом исследуемая жидкость заполняет пространство между цилиндром и экраном. Для достаточно малых толщин слоя жидкости, как будет показано, увеличивается также диффе-

ренциальная чувствительность, под которой понимается способность прибора измерять достаточно малые изменения КДП.

1. Геометрия и характеристическое уравнение электродинамической структуры. Решение краевой задачи электродинамики для круглого металлического волновода радиусом b с двумя коаксиальными слоями диэлектриков: круглым цилиндром ($\varepsilon_1 = \varepsilon'_1 + i\varepsilon''_1$, $\varepsilon''_1/\varepsilon'_1 \ll 1$, $\mu_1 = 1$) радиусом a и слоем поглощающей среды ($\varepsilon_2 = \varepsilon'_2 + i\varepsilon''_2$, $\mu_2 = 1$), заполняющей пространство $a < r < b$, где r – радиальная координата, проводится методом разделения переменных в цилиндрической системе координат (ϕ, r, z) [7]. Находятся типы волн, распространяющихся вдоль оси симметрии z структуры с постоянными распространения $h = h' + ih''$, где h' – фазовая постоянная и h'' – коэффициент затухания. По азимуту ϕ поля распределены по гармоническому закону $\cos(n\phi)$, где $n = 0, 1, 2, \dots$ – азимутальный индекс типа волны. Вдоль радиуса r поле представляется известными комбинациями цилиндрических функций функции Бесселя $J_n(\cdot)$ и Неймана $N_n(\cdot)$ порядка n . Характеристическое уравнение структуры имеет вид

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

где

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

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

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

Здесь штрихи означают производные по аргументам функций $J_n(\cdot)$ и $N_n(\cdot)$; $k_i = \sqrt{\varepsilon_i \mu_i k_0^2 - h^2}$ – поперечные волновые числа в диэлектрическом цилиндре ($i = 1$) и в окружающей жидкости ($i = 2$).

Уравнение (2) применялось для изучения электродинамических свойств круглых металлических волноводов с диэлектрическими вставками с малыми потерями [10]. Исследуемая в данной работе структура отличается тем, что пространство между вставкой и экраном заполнено средой с большими диэлектрическими потерями, причем выполняется неравенство $\varepsilon'_1 < \varepsilon'_2$. На практике подобная структура используется в качестве фидерных линий (лучеводов) субмиллиметрового или оптического диапазонов при условии, что $\lambda \ll a$ [11, 12]. В предлагаемой кювете

диэлектрометра радиус вставки a соизмерим с длиной волны λ .

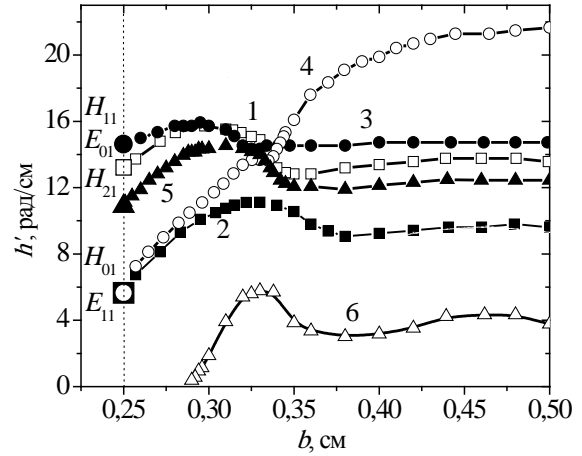
Для $n=0$ (азимутально-однородные поля) уравнение (2) распадается на два независимых уравнения, что равносильно наличию в исследуемой структуре волноводных волн электрического E_{0m} - и магнитного H_{0m} -типов, для которых индекс $m=1, 2, \dots$ означает количество вариаций поля по радиусу цилиндра. Все остальные типы волн двухслойного волновода с $n \neq 0$ гибридные.

В предельном случае отсутствия поглощающего слоя, т. е. при $b=a$, имеем круглый металлический волновод, заполненный диэлектриком с проницаемостью ϵ_1 . Как известно, постоянные распространения электрических E_{nm} - и магнитных H_{nm} -типов волн в таком волноводе являются решениями уравнений $J_n(k_1 a) = 0$ и $J'_n(k_1 a) = 0$ соответственно. В другом предельном случае $b \rightarrow \infty$ исследуемая структура трансформируется в заполненный диэлектриком цилиндрический канал в безграничной поглощающей среде. Используя известные асимптотические выражения для функций Бесселя и Неймана при больших аргументах, можно показать, что уравнение (2) приводится к известному характеристическому уравнению для диэлектрического волновода в неограниченной поглощающей среде [11, 13].

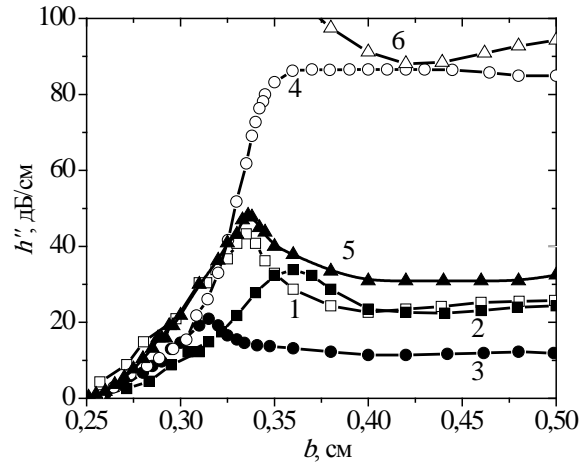
Отмеченные предельные случаи наглядно иллюстрируют графики на рис. 1, на котором показаны расчетные зависимости фазовой постоянной h' , рад/см, и коэффициента затухания h'' , дБ/см ряда типов волн исследуемой структуры на частоте $f=40$ ГГц от диаметра b металлического экрана. Представлены все комплексные корни уравнения (2), для которых коэффициент затухания h'' меньше 100 дБ/см и индекс $n \leq 2$. Расчет проведен для кварцевого цилиндра ($\epsilon_1 = 3,8 + i10^{-4}$) с радиусом $a = 2,5$ мм и 40% (объемные доли) раствора этанола в воде. КДП раствора рассчитывалась по формуле Дебая $\epsilon_2 = \epsilon'_2 + i\epsilon''_2 = \epsilon_\infty + (\epsilon_0 - \epsilon_\infty)/(1 - i2\pi f\tau)$, где зависимости констант (статическая диэлектрическая постоянная ϵ_0 , «оптическая» диэлектрическая постоянная ϵ_∞ и время релаксации τ_0) от концентрации вычислялись путем интерполяции данных измерений, приведенных в работе [14]. Например, для частоты $f=40$ ГГц и 40% раствора этанола в воде получим $\epsilon_2 = 6,006 + i6,171$.

Выделим три характерные области значений толщины $(b-a)$ поглощающего слоя, сравнивая их с величиной глубины проникновения волны в среду при нормальном падении на

границу раздела $\Lambda = (k_0 \sqrt{(\epsilon_2 - \epsilon'_2)/2})^{-1}$. В 40% растворе этанола в воде на частоте 40 ГГц $\Lambda = 0,95$ см.



а)



б)

Рис. 1. Зависимость фазовых постоянных (а) и коэффициентов затухания (б) типов волн круглого волновода с кварцевой вставкой: 1 – E_{01} ; 2 – H_{01} ; 3 – HE_{11} ; 4 – EH_{11} ; 5 – HE_{21} ; 6 – EH_{21}

В области «тонких» слоев поглощающей жидкости, когда $(b-a) \ll \Lambda$, зависимости фазовых постоянных h' ряда типов волн стремятся к значениям фазовых постоянных H_{nm} - или E_{nm} -типов волн круглого волновода. Этот факт мы используем для классификации типов волн исследуемой структуры. Азимутально-симметричные волны обозначены символами H_{0m} и E_{0m} , а гибридные – HE_{nm} и EH_{nm} . Для других типов волн (на рис. 1 – EH_{21} -волна) зависимости фазовых постоянных стремятся к нулю при $b \rightarrow a$, поскольку критические частоты круглого волновода радиусом a для этих волн превышают частоту 40 ГГц, на которой был выполнен расчет

(критическая частота E_{21} -волны круглого волновода равна 50,5 ГГц).

Для типов волн, у которых критические частоты ниже 40 ГГц, коэффициенты затухания h'' при $b \rightarrow a$ стремятся к значениям, определяемым потерями в кварцевом цилиндре. Для EH_{21} -волны (кривая 6, рис. 2) при $b \rightarrow a$ потери резко увеличиваются аналогично росту потерь в обычных волноводах вблизи критической частоты.

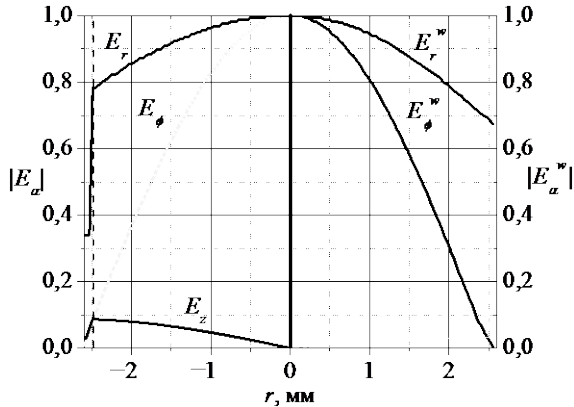


Рис. 2. Распределение компонент электрического поля HE_{11} -волны в относительных единицах на 40 ГГц для: волновода с кварцевой вставкой и тонким слоем 40 % раствора этанола (слева) и круглого волновода, полностью заполненного кварцем (справа)

Однако в волноводе с потерями распространение волн возможно также на частотах ниже критической. В этом случае поток мощности распространяющейся вдоль структуры электромагнитной волны поддерживается диссипацией энергии в жидкости. В области «толстых» слоев поглощающей жидкости, когда $(b-a) \gg \Lambda$, зависимости $h'(b)$ и $h''(b)$ с ростом b быстро сходятся к значениям постоянных распространения волн цилиндрического канала в неограниченной поглощающей среде. Наблюдаем, что при толщине слоя $(b-a)$, превышающей удвоенную глубину проникновения Λ плоской волны в среду, металлический экран оказывает пренебрежимо малое влияние на фазовые постоянные и коэффициенты затухания типов волн структуры. Можно также показать, что в квазиоптическом приближении $\lambda \ll a$ коэффициент затухания пропорционален λ^2/a^3 , поэтому каналы в диэлектриках с потерями используются в качестве фидерных линий [6].

В области «резонансных» толщин слоев, когда $(b-a) \sim \Lambda$, зависимости $h'(b)$ и $h''(b)$ немонотонны. Наблюдается периодически затухающее изменение фазовых постоянных и коэффициентов затухания распространяющихся волн, что можно объяснить, как показано далее, интер-

ференцией волн, отраженных от металлического экрана и границы диэлектрических слоев.

2. Распределения электромагнитного поля рабочего типа волны. Для кюветы диэлектрометра целесообразно выбрать HE_{11} -тип волны в качестве рабочего, поскольку он имеет наименьший коэффициент затухания (рис. 1, б), легко возбуждается с торца круглого одномодового волновода и является низшим в исследуемой структуре. При соответствующем выборе геометрических размеров структуры можно избежать нежелательного на практике многомодового режима работы.

Отметим характерные особенности в распределении электромагнитного поля HE_{11} -типа волны. На левой половине графика рис. 2 представлено распределение амплитуд $E_\phi(r, \phi=0)$, $E_r(r, \phi=\pi/2)$ и $E_z(r, \phi=\pi/2)$ компонент электрического поля структуры с тонким слоем $(b-a) = 0,1$ мм 40 % раствора этанола на частоте 40 ГГц, при радиусе кварцевой вставки $a = 2,5$ мм. Для сравнения на правой половине графика рис. 2 представлены распределения $E_\phi^w(r, \phi=0)$ и $E_r^w(r, \phi=\pi/2)$ компонент поля круглого волновода радиусом 2,6 мм, полностью заполненного кварцем. Расчет амплитуд полей выполнен по формуле $E_\alpha = \sqrt{\text{Re}^2\{\hat{E}_\alpha(r, \phi, z)\} + \text{Im}^2\{\hat{E}_\alpha(r, \phi, z)\}}$, где $\hat{E}_\alpha(r, \phi, z)$ комплексные амплитуды полей, индекс α принимает значения (ϕ, r, z) .

Наблюдаем, что азимутальные компоненты в обоих волноводах распределены практически одинаково, тогда как радиальная компонента поля в двухслойном волноводе испытывает скачек на границе слоев. Граничное условие для нормальной компоненты электрического поля будет выполнено, если отношение напряженностей полей равно отношению модулей диэлектрических проницаемостей сред по обе стороны от границы раздела, т. е. $\sqrt{(\epsilon_2')^2 + (\epsilon_2'')^2} / \epsilon_1 = 2,27$, что подтверждается данными расчета на рис. 2. Наиболее существенное отличие поля двухслойного волновода с тонким поглощающим слоем состоит в наличии продольной E_z -компоненты поля, отсутствующей в круглом волноводе с однородным заполнением.

Распределение электромагнитного поля HE_{11} -волны структуры с толстым $((b-a) = 2,5$ мм, $a = 2,5$ мм) слоем 40 % раствора этанола показано на рис. 3. На правой половине графика представлено семейство распределения радиальной $E_r(r, \phi=\pi/2)$ компоненты поля, а на левой половине — семейство распределения азимутальной

$E_\phi(r, \phi = 0)$ компоненты поля. Представлены абсолютные значения мгновенных значений полей, рассчитанные по формулам

$$|E_\alpha(t)| = \left| \operatorname{Re} \left\{ \hat{E}_\alpha(r, \phi, z) \right\} \cos \omega t + m \left\{ \hat{E}_\alpha(r, \phi, z) \sin \omega t \right\} \right|.$$

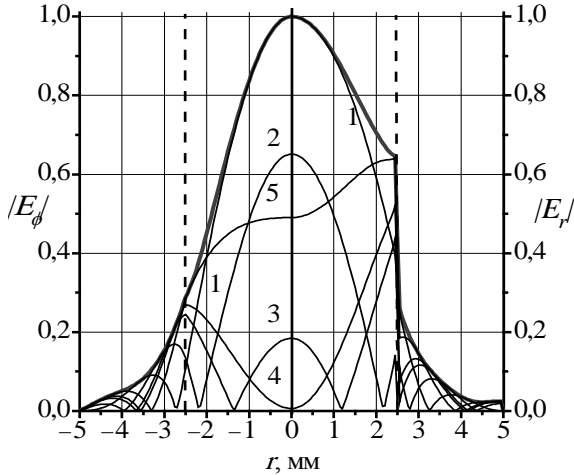


Рис. 3. Распределение компонент электрического поля $E_\phi(r, \phi = 0)$ компоненты (слева) и $E_r(r, \phi = \pi/2)$ компоненты (справа) волновода с кварцевой вставкой и толстым слоем 40 % раствора этанола для ряда фаз колебания ωt : 1 – 0°; 2 – 50°; 3 – 80°; 4 – 90°; 5 – 120°

Параметром семейств на рис. 3 является фаза ωt колебательного процесса. На рис. 3 толстыми линиями отложены также распределения амплитуд $E_\phi(r, \phi = 0)$ и $E_r(r, \phi = \pi/2)$ компонент поля, которые, как видно, являются огибающими $|E_\alpha(t)|$.

Структура поля в сечении двухслойного волновода напоминает структуру поля диэлектрического круглого волновода. Отличие состоит в том, что внутри цилиндра поле представляет собой суперпозицию полей стоячей волны, характерной для идеального диэлектрического волновода, и бегущей волны, распространяющейся в радиальном направлении. Снаружи диэлектрического цилиндра колебательный процесс представляет собой волну, распространяющуюся от цилиндра в поглощающую среду. Как известно, поле классического диэлектрического волновода реактивно спадает при удалении от поверхности цилиндра и синфазно во всех точках пространства.

3. Интерференция волн в слое поглощающей жидкости и повышение дифференциальной чувствительности кюветы. Наблюдаемое немонотонное изменение фазовых постоянных и коэффициентов затухания типов волн структуры (см. рис. 1), равно как и значения декрементов затухания амплитуд поля в поперечном направлении (рис. 3), можно пояснить исходя из разложения поля структуры в спектр плоских волн и законов преломления этих волн на границе

диэлектрических слоев. Направления распространения плоских волн пространственного спектра образуют круговой конус с осью вращения z [7]. Угол раствора конуса $(\pi/2 - \varphi)$ определяется волновыми числами структуры и среды заполнения так, что $h' = k_0 \sqrt{\varepsilon_1} \sin \varphi$, где φ – угол падения плоских волн на границу диэлектриков. Преломленные в поглощающую среду волны существуют в виде обобщенных плоских волн. Угол преломления ψ нормали к фазовому фронту волны следует из закона $\sqrt{(v')^2 + \sin^2 \varphi} \sin \psi = \sqrt{\varepsilon_1} \sin \varphi$, где $v = v' + i v'' = \sqrt{\varepsilon_2' - \sin^2 \varphi + i \varepsilon_2''}$ и зависит от угла падения.

Очевидно, что максимальное замедление волны в структуре будет наблюдаться, когда максимальной станет концентрация поля в зазоре между диэлектрической вставкой и экраном. Для этого необходимо, чтобы фазовый набег фронта обобщенной плоской волны при распространении от границы раздела диэлектриков до экрана и обратно составил 180° . Последнее оказывается справедливым, если $(b - a) = \pi \cos \psi / \left(2k_0 \sqrt{(v')^2 + \sin^2 \varphi} \right)$. Например,

для E_{01} - и H_{01} -типов волн расчетные значения толщин слоев 40 % раствора этанола, при которых ожидается максимальное замедление волн, составили 0,28 и 0,33 см соответственно. Как видим, эти значения согласуются с максимумами фазовых постоянных для этих волн на рис. 1, а.

Направление распространения фазового фронта и направление градиента снижения амплитуды обобщенной плоской волны не совпадают друг с другом [7]. Амплитуда экспоненциально снижается в направлении нормали к поверхности раздела сред. Поскольку амплитуда цилиндрических волн дополнительно уменьшается обратно пропорционально радиусу фронта волны, то суммарное снижение амплитуды будет описываться законом $r^{-1} \exp(-k_0 v'' r)$. В результате снижения амплитуды поля при удалении от границы слоев вдоль радиуса на 1 см в жидкость относительно поля на границе составит $(8,69 k_0 v'' - 20 \lg \{ (a / (a + 1)) \}) = 101$ дБ. Величина коэффициента затухания в жидкости, оцененная из рис. 3 по огибающим распределения поля снаружи цилиндра, равна 103 дБ/см.

Таким образом, как оценка затухания поля в поперечном направлении (рис. 3), так и расчетные значения толщины слоя для максимального замедления волн в структуре (рис. 1, а), полученные на основании концепции спектра плоских волн, хорошо соответствуют результатам расчета по характеристическому уравнению (2), что поз-

воляет физически интерпретировать полученные результаты.

В диэлектрометре [5] толщина слоя поглощающей жидкости соответствует области толстых слоев. В предлагаемой кювете поперечные размеры стаканов для жидкости могут быть уменьшены на порядок, что на два порядка сократит объем жидкости, требующийся для проведения измерений. Помимо этого, кювета с резонансными слоями жидкости повышает дифференциальную чувствительность диэлектрометра. На рис. 4 представлены зависимости фазовых постоянных и коэффициентов затухания HE_{11} -волны структуры как функции концентрации p (объемные доли) этанола в воде для ряда значений толщины слоя раствора. Расчет выполнен на рабочей частоте 32,82 ГГц диэлектрометра [5].

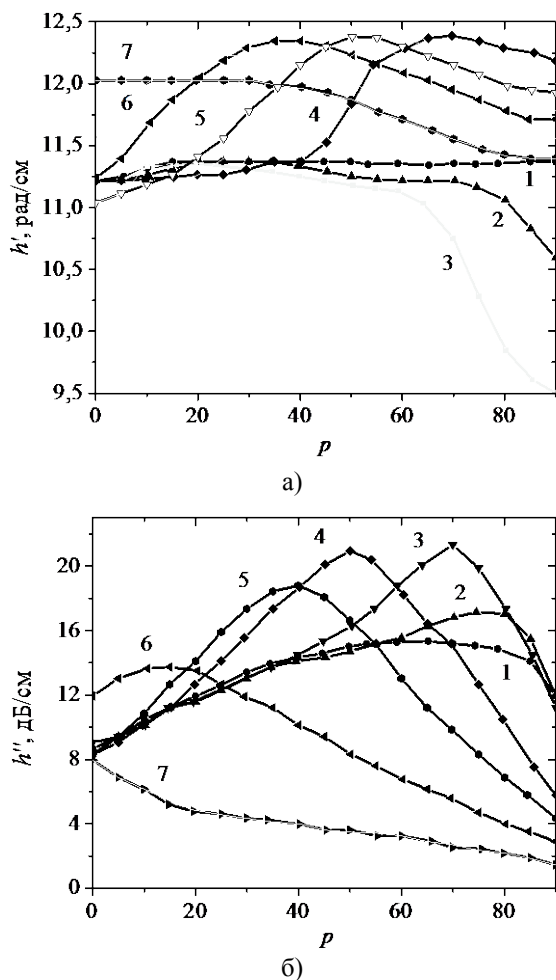


Рис. 4. Зависимость фазовых постоянных (а) и коэффициентов затухания (б) HE_{11} -волны структуры от концентрации этанола в воде на частоте 31,82 ГГц, радиуса b волновода: 1 – 1,0 см; 2 – 0,45 см; 3 – 0,4 см; 4 – 0,35 см; 5 – 0,32 см; 6 – 0,3 см; 7 – 0,28 см

Изменение концентрации веществ в растворе вызывает изменение диэлектрической про-

ницаемости. На фиксированной частоте с ростом концентрации этанола уменьшаются как действительная, так и мнимая часть диэлектрической проницаемости. Поэтому при изменении толщины слоя жидкости условие конструктивной или деструктивной интерференции волн, отраженных от границы слоев и от экрана, будет выполняться при различных значениях КДП жидкости, т. е. при различных концентрациях этанола. Этот вывод наглядно демонстрируют зависимости на рис. 4.

Очевидно, что чем выше производные $\partial h''/\partial p$ и $\partial h'/\partial p$ по концентрации p веществ в исследуемом растворе, тем выше, при прочих равных условиях, способность диэлектрометра выявлять примеси веществ или изменение их концентрации в многокомпонентных растворах.

Как видно из рис. 4, дифференциальная чувствительность кюветы с резонансным слоем поглощающей жидкости превышает чувствительность кюветы диэлектрометра [5] с толстым слоем в несколько раз как для фазовой постоянной, так и для коэффициента затухания. Возрастание чувствительности наблюдается при соответствующем выборе радиуса b металлического экрана. Значение радиуса b зависит от диэлектрической проницаемости жидкости, подлежащей исследованию, при этом значения $\partial h''/\partial p$ и $\partial h'/\partial p$ остаются приблизительно постоянными в достаточно большом интервале изменения концентрации и, соответственно, диэлектрической проницаемости.

Например, при исследовании вин всех типов (от сухих до крепленых) достаточно использовать кювету одного радиуса $b = 3,2$ мм. Из рис. 4 следует, что чувствительность такой кюветы выше чувствительности кюветы с толстым слоем [5] в 2 раза по коэффициенту затухания и в 4,6 раза по фазовой постоянной.

Абсолютное значение дифференциальной чувствительности кюветы пропорционально ее длине, поэтому сравнение чувствительностей предложенной и классической волноводной кювет следует проводить с учетом ограниченности динамического диапазона D , дБ, используемой аппаратуры, поскольку он определяет максимально возможную длину кюветы заданной конструкции. Проведем расчет дифференциальных чувствительностей волноводной кюветы [8], воспользовавшись выражением (1), а для предложенной кюветы – уравнением (2).

Пусть, для определенности, $D = 80$ дБ, а значение концентрации этанола изменяется в пределах $5\% < p < 15\%$. Для дифференциальной чувствительности по затуханию получим $(D/\Gamma'')(\partial \Gamma''/\partial p) = -0,98$ дБ/% и $(D/h'')(\partial h''/\partial p) = 1,7$ дБ/%, а по фазе –

$$(D/\Gamma')(\partial\Gamma'/\partial p) = -0,29 \text{ см}^{-1}/\%$$

$$(D/h')(\partial h'/\partial p) = 0,20 \text{ см}^{-1}/\% \text{ соответственно.}$$

Таким образом, абсолютные дифференциальные чувствительности волноводной и предложенной кюветы соизмеримы. Преимущество состоит в том, что длина кюветы на основе двухслойного волновода в 10 раз превышает длину кюветы на основе полого волновода. Это позволяет снизить погрешность измерения погонного затухания и погонного набега фазы волны вследствие снижения относительной погрешности изготовления кюветы заданной длины. Большая длина кюветы на основе двухслойного волновода делает возможным применение дифференциальной кюветы с идентичными ячейками, отличающимися только длиной регулярной части. Это позволяет устранить влияние неоднородностей на краях ячеек кюветы на результаты измерений.

Выводы. В работах [5, 6] для измерения КДП сильно поглощающих жидкостей на фиксированной частоте в миллиметровом диапазоне нами впервые была использована волноведущая структура в виде диэлектрического цилиндра, погруженного в емкость с исследуемой жидкостью. Размеры емкости выбирались таким образом, чтобы можно было пренебречь влиянием их стенок на результаты измерений. В данной работе для измерения КДП жидкостей предлагается новая структура: круглый металлический волновод с двумя коаксиальными слоями диэлектриков, один из которых – исследуемая жидкость. Ранее подобная электродинамическая структура использовалась для построения квазиоптических или оптических волноводов [11, 12]. Отличие состоит в том, что поперечные размеры измерительной кюветы порядка длины волны, тогда как в волноводах – много больше длины волны.

Проведен анализ электродинамических характеристик круглого металлического волновода, заполненного двумя слоями диэлектриков, причем один из слоев – дисперсионная среда с тангенсом потерь порядка единицы, моделирующая свойства полярных жидкостей, таких как водные растворы различных веществ. Исследован спектр собственных волн структуры и выявлены типы волн с коэффициентами затухания, приемлемыми для построения измерительных кювет. Интерес представляют HE_{11} - и E_{01} -типы волн, имеющие коэффициент затухания порядка 10...20 дБ/см.

Исследованы зависимости коэффициентов затухания и фазовых постоянных типов волн от геометрических размеров слоистого волновода. Выделены три характерные области значений толщины поглощающего слоя жидкости. Найдено, что в области тонких слоев, когда глубина про-

никновения поля в жидкость меньше толщины ее слоя, зависимости фазовых постоянных ряда типов волн стремятся к значениям фазовых постоянных мод круглого волновода, у которых критическая частота ниже рабочей частоты. Для волн, у которых критическая частота выше рабочей частоты, в области тонких слоев наблюдается резкое увеличение потерь, что характерно для волновода с потерями, где распространение волн возможно также на частотах ниже критической. В области толстых слоев поглощающей жидкости, когда глубина проникновения поля в жидкость много меньше толщины слоя жидкости, установлено, что зависимости коэффициентов затухания и фазы волны быстро сходятся к значениям постоянных распространения волн цилиндрического канала в неограниченной поглощающей среде. В области резонансных толщин слоев (глубина проникновения поля в жидкость соизмерима с толщиной ее слоя) найдено периодическое изменение фазовых постоянных и коэффициентов затухания распространяющихся волн, что обусловлено интерференцией волн, отраженных от металлического экрана и от границы диэлектрических слоев, для которой имеются соответствующие условия.

В результате показано, что кювета диэлектromетра со слоем поглощающей жидкости, при котором глубина проникновения поля в жидкость соизмерима с толщиной ее слоя, обладает повышенной дифференциальной чувствительностью. Предложенная структура имеет преимущества при использовании в кюветах прецизионных диэлектromетров сильно поглощающих жидкостей по сравнению с известными техническими решениями [5, 8].

Авторы благодарят Е. С. Кузнецову за помощь в проведении численных расчетов.

Библиографический список

1. Kaatz U. Perspectives in the dielectric measurement techniques for liquids / U. Kaatz // Meas. Sci. Technol. – 2008. – 19, N 11. – 112001 (4 p.).
2. Kaatz U. Broadband dielectric spectrometry of liquids and biosystems / U. Kaatz, Y. Feldman // Meas. Sci. Technol. – 2006. – 17, N 2. – R17–R35.
3. Krasov P. S. Instrument for measuring the complex permittivity of biological objects / P. S. Krasov, E. A. Arkhipova // Telecom. & Radio Engineering. – 2009. – 68, N 8. – P. 727–733.
4. Alison J. M. Dielectric properties of human blood at microwave frequencies / J. M. Alison, R. J. Sheppard // Phys. Med. Biol. – 1993. – 38, N 7. – P. 971–978.
5. Improved differential Ka band dielectrometer based on the wave propagation in a quartz cylinder surrounded by high loss liquid under test / V. N. Skresanov, Z. E. Eremenko, V. V. Glamazdin, A. I. Shubnyi // Meas. Sci. Technol. – 2011. – 22, N 6. – 065403 (10 p.).
6. Complex permittivity of table wines measured by differential Ka band dielectrometer / Z. E. Eremenko, V. N. Skresanov, A. I. Shubnyi et al. // Electromagnetic Waves / ed. by V. Zhurbenko. – Rijeka, INTECH, 2011. – Chap. 19. – P. 403–422.

7. *Вайнштейн Л. А.* Электромагнитные волны / Л. А. Вайнштейн. – М.: Радио и связь, 1988. – 440 с.
8. *Hu X.* The 9.355 GHz complex permittivity of light and heavy water from 1 to 90°C using an improved high-precision instrumentation system / X. Hu, H. A. Buckmaster, O. Baralas // *J. of Chemical and Engineering Data.* – 1994. – 39, N 4. – P. 625–638.
9. *Complex permittivity measurement at millimetre-wave frequencies during fermentation process of Japanese sake* / K. Masaki, N. Atsuhiko, F. Kaori, M. Shunsuke // *J. Phys. D: Appl. Phys.* – 2007. – 40, N 1. – P. 54–60.
10. *Веселов Г. И.* Слоистые металлодиэлектрические волноводы / Г. И. Веселов, С. Б. Раевский. – М.: Радио и связь, 1988. – 248 с.
11. *Marcatili E. A.* Hollow metallic and dielectric waveguides for long distance optical transmission and lasers / E. A. Marcatili, R. A. Schmelzter // *Bell System Technic. J.* – 1964. – 3, N 4. – P. 1783–1809.
12. *Горошко А. И.* Исследование полого диэлектрического лучевода миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов волн / А. И. Горошко, Е. М. Кулешов // *Радиотехника: науч.-техн. сб.* / Харьков. гос. ун-т. – Х., 1972. – Вып. 21. – С. 215–219.
13. *Radio wave propagation characteristics in lossy circular waveguides such as tunnels, mine shafts, and boreholes* / C. L. Holloway, D. I. Hill, R. A. Dalke, G. A. Hufford // *IEEE Trans. On Antennas and Propagations.* – 2000. – 48, N 9. – P. 1354–1366.
14. *The dielectric relaxation of mixtures of water and primary alcohol* / S. Mashimo, S. Kuwabara, S. Yagihara, K. Higasi // *J. of Chemical Phys.* – 1989. – 90, iss. 6. – P. 3292–3294.

Рукопись поступила 12.03.2013 г.

V. N. Skresanov, Z. E. Eremenko

DIELECTROMETER CUVETTE
WITH HIGH DIFFERENTIAL SENSITIVITY
BASED ON CIRCULAR WAVEGUIDE
WITH A DIELECTRIC INSERT
FOR HIGH LOSS LIQUIDS

The value of the complex permittivity of strongly absorbing liquids (e. g., water and aqueous solutions of various substances) needs to be known in various fields of science and technology, where such liquids are used. Previously, we proposed a waveguide-type measuring cuvette, which is a dielectric (quartz) cylinder immersed in the test liquid and developed a highly sensitive 8-mm band dielectrometer with such a cuvette. Theoretical and numerical analysis of the proposed cuvette was conducted without external border of the cuvette, which was the subject of discussion by comparing it with the experiment results. In this paper, we address this shortcoming, and conducted theoretical and numerical study of electrodynamic parameters of the dielectrom-

eter cuvette with its external borders. This cell is formed by a circular metal 8-mm band waveguide with a coaxial cylindrical insertion of a low-loss dielectric. The study liquid fills the space between the surfaces of the insert and the waveguide. To increase the sensitivity of the cell to the changes in the concentration of substances in a test high loss liquid we used sufficiently thin layer of it (of the order of quarter wavelength), in which there is the interference of the waves. The result shows that the cuvette with the layer of absorbing liquid, wherein a penetration depth commensurate with the thickness of the liquid of the layer, has an increased differential sensitivity. The proposed structure has advantages when it is used in precise dielectrometer of strongly absorbing liquids compared with known technical solutions.

Key words: dielectrometry, metal waveguide, permittivity, high loss liquid, wave interference.

В. М. Скресанов, З. Е. Еременко

КЮВЕТА ДІЕЛЕКТРОМЕТРА З ПІДВИЩЕНОЮ
ДИФЕРЕНЦІЙНОЮ ЧУТЛИВІСТЮ
НА ОСНОВІ КРУГЛОГО ХВИЛЕВОДУ
З ДІЕЛЕКТРИЧНОЮ ВСТАВКОЮ
ДЛЯ СИЛЬНО ПОГЛИНАЮЧИХ РІДИН

Значення комплексної діелектричної проникності сильно поглинаючих рідин (наприклад, води та водних розчинів різних речовин) необхідно знати в різних галузях науки і техніки, де використовуються такі рідини. Раніше нами була запропонована вимірювальна кювета хвилевого типу, що представляє собою діелектричний (кварцовий) циліндр, занурений у досліджувану рідину, а також розроблено високочутливий діелектрометр 8-мм діапазону з використанням такої кювети. Теоретичний і числовий аналіз запропонованої кювети був проведений без урахування зовнішньої границі кювети, що було предметом обговорення при порівнянні його з результатами експерименту. У даній роботі ми усунули цей недолік, і провели дослідження електродинамічних параметрів кювети діелектрометра з урахуванням її зовнішньої границі. При цьому кювету утворено круглим металевим хвилеводом 8-мм діапазону з коаксіально розташованою циліндричною вставкою з діелектрика з малими втратами. Досліджувана рідина заповнювала простір між вставкою і хвилеводом. Для підвищення чутливості кювети до зміни концентрації речовин в досліджуваній сильно поглинаючій рідині використаний достатньо тонкий її шар (чверть довжини хвилі), в якому спостерігається ефект інтерференції хвиль. У результаті показано, що кювету діелектрометра з шаром поглинаючої рідини, при якому глибина проникнення поля в рідину порівняна з товщиною її шару, має підвищену диференціальну чутливість. Запропонована структура має переваги при використанні в кюветах прецизійних діелектрометрів сильно поглинаючих рідин в порівнянні з відомими технічними рішеннями.

Ключові слова: діелектрометрії, металевий хвилевід, діелектрична проникність, сильно поглинаюча рідина, інтерференція хвиль.