

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОМПЛЕКСНОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ВОДЫ С ПОМОЩЬЮ РАДИОИНТЕРФЕРОМЕТРА РИ-03/3 В КВЧ ДИАПАЗОНЕ

Г. А. Козлов

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

На данный момент измерение комплексной диэлектрической проницаемости веществ в КВЧ диапазоне является важной научно-исследовательской задачей. Существует целый ряд различных методов измерений – резонансный, волноводный, оптический и др. Среди которых очевидным преимуществом обладает оптический метод, так как он позволяет без контакта с исследуемым образцом и в отсутствие априорной информации о составе объекта, определять его диэлектрические параметры.

Имеется множество способов реализаций оптического метода, один из которых – это применение теории классической эллипсометрии. Эллипсометрия [1] очень хорошо зарекомендовала себя в оптическом диапазоне длин волн и позволяет с высокой точностью определять диэлектрические параметры различных сред. Научный интерес представляет применение данной теории в КВЧ диапазоне. В данном диапазоне метод эллипсометрии можно реализовать с помощью радиоинтерферометра РИ-03/3, который через передающий волновод облучает исследуемый объект электромагнитным колебанием известной формы и частоты. Отраженное электромагнитное колебание поступает на два приемных волновода, соединенных с приемными каналами радиоинтерферометра.

В теории эллипсометрии утверждается, что линейно-поляризованная волна после отражения от границы раздела двух сред становится эллиптически-поляризованной. Состояние поляризации отраженной волны можно разложить на две составляющие s (осциллирующая перпендикулярно плоскости падения) и p (осцилляция волны параллельна плоскости падения). Используя два приемных канала радиоинтерферометра можно измерить отношение комплексных амплитуд отраженных волн на p и s поляризациях.

Однако экспериментально, при эллипсометрических измерениях, определяют не сами коэффициенты отражения, а их отношения:

$$P = \operatorname{tg} \psi = \frac{P_{\perp}}{P_{\parallel}}, \quad \Delta = \varphi_{\perp} - \varphi_{\parallel}, \quad (1)$$

где P показывает отношение амплитуд коэффициентов отражения для p - и s - волн, а параметр Δ равен разности между фазовыми скачками этих волн при отражении. Также необходимо учитывать угол ϑ_1 , под которым зондируется поверхность исследуемого вещества.

Угловые параметры ψ , Δ и ϑ_1 называют эллипсометрическими параметрами. Применяя основные законы электродинамики: уравнения Максвелла, формулы Френеля и закон Снеллиуса можно связать данные параметры с комплексным коэффициентом преломления следующим выражением:

$$n = -\frac{\sin \vartheta_1 \operatorname{tg} \vartheta_1 \cos 2\psi}{1 + \sin 2\psi \cos \Delta} \quad \kappa \cong \operatorname{tg} 2\psi \sin \Delta \quad (2)$$

который, в свою очередь, связан с КДП выражением:

$$\hat{\varepsilon} = \hat{n}^2 = [n(1 + i\kappa)]^2. \quad (3)$$

Описание экспериментальной установки

Для реализации данных измерений был собран экспериментальный стенд, общий вид которого приведен на рис. 1.



Рис. 1. Общий вид экспериментального стенда

Схема его приведена на рис. 2. Стенд представляет собой металлический каркас 1, с боковыми стенками 2. Между боковыми стенками каркаса была закреплена деревянная подложка 3 с антеннами 4. Преимущество такого каркаса в том, что он позволяет нам задавать определенные углы падения, с точностью 1° . В качестве исследуемого образца была выбрана пресная вода 5, которая наливалась в металлический аквариум 6. Угол падения задавался равным $\vartheta_1 = 45^\circ$. Чтобы точно располагать уровень воды в точке пересечения лучей, металлический аквариум был поставлен на лабораторный домкрат 7.

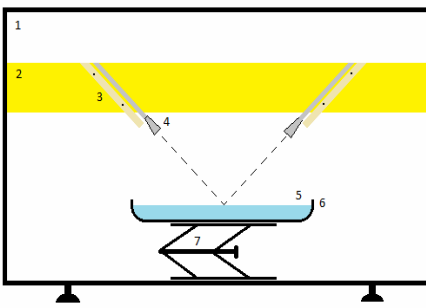


Рис. 2. Принципиальная схема экспериментального стенда: 1 – металлический каркас, 2 – боковые стенки каркаса, 3 – деревянная подложка, 4 – антенны, 5 – пресная вода, 6 – металлический аквариум, 7 – дократ

На рис. 3 показано крепление антенн радиоинтерферометра.



а



б

Рис. 3. Крепление антенн радиоинтерферометра: а – передающая антенна, б – приемные антенны

Для максимального приближения фронта падающей волны к плоскости в непосредственной близости от отражающей поверхности следует выбрать расстояние от антенн радиоинтерферометра до отражающей поверхности максимально возможным, поэтому расстояние от антенн до места отражения волн $L = 423$ мм подобрано таким образом, чтобы проводить эксперимент в дальней зоне антенны. Размер апертуры антенны $d = 16$ мм, длина э/м волны $\lambda = 3,2$ мм, дальняя зона:

$$r \geq \frac{2d^2}{\lambda} = 160 \text{ мм.}$$

Вода была налита до уровня 10 мм относительно дна аквариума, тогда как скин-слой [2] для воды в 3 мм диапазоне:

$$\delta = \frac{\lambda_0}{4\pi nk} = 0,01 \text{ мм}$$

поэтому отражение будет происходить от верхней поверхности слоя воды, а граница вода-металл никак не будет влиять на комплексную амплитуду отраженной волны.

В эксперименте антенны, возбуждаемые прямоугольным диэлектрическим волноводом, представляют собой конический диэлектрический рупор. Из-за технических особенностей изготовления этих антенн, излучаемые (принимаемые) ими поля эллиптически поляризованы. Для проведения поляризационных измерений необходимо, чтобы передающая

и приемные антенны имели линейную поляризацию. Поэтому был сконструирован поляризатор, состоящий из последовательно наложенных друг на друга тонких стальных пластин (лезвий), разделенных двумя слоями изолянта, рис. 4. Для того, чтобы убедиться, что на выходе поляризатора излучалась линейно-поляризованная волна был проведен эксперимент: приемная антенна располагалась вдоль линии визирования передающей антенны, при вращении приемной антенны в плоскости поляризации, на экране осциллографа наблюдалось отсутствие (поляризаторы располагались ортогонально) и наличие сигнала (оси поляризаторов сонаправлены).



а

б

Рис. 4. Общий вид поляризаторов: а – для приемных антенн, б – для передающей антенн

В нашем случае приемные антенны должны иметь поляризации, ортогональные друг к другу, рис. 4, одна – перпендикулярна плоскости падения. Также линейную поляризацию должна иметь передающая антенна. Причем, если азимутальный угол падающей волны равен $\alpha_i = 45^\circ$, то отношение амплитуд р- и s- волн для передающей антенны

$$\frac{A_{\square}}{A_{\perp}} = \operatorname{tg} \alpha_i = 1 \quad \text{и} \quad \text{соответственно} \quad \text{величина}$$

$$P = \frac{P_{\perp}}{P_{\square}} = \frac{R_{\perp} A_{\square}}{A_{\perp} R_{\square}} = \frac{R_{\perp}}{R_{\square}} \quad \text{зависит только от отношения}$$

принятых амплитуд.

Методика проведения эксперимента

Исходя из выражения (2), для вычисления комплексной диэлектрической проницаемости воды, помимо угла падения $\vartheta_i = 45^\circ$, нужно определить разность фаз $\Delta = \varphi_{\square} - \varphi_{\perp}$ между двумя принятыми сигналами. Также, чтобы найти величину ψ нужно

$$\text{знать отношение принятых амплитуд} \quad \psi = \arctan \frac{R_{\perp}}{R_{\square}}.$$

Из-за конструктивных особенностей радиоинтерферометра и волноводов, соединяющих антенны измерительной установки с приемным и передающим устройствами, возникает неопределенность в определении амплитуды и фазы сигнала. Поэтому была проведена калибровка амплитуды и фазы сигнала (индекс k) по эталонной отражающей поверхности, в качестве которой был выбран медный лист.

Коэффициенты отражения от металла:

– при параллельной поляризации $\hat{k} = 1$,

– при перпендикулярной $\hat{k} = -1$.

Соответственно, если измерить амплитуды $R_{\perp}^k, R_{\square}^k$ и фазы $\varphi_{\perp}^k, \varphi_{\square}^k$ принятых колебаний и учесть тот факт, что при отражении от металла между двумя приемными ортогональными каналами происходит сдвиг фаз на π радиан, то реальное значение Δ и ψ для воды будет равным:

$$\Delta = \varphi_{\square} - \varphi_{\perp} - (\varphi_{\square}^k - \varphi_{\perp}^k - \pi), \quad (4)$$

$$\psi = \arctan \frac{R_{\perp} R_{\square}^k}{R_{\square} R_{\perp}^k}. \quad (5)$$

В ходе эксперимента было обнаружено, что выбранный нами в качестве эталона медный лист отлично держится на поверхности воды, рис. 5.

Этот факт существенно упростил методику наших измерений и помимо этого увеличил ее точность, так как разность принятых фаз существенно зависит от углового расположения плоскости отражающей поверхности относительно фронта волны.



Рис. 5. Медный лист на поверхности воды

Поэтому эксперимент проводился в три этапа:

- 1) запись принятых интерферограмм при отражении э/м волны от поверхности воды;
- 2) установка медного листа на поверхность воды;
- 3) запись принятых интерферограмм при отражении э/м волны от поверхности медного листа.

Как видим, записи интерферограмм при отражении от воды и медного листа проводится независимо. Так как собственные шумы радиоинтерферометра РИ-03/3 имеют относительно высокий уровень, в интерферограммах присутствуют значительные флюктуации фазы сигнала, поэтому для их компенсации путем статистического усреднения результатов проводились серии по 30 измерений.

В результате обработки интерферограмм получено следующее значение эллипсометрических параметров $\Delta = 3,02$ и $\psi = 1,028$.

Применяя выражение (2), получаем значение комплексной диэлектрической проницаемости:

$$\hat{\epsilon} = 7 - 3,3i.$$

Теоретическое значение $\hat{\epsilon}$, данное в работе [2]:

$$\hat{\epsilon} = 8,8 - 13,4i.$$

Решая систему обратных уравнений, находим, что это значение соответствует значению $\Delta = 2,97$ и $\psi = 0,9386$. Отсюда видим, что принятый нами метод калибровки фазы обеспечивает отличную точность. Абсолютная погрешность $\Delta = 0,05$ радиан. Основное расхождение практического значения $\hat{\epsilon}$ с теоретическим дает величина ψ .

В общем случае она определяется выражением:

Так как задача расположения приемных поляризаторов ортогонально друг к другу значительно проще, чем установка оси поляризации передающей антенны под азимутальным углом $\alpha_i = 45^\circ$, основное расхождение в величине ψ , исходя из формулы (6), дает отношение A_{\square}/A_{\perp} , которое не равно 1, т. е. азимутальный угол падения $\alpha_i \neq 45^\circ$. Тогда реальное значение компонент A_{\square} и A_{\perp} равны

$A_{\square}^{real} = A_{\square} + \Delta A$ и $A_{\perp}^{real} = A_{\perp} - \Delta A$. Решая систему уравнений:

$$\begin{cases} \psi^{teor} = \arctan \frac{R_{\perp} R_{\square}^k A_{\square}}{R_{\square} R_{\perp}^k A_{\perp}} \\ \psi^{prakt} = \arctan \frac{R_{\perp} R_{\square}^k (A_{\square} + \Delta A)}{R_{\square} R_{\perp}^k (A_{\perp} - \Delta A)} \end{cases}, \quad (7)$$

находим что $\Delta A = 0,1A$. Это соответствует ошибке $\Delta \alpha_i = 5,6^{\circ}$, что вполне реально, так как размеры поляризатора малы, и задать азимутальный угол α_i точно равным 45° , представляет значительную сложность.

Абсолютная погрешность измерений:

$$\Delta \varepsilon^{real} = \frac{\partial \varepsilon^{real}}{\partial \psi} \Delta \psi = 32$$

$$\Delta \varepsilon^{im} = \frac{\partial \varepsilon^{im}}{\partial \psi} \Delta \psi = 17,$$

тогда как ошибка в расхождении экспериментально измеренного значения $\hat{\varepsilon}$ с теоретическим составляет $\Delta \varepsilon^{real} = 1,8$; $\Delta \varepsilon^{im} = 11,1$.

Выводы

В результате выполненного теоретического и экспериментального исследования получены оценки комплексной диэлектрической проницаемости воды,

согласующие друг с другом в пределах погрешностей измерений.

Значительное расхождение в определении мнимой части связано с тем, что измерения проводились при угле, меньшем угла Брюстера. Для воды в 3 мм диапазоне он равен $\bar{\vartheta} = 71^{\circ}$. Для уменьшения погрешности измерения на порядок необходимо либо повысить точность амплитудных измерений в 10 раз, либо реализовать метод измерений при угле падения больше угла Брюстера. Применение данной методики измерений предполагается в газодинамических экспериментах в полевых условиях, где повышение качества юстировки схемы представляет значительную трудность и соответственно повышение точности измерений затруднительно. С другой стороны, наиболее интересным объектом исследований в газодинамических процессах является плазма, для которой угол Брюстера лежит в интервале от до 45° . Таким образом, проведение экспериментов под углом несколько больше, чем 45° может обеспечить повышение точности измерений.

Литература

1. Электромагнитная теория распространения, интерференции и дифракции света MaxBorn & Emil Wolf / под ред. Г. П. Мотулевич. – М., 1973.
2. Красюк Н. П., Розенберг В. И. Корабельная радиолокация и метеорология. 1970, 325 с.