

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОМПЛЕКСНОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ПЛОСКИХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ПО ИЗМЕРЕНИЮ ИНТЕНСИВНОСТИ ПРОХОДЯЩЕГО И ОТРАЖЕННОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Научно исследовательское учреждение «Институт прикладных физических проблем
имени А.Н. Севченко» Белорусского государственного университета.
Минск. Республика Беларусь. serdyukvm@bsu.by

Теоретически обоснована возможность определения вещественной и мнимой части комплексной диэлектрической проницаемости плоского однородного слоя по измерению энергетических коэффициентов отражения и прохождения двух ортогональных поляризаций электромагнитного излучения без привлечения фазовой информации о поле. Для этого используются простые аналитические выражения, полученные в первом приближении по величине мнимой части диэлектрической проницаемости.

Широкое применение электромагнитных методов бесконтактного исследования и тестирования различных материалов и веществ обусловлено их очевидными преимуществами [1]. Основная идея применения этих методов состоит в том, что по изменениям интенсивности и фазы тестирующего поля определяются изменения комплексной диэлектрической проницаемости контактирующего материала, и затем по стандартным алгоритмам, заранее установленным из теории или эксперимента, вычисляются соответствующие изменения других физических параметров диэлектрика, например, концентрация различных компонент в его составе, плотность, наличие дефектов структуры и т.д. [1]. Таким образом, ключевым этапом всех электродинамических (радио, оптических и микроволновых) методов изучения и тестирования материалов является определение их комплексной диэлектрической проницаемости. Существуют различные методы решения этой задачи, использующие самые разные методики измерения параметров тестирующего поля [2], однако наиболее простой и универсальной схемой применения электромагнитного метода является обычная схема на просвет и отражение, когда тестируемый материал в виде плоского слоя помещается перед источником излучения, а искомые параметры материала определяются по измерениям интенсивности и фазы отраженного и (или) прошедшего пучков. Схему тестирования на просвет и отражение используют эллипсометрические методы определения диэлектрической проницаемости [3], которые относятся к числу наиболее точных и распространенных. Однако погрешность этих методов возрастает с уменьшением поглощения в тестируемой среде [4]; кроме того, они явно используют фазовую информацию об отраженном и преломленном поле. В связи с этим возникает вопрос о возможности определения диэлектрической проницаемости только по измерениям энергетических коэффициентов отражения и прохождения без использования какой-либо фазовой информации. Это позволило бы снизить требования по когерентности источников и тем самым расширить возможности электродинамического метода тестирования материалов. Для прозрачных сред и материалов такая возможность была доказана в работе [5]. В настоящей работе решается аналогичная задача для плоского диэлектрического слоя с поглощением.

В качестве тестирующего излучения будем рассматривать пучки электромагнитных волн одной или близких временных частот (радио, микроволнового, ИК, оптического и УФ диапазонов), которые обладают некоторым выделенным направлением распространения в пространстве и для которых имеют смысл коэффициенты прохождения и отражения [6,7]. Для таких пучков излучения справедливы формулы Френеля [6,7], которые определяют преобразование комплексной амплитуды пучка на одной границе раздела двух различных однородных изотропных диэлектрических сред, а также более сложные формулы для нескольких параллельных междиэлектрических границ, которые вытекают из формул Френеля и описы-

вают преобразование амплитуды пучка в слоистых средах. Указанные формулы применимы не только для когерентных плоских волн, но и для электромагнитных пучков, характеризующихся ограниченным спектром временных и пространственных частот некоторой ширины.

В среде с потерями диэлектрическая проницаемость ϵ , которая требует определения, становится комплексной. Неизвестной величиной может быть и толщина тестируемого диэлектрического слоя. В качестве основы теоретического рассмотрения возьмем выражения для коэффициентов отражения и прохождения слоя для двух ортогональных поляризаций H и E , электрический вектор которых соответственно ортогонален и параллелен плоскости падения пучка на слой. Эти выражения хорошо известны [6,7] и могут быть записаны в виде:

$$R_{H,E} = -iP_{H,E}T_{H,E} \sin(k\gamma h) \quad T_{H,E} = [\cos(k\gamma h) - iQ_{H,E} \sin(k\gamma h)]^{-1} \quad (1)$$

где h – толщина среды,

$$P_{H,E} = (\epsilon^{2\nu} \alpha^2 - \gamma^2) / (2 \epsilon^\nu \alpha \gamma); \quad Q_{H,E} = (\epsilon^{2\nu} \alpha^2 + \gamma^2) / (2 \epsilon^\nu \alpha \gamma),$$

величина ν принимается равной нулю для H -поляризации распространяющегося поля и единице для E -поляризации, k – волновое число ($k=2\pi/\lambda$, λ – средняя длина волны излучения), $\gamma=(\epsilon-\beta^2)^{1/2}=(\epsilon-1+\alpha^2)^{1/2}$ – эффективный параметр нормального распространения проходящего пучка внутри диэлектрического слоя, α и β – эффективные параметры нормального и тангенциального распространения тестирующего пучка в окружающей среде (воздухе), причем $\alpha=\cos \varphi$ и $\beta=\sin \varphi$, где φ – угол падения пучка на тестируемый диэлектрический слой.

Постановка задачи следующая. Пусть каким-либо образом измерены коэффициенты отражения и прохождения плоского диэлектрического слоя по интенсивности для двух ортогональных H - и E -поляризаций пучка электромагнитного излучения (квадраты модулей величин (1)). Требуется определить вещественную и мнимую части комплексной диэлектрической проницаемости слоя. Угол падения пучка на слой предполагается заданным, т.е. параметры распространения пучка α и β известны, но неизвестны и требуют определения вещественная и мнимая части диэлектрической проницаемости ϵ . Неизвестной может быть и толщина слоя h .

Согласно (1) удобнее рассматривать не энергетические коэффициенты отражения и прохождения слоя $|R_{H,E}|^2$ и $|T_{H,E}|^2$, а производные от них величины $U_{H,E}=|R_{H,E}|^2/|T_{H,E}|^2$ и $V_{H,E}=|T_{H,E}|^2$, которые будем считать заданными. Из первого уравнения (1) следует, что $U_E/U_H=|P_E|^2/|P_H|^2$, откуда получается приближенное выражение

$$\epsilon_R = \frac{\beta^2}{\alpha^4 U_H - U_E} \left(\alpha^2 U_H \pm \sqrt{U_H U_E} \right) \quad (2)$$

Оно определяет вещественную часть диэлектрической проницаемости $\text{Re } \epsilon \approx \epsilon_R$ с точностью до членов порядка второй степени по ее мнимой части $\text{Im } \epsilon$. При $\text{Re}(R_{EH}/R_{HE}) > 0$ перед квадратным корнем в выражении (2) следует брать знак минус, а при $\text{Re}(R_{EH}/R_{HE}) < 0$ – знак плюс; последний случай будет иметь место всегда для диэлектриков с $\text{Re } \epsilon > 1$, если угол падения меньше 45° . При $\text{Im } \epsilon = 10^{-1}$ формула (2) дает относительную погрешность в третьем десятичном знаке, то есть верное значение вещественной части проницаемости для двух первых знаков, но если к тому же $\text{Re } \epsilon > 11$, то для трех-четырех знаков, тогда как для малого поглощения, когда $\text{Im } \epsilon = 10^{-4}$, ошибка определения проницаемости проявляется только в восьмом-девятом, а при $\text{Re } \epsilon > 11$ – в десятом знаке. Для прозрачной среды ($\text{Im } \epsilon = 0$) формула (2) определяет точное значение диэлектрической проницаемости. В такой среде должны иметь место соотношения:

$$1 + U_H - V_H = 0; \quad 1 + U_E - V_E = 0 \quad (3)$$

которые представляют собой одну из форм записи закона сохранения энергии для каждой из двух поляризаций излучения в процессе прохождения диэлектрического слоя без потерь. Если же соотношения (3) не выполняются, то мнимая часть проницаемости $\text{Im } \epsilon$ отлична от нуля, и для ее определения необходимо привлекать дополнительные уравнения, в качестве ко-

торых могут выступать соотношения для квадратов модулей коэффициентов прохождения T_{HE} (1). Выполняя простые преобразования с этими уравнениями и используя прежнее приближение до второго порядка малости по $\text{Im } \varepsilon$, можно получить простые соотношения для определения неизвестной мнимой части проницаемости и толщины тестируемого слоя. Эти соотношения выведены для двух случаев, когда данная толщина неизвестна и когда она заранее определена из независимых измерений. Они позволяют решить поставленную задачу определения комплексной диэлектрической проницаемости диэлектрического слоя.

Возможность применения данного метода на практике проверялась с помощью математического моделирования процедуры определения диэлектрической проницаемости, когда в качестве измеряемых величин использовались результаты вычисления энергетических коэффициентов отражения и прохождения двух ортогональных H - и E -поляризаций с помощью формул (1) для различных значений углов падения пучка и толщины слоя. Эти результаты показывают, что точность определения мнимой части проницаемости в случае заданной толщины слоя много выше, чем в случае, когда она неизвестна: в первом случае $\text{Im } \varepsilon$ вычисляется с точностью до 4 знаков и выше, а во втором случае надежно определяемыми оказываются только первые два-три знака. Точность определения самой толщины слоя оказывается еще ниже: в среднем всего два знака.

Таким образом, использование результатов измерений энергетических коэффициентов отражения и прохождения плоского диэлектрического слоя позволяет определять вещественную и мнимую части его комплексной диэлектрической проницаемости, а при необходимости – еще и толщину. При этом используется довольно простой алгоритм вычисления искомых величин, погрешность которого зависит от величины искомой проницаемости. Результаты математического моделирования показывают, что данный алгоритм позволяет достичь высокой точности определения проницаемости, до пяти-шести знаков и более, при малых значениях ее мнимой части $\text{Im } \varepsilon$, порядка 10^{-4} – 10^{-3} , тогда как с увеличением потерь до $\text{Im } \varepsilon = 10^{-1}$ точность определения искомых величин падает до двух-трех знаков, а то и еще меньше. Этим предлагаемый метод отличается от эллипсометрического метода определения комплексной диэлектрической проницаемости, точность которого снижается с уменьшением величины потерь до нуля. Указанная точность зависит также и от вещественной части проницаемости $\text{Re } \varepsilon$. Наименьшая ее величина наблюдается, когда $\text{Re } \varepsilon$ близко к единице, но с ростом данной величины до 20 единиц точность повышается на один-два порядка.

Список литературы

1. Kupfer, K. (ed.) *Electromagnetic Aquametry. Electromagnetic Wave Interaction with Water and Moist Substances* / Edited by K. Kupfer. – Berlin: Springer, 2005. – 530 pp.
2. Singh, S. Refractive index measurement and its applications / S. Singh // *Physica Scripta*. – 2002. – Vol. 65, No. 2. – P. 167–180.
3. Аззам, Р. Эллипсометрия и поляризованный свет / Р. Азам, Н. Башара. – М.: Мир, 1981. – 584 с.
4. Кизель, В. А. Отражение света / В. А. Кизель. – М.: Наука, 1973. – 352 с.
5. Serdyuk, V. M. Refractive index determination for a plane dielectric layer using the measurements of transmitted beam intensity / V. M. Serdyuk, J. A. Titovitsky // *Devices and Methods of Measurements*. – 2017. – Vol. 8, No 1. – P. 55–60.
6. Борн, М. Основы оптики / М. Борн, Э. Вольф. – М.: Наука, 1973. – С. 54–78.
7. Chew, W. C. *Waves and fields in inhomogeneous media* / W. C. Chew – New York: IEEE Press, 1995. – 608 pp.