

Метод определения диэлектрической проницаемости жидких диэлектриков в X-диапазоне частот

А.А. Андреев, Е.А. Рябов, Б.В. Сергеева, И.В. Хайрушев, С.В. Середич, В.И. Гукова, С.А. Сергеев

Саратовский национальный исследовательский государственный университет
им. Н.Г. Чернышевского

Аннотация: В работе предложен новый метод определения диэлектрической проницаемости жидких диэлектриков в X-диапазоне частот, который позволяет эффективно исследовать жидкие диэлектрики со значением диэлектрической проницаемости более 50.

Ключевые слова: FDTD, прямоугольный волновод, СВЧ излучение, OpenEMS

1. Введение

Диэлектрическая проницаемость является основным параметром материала, который определяет взаимодействие материала с электромагнитной волной [1]. Новые методы измерения диэлектрической проницаемости позволяют исследовать материалы, к которым не применимы другие методы измерения. Такие исследования активно проводятся в настоящее время [2 – 8]. В частности, использование жидких диэлектриков позволяет создавать СВЧ приборы со сложной конструкцией. Так же измерение диэлектрической проницаемости биологических жидкостей позволяет проводить медицинскую диагностику, например, уровня сахара в крови [9 – 12]. Данную методику также планируется использовать при исследовании характеристик жидких коллоидов микро- и наночастиц различной природы, обладающих высокой диэлектрической проницаемостью (более 50), в СВЧ диапазоне [13 – 16], а также в учебном процессе в Саратовском государственном университете [17– 19].

2. Описание и математическое моделирование конструкции

В данной работе рассматривается волноводная конструкция (рисунок 1) для исследования жидких диэлектриков в X-диапазоне частот. Конструкция состоит из двойного согласованного волноводного тройника и ступенчатого трансформатора сопротивления, соединенного с одним из коллинеарных плеч тройника. Источник электромагнитного излучения расположен в Н-плече (порт 1). Через трансформатор сопротивления проходит трубка, заполненная жидким диэлектриком (рисунок 1 б).

Для измерения коэффициентов отражения и пропускания использовался панорамный измеритель КСВН и ослабления P2-61 в частотном диапазоне $8 \div 12$ ГГц. Результаты измерений P2-61 записывались из порта «самописец» на карту памяти с помощью Arduino MEGA [20 – 23].

Проведено численное моделирование S-параметров конструкций с материалами различной диэлектрической проницаемости с использованием программного пакета со свободным и открытым исходным кодом OpenEMS [24 – 25], позволяющим проводить численное моделирование электромагнитных полей. Данный пакет основан на решении уравнений Максвелла в дискретизированном пространстве, усовершенствованном методом конечных разностей во временной области (Equivalent-Circuit FDTD или EC-FDTD). Он имеет потенциал для проектирования СВЧ-схем, антенн, радаров, метаматериалов и в медицинских исследованиях.

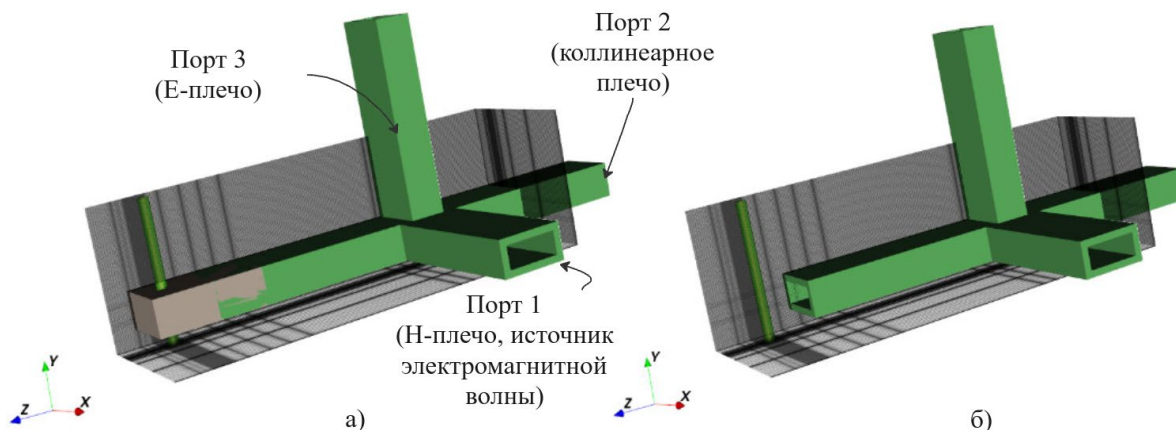


Рисунок 1. 3D-изображение волноводной конструкции в общем виде (а) и без трансформатора (б).

3. Экспериментальные измерения

Проведены экспериментальные измерения S -параметров конструкций с водными растворами поваренной соли NaCl различной концентрации. На рисунке 2 показаны S_{11} -параметры, полученные в результате численного моделирования (а) и экспериментальных измерений (б). Как можно наблюдать, при увеличении диэлектрической проницаемости вещества в трубке минимумы отражения смещаются в область низких частот. На экспериментальных данных (рисунок 2 б) также наблюдается смещение минимумов отражения в область высоких частот при повышении концентрации соли, что свидетельствует об уменьшении диэлектрической проницаемости водного раствора с увеличением концентрации растворенной соли.

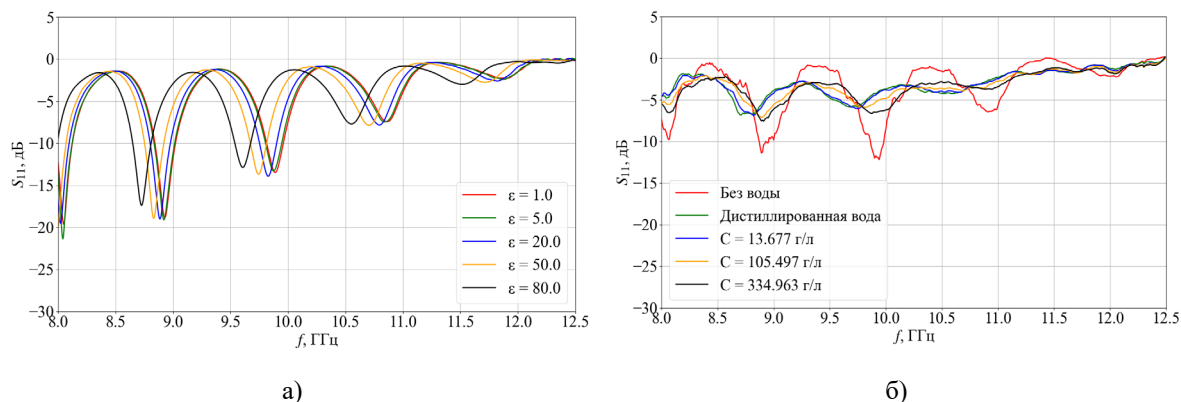


Рисунок 2. S_{11} -параметры, полученные при: а) численном моделировании при разных значениях диэлектрической проницаемости материала; б) экспериментальных измерениях при различной концентрации соли.

По результатам численного моделирования найдены локальные минимумы коэффициента отражения. На рисунке 3 изображена зависимость положения резонансного пика от диэлектрической проницаемости вещества в трубке в частотном диапазоне $9,25 \div 10,25$ ГГц (min^2).

Для нахождения частоты резонансного пика отражения зашумленных экспериментальных данных проведена аппроксимация полиномом 10 степени. Найден локальный минимум сглаженной АЧХ в диапазоне частот $9,25 \div 10,25$ ГГц (min^2 на рисунке 4). Минимум, который наблюдается в результатах численного

моделирования в диапазоне частот $10,25 \div 11,25$ ГГц ($\min_3$), слабо выражен при исследовании спектров отражения водного раствора в данной конструкции.

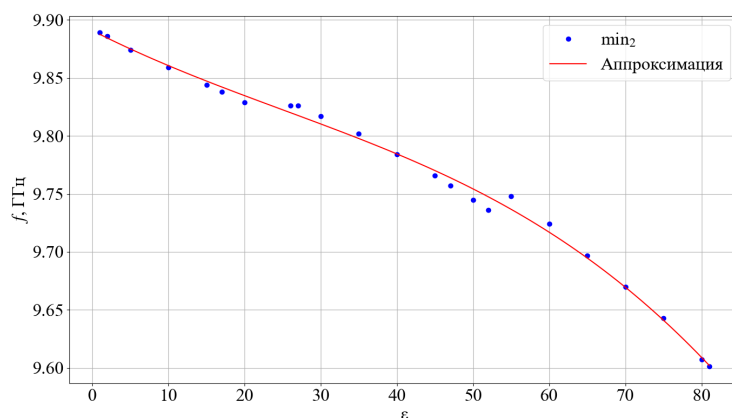


Рисунок 3. Зависимость частоты наблюдаемого минимума S_{11} -параметра в диапазоне $9,25 \div 10,25$ ГГц от диэлектрической проницаемости вещества в трубке.



Рисунок 4. Нахождение локальных минимумов отражения спектра, аппроксимированного полиномом, при концентрации соли 13,7 г/л.

Частоты минимумов отражения были сопоставлены с зависимостями частот резонансного пика от диэлектрической проницаемости вещества в трубке. В результате получены зависимости диэлектрической проницаемости водного раствора от концентрации растворенной соли (рисунок 5).

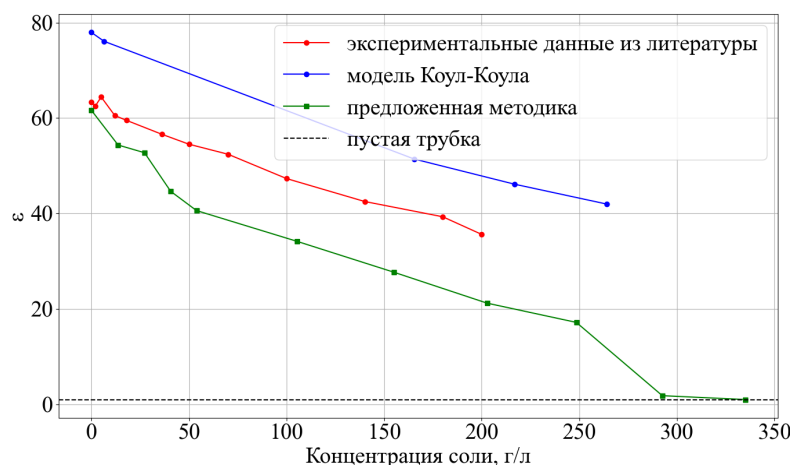


Рисунок 5. Сравнение результатов измерения диэлектрической проницаемости предложенным методом с теоретическими данными [6, 7]

Из рисунка 5 видно, что диэлектрическая проницаемость воды уменьшается по мере увеличения концентрации растворенной соли NaCl.

3. Заключение

Разработанная конструкция позволяет эффективно определять значения диэлектрической проницаемости более 55. При исследовании материалов с диэлектрической проницаемостью ниже 55 резонансные пики отражения смещаются незначительно, что приводит к уменьшению чувствительности измерительной системы и данный метод измерения становится неэффективным.

Список литературы

1. Брандт А. А. Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах. – М.: Физматгиз, 1963. – 404 с.
2. Talmoudi O. et al. Determination of Distilled Water Dielectric Constant by 2D-FDTD Method at X-Band Frequencies // 2024 4th International Conference on Innovative Research in Applied Science, Engineering and Technology (IRASET). – IEEE. – 2024. – С. 1-5.
3. Eremenko Z. E. et al. High loss liquid dielectric characterization: Comparison of microwave waveguide and resonator measurement techniques // International Journal of Microwave and Wireless Technologies. – 2020. – Т. 12. – № 9. – P. 892-899.
4. Gulsu M. S. et al. Metamaterial-based sensor with a polycarbonate substrate for sensing the permittivity of alcoholic liquids in a WR-229 waveguide // Sensors and Actuators A: Physical. – 2020. – Т. 312. – P. 112139.
5. Sim M. S. et al. Microwave Sensors Loaded with Metamaterial-Inspired Resonators for Dielectric Material Characterization: A Review // Sensors and Actuators A: Physical. – 2024. – P. 115322.
6. Ашеко А. А., Батулин С. А. Диэлектрические свойства водных электролитных систем. IV. Частота 75, 5 ГГц // Вестник Харьковского Университета. Серия физическая «Ядра, частицы, поля». – 2011. – С. 84-88.
7. Buchner R., Hefter G. T., May P. M. Dielectric relaxation of aqueous NaCl solutions // The Journal of Physical Chemistry A. – 1999. – V. 103. – № 1. – P. 1-9.
8. Liu C. et al. Microwave sensors and their applications in permittivity measurement // Sensors. – 2024. – V. 24. – № 23. – P. 7696.
9. Gun L. et al. Effective permittivity of biological tissue: comparison of theoretical model and experiment // Mathematical Problems in Engineering. – 2017. – V. 2017. – № 1. – P. 7249672.
10. Kratzenberg E. et al. Complex permittivity measurements of chicken blood // Microwave and optical Technology letters. – 2003. – V. 39. – № 1. – P. 54-56.
11. Jaspard F., Nadi M. Dielectric properties of blood: an investigation of temperature dependence // Physiological measurement. – 2002. – V. 23. – № 3. – P. 547.
12. Abdalla S. Complex permittivity of blood cells and E. coli suspensions // Journal of Molecular Liquids. – 2011. – V. 160. – № 3. – P. 130-135.
13. Горин Д. А. и др. Влияние микроволнового излучения на полимерные микрокапсулы с неорганическими наночастицами // Письма в ЖТФ. – 2006. – Т. 32. – Вып. 2. – С. 45-50.
14. Сергеев С. А. и др. Исследование свойств водотопливных эмульсий с наночастицами магнетита на сверхвысоких частотах // В мире научных открытий. – 2014. – № 4(52). – С. 148-160.
15. Sergeev S. A. et al. Investigation of absorption and reflection spectra of aqueous suspensions of nanoparticles in the X band of microwave bandwidth // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering Saratov Fall Meeting 2006. – Saratov, 2007. – P. 653606.
16. Сергеев С. А. и др. Коллоиды магнетита: получение и исследование свойств в СВЧ диапазоне // Полупроводниковая электроника и молекулярные нанотехнологии: сб. статей. – Саратов: Наука, 2013. – С. 214-228.
17. Михайлов А. И. др. Современные компьютерные технологии. Персональный компьютер в инженерной практике. – Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011. – 240 с.
18. Сергеев С. А., Сысоев И. В. Компьютер в физической лаборатории: учеб.-метод. пособие. – Саратов: Изд-во «Саратовский источник», 2013. – 304 с.
19. Синёв И. В. и др. Основы программирования для задач биофизики и материаловедения: учеб. пособие. – Саратов: Изд-во «Амирит», 2017. – 308 с.
20. Сергеев С. А. и др. Автоматизированная установка для измерения спектров КСВН и пропускания жидких диэлектриков // Электроника и микроэлектроника СВЧ. – 2019. – Т. 1. – № 1. – С. 439-444.
21. Рябов Е. А. и др. Автоматизированная установка для измерения спектров КСВН и пропускания коллоидов микро- и наночастиц // Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и

- оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами: сборник статей шестой Всероссийской научной школы-семинара. – Саратов: Саратовский источник, 2019. – С. 188-191.
22. Рябов Е. А. и др. Установка для измерения спектров КСВН и пропускания жидких диэлектриков // Нанoeлектроника, нанофотоника и нелинейная физика: тез. докл. – Саратов: Техно-Декор, 2019. – С. 214-216.
 23. Рябов Е. А. и др. Модифицированная установка для измерения спектров КСВН и пропускания жидких диэлектриков // Электроника и микроэлектроника СВЧ. – 2021. – Т. 1. – № 1. – С. 586-589.
 24. Liebig T. et al. OpenEMS—A free and open source equivalent-circuit (EC) FDTD simulation platform supporting cylindrical coordinates suitable for the analysis of traveling wave MRI applications // International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields. – 2013. – V. 26. – Is. 6. – P. 680-696.
 25. Рябов Е. А. и др. Исследование свойств материалов в прямоугольном волноводе методом FDTD // Электроника и микроэлектроника СВЧ. – 2022. – Т. 1. – С. 555-559.