

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г.
ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра физики твёрдого тела

**Исследование частотной зависимости диэлектрической проницаемости
водно-спиртовых растворов и их применение в жидкостных
согласованных СВЧ-нагрузках**

наименование темы выпускной квалификационной работы полужирным шрифтом

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА

студента 4 курса 4051 группы

Направления (специальности) 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника»
код и наименование направления (специальности)

Институт физики

наименование факультета, института, колледжа

Гребнев Алексей Сергеевич

фамилия, имя, отчество

Научные руководители:

д.ф.-м.н., профессор

должность, уч. степень, уч. звание

 15.06.2022
подпись, дата

А.В. Скрипаль

инициалы, фамилия

к.ф.-м.н. доцент

должность, уч. степень, уч. звание

 15.06.2022
подпись, дата

А.П. Фролов

инициалы, фамилия

Зав. кафедрой:

д.ф.-м.н., профессор

должность, уч. степень, уч. звание

 15.06.2022
подпись, дата

А.В. Скрипаль

инициалы, фамилия

Саратов, 2022

Введение

Целью данной работы является изучение диэлектрической проницаемости водных растворов, раствора глицерин-вода. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- 1) рассмотреть взаимодействие электрического поля с диэлектриком.
- 2) изучить методы измерения диэлектрической проницаемости в диапазоне сверхвысоких частот.
- 3) рассмотреть на примере полярных жидкостей (в частности сильные спирты, глицерин) и неполярных жидкостей (мицеллярная вода, вакуумное масло) параметров жидкостей для согласованной нагрузки.

Целью бакалаврской работы являлось исследование частотной зависимости диэлектрической проницаемости водно-спиртовых растворов и их применение жидкостных согласованных СВЧ-нагрузках .

1.Согласованные СВЧ-нагрузки

1.1 Распределенные согласованные нагрузки.

Согласованные нагрузки (в разной литературе сокращают это название до СН)- служат для полного или частичного поглощения сверхвысоко частотных нагрузок (мощностей) передаваемые по линии передачи. Технически согласованные нагрузки имеют такие параметры как КСВ (Коэффициент стоячей волны) более 1.

КСВ- физическая величина, отношения максимального значения амплитуды напряженности магнитного или электрического поля стоячей волны в пучностях к амплитуде в узлах.

1.2 Коаксиальные согласованные нагрузки

В таком виде тракта используется тракт с сосредоточенным резистором у которого сопротивление будет равно волновому сопротивлению всей линии. Хорошее согласование достигается уменьшением размера резистора в разы меньше длины линии. Чаще всего в использование или на производстве

используют коаксиальные нагрузки в которых основной проводник выполнен в виде керамического цилиндра покрытой проводящей пленкой. Этот вид нагрузки так же не совсем практичен, потому что при подборе размера можно выбрать совсем маленький размер резистора из-за чего согласование опять возрастет.

1.3 Жидкостные СВЧ нагрузки

Нагрузка состоит из прямоугольного волновода, поглощающую жидкость в сосуде (чаще всего в металлическом), герметичной перегородки отделяющую внутренний объем волновода от жидкости. Герметичная перегородка представляет с собой две пластины, которые стыкуются между собой и пластине, которая лежит перпендикулярно широкой стенке и радиопрозрачную трубку с поглощающей жидкостью внутри.

2. Поляризация диэлектриков

2.2 Различие полярных и неполярных жидкостей

Любые жидкости делятся на два типа: полярные растворители и не полярные растворители. Например, вода состоит из атомов кислорода и водорода, которые в свою очередь, имеют противоположные по отношению друг другу заряды молекул. Самое главное различие между полярными жидкостями и неполярными является то, что полярные растворители растворяют полярные соединения жидкостей, а неполярные соответственно неполярные. Еще одно важное различие, то что полярные растворители имеют высокий дипольный момент, в то время как неполярные в принципе не имеют его. Одним из самых простых полярных растворителей является вода. Не полярные пентан, бензол, глицерин и т.д

2.3. Поляризация диэлектриков

Такое явление чаще всего можно увидеть в материалах, в которых идёт образование внешнего электрического поля.

Поляризация диэлектриков является термином, который применяется для описания поведения материала с подобными свойствами, располагающегося во

внешнем поле. Связанные частицы образуются, когда идет взаимодействие электрического поля и частиц уже существующих, расположенных на конденсаторе. Они формируются вследствие контакта конденсаторных пластин конденсатора, а свободные заряды в это же время получают возможность свободного передвижения. Используя модель конденсатора, представляется возможным определить значение диэлектрической проницаемости. Для этого вычисляют показатель относительной проницаемости, используя значение ёмкости так называемого эталонного конденсатора.

2.3.1 Электронная поляризация

Возникает одновременно при активном воздействии электрического поля. В этом случае ядро атома вместе с его электронным облаком движутся во взаимно противоположных направлениях. В результате они удаляются друг от друга, а образующийся диполь обладает крайне малыми размерами. Соответственно эффект поляризации, если и возникает, то имеет весьма незначительные объём и влияние.

2.2.2 Ионная поляризация

В некоторых твёрдых веществах-диэлектриках, например, в керамике, ионы в кристаллической решетке размещаются симметрично, естественно, что в таком случае поляризация отсутствует. При введении частиц разной полярности, то направление их притягивание будет происходить в разных друг от друга направлениях.

2.2.3 Самопроизвольная поляризация

Такой вид поляризации рассматривается, когда есть заряды, как положительные так и отрицательные и чаще всего самопроизвольная поляризация присутствует в кристаллах, имеющие отрицательный заряд и положительный заряд. Поляризация в кристаллах может измениться, если на него воздействовать электрическим полем и называются такие материалы сегнетоэлектриками. Отличным примером служит соль состоящая из BaTiO_3 , в которой заряды, как положительные, так и отрицательные считаются

разделенными. Под воздействием электрического поля диполи создают вид доменов и движутся в одном направлении, а отставание между ними принято называть гистерезисом.

2.4 Зависимость диэлектрической проницаемости от частоты

С увеличением частоты в области низких частот ϵ полярных диэлектриков остается постоянной до тех пор, пока время релаксации дипольных молекул остается меньше полупериода электрического поля.

В диэлектриках сложной структуры при наличии в них нескольких физических механизмов поляризации, например, за счет различных полярных групп молекул или нескольких компонентов смешанного диэлектрика с различными временами релаксации в зависимости от частоты, может наблюдаться несколько областей дисперсии.

3 Методы измерения диэлектрической проницаемости в диапазоне сверхвысоких частот

3.1 Резонансные методы

Достоинства резонансного метода: 1) при измерениях требуется небольшое количество измеряемого материала; 2) нет необходимости измерения комплексных коэффициентов передачи и отражения, достаточно знать лишь амплитудные значения коэффициента отражения; 3) взамен дорогостоящего векторного анализатора цепей может быть использован более дешевый скалярный анализатор.

Недостатки резонансного метода: 1) требуется несколько образцов волноводных резонаторов с разной собственной частотой резонанса для измерения исследуемого образца материала в широком диапазоне частот; 2) высокие требования к точности изготовления волноводных резонаторов; 3) искажения частотной зависимости коэффициента отражения из-за паразитных отражений и переотражений в волноводном тракте.

3.2 Волноводные методы

Волноводные методы - это методы в основу которых входят матричный элемент рассеивания, в который помещён испытуемый образец (он должен быть в виде пластинного типа. Сечение волновода заполняется поперёк.

Для таких методов часто все используют специальную камеру Метод, в которую помещён материал в виде с определенной толщиной (рис. 10). Для предположения возьмём, что образец является немагнитным, а её проницаемости равна единице. Сечение волновода заполняется поперёк.

3.3 Измерения в свободном пространстве

Применение такого метода используется, если есть материал, имеющий большую площадь как показано на рисунке ниже. То есть замеряются коэффициент передачи и коэффициент отражения
Достоинства: требуется пару образцов для испытаний, а также есть возможность исследований под действием большой температуры.

Недостатки: можно отнести оборудование, которое стоит больших денег, а также их поверка для дальнейших исследований.

3.4 Коаксиальные методы

В коаксиальном измерительном тракте используется волна основного Т-типа. Волновое сопротивление коаксиальной линии

Напряжение и ток бегущей волны в коаксиальной линии определяются однознач

Результаты измерений комплексной диэлектрической проницаемости и её частотных зависимостей, диаграммы Коула-Коула раствора глицерина.

Для проведения испытаний был выбран коаксиальный метод, а перед началом самой работы мы убедились, что приборы исправны, проведена калибровка. Частотность от десяти мегагерц до 40 гигагерц.

Исследуемые материалы: дистиллированная вода, глицерин $C_3H_8O_3$, Вакуумное масло тип 5, обычная мицеллярная вода фирмы «Чистая линия». Вспомогательные материалы: мерный стакан объемом 100 мл, термометр.

Чтобы убедиться, что вакуумное масло и мицеллярная вода по праву считается слабыми жидкостями на параметры для согласованных нагрузок мы измерили диэлектрическую проницаемость этих жидкостей. Так же проводились измерения диэлектрической проницаемости ϵ для дистиллированной воды и 97%-го глицерина. Далее путём добавления дистиллированной воды в мерный стакан с глицерином уменьшалась концентрация глицерина вдвое. После каждого изменения концентрации раствор тщательно перемешивался, и проводились измерения. Температура раствора измерялась с помощью термометра.

В ходе эксперимента поочерёдно измерялись значения частотной зависимости диэлектрической сначала для чистой дистиллированной воды. На рисунке 20 - показано диэлектрическая комплексной проницаемость ϵ' для мицеллярной воды и вакуумного масла

Заключение

В ходе выполнения бакалаврской работы были получены следующие результаты:

Проведен анализ используемых в СВЧ-диапазоне согласованных нагрузок.

Проанализирована возможность использования в согласованных нагрузках полярных жидкостей, обладающих значительной величиной мнимой части комплексной диэлектрической проницаемости.

Рассмотрены методы измерения диэлектрической проницаемости на сверхвысоких частотах.

Выполнены измерения полярных и неполярных жидкостей методом коаксиального зонда.

Выполнены измерения действительной и мнимой частей комплексной диэлектрической проницаемости водно-спиртовых растворов.

Показано, что изменением концентрации глицерина в растворе дистиллированная вода–глицерин может быть достигнуто управление действительной и мнимой частями комплексной диэлектрической проницаемости в широком диапазоне сверхвысоких частот.

Результаты измерений свидетельствуют о возможности создания на основе водно-спиртовых растворов согласованных нагрузок, рассчитанных на работу в диапазоне частот от 1 ГГц до 40 ГГц.

Список использованных источников

1) *Таблица распределения полос радиочастот между радиослужбами Российской Федерации (статистические данные)* [Электронный ресурс]. 28.05.2022. URL: <https://digital.gov.ru/opendata/7710474375-trpch/table/>

2) Mandrić V.R., Rupčić S., Srnović M., Benšić G. Measuring the dielectric constant of paper using a parallel plate capacitor. *International journal of electrical and computer engineering systems*. 2018. Vol.9. P.1-10. <http://dx.doi.org/10.32985/ijeces.9.1.1>

3) Дьяконова О. А., Казанцев Ю. Н., Каленов Д.С. Измерительный комплекс для определения электромагнитных характеристик материалов резонаторным методом с помощью скалярных анализаторов цепей. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2017. №7. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/jul17/7/text.pdf>

4) Nicolson A.M., Ross G.F. Measurement of the intrinsic properties of materials by time domain techniques. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 1970. No.4. P.377-382. <https://doi.org/10.1109/TIM.1970.4313932>

- 5) Sahin S., Nahar N.K., Sertel K. Simplified Nicolson-Ross-Weir Method for Material Characterization Using Single-Port Measurements. *IEEE Trans. On terahertz science and technology*. 2020. Vol.10. No.4. P.404-410. <https://doi.org/10.1109/TTHZ.2020.2980442>
- 6) Luukkonen O., Maslovski S.I., Tretyakov S.A. Stepwise Nicolson-Ross-Weir-Based Material Parameter Extraction Method. *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* 2011. No.10. P.1295-1298. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2011.2175897>
- 7) Rothwell E. J., Frasca J. L., Ellison S. M., Chahal P., Ouedraogo R. O. Analysis of the Nicolson-Ross-Weir Method for Characterizing the Electromagnetic Properties of Engineered Materials. *Progress In Electromagnetics Research*. 2016. No.157. P.31-47. <http://dx.doi.org/10.2528/PIER16071706>
- 8) Severo S.L.S., de Salles A.A.A., Nervis B., Zanini B. K. Non-resonant Permittivity Measurement Methods. *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*. 2017. No.1. P.297-311. <https://doi.org/10.1590/2179-10742017v16i1890>
- 9) Weir W.B. Automatic Measurement of Complex Dielectric Constant and Permeability at Microwave Frequencies. *Proceedings of the IEEE*. 1974. No.1. P.3-36. <https://doi.org/10.1109/PROC.1974.9382>
- 10) Klygach D., Vakhitov M., Khashimov A., Zhivulin V., Vinnik D., Sherstyuk D. Determination of the Optimal Sample Size for Measurement in a Coaxial Transmission Line. *Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBREIT)*. 2020. P.322-325. <https://doi.org/10.1109/USBREIT48449.2020.9117619>
- 11) Agilent. *Basics of Measuring the Dielectric Properties of Materials. Application Note*. [Электронный ресурс]. 28.05.2022. URL: http://academy.cba.mit.edu/classes/input_devices/meas.pdf
- 12) Keysight Technologies. *Basics of Measuring the Dielectric Properties of Materials. Application Note*. [Электронный ресурс]. 28.05.2022. URL:

https://www.cmc.ca/wp-content/uploads/2019/08/Basics_Of_MeasuringDielectrics_5989-2589EN.pdf

13) Беляев А.А., Романов А.М., Широков В.В., Шульдешов Е.М. Измерение диэлектрической проницаемости стеклосотопласта в свободном пространстве. *Труды ВИАМ*. 2014. №5. С.1-16.

14) Певнева Н.А., Гурский А.Л., Кострикин А.М. Метод свободного пространства с использованием векторного анализатора цепей для определения диэлектрической проницаемости материалов на сверхвысоких частотах. *Доклады БГУИР*. 2019. №4. С.32-39.

15) Gonçalves F.J.F., Pinto A.G. M., Mesquita R.C., Silva E.J., Brancaccio A. Free-Space Materials Characterization by Reflection and Transmission Measurements using Frequency-by-Frequency and Multi-Frequency Algorithms. *Electronics*. 2018. No.7. P.1-21. <https://doi.org/10.3390/electronics7100260>

16) Tarkhov, A. G. Concerning the dispersion of electrical properties of rocks / A. G. Tarkhov, // Trans. Moscow Geol.-Prospect. Inst. – 1956 – № 29. – P. 234–236.

17) Wagner, N. Broadband electromagnetic characterization of two-port rod based transmission lines for dielectric spectroscopy in soils / N. Wagner, B. Muller, K. Kupfer, M. Schwing, A. Scheuermann // Proceedings of the First European Conference on Moisture Measurement, Aquametry. – 2010. – P. 228–237.

18) Свойства диэлектриков на СВЧ / В. И. Воропаев [и др.] // Измерительная техника. – 2004. – № 9. – С. 16–18.

19) Дебай, П. Полярные молекулы: пер. с нем. / П. Дебай – М.-Л. : ГНТИ, 1931. – 247 с. 20. Дерягин, Б. В. Смачивающие пленки / Б. В. Дерягин, Н. В. Чураев. – М. : Наука, 1984. – 160 с.

20) Брандт, А. А. Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах / А. А. Брандт – М. : Изд-во физ.-мат. лит, 1963. – 404 с