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

Кафедра физики твёрдого тела

СПЕКТРЫ ПРОПУСКАНИЯ И ОТРАЖЕНИЯ КОЛЛОИДОВ НАНОЧАСТИЦ МАГНЕТИТА И ВОДНЫХ РАСТВОРОВ ПОЛИЭЛЕКТРОЛИТОВ В САНТИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

студента 4 курса 4052 группы

направления 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника»

Института физики

Иванова Никиты Максимовича

Научный руководитель:
доцент, к.ф.-м.н., доцент
должность, ученая степень, ученое звание
_____
подпись, дата
С.А. Сергеев
инициалы, фамилия

Зав. кафедрой физики твёрдого тела: д.ф.-м.н., профессор
должность, ученая степень, ученое звание
_____
подпись, дата
Ал.В. Скрипаль
инициалы, фамилия

Саратов 2025

ВВЕДЕНИЕ

Определение таких параметров как коэффициент отражения и поглощения является ключевыми в исследовании диэлектрических и магнитных параметров различных жидких веществ [1]. Известно несколько методов измерения диэлектрических и магнитных параметров материалов на сверхвысоких частотах [2, 3]. Одним из методов таких методов является волноводный метод. Для коллоидных и эмульсионных систем, учитывая их специфику, он является одним из корректных методов измерения [4, 5].

Большинство известных СВЧ-методов и устройств измерения электрофизических параметров жидких сред обладают следующими недостатками: низкой точностью измерений из-за наличия больших потерь электромагнитной энергии в поверхностном слое металлических стенок измерительной камеры по причине наличия гальванического контакта с исследуемым материалом; невозможностью измерения электрофизических параметров малых объемов жидких и твердых сред; сложностью учета частотной дисперсии диэлектрической проницаемости материалов; громоздкостью и сложностью конструкции; высокой стоимостью реализующего устройства [6].

В связи с этим **целью** работы является отработка методики экспериментального исследования и измерение спектров пропускания и отражения водных растворов наночастиц магнетита и полиэлектролитов в сантиметровом диапазоне.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Поиск и анализ периодической литературы, посвященной вопросам применения микроволнового излучения, его воздействия на следующие вещества: воду, полимеры, водные растворы органических и неорганических веществ, органические и неорганические вещества, биологические клетки, сухие вещества, нанокомпозитные материалы, микрокапсулы.

2. Отработка методики экспериментального исследования и измерение спектров пропускания и отражения СВЧ мощности от частоты излучения в 3-см диапазоне микроволнового излучения для следующих систем:

- дистиллированная вода;
- 0,5 М раствор хлорида натрия (NaCl);
- водные растворы наночастиц магнетита (Fe_3O_4);
- водные растворы поли(аллиламина) гидрохлорида (poly(allylamine hydrochloride) (ПАА (PAH, англ.)) и поли(стиролсульфоната) натрия (poly(styrene sulfonate) (ПСС (PSS, англ.)) в 0,5 М растворе NaCl;
- смесь двух полиэлектролитов PAH и PSS в водном растворе 0,5 М NaCl.

Выпускная работа занимает 51 страницу, состоит из введения, теоретической и практической частей, заключения, имеет 24 рисунка и 12 таблиц в приложении. Обзор составлен по 35 информационным источникам.

Исследование свойств жидких диэлектриков в СВЧ диапазоне

Для измерения и воспроизведения на экране ЭЛТ частотных характеристик КСВН и ослабления элементов волноводных каналов использовался измеритель КСВН панорамный Р2-61, диапазон рабочих частот от 7,8 ГГц до 12,5 ГГц, сечение волноводного тракта 23×10 мм.

Работа измерителя основана на принципе рефлектометрараздельного выделения сигналов, пропорциональных мощности падающей от генератора и отраженной от измеряемого объекта (при измерении КСВН) или прошедшей через измеряемый объект (при измерении ослабления) волн.

Сигналы, пропорциональные падающей и отраженной мощностям, снимаются с детекторных головок, встроенных во вторичных трактах направленных детекторов. Уровень напряжения на выходе детекторной головки направленного детектора падающей волны поддерживается постоянным системой АРМ генератора.

Уровень напряжения на выходе детекторной головки направленного детектора отраженной волны, при условии квадратичного детектирования,

пропорционален квадрату коэффициента отражения измеряемой нагрузки на частоте измерения. Шкалы индикатора рассчитаны на квадратичность детектирования и проградуированы непосредственно в значениях КСВН и ослабления. Измерения КСВН и ослабления может производиться как в автоматическом, так и в ручном режимах перестройки частоты.

Методика расчёта диэлектрической проницаемости жидких диэлектриков

Определение диэлектрических и магнитных параметров нанокомпозитных материалов и наноструктур с различной геометрией является актуальной задачей нанотехнологии и наноэлектроники. Однако эти параметры, как правило, недоступны для экспериментального измерения (ввиду композитного характера материалов) [7, 8], что приводит к необходимости применять методы математического моделирования [9].

Использовались известные соотношения коэффициентов отражения и пропускания, которые получены из решения уравнений Максвелла для части волновода, полностью заполненной веществом [10, 11].

Выражение для комплексного коэффициента отражения электромагнитной волны от слоя жидкого диэлектрика в волноводе может быть представлено в следующем виде:

$$R = \frac{(\gamma_0{}^2 - \gamma_0{}^2) \cdot i\sin(\gamma L)}{2\gamma_0\gamma \cdot \cos(\gamma L) + (\gamma_0{}^2 + \gamma^2) \cdot i\sin(\gamma L)}.$$

А коэффициент пропускания может быть найден по формуле

$$T = \frac{2\gamma_0\gamma}{2\gamma_0\gamma \cdot \cos(\gamma L) + (\gamma_0{}^2 + \gamma^2) \cdot i\sin(\gamma L)},$$

где γ_0 – постоянная распространения волны в пустом волноводе, γ – постоянная распространения волны в заполненном волноводе

$$\gamma_0 = \sqrt{\omega^2\varepsilon_0\mu_0 - \left(\frac{\pi}{a}\right)^2}\ ,\ \gamma = \sqrt{\omega^2\varepsilon_0\varepsilon\mu_0\mu - \left(\frac{\pi}{a}\right)^2}\ ,$$

$\omega = 2\pi f$ – круговая частота, f – частота, ε_0 – диэлектрическая постоянная вакуума, $\varepsilon = \varepsilon' + j\varepsilon''$– комплексная диэлектрическая постоянная исследуемого вещества в волноводе, a – ширина волновода, μ_0 – магнитная постоянная вакуума, μ – магнитная постоянная исследуемого вещества, L – длина заполненной части волновода. Мнимая и действительная части комплексной диэлектрической проницаемости связаны между собой соотношением: $\varepsilon''=\varepsilon' \operatorname{tg}\delta$. Мнимую часть комплексной диэлектрической проницаемости называют коэффициентом диэлектрических потерь.

Диэлектрическая проницаемость определяется следующим образом. Варьируя действительную и мнимую компоненты диэлектрической проницаемости, вычисляют значения коэффициента отражения на частотах, на которых производилось его экспериментальное определение. Наиболее удачным считается приближение (ε', ε"), при котором сумма квадратов разностей теоретического и практического коэффициентов отражений минимальна.

Методика проведения измерений и анализ спектров пропускания и КСВН жидких диэлектриков

Разработана методика проведения измерения спектров пропускания и КСВН жидких диэлектриков: волновод закреплялся строго вертикально и в определенном месте располагалась волноводная секция с устройством для загрузки диэлектрика с тонкой слабопоглощающей в СВЧ пробкой снизу; через отверстие загружался минимальный объем диэлектрика и проводились необходимые измерения. Первые измерения прошедшей мощности проводились для минимального количества вещества (длина взаимодействия 1 мм), далее не разбирая волноводную конструкцию, выкручивался винт, добавлялось рабочее вещество, проводилось второе измерение. Всего проводилось шесть измерений частотных спектров прошедшей мощности. Затем волновод промывался и аналогично проводились измерения частотных спектров прошедшей мощности для всех жидких диэлектриков. Затем вертикальная волноводная конструкция

собиралась для проведения измерения КСВН и проводились шесть измерений спектров КСВН для каждого диэлектрика.

Процедура повторялась для всех объемов веществ: № 1 - 200 мкл (длина взаимодействия 1 мм), № 2 - 400 мкл (2 мм), № 3 - 600 мкл (3 мм), № 4 - 700 мкл (4 мм), № 5 - 900 мкл (5 мм), № 6 - 1200 мкл (6 мм). Рабочий диапазон частот 7,8 ÷ 12,5 ГГц, измерения проводились с шагом 0,2 ГГц в режиме амплитудной модуляции и непрерывной генерации. Рабочие вещества необходимого объема добавлялись в волновод при помощи 1-канальной автоматической пипетки Gilson Pipetman Neo P100N, 10-100 мкл.

Измерения были проведены для следующих жидких диэлектриков:

- дистиллированная вода;
- 0,5 М раствор хлорида натрия (NaCl);
- водные растворы наночастиц магнетита (Fe_3O_4);
- водные растворы поли(аллиламина) гидрохлорида (PAH) и поли(стиролсульфоната) натрия (PSS) в 0,5 М растворе NaCl;
- смесь двух полиэтектролитов PAH и PSS в водном растворе 0,5 М NaCl.

Объектом экспериментального исследования были синтетические полиэлектролиты, наиболее часто используемые в методе полиионной сборки: поликатиона поли(аллиламина) гидрохлорида (ПАА, (PAH, англ.)) и полианиона поли(стиролсульфонат) натрия (ПСС (PSS, англ.)), растворимые в воде.

Объектом экспериментального исследования была также водная суспензия наночастиц магнетита (Fe_3O_4). Для определения размеров наночастиц Fe_3O_4 использовался просвечивающий электронный микроскоп (ПЭМ) и Malvern Zetasizer Nano ZS. Размер наночастиц магнетита для водной суспензии был измерен с помощью установки Malvern Zetasizer Nano ZS (метод DLS) и составил величину порядка 12 нм. Размер наночастиц магнетита, полученный с помощью установки Malvern Zetasizer Nano ZS и установки ПЭМ совпадают, что говорит о достоверности полученных данных.

Коэффициент поглощения – безразмерная физическая величина, характеризующая способность тела поглощать падающее на него излучение. В качестве буквенного обозначения обычно используется греческая α.

Численно коэффициент поглощения равен отношению потока излучения, поглощенного телом, к потоку излучения, упавшего на тело.

Коэффициент поглощения СВЧ излучения был рассчитан из полученных частотных спектров КСВН и ослабления по формуле:

$$\alpha = 100\% - T - R,$$

где α – коэффициент поглощения, R – коэффициент отражения, T – коэффициент пропускания:

$$T = 10^{(\text{ослабление} / 10)} \times 100\%,\ R = ((\text{КСВН} - 1)/(\text{КСВН} + 1)) \times 100\%.$$

Измерение и анализ спектров пропускания жидких диэлектриков

Были измерены частотные зависимости мощности прошедшего сигнала в диапазоне от 7,8 ГГц до 12,5 ГГц для следующих систем: дистиллированная вода; 0,5 мольный раствор NaCl; водные растворы наночастицы магнетита; водные растворы поли(аллиламина) гидрохлорида и поли(стиролсульфоната) натрия в 0,5 М растворе NaCl, а также смесь полиэтектролитов PAH и PSS в водном растворе 0,5 М NaCl.

Для объема 200 мкл (длина взаимодействия 1 мм) наименьшим пропусканием обладают следующие системы: вода, водный коллоид наночастиц магнетита и 0,5 мольный раствор хлорида натрия. Максимальное пропускание у раствора PSS.

Наименьшее пропускание для объема 400 мкл (длина взаимодействия 2 мм) наблюдается для воды и 0,5 мольного раствора NaCl, наибольшее – у водного раствора наночастиц магнетита и комплекса PAH+PSS.

Для объема 600 мкл (длина взаимодействия 3 мм) в наблюдаемых спектрах спектральные линии расположены близко друг к другу и мало зависят от исследуемого вещества, что затрудняет анализ.

Наименьшее пропускание для объема 700 (длина взаимодействия 4 мм) мкл для водных суспензий наночастиц магнетита в диапазоне от 9,8 до

12,5 ГГц, а от 7,8 до 9,8 ГГЦ самое низкое пропускание наблюдается у воды. Спектральные линии на графике зависимостей уже достаточно удалены друг от друга, что упрощает анализ.

Наибольшее пропускание для объема 900 мкл (длина взаимодействия 5 мм) наблюдается для водного раствора наночастиц магнетита и PAH, а наименьшее для воды во всем диапазоне частот.

Для максимального объема 1200 мкл (длина взаимодействия 6 мм) наблюдается наименьшее ослабление для водного раствора PAH и наименьшее прохождение для комплекса PAH+PSS.

Анализ спектров пропускания позволяет сделать следующие выводы:

1. С увеличением объема исследуемого вещества проходящая мощность уменьшается.

2. Спектральные линии начинают существенно отличаться, начиная с объема 700 мкл (длина взаимодействия 4 мм).

3. Наиболее удачные для проведения анализа спектры прошедшего сигнала получились для объема 900 мкл (длина взаимодействия 5 мм).

Измерение и анализ спектров КСВН жидких диэлектриков

Вещество, как и при измерениях спектров пропускания, помещали в волновод, меняя частоту от 7,8 до 12,5 ГГЦ. С помощью индикатора КСВН и ослабления Я2Р-67 на экране электронно-лучевой трубки наблюдали частотные характеристики КСВН.

Были получены спектры КСВН от частоты излучения для всех вышеперечисленных систем.

Чем больше значение КСВН, тем большая мощность отражается от исследуемого объекта. Наименьшую мощность для объема 200 мкл (длина взаимодействия 1 мм) отражает комплекс PAH+PSS и PAH. Наибольшую мощность в диапазоне от 7,8 до 9 ГГц отражает раствор наночастиц магнетита, после 9 ГГц – вода.

При объеме 400 мкл (длина взаимодействия 2 мм) водный раствор наночастиц магнетита имеет наименьшее отражение, остальные зависимости анализировать достаточно сложно.

Для объемов 600, 700, 900 и 1200 мкл анализ графиков наиболее затруднителен в связи с высокой плотностью спектров КСВН.

На графиках зависимостей КСВН от частоты для объемов 600, 900 и 1200 мл наблюдаются минимумы: для объема 600 мл на частоте 8,4 ГГц, для 900 мл – 8,6 ГГц, для 1200 мл – 8,8 ГГц. На всех графиках наблюдается максимум на частотах 9,6-9,8 ГГц, наиболее ярко он виден на графике зависимостей для объема 200 мл.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в ходе выполнения выпускной квалификационной работы был проведен поиск и анализ периодической литературы, посвященной вопросам применения микроволнового излучения, его воздействия на следующие вещества: воду, полимеры, водные растворы органических и неорганических веществ, органические и неорганические вещества, биологические клетки, сухие вещества, нанокомпозитные материалы, микрокапсулы.

Отработана методика экспериментального определения спектров пропускания и КСВН жидких диэлектриков.

Были получены частотные спектры КСВН и пропускания в диапазоне частот от 7,8 до 12,5 ГГц для следующих исследуемых жидкостей: дистиллированная вода, 0,5 М водный раствор хлорида натрия, водные растворы наночастиц магнетита, водные растворы поли(аллиламина) гидрохлорида и поли(стиролсульфоната) натрия и их смесь в 0,5 М растворе хлорида натрия.

Экспериментально установлено, что с увеличением объема исследуемых веществ пропускание уменьшается; спектральные линии начиная с объема 700 мкл существенно отличаются; объем 900 мкл (длина

взаимодействия 5 мм) наиболее удачен для проведения анализа спектров прошедшего сигнала в исследуемых жидкостях.

Спектры КСВН для всех исследуемых объемов и всех диэлектриков различаются незначительно, что затрудняет анализ диэлектриков на их основе.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Лощилов А.Г., Семёнов Э.В., Малютин Н.Д. Экспериментальная установка для исследования характеристик нелинейности СВЧ-цепей в режиме сверхширокополосного импульсного воздействия // Доклады ТУСУРа. 2010. № 2 (22). С. 161-165.
2. Брандт А.А. Исследование диэлектриков на СВЧ. М.: Физматгиз, 1963. 404 с.
3. Беляев Б.А., Лексиков А.А., Тюрнев В.В. Микрополосковый метод исследования диэлектрической проницаемости материалов на сверхвысоких частотах // Приборы и техника эксперимента. 1995. № 6. С. 123.
4. Демянов А.А., Семенов М.Г., Тамарин В.А. Измерение комплексной диэлектрической проницаемости сильнопоглощающих жидкостей // Приборы и техника эксперимента. 1974. № 3. С. 132-133.
5. Дьяконова О.А., Казанцев Ю.Н., Маречек С.В. Измерения коэффициента генерации гармоник радиопоглощающим материалом в СВЧ-диапазоне // Приборы и техника эксперимента. 2011. № 2. С. 58-65.
6. Котов И.О., Чернышов В.Н. СВЧ-метод и устройство определения электрофизических параметров ферромагнитных жидкостей на базе критичного волновода // Вестник ТГТУ. 2010. Т. 16, № 2. С. 303-313.
7. Solymar L. Shamonina E. Waves in Metamaterials // Contemporary Physics 2010. Vol. 51, Is. 6. P. 545-546.
8. Zharova N.A. Nonlinear Transmission and Spatiotemporal Solutions in Metamaterials whith Negative Refraction // Optics Express. 2005. Vol. 13. № 4. P. 1291-1298.

9. Shestopalov Y.V. Development of Mathematical Methods for Reconstructing Complex Permittivity of a Scatterer in a Waveguide // Proceedings of 5th International Workshop on Electromagnetic Wave Scattering, Antaliya, 2008.
10. Арапов Ю.Г., Давыдов А.Б. Волновые методы измерения электрофизических параметров полупроводников на СВЧ // Дефектоскопия. 1978. № 1 С. 63-67.
11. Усанов Д.А. СВЧ-методы измерения параметров полупроводников. – Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1985. 56 с.