

Министерство образования и науки Российской Федерации  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра физики твердого тела

«Исследование температурной зависимости электрофизических  
параметров жидких диэлектриков в диапазоне сверхвысоких частот»

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

Студента 4 курса 411 группы

направления 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника»

факультета нано- и биомедицинских технологий

Халитова Руслана Рустемовича

Научный руководитель

доцент, к.ф.-.м.н..

\_\_\_\_\_  
должность, уч. степень, уч. звание

А.П. Фролов

\_\_\_\_\_  
инициалы, фамилия

Научный руководитель

профессор, д.ф.-.м.н.

\_\_\_\_\_  
должность, уч. степень, уч. звание

А.В. Скрипаль

\_\_\_\_\_  
инициалы, фамилия

Зав. кафедрой

профессор, д.ф.-.м.н.

\_\_\_\_\_  
должность, уч. степень, уч. звание

Д.А. Усанов

\_\_\_\_\_  
инициалы, фамилия

Саратов 2016

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время разработано большое количество методов для определения электрофизических параметров веществ в СВЧ – диапазоне. Данные методы помогают для производства современных приборов, реализации новейших технологий создания электронных систем и компонентов и получения новых веществ с уникальными свойствами. Большую роль эти методы измерения играют при исследовании материалов и структур, используемых при создании приборов СВЧ электроники, так как информация, полученная с помощью низкочастотных методов, при переходе в СВЧ - диапазон может оказаться недостаточной для конструирования СВЧ устройств с заданными характеристиками.

СВЧ - методы измерения параметров материалов обладают рядом важных преимуществ: они являются бесконтактными методами, позволяют проводить исследование в широком температурном интервале, дают возможность изучения анизотропных полупроводниковых материалов, порошкообразных материалов и образцов произвольной формы, позволяют изучать эффекты в сильных полях и явления резонансного взаимодействия электромагнитного излучения с веществом. Недостатками СВЧ - методов измерения, препятствующими их широкому применению в производстве и в научных исследованиях, являются необходимость в сложной и дорогостоящей регистрирующей аппаратуре и невозможность в большинстве случаев получить простые и точные соотношения, связывающие измеряемые параметры образца материала с характеристиками СВЧ – колебаний [1].

В основе СВЧ - методов лежат эффекты поглощения электромагнитной энергии свободными носителями заряда, инерционности движения свободных носителей заряда в поле СВЧ - волны, поворота плоскости поляризации волны в присутствии постоянного магнитного поля, резонансного поглощения электромагнитной энергии и другие эффекты в материалах в СВЧ - диапазоне. По типу используемой электродинамической

системы СВЧ - методы можно разделить на волноводные, полосковые, мостовые, резонаторные и методы, использующие электромагнитные волны в свободном пространстве. Исследуемый образец может помещаться внутрь электродинамической системы, прикладываться к отверстию связи или подноситься к открытому концу линии передачи.

С помощью СВЧ - методов измерения могут быть определены диэлектрическая проницаемость и удельная проводимость материала, время жизни, эффективная масса носителей заряда, подвижность, скорость поверхностной рекомбинации, толщина слоев и другие параметры. При этом оказывается возможным проводить измерение нескольких параметров на одной установке с использованием одного образца.

Среди СВЧ - методов измерения параметров материалов микрополосковые методы выделяются технологичностью изготовления структур и оправок для измерений, простотой измерений и отсутствием жестких требований на размеры образцов. Недостатками являются потери, связанных с излучением в открытой линии передачи, и появление неоднородностей при наличии коаксиально-микрополосковых переходов.[2]

В моей работе будут исследованы параметры жидкого полярного диэлектрика. Жидкие диэлектрики - это молекулярные жидкости, удельное электрическое сопротивление которых превышает  $10^{10}$  Ом\*см. жидкие диэлектрики, как и твердые диэлектрики поляризуются в электрических полях: для них характерна электронная и ориентационная поляризация. Диэлектрическая проницаемость (статическая) жидких диэлектриков может достигать значений  $10^2$  (для частоты  $10^4$  Гц). В сильных электрических полях происходит электрический пробой жидких диэлектриков. Механизм пробоя (тепловой или электронный) зависит от природы жидкости, чистоты, температуры и др.

Полярные жидкие диэлектрики интересны тем, что применяются в электроизоляционной технике в качестве пропитывающих и заливочных составов при производстве электро - и радиотехнической аппаратуры: в электрических аппаратах высокого напряжения, а также в блоках электронной аппаратуры. По применению они делятся на: жидкости для конденсаторов, кабелей, циркулярных систем охлаждения выпрямительных установок и турбогенераторов, масляных выключателей. Электрическая прочность, теплопроводность и диэлектрическая проницаемость жидких диэлектриков имеет более высокие значения по сравнению с воздухом и другими газами при атмосферном давлении, поэтому электроизоляционные жидкие диэлектрики должны обеспечивать повышение электрической прочности твердой пористой изоляции, отвод тепла от обмоток трансформатора, гашение электрической дуги в масляных выключателях. В импульсном электрическом поле их электрическая прочность возрастает.

Целью дипломной работы является исследование температурной зависимости электрофизических параметров жидких диэлектриков на сверхвысоких частотах.

## Содержание работы

В первом разделе речь идет о методах измерения электрофизических параметров жидких диэлектриков на свч – частотах.

В первом методе используются электромагнитные волны в свободном пространстве. Эта измерительная система включает в себя измерительную ячейку с исследуемой жидкостью, приемник излучения и источник излучения. Сигнал, который идет от генератора сверхвысоких частот, отражается от поверхности жидкости и принимается приемной антенной. При этом коэффициент отражения измеряется в зависимости от того какая толщина слоя жидкости, изменяемая с помощью микрометрической системы.

Далее идут волноводные методы измерения. если мы помещаем источник электромагнитных волн в одном из концов волновода, а в другом - короткозамыкающую пластину, образуется стоячая волна. Если там есть диэлектрик, то в волноводе положение минимума стоячей волны сдвигается, и часть падающей волны поглощается диэлектриком, а значение напряженности электрического поля в минимуме стоячей волны, отлично от нуля. Соотношение, которое связывает параметры отраженной волны с диэлектрическими свойствами исследуемого образца и его толщиной имеет вид:

$$\frac{t\eta\gamma_1 \times d}{\gamma_1 \times d} = -\frac{\lambda_0}{2 \times \pi \times d} \times \frac{1-j \times \eta \times tg \beta_0 \times \chi_0}{\eta - j \times tg \beta_0 \times \chi_0}, \quad (7)$$

где  $\eta$  – коэффициент стоячей волны,  $\beta_0$  – фазовая постоянная,  $\lambda_0$  – длина волны в волноводе,  $\chi_0$  – расстояние от диэлектрика до первого узла стоячей волны,  $\gamma_1$  – постоянная распространения в жидкости,  $d$  – толщина в жидкости.

Данное уравнение является трансцендентным и решается графическими методами, а так же методом последовательных приближений с помощью.

Третий - это мостовые методы измерения основанные на применении двойных волноводных тройников. Высокочастотная мощность подается на плечо первого двойного волноводного тройника и делится на две равные части. Одна часть из плеча моста через вентиль и согласующий трансформатор попадает в ячейку с жидкостью. С выхода ячейки волна через согласующий трансформатор и вентиль попадает в плечо второго двойного тройника. Другая часть высокочастотной мощности из плеча первого моста через вентиль, аттенюатор и фазовращатель попадает во второе плечо второго двойного волноводного тройника. Измерительная ячейка состоит из двух круглых или прямоугольных волноводов. Один волновод имеет чуть меньшие размеры и может перемещаться внутри другого. Ячейка закрыта с двух сторон пластинами слюды или тефлона. На стенке волновода сделаны маленькие отверстия, через которые жидкость может поступать из резервуара или вытесняться в резервуар при перемещении подвижного волновода.

Процедура измерения заключается в определении изменения фазы волны при прохождении через жидкость и поглощенной энергии.

Резонаторные методы измерения. Для измерений электрофизических параметров веществ и исследования свойств материалов в СВЧ – диапазоне используются также резонаторные методы [8].

В методе биений сравниваются резонансные частоты двух генераторов. Первый генератор является опорным и работает на фиксированной частоте. В колебательный контур второго генератора включается эталонный переменный конденсатор. Колебания от двух генераторов подаются на смеситель, позволяющий получить разностную частоту. Изменяя переменную емкость, добиваются равенства частот генераторов. После этого к эталонному конденсатору подключают параллельно конденсатор с исследуемой жидкостью. Появляется разностная частота, которая может быть сведена к нулю изменением емкости эталонного конденсатора. Разность значений емкости эталонного конденсатора до подключения измерительного конденсатора и после его подключения равна емкости измерительного

конденсатора, а диэлектрическая проницаемость определяется по формуле:

$$\varepsilon = \frac{C_1 - C_2}{C_0}$$

**Микрополосковые методы.** Микрополосковые методы измерения позволяют определить электрофизические параметры исследуемых материалов при относительной простоте используемых измерительных систем [9].

Создано несколько различных типов микрополосковых датчиков для измерения параметров жидких диэлектриков. В одном из методов используется резонатор, состоящий из симметричной микрополосковой линии передачи и цилиндрической измерительной кюветы, в которую вводится полосковый проводник линии передачи. В этом датчике исследуемый образец всегда находится в пучности высокочастотного электрического поля. Расчет искомых параметров проводится аналогично тому, как это описано в предыдущем подразделе.

Далее идет речь о физических свойствах диэлектриков, Полярные и неполярные диэлектрики. Их применение. И их основные параметры.

### 3. Результаты измерений температурной зависимости диэлектрической проницаемости раствора спирта в диапазоне сверхвысоких частот

Для исследования диэлектрической проницаемости использовался коаксиальный метод. Перед проведением измерений была проведена калибровка. Измерения проводились в диапазоне частот 10 МГц – 40 ГГц.

Исследуемые материалы: дистиллированная вода, спирт.

Вспомогательные материалы: мерный стакан объемом 100 мл, термометр, термостат, лед.

#### 3.1 Измерение температурной зависимости диэлектрической проницаемости дистиллированной воды

В мерный стакан наливалась дистиллированная вода 50 мл. С использованием термостата и льда раствор охлаждался до необходимой температуры (4 – 27 °С). Температура раствора измерялась с помощью термометра. Затем проводились измерения  $\epsilon^*$ .

На рис. 3.1 представлены частотные зависимости комплексной диэлектрической проницаемости для дистиллированной воды при изменении ее температуры.

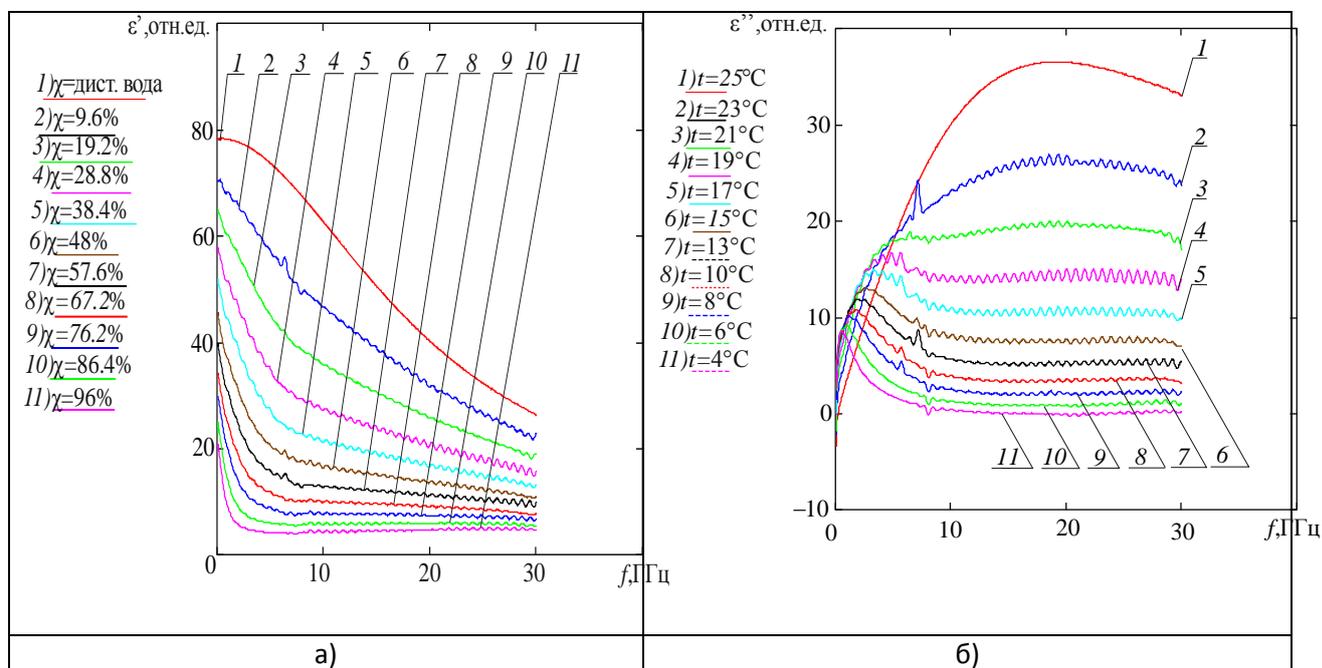


Рисунок 3.1 Зависимость действительной (а) и мнимой (б) частей комплексной диэлектрической проницаемости дистиллированной воды от частоты для различных значений температуры: 1- $t$ =4°C, 2- $t$ =6°C, 3- $t$ =8°C, 4- $t$ =10°C, 5- $t$ =13°C, 6- $t$ =15°C, 7- $t$ =17°C, 8- $t$ =19°C, 9- $t$ =21°C, 10-  $t$ =23°C, 11-  $t$ =25°C.

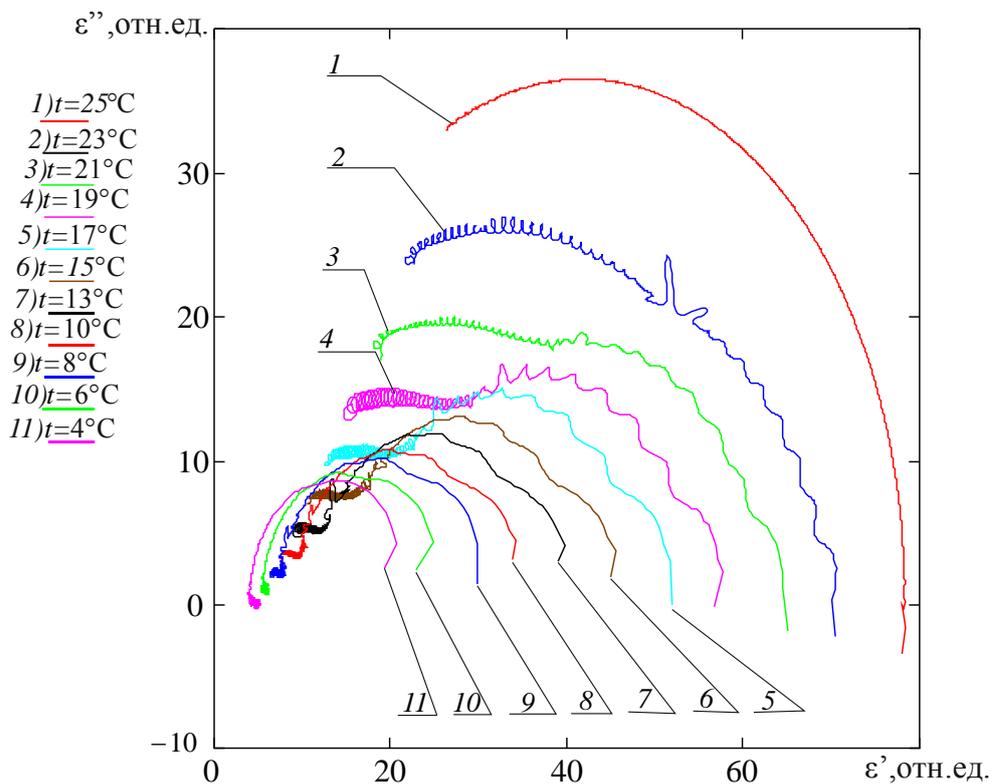


Рисунок 3.2. Диаграмма Коула – Коула для дистиллированной воды при изменении температуры (от  $t = 4^\circ\text{C}$  до  $t = 25^\circ\text{C}$ ).

**3.2 Измерение температурной зависимости диэлектрической проницаемости раствора вода – спирт, при концентрации спирта – 10%**  
 В мерный стакан наливалась дистиллированная вода 45 мл (90% от всего раствора) и смешивалась с определенным количеством спирта 5 мл (10% от всего раствора). Затем проводились измерения при комнатной температуре.

На рис. 3.3 представлены частотные зависимости комплексной диэлектрической проницаемости для дистиллированной воды при изменении ее температуры.

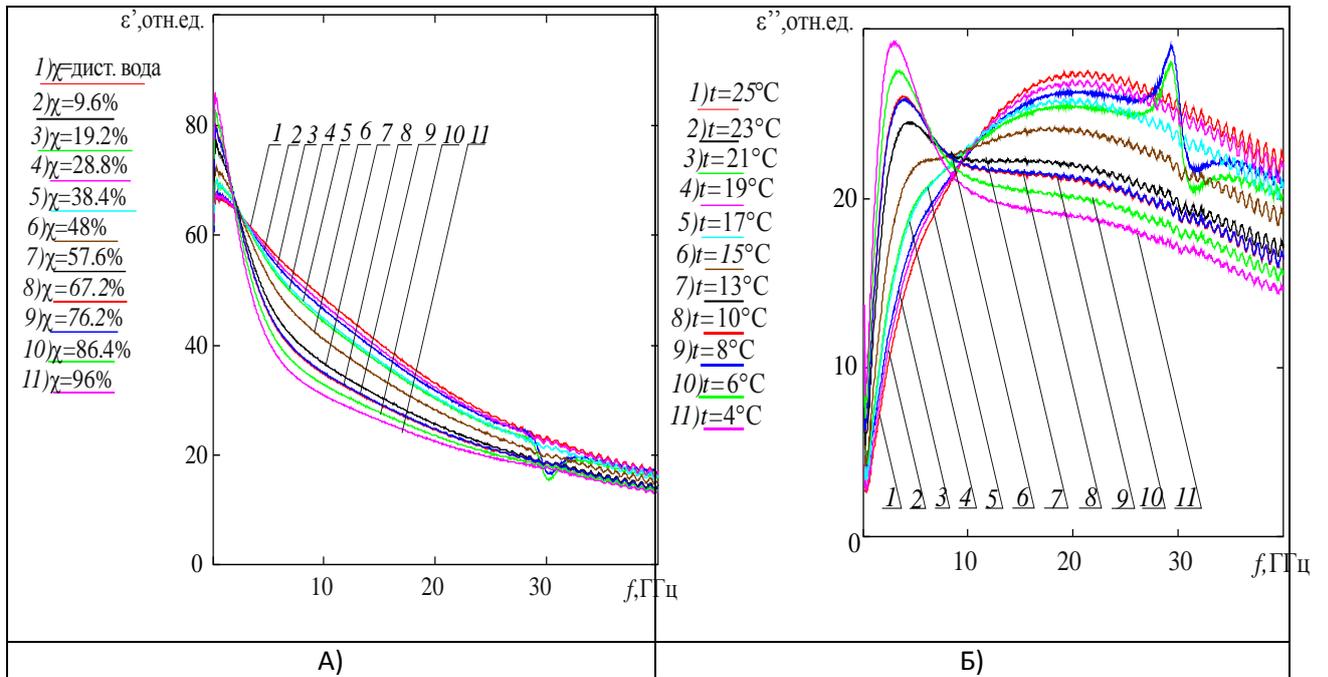


Рис. 3.3. Зависимость действительной (а) и мнимой (б) частей комплексной диэлектрической проницаемости для раствора вода-спирт от частоты для различных значений температуры: 1- $t=4^\circ\text{C}$ , 2- $t=6^\circ\text{C}$ , 3- $t=8^\circ\text{C}$ , 4- $t=10^\circ\text{C}$ , 5- $t=13^\circ\text{C}$ , 6- $t=15^\circ\text{C}$ , 7- $t=17^\circ\text{C}$ , 8- $t=19^\circ\text{C}$ , 9- $t=21^\circ\text{C}$ , 10-  $t=23^\circ\text{C}$ , 11-  $t=25^\circ\text{C}$ .

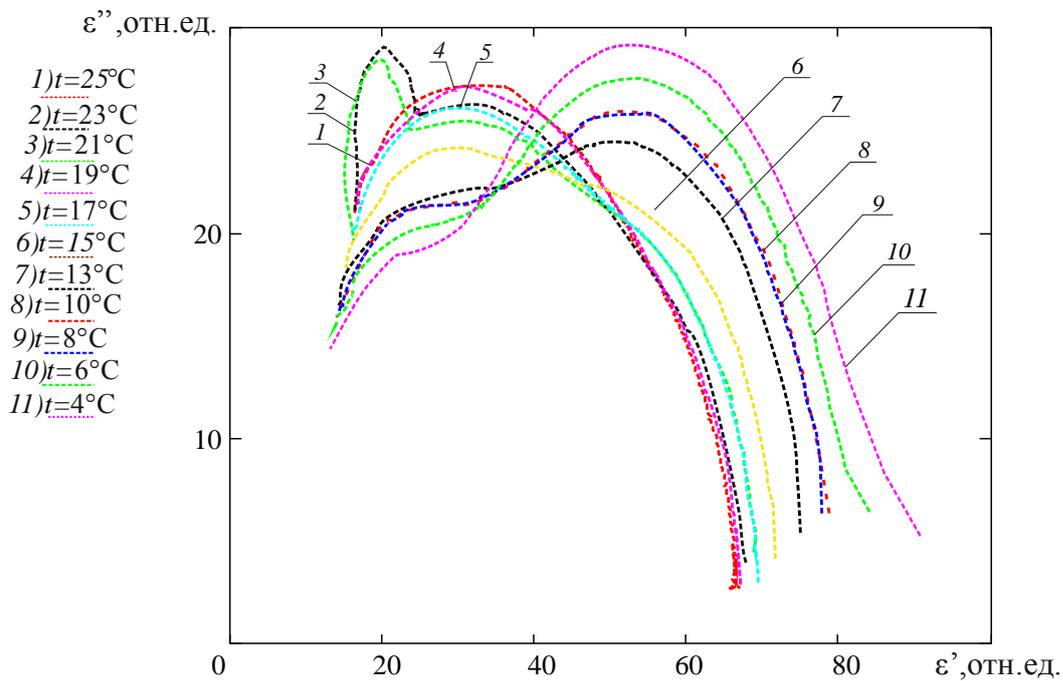


Рис. 3.4. Диаграмма Коула – Коула для раствора вода - спирт при изменении температуры.

## Заключение

В ходе выполнения данной работы были получены следующие результаты:

Проведён анализ методов измерения комплексной диэлектрической проницаемости веществ в СВЧ-диапазоне.

Описана методика проведения измерения комплексной диэлектрической проницаемости жидких диэлектриков в виде растворов полярных жидкостей при изменении температуры в СВЧ-диапазоне с использованием зонда, представляющего собой отрезок разомкнутой коаксиальной линии передачи.

Проведено измерение комплексной диэлектрической проницаемости раствора спирт-дистиллированная вода при изменении объемной доли спирта  $\chi$  в растворе.

Представлены диаграммы Коула-Коула раствора спирт-дистиллированная вода при изменении объемной доли спирта  $\chi$  в растворе.

Проведено измерение комплексной диэлектрической проницаемости раствора спирт-дистиллированная вода для фиксированной объемной доли спирта  $\chi=9.6\%$  в растворе для различных значений температуры.

Представлены диаграммы Коула-Коула для фиксированной объемной доли спирта  $\chi=9.6\%$  в растворе для различных значений температуры раствора.

Полученные зависимости позволяют сделать вывод о том, что в зависимости от частотного диапазона измерений можно получить «монотонно убывающую», «монотонно возрастающую» и практически не меняющуюся температурные зависимости действительной и мнимой частей комплексной диэлектрической проницаемости.