

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

Кафедра медицинской физики

**АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТНОЙ ЗАВИСИМОСТИ  
ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ КОМПОЗИТОВ НА  
ОСНОВЕ ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ С НАПОЛНИТЕЛЯМИ И  
СЫПУЧИХ ВЕЩЕСТВ**

студента 2 курса 2221 группы

направления 03.04.02 «Физика», профиль «Медицинская физика»

код и наименование направления

Института физики

наименование факультета, института

Скрипника Данила Витальевича

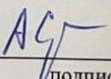
фамилия, имя, отчество

Научный руководитель  
д.ф.-м.н., профессор  
должность, уч. степень, уч. звание

  
подпись, дата

Ал.В. Скрипаль  
инициалы, фамилия

Зав. кафедрой:  
д.ф.-м.н., профессор  
должность, уч. степень, уч. звание

 9.06.23  
подпись, дата

Ан.В. Скрипаль  
инициалы, фамилия

Саратов 2023 г.

## Введение

Прогресс в производстве полупроводниковых приборов во многих моментах определяется уровнем развития методов измерений электрофизических параметров полупроводниковых материалов и структур. Чаще всего измерения параметров материалов производятся при их включении в цепи постоянного тока, в низкочастотные, реже в высокочастотные цепи. Сверхвысокочастотные методы принадлежат к классу так называемых бесконтактных методов, следовательно, с помощью них можно проводить измерения без разрушения материала и без изменения его свойств в процессе измерений. С помощью СВЧ методов измерения могут быть определены удельная проводимость, диэлектрическая проницаемость, время жизни, подвижность, эффективная масса носителей заряда, скорость поверхностной рекомбинации, толщина полупроводниковых слоёв и прочие параметры. Отсутствие контакта и возможность вынесения измерительных приборов за пределы области температурного воздействия на материал позволяет исследовать свойства материалов в широком интервале температур и, в частности, контролировать их параметры в процессе термообработки. С помощью СВЧ методов становится возможным изучение квантовых явлений, эффектов в сильных электрических полях и других.

Особый интерес представляет определение параметров широко используемых в промышленности и быту композитов на основе пористых материалов и сыпучих веществ на сверхвысоких частотах. Так, например, в медицинской промышленности и в производстве продуктов питания часто используются поролон и силикагель.

Поролон, используемый в медицинской мебели должен соответствовать всем стандартам, а, следовательно, требуются знания о его физических свойствах.

Силикагель, в свою очередь, - это высушенный гель кремниевой кислоты, является твердым гидрофильным сорбентом.

Гранулы материала имеют пористую структуру и сильно развитую внутреннюю поверхность, благодаря чему обладают способностью сорбировать воду и другие жидкости, а также пары органических веществ.

В медицине силикагель используется при радиоактивном отравлении. В фармацевтике — для выделения и повышения концентрации лекарственных веществ органического происхождения (витаминов, антибиотиков, др).

Таким образом, для полноценного использования любого материала (особенно в области медицины) необходимо обладать знаниями о его физических свойствах в разных условиях, в том числе и при воздействии СВЧ.

Следовательно, для того, чтобы работать с тем или иным объектом на СВЧ, нужно знать его характеристики в выбранном диапазоне частот. С этой целью и производятся измерения комплексной диэлектрической проницаемости.

Из этих данных также могут быть дополнительно получены сведения о примесях, содержащихся в композите.

Целью магистерской работы являлось исследование частотной зависимости диэлектрической проницаемости композитов на основе пористых материалов с наполнителями и сыпучих веществ.

## **Результаты измерений комплексной диэлектрической проницаемости композитов на основе пористых материалов и сыпучих веществ**

### **Пористые материалы**

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

Исследуемые материалы: дистиллированная вода, поролон.

Вспомогательные материалы: электронные весы, мерный стакан.

С помощью электронных весов были произведены взвешивания сухого и влажного поролона.

Был взят сухой поролон массой 0,69г. Далее он был пропитан максимально возможной массой дистиллированной воды – 8,24. После, равномерно отжимая образец, были получены разные концентрации воды в поролоне. Затем проводились измерения диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  после каждого изменения массы.

Далее по полученным данным были построены графики.

В ходе эксперимента поочередно измерялись значения частотной зависимости диэлектрической проницаемости.

Результаты измерений действительной и мнимой частей комплексной диэлектрической проницаемости объекта представлены на рис. 3.1 и 3.2.

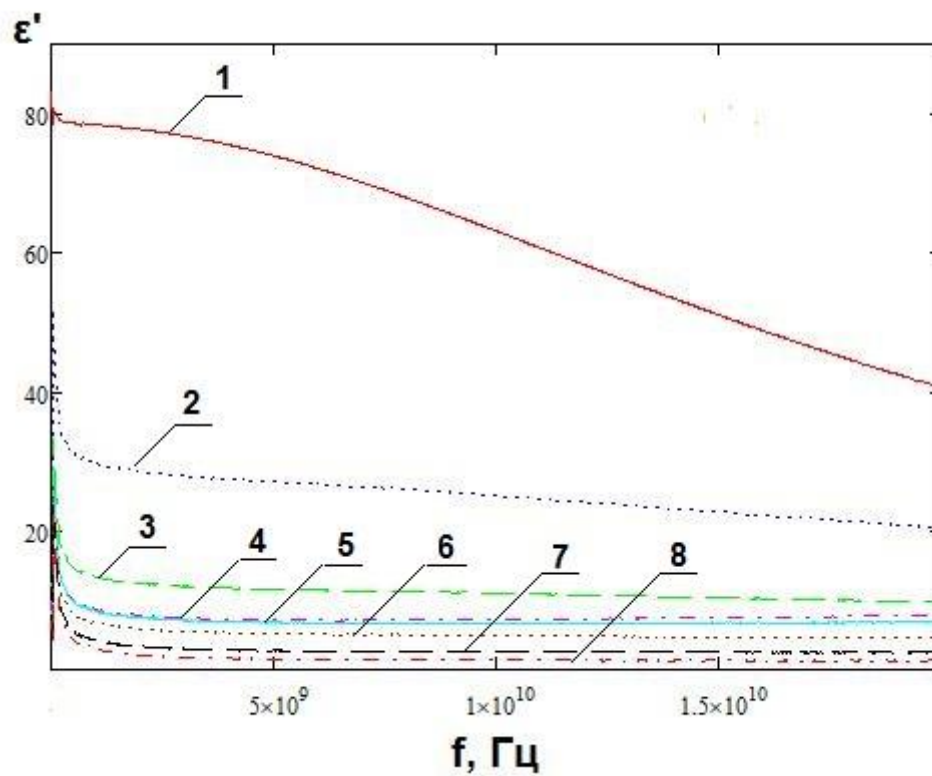


Рисунок 3.1. Результаты измерения зависимости действительной части комплексной диэлектрической проницаемости от частоты при разных массовых долях воды в поролоне: 1 – дистиллированная вода; 2 – 0,92; 3 – 0,89; 4 – 0,86; 5 – 0,82; 6 – 0,74; 7 – 0,6; 8 – 0,42.

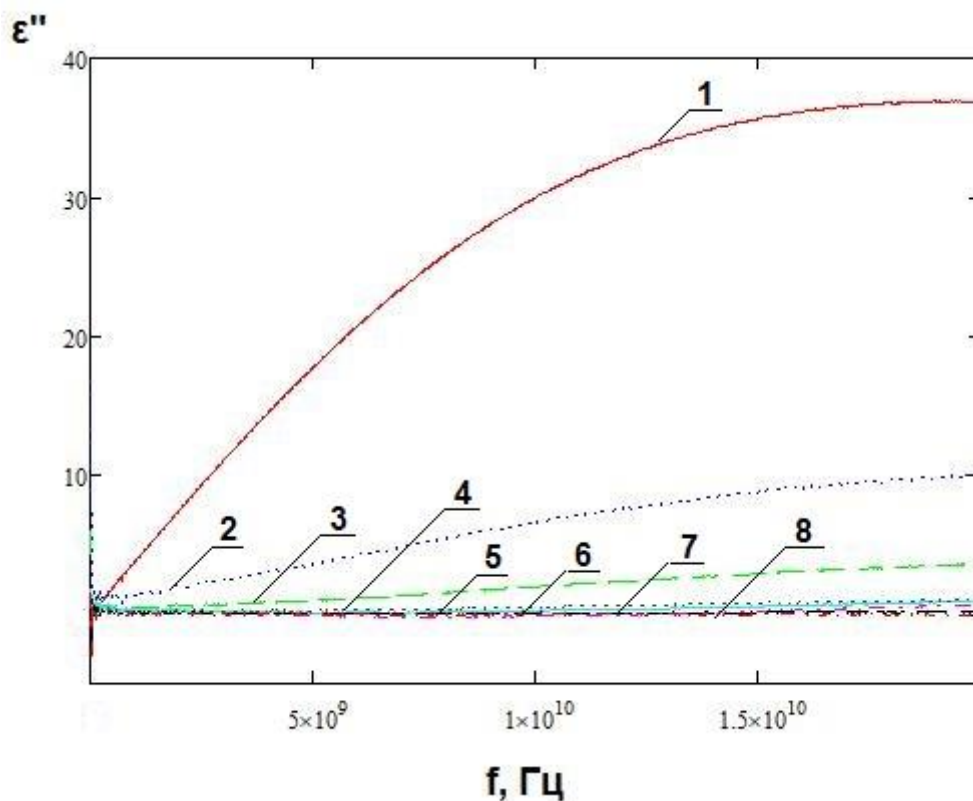


Рисунок 3.2. Результаты измерения зависимости мнимой части комплексной диэлектрической проницаемости от частоты при разных массовых долях воды в поролоне: 1 – дистиллированная вода; 2 – 0,92; 3 – 0,89; 4 – 0,86; 5 – 0,82; 6 – 0,74; 7 – 0,6; 8 – 0,42.

Из результатов эксперимента видно, что с ростом массовой доли воды в объекте при увеличении частоты максимальное значение мнимой части комплексной диэлектрической проницаемости становится больше, и кривая частотной зависимости действительной части диэлектрической проницаемости приобретает крутизну. При этом явно выраженного максимума не наблюдается.

С действительной частью всё наоборот. Стоит только отметить, что резкое падение  $\epsilon'$  приходится на один и тот же диапазон частот – 40-300 МГц.

На рисунках 3.3 и 3.4 в разных масштабах представлены диаграммы Коула-Коула для разного массового содержания воды в поролоне.

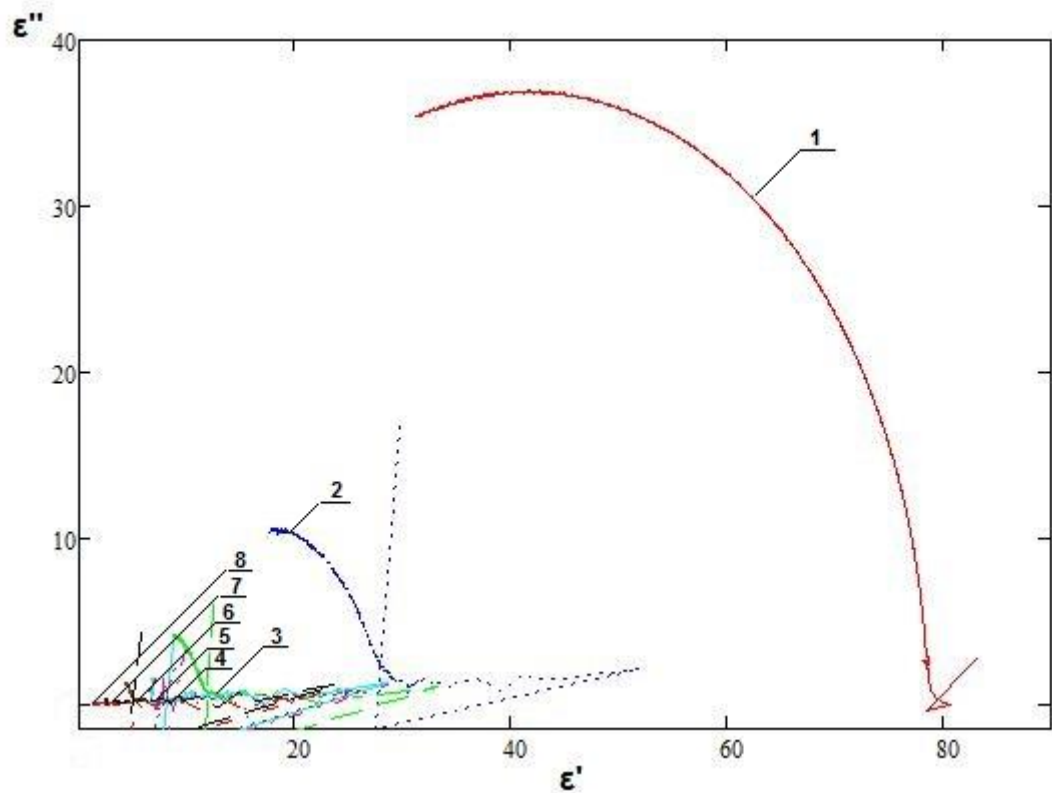


Рисунок 3.3. Диаграмма Коула-Коула для разного массового содержания воды в поролоне: 1 – дистиллированная вода; 2 – 0,92; 3 – 0,89; 4 – 0,86; 5 – 0,82; 6 – 0,74; 7 – 0,6; 8 – 0,42.

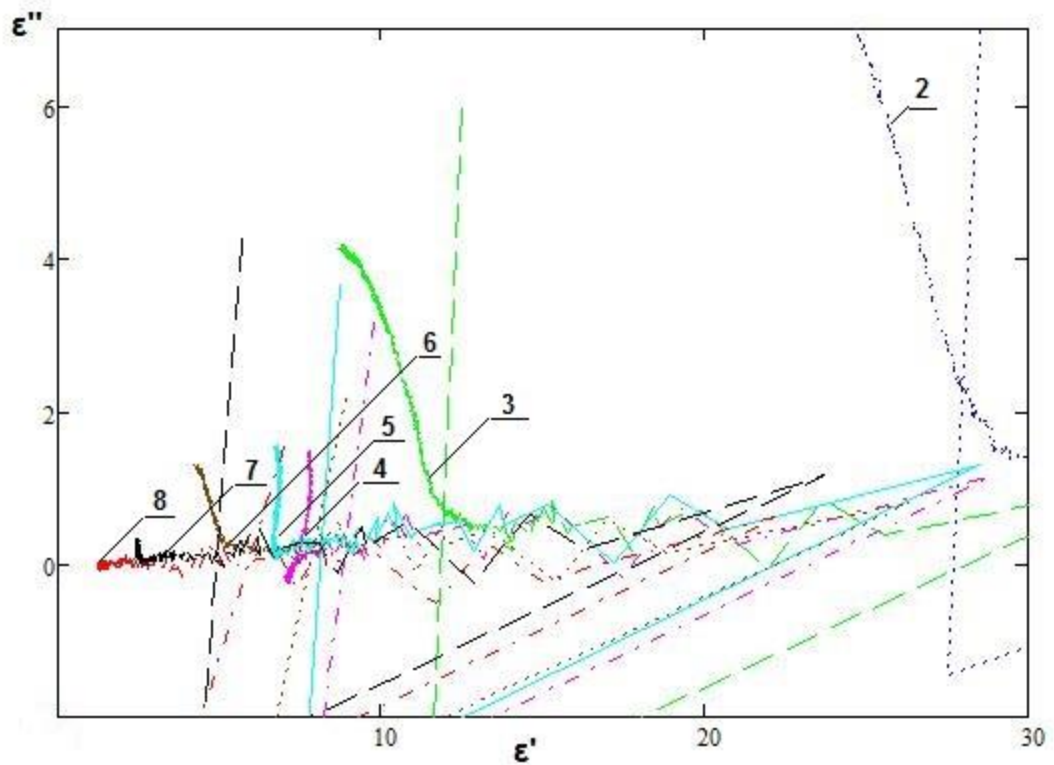


Рисунок 3.4. Диаграмма Коула-Коула увеличенного масштаба для разного массового

содержания воды в поролоне: 1 – дистиллированная вода; 2 – 0,92; 3 – 0,89; 4 – 0,86; 5 – 0,82; 6 – 0,74; 7 – 0,6; 8 – 0,42.

Из результатов измерений видно, что с ростом концентрации минимум мнимой части комплексной диэлектрической проницаемости смещается в область меньших значений действительной части комплексной диэлектрической проницаемости и принимает большую величину.

Чем меньше массовая доля воды в поролоне, тем явно диаграммы теряют свою «закрученность» и в области меньших значений действительной части комплексной диэлектрической проницаемости кривым становятся характерны вертикальность и хаотичность.

### **Сыпучие вещества**

Для исследования диэлектрической проницаемости композитов на основе сыпучих веществ использовался волноводный метод. Перед проведением измерений была проведена калибровка. Исследуемые материалы: силикагель, напитанный влагой.

Вспомогательные материалы: электронные весы, керамическая посуда, СВЧ-печь.

С помощью электронных весов были произведены взвешивания напитанного влагой силикагеля массой 2,02г. Далее в керамической посуде он высушивался с шагом в 30 сек и сразу после повторно взвешивался с целью узнать, какая масса жидкости из него испарилась. Затем проводились измерения диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  после каждого изменения массы.

Далее по полученным данным были построены графики.

В ходе эксперимента поочередно измерялись значения частотной зависимости диэлектрической проницаемости.

Результаты измерений действительной и мнимой частей комплексной диэлектрической проницаемости объекта представлены на рис. 3.5 и 3.6.

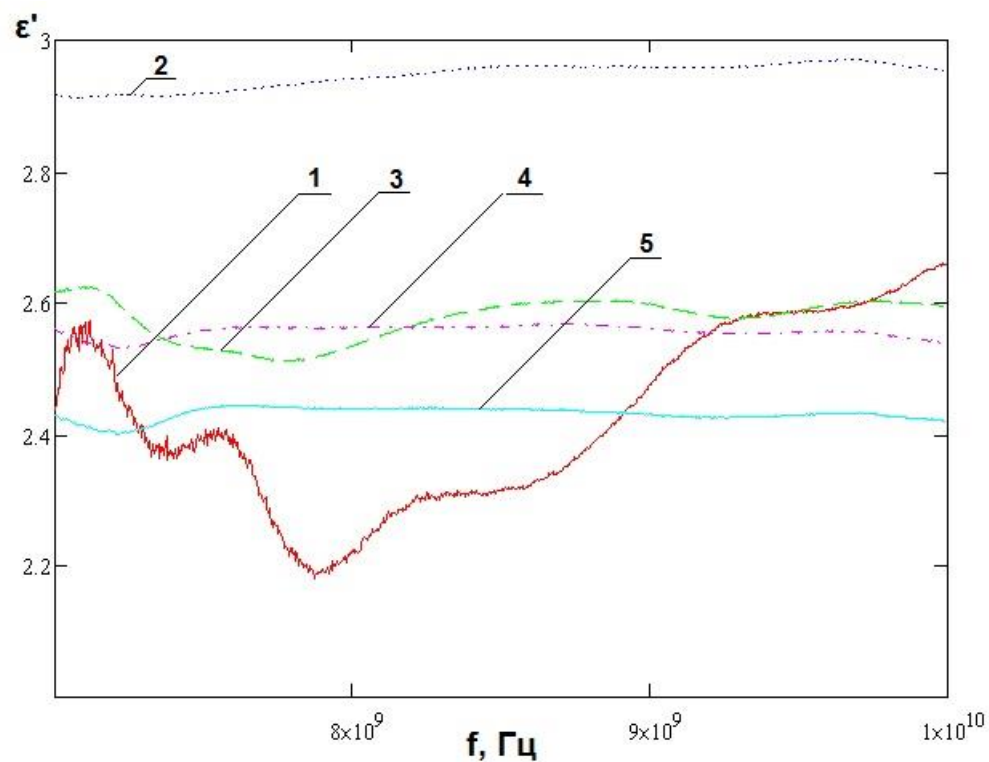


Рисунок 3.5. Результаты измерения зависимости действительной части комплексной диэлектрической проницаемости от частоты после разного количества суммарного времени сушки: 1 – силикагель, напитанный влагой (2,93г); 2 – после 30 сек сушки (2,77г); 3 – после 1 мин сушки (2,67г); 4 – после 1 мин 30 сек сушки (2,63г); 5 – после 2 мин сушки (2,6г).



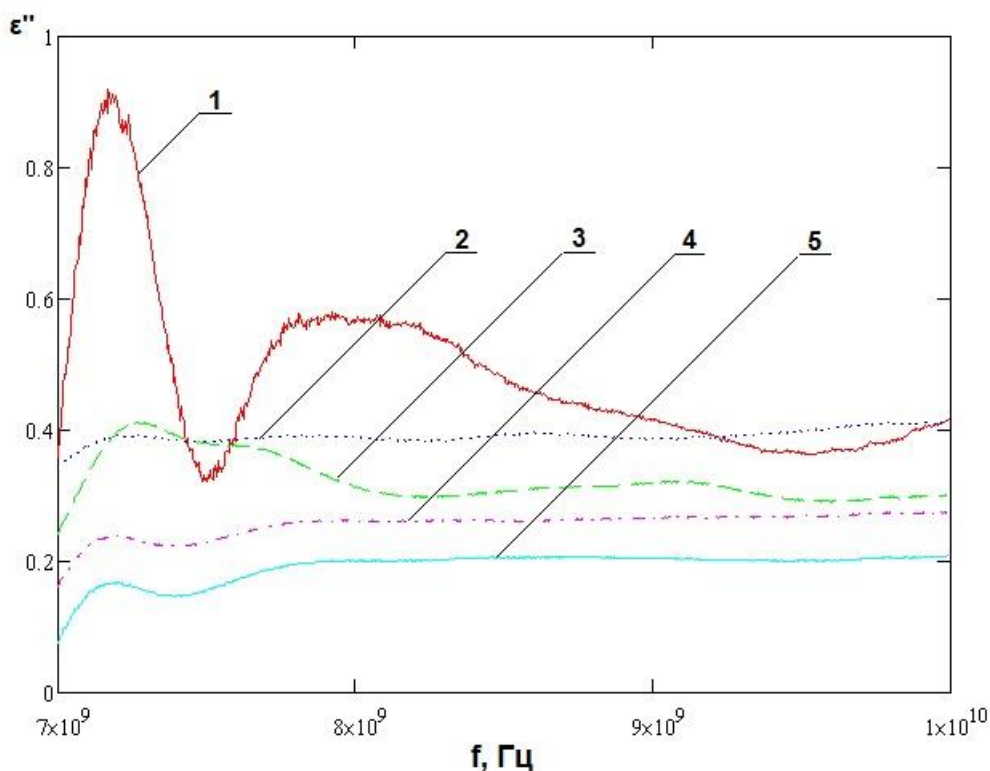


Рисунок 3.6. Результаты измерения зависимости действительной части комплексной диэлектрической проницаемости от частоты после разного количества суммарного времени сушки: 1 – силикагель, напитанный влагой (2,93г); 2 – после 30 сек сушки (2,77г); 3 – после 1 мин сушки (2,67г); 4 – после 1 мин 30 сек сушки (2,63г); 5 – после 2 мин сушки (2,6г).

Из результатов эксперимента видно, что в случае действительной части комплексной диэлектрической проницаемости особенно выделяется силикагель, который сушили меньше всего – 30 сек.  $\epsilon'$  приобретает наибольшее значение для данного композита – 2,93-2,96, и держится в этом промежутке на большом диапазоне частот. У силикагеля, не подверженного сушке, кривая приобретает вид, похожий на случай с чистой водой, только с гораздо меньшими значениями  $\epsilon'$ . Далее по мере увеличения суммарного времени сушки действительная часть диэлектрической проницаемости приобретает все меньшее значение, выходя на плато при 7,4-8,1 ГГц.

С мнимой частью всё иначе.  $\epsilon''$  стремительно приобретает свой максимум при 7,2 ГГц, и далее стремится к точке минимума на 7,5 ГГц. После у данной кривой можно наблюдать подобие затухающих колебаний. Далее по мере увеличения суммарного времени сушки действительная часть диэлектрической проницаемости приобретает все меньшее значение, выходя на плато при 7,4-8,1 ГГц.

На рисунке 3.7 представлена диаграмма Коула-Коула после разного количества суммарного времени сушки силикагеля.

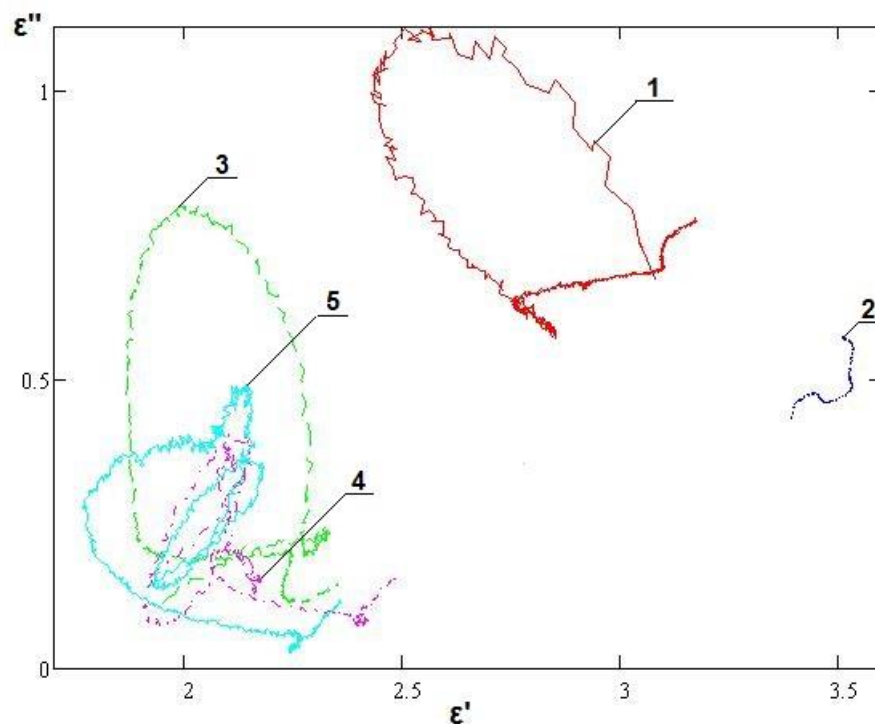


Рисунок 3.7. Диаграмма Коула-Коула после разного количества суммарного времени сушки силикагеля.: 1 – силикагель, напитанный влагой (2,93г); 2 – после 30 сек сушки (2,77г); 3 – после 1 мин сушки (2,67г); 4 – после 1 мин 30 сек сушки (2,63г); 5 – после 2 мин сушки (2,6г).

Из результатов данных измерений также видно, что насыщенный влагой силикагель явно выделяется среди высушенных композитов, и его диаграмма Коула-Коула более приближена в своих значениях к диаграмме воды. И также стоит отметить явное отличие кривой, соответствующей минимально высушенному объекту, - при большем значении  $\epsilon'$  значение  $\epsilon''$  остается в диапазоне от 0,41 до 0,62 (имеет средние потери для своего композита). При этом не имеет свойственных для диаграмм Коула-Коула «завихрений». Остальные диаграммы ведут себя более предсказуемо – с уменьшением содержания воды в композите кривые смещаются в область меньших значений действительной и мнимой частей комплексной диэлектрической проницаемости.

## Заключение

В ходе выполнения работы были получены следующие результаты:

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

Описана методика проведения измерения комплексной диэлектрической проницаемости композитов на основе пористых материалов с наполнителями и сыпучих веществ в СВЧ-диапазоне с использованием зонда, представляющего собой отрезок разомкнутой коаксиальной линии передачи и волновода соответственно.

Установлено, что с ростом массовой доли воды в пористом материале при увеличении частоты максимальное значение мнимой части комплексной диэлектрической проницаемости становится больше, и кривая частотной зависимости действительной части диэлектрической проницаемости приобретает крутизну. При этом явно выраженного максимума не наблюдается.

С действительной частью всё наоборот. Стоит только отметить, что резкое падение  $\epsilon'$  приходится на один и тот же диапазон частот – 40-300 МГц.

Чем меньше массовая доля воды в поролоне, тем явно диаграммы теряют свою «закрученность» и в области меньших значений действительной части комплексной диэлектрической проницаемости кривым становятся характерны вертикальность и хаотичность.

Также с ростом концентрации минимум мнимой части комплексной диэлектрической проницаемости смещается в область меньших значений действительной части комплексной диэлектрической проницаемости и принимает большую величину.

Показано, что в случае действительной части комплексной диэлектрической проницаемости особенно выделяется силикагель, который сушили меньше всего – 30 сек.  $\epsilon'$  приобретает наибольшее значение для данного композита – 2,93-2,96, и держится в этом промежутке на большом диапазоне частот. У силикагеля, не подверженного сушке, кривая приобретает вид, похожий на случай с чистой водой, только с гораздо меньшими значениями  $\epsilon'$ . Далее по мере увеличения суммарного времени сушки действительная часть диэлектрической проницаемости приобретает все меньшее значение, выходя на плато при 7,4-8,1 ГГц.

Стоит отметить, что с мнимой частью всё иначе.  $\epsilon''$  стремительно приобретает свой максимум при 7,2 ГГц, и далее стремится к точке минимума на 7,5 ГГц. После у данной кривой можно наблюдать подобие затухающих колебаний. Далее по мере увеличения суммарного времени сушки действительная часть диэлектрической проницаемости приобретает все меньшее значение, выходя на плато при 7,4-8,1 ГГц.

Отметим, что насыщенный влагой силикагель явно выделяется среди высушенных композитов, и его диаграмма Коула-Коула более приближена в своих значениях к диаграмме воды. И также стоит отметить явное отличие кривой, соответствующей минимально высушенному объекту, - при большем значении  $\epsilon'$  значение  $\epsilon''$  остается в диапазоне от 0,41 до 0,62 (имеет средние потери для своего композита). При этом не имеет свойственных для диаграмм Коула-Коула «завихрений». Остальные диаграммы ведут себя более предсказуемо – с уменьшением содержания воды в композите кривые смещаются в область меньших значений действительной и мнимой частей комплексной диэлектрической проницаемости.

### Список использованных источников

- 1 Губкин, А. Н. Физика диэлектриков: учеб.пособие для вузов / А. Н. Губкин. М.: Высш. школа, 1971. 272 с.
- 2 Поплавко, Ю. М. Физика диэлектриков: учебное пособие для вузов / Ю. М. Поплавко. Киев: Вища школа, 1980. 400 с.
- 3 Тареев, Б. М. Физика диэлектрических материалов: учебное пособие для вузов / Б. М. Тареев. М.: Энергоиздат, 1982. 320 с.
- 4 Брандт, А. А. Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах / А. А. Брандт. М.: Физмалит, 1963. 404 с.
- 5 Лебедев, И. В. Техникаиприборы СВЧ / И. В. Лебедев. М.: Высш. Школа, 1970. 440 с.
- 6 Викторов, В. А. Радиоволновые измерения параметров технологических процессов / В. А. Викторов, Б. В. Лункин, А. С. Совлуков. М.: Энергоиздат, 1989. 208 с.
- 7 Усанов, Д.А. Измерение параметров полупроводников и диэлектриков на СВЧ / Д. А. Усанов, А. В. Скрипаль, В. Б. Феклистов, С. Б. Вениг. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2010. 91 с.
- 8 Drude, P. EineMethodezurMessungderDielectricitätsconstantenundelectrischenAbsorptionkl einerSubstanzmengenvermittelstelectrischerDrahtwellen / P. Drude// AnnalenderPhysik. 1897. Т. 297, № 7.С. 466 – 510.
- 9 Drude, P. // Annalen der Physik und Chemie. 1895. 55. С. 633.
- 10 Рожанский, Д. А. // ЖТФ, 1938. 3, 6. С. 935.
- 11 Татаринов, В. В. // ЖЭТФ, 1935. 5, 5. С. 539.
- 12 Бурдун, Г. Д. // ЖТФ, 1950. 20, 7. С. 813.
- 13 Терещенко, А. И. // Измерительная техника, 1959. № 5. С. 54.
- 14 Дивильковский, Н. А., Филиппов, М. И. // ЖЭТФ, 1936. 6. С. 93.

- 15 Шестопалов, В. П. Методы измерения диэлектрических проницаемостей вещества на сверхвысоких частотах/ В. П. Шестопалов, К. П. Яцук // УФН, 1961. Т.LXXIV, вып. 4. С. 721-723.
- 16 Пат. 2419099 Российская Федерация. Устройство для измерения относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь жидкости / Д. А. Усанов, А. В. Скрипаль, А. В. Абрамов, А. С. Боголюбов, М. Ю. Куликов, Д. В. Пономарев. Заявка № 2010100983/28 от 14.01.2010. Оpubл. 20.05.2011. Бюл. №14.
- 17 Пат. 2449300 Российская Федерация. Способ определения диэлектрической проницаемости материала/ Б. В. Шалаев, А. Б. Данилов, Е. М. Ильина. Заявка № 2010136588/28 от 31.08.2010. Оpubл. 27.04.2012. Бюл. №12.
- 18 Пат. 2453856 Российская Федерация. Устройство для определения диэлектрической проницаемости образца материала при воздействии внешних факторов / В. П. Крылов, В. Г. Ромашин, М. В. Кулаковский. Заявка № 2011106859/28 от 22.02.2011. Оpubл. 20.06. 2012. Бюл. № 17.
- 19 Пат. 2474830 Российская Федерация. Способ измерения комплексной диэлектрической проницаемости жидких и сыпучих веществ в широком диапазоне частот / П. П. Бобров, А. В. Репин, О. В. Кондратьева. Заявка № 2011134175/28 от 12.08.2011. Оpubл. 10.02.2012. Бюл. № 4.
- 20 Основы измерений диэлектрических свойств материалов // Заметки по применению. 2010. № 5989 – 2589RURU. 32 с.
- 21 Усанов, Д.А.Микрополосковые фотонные кристаллы и их использование для измерения параметров жидкостей / Д.А. Усанов, А.В. Скрипаль, А.В. Абрамов, А.С. Боголюбов, М.Ю. Куликов, Д.В. Пономарев // Журнал технической физики. 2010. Т. 80, вып. 8, С. 143–148.
- 22 Усанов, Д.А. Измерение параметров твердых и жидких диэлектриков на сверхвысоких частотах с использованием микрополосковых фотонных структур / Д.А. Усанов, С.А. Никитов, А.В. Скрипаль, М.Ю. Куликов, Д.В. Пономарев // Радиотехника и электроника. 2012, Т. 57, № 2. С. 230–236.

- 23 Усанов, Д.А. Фотонные структуры в СВЧ-диапазоне и их применение для измерения параметров композитов с включениями из углеродных нанотрубок и жидких диэлектриков / Д.А. Усанов, А.В. Скрипаль, А.В. Абрамов, А.С. Боголюбов, А.В. Романов, М.Ю. Куликов, Д.В. Пономарев // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2010. Т. 13, №3. С. 26 – 43.
- 24 Пат. 2419099 МПК G 01 R 27/26 Российская Федерация. Устройство для измерения относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь жидкости / Д.А. Усанов, А.В. Скрипаль, А.В. Абрамов, А.С. Боголюбов, М.Ю. Куликов, Д.В. Пономарев. О публ. 20.05.2011. Бюл. 14.
- 25 Takaaki Sato Dielectric Relaxation Processes in Ethanol / Water Mixtures /Takaaki Sato // J. Phys. Chem. A 2004, 108, 5007 – 5015.

*Dis*

