

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

Кафедра физики твёрдого тела

Исследование диэлектрической проницаемости жидких диэлектриков в
X-диапазоне частот
АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

студента 2 курса 2252 группы
направления 11.04.04 «Электроника и наноэлектроника»

Института физики
Андреева Антона Андреевича

Научные руководители:

доцент, к.ф.-м.н., доцент

должность, ученая степень, ученое звание

ассистент

должность, ученая степень, ученое звание

Зав. кафедрой физики твердого
тела:

профессор, д.ф.-м.н., профессор

должность, ученая степень, ученое звание


подпись, дата

С.А. Сергеев

инициалы, фамилия


подпись, дата

Е.А. Рябов

инициалы, фамилия


подпись, дата

Ал.В. Скрипаль

инициалы, фамилия

Саратов 2025

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1 Методы измерения диэлектрической проницаемости в СВЧ-диапазоне	5
2 Модели диэлектрической проницаемости жидких диэлектриков.....	6
3 Эффективная диэлектрическая проницаемость	7
4 Волноводные резонаторы для исследования стержневых образцов.....	7
5 Описание конструкции для измерения диэлектрической проницаемости.....	8
6 Численное моделирование и экспериментальное исследование S -параметров разработанной конструкции.....	8
6 Анализ полученных результатов	9
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	12

ВВЕДЕНИЕ

Одна из современных тенденций развития СВЧ-устройств состоит в увеличении частот сигналов, используемых в системах связи и управления. Также к антеннам и приемникам СВЧ-сигналов повышаются требования для обработки более высокочастотных сигналов. Для удовлетворения новых требований может требоваться разработка новых или усовершенствование существующих конструктивных особенностей устройств. Очень важным является выбор материалов с требуемыми диэлектрическими свойствами для обеспечения корректной и стабильной работы устройства, поскольку работа многих приборов, таких как антенны, фильтры, делители мощности, определяется диэлектрическими свойствами используемых материалов.

Исследования влияния внешних параметров на диэлектрические свойства материалов имеют важное научное и техническое значение. Это позволяет подбирать материалы с необходимыми электрическими свойствами для разработки сложных устройств СВЧ электроники.

Диэлектрическая проницаемость является основным параметром материала, который определяет взаимодействие материала с электромагнитной волной. Новые методы измерения диэлектрической проницаемости позволяют исследовать материалы, к которым неприменимы существующие методы или для устранения недостатков существующих методов. Такие исследования активно проводятся в настоящее время. В частности использование жидких диэлектриков позволяет создавать СВЧ приборы со сложной конструкцией. Также измерение диэлектрической проницаемости биологических жидкостей позволяет проводить медицинскую диагностику, например, уровня сахара в крови. Особый интерес представляет и использование коллоидных растворов наночастиц для создания экранирующих покрытий и в медицинских применениях.

Для измерения диэлектрической проницаемости жидкостей в СВЧ-диапазоне классическими волноводными методами требуется заполнение сечения волновода, что имеет некоторые недостатки:

1) для заполнения сечения волновода требуется большое количество исследуемого образца, что особенно важно для дорогих образцов, таких как коллоидные растворы наночастиц;

2) после заполнения волновода жидким диэлектриком, волновод загрязняется, что требует дополнительной очистки.

Целью данной работы является разработка конструкции для определения диэлектрической проницаемости жидких диэлектриков в X-диапазоне частот.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1) проведение литературного обзора по методам определения диэлектрической проницаемости;

2) проектирование конструкции для определения диэлектрической проницаемости;

3) разработка методики определения диэлектрической проницаемости на основе численного моделирования S -параметров конструкции, с исследуемым образцом;

4) экспериментальные измерения и анализ спектров S -параметров конструкции с водными растворами поваренной соли NaCl и этилового спирта C_2H_5OH , определение диэлектрической проницаемости данных растворов;

5) обсуждение полученных результатов.

1 Методы измерения диэлектрической проницаемости в СВЧ-диапазоне

В настоящее время в основном применяются три метода измерения диэлектрических свойств материалов в СВЧ диапазоне частот: 1) резонансный метод, 2) нерезонансный метод, 3) метод свободного пространства. Каждый метод имеет свои преимущества и недостатки.

Нерезонансные методы обычно применяются для исследования диэлектрических материалов со средними или большими потерями, а резонансные методы предназначены для измерений на одной частоте с произвольными потерями. Некоторые резонансные методы позволяют измерять параметры в широком, но дискретном спектре.

При измерении диэлектрической проницаемости резонансными методами исследуются смещения резонансных частот коэффициента отражения без вещества и при наличии вещества в резонаторе. Измерения коэффициента отражения обычно проводятся с помощью скалярных или векторных анализаторов цепей. В качестве резонаторов, в основном, используются прямоугольные волноводы.

При измерении диэлектрической проницаемости нерезонансными методами проводится анализ измеренных комплексных коэффициентов пропускания и отражения линии передач без образца и с исследуемым веществом. Измерения комплексных коэффициентов пропускания и отражения проводятся с помощью векторных анализаторов цепей.

Измеренные величины ячейки, содержащей образец, являются комплексными параметрами матрицы рассеяния. Для обратной среды два из них, коэффициент отражения и коэффициент пропускания, должны быть измерены в определенном диапазоне частот. Для изотропных материалов из измеренных значений коэффициентов отражения и пропускания могут быть одновременно определены комплексная диэлектрическая проницаемость и комплексная магнитная проницаемость в зависимости от частоты. Открытый коаксиальный зонд и открытая волноводная ячейка используются для определения

комплексной диэлектрической проницаемости изотропных немагнитных материалов по измеренным значениям S_{11} в зависимости от частоты. Для материалов с большой диэлектрической проницаемостью образцы должны быть небольшими, чтобы избежать резонансов в образце. Одним из основных источников погрешностей измерений в ячейках для измерения пропускания и отражения являются воздушные зазоры между образцом и металлическими стенками коаксиальной линии или волновода. Чтобы свести к минимуму влияние воздушных зазоров, поверхности образцов, которые непосредственно соприкасаются с поверхностями ячейки, должны быть металлизированы.

Измерения диэлектрической проницаемости методом свободного пространства проводятся путем анализа измеренных комплексных коэффициентов передачи (S_{21}) и отражения (S_{11}) при прохождении сигнала через плоский образец исследуемого вещества, помещенного между двумя антеннами.

2 Модели диэлектрической проницаемости жидких диэлектриков

Взаимодействие электромагнитной волны с жидким диэлектриком определяется строением молекул жидкости. При помещении полярного жидкого диэлектрика в электромагнитное поле происходит поляризация диполей. При относительно низких частотах взаимодействие электромагнитной волны с жидким диэлектриком не отличается от взаимодействия жидкого диэлектрика с постоянным полем, но при высоких частотах, период которых сравним со временем релаксации, диполи не успевают переориентироваться с изменением поля, а при еще более высоких частотах диполи перестают следовать за полем и диэлектрическая проницаемость обуславливается только электронной и атомной деформационной поляризацией. Такая зависимость диэлектрической проницаемости от частоты называется дисперсией диэлектрической проницаемости.

Модель Лоренца подходит для жидких металлов и неполярных жидкостей. Для полярных жидкостей в основном применяются модели Дебая и Коула-Коула.

Модель Коула-Коула является полуэмпирической и учитывает дисперсию времени релаксации. Для стеклообразующих жидкостей можно применять модель Коула-Дэвидсона. Модель Гаврилиака-Негами является модификацией другой модификацией модели Дебая, которая учитывает асимметрию и дисперсию спектра дисперсии диэлектрической проницаемости.

Кроме перечисленных, существуют и другие модели и их модификации. Например, для расчётов диэлектрической проницаемости водных растворов соли NaCl можно использовать модель Коула-Коула с учетом проводимости.

3 Эффективная диэлектрическая проницаемость

Для разработки новых технологий может потребоваться материал с заданными диэлектрическими свойствами. Однако выбранный материал с наилучшими диэлектрическими свойствами может не подойти из-за его тепловых или механических свойства, либо подходящий материал слишком дорогой. В этом случае возникает проблема исследования новых материалов с необходимыми свойствами. Использование неоднородных композитных материалов позволяют подбирать необходимые параметры путем изменения структуры неоднородностей без необходимости перебора материалов.

Если размеры неоднородностей много меньше длины волны или если неоднородности образуют фотонный кристалл или метаматериал, то детальное моделирование таких композитных материалов не всегда целесообразно и можно использовать усреднённое значение диэлектрической проницаемости – так называемую эффективную диэлектрическую проницаемость.

Эффективная диэлектрическая проницаемость позволяет рассчитывать параметры сложных по структуре и составу материалов, таких как коллоидные растворы наночастиц и даже потока плазмы.

Для расчётов эффективной диэлектрической проницаемости композитных материалов можно использовать модели Максвелла-Гарнета и Брюггемана.

4 Волноводные резонаторы для исследования стержневых образцов

Существуют волноводные конструкции для определения диэлектрической проницаемости резонансным методом. Резонаторы представляют собой отрезки

прямоугольного волновода, в которых проделаны небольшие отверстия. Измерение диэлектрической проницаемости основано на измерении смещения резонансной частоты при введении исследуемого образца в резонатор через отверстия.

Существуют работы, в которых измерение диэлектрической проницаемости плазмы основано на измерении S_{11} и S_{21} параметров. СВЧ-излучение ионизирует аргон в кварцевой трубке и возникает плазма. Параметры S_{11} и S_{21} можно изменять изменяя мощность СВЧ-излучения. Происходит обучение нейросети на измеренных S -параметрах. Обученная нейросеть определяет значение диэлектрической проницаемости плазмы по S -параметрам.

5 Описание конструкции для измерения диэлектрической проницаемости

Для измерения диэлектрической проницаемости жидких диэлектриков в Х-диапазоне частот предложена волноводная конструкция, состоящая из короткозамкнутого ступенчатого трансформатора сопротивления для волновода с сечением $23 \times 10 \text{ мм}^2$, и двойного согласованного волноводного тройника с сечением $23 \times 10 \text{ мм}^2$.

К первому коллинеарному плечу двойного согласованного волноводного тройника соединен ступенчатый трансформатор сопротивления, который позволяет отраженной волне распространяться в Н- и Е-плечи. Через отверстие в трансформаторе проходит силиконовая трубка, в которой будет находиться исследуемая жидкость. Источник электромагнитной волны расположен в Н-плече.

6 Численное моделирование и экспериментальное исследование S -параметров разработанной конструкции

В качестве исследуемых образцов выбраны водные растворы поваренной соли NaCl и этилового спирта $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$.

В программе openEMS проведено численное моделирование данного отрезка прямоугольно волновода с разными силиконовыми трубками: 1) трубка с внутренним диаметром $d = 1 \text{ мм}$, внешним диаметром $D = 2 \text{ мм}$ и 2) трубка с

внутренним диаметром $d = 2,4$ мм, внешним диаметром $D = 4,4$ мм, заполненной материалами с различной диэлектрической проницаемостью в X-диапазоне частот. Значения диэлектрической проницаемости вещества в трубке изменялись в диапазоне 1 – 80. Диэлектрическая проницаемость трубки $\epsilon = 3$.

При увеличении диэлектрической проницаемости материала в трубке, резонансные пики смещаются в низкочастотную область и увеличиваются потери.

Проведено экспериментальное исследование S-параметров спроектированной конструкции с трубкой с внутренним диаметром $d = 1$ мм и внешним диаметром $D = 2$ мм, заполненной водой при различной концентрации растворенной соли и спирта C .

В результате экспериментальных исследований выявлено, что добавление воды в трубку приводит к смещению резонансных пиков в низкочастотную область, с повышением концентрации растворенной соли, резонансные пики смещаются в высокочастотную область, это свидетельствует об уменьшении диэлектрической проницаемости воды при увеличении концентрации NaCl и спирта.

При изменении диэлектрической проницаемости вещества в трубке происходит смещение резонансных частот как и в случае трубки с $d = 1$ мм, но при увеличении диэлектрической проницаемости более 60 в высокочастотной части спектра возникают дополнительные резонансы.

Проведены измерения S-параметров разработанной конструкции с трубкой с внутренним диаметром $d = 2,4$ мм и внешним диаметром $D = 4,4$ мм, заполненной водой при различной концентрации растворенной соли и спирта C .

6 Анализ полученных результатов

Результаты численного моделирования и экспериментальных измерений согласуются. На АЧХ S_{11} -параметра наблюдается 3 минимума в диапазоне 8,5 – 11,5 ГГц, но третий минимум при добавлении воды сильно уменьшается и его становится трудно анализировать. По результатам численного

моделирования получены зависимости частоты резонансных пиков отражения от диэлектрической проницаемости вещества в трубке.

Зависимости частоты резонансных минимумов S_{11} -параметра от диэлектрической проницаемости вещества в трубке с внутренним диаметром 1 мм почти линейны, а в трубке 2,4 мм – смещение резонансных минимумов отражения происходит сильнее при $\epsilon < 30$.

По измеренным S_{11} -параметрам водных растворов NaCl и C_2H_5OH также найдены резонансные минимумы отражения, но в экспериментальных данных наблюдаются шумы. Для определения частот минимумов отражения применялись аппроксимации полиномом 20-ой степени, аппроксимации синусоидой и сглаживание интегралом свертки.

Получены зависимости частоты резонансных минимумов отражения от концентрации раствора.

При изменении концентрации растворенной соли водного раствора в трубке с $d = 2,4$ мм резонансный пик почти не смещается, а при увеличении объемного процента спирта – существенное смещение резонансных пиков происходит только при концентрации > 60 %. Диэлектрическая проницаемость водных растворов поваренной соли NaCl велика и можно сделать вывод что трубка с внутренним диаметром $d = 2,4$ мм не подходит для измерения больших значений диэлектрической проницаемости ($\epsilon > 30$), но для малых значений ($\epsilon < 20$) точность должна быть выше чем в случае с трубкой с внутренним диаметром $d = 1$ мм. В связи с этим для определения диэлектрической проницаемости водных растворов соли невозможна с использованием трубки с внутренним диаметром $d = 2,4$ мм.

По найденным частотам и соответствующим зависимостям частоты резонансного минимума S_{11} -параметра от диэлектрической проницаемости вещества в трубке найдены значения диэлектрической проницаемости исследуемых образцов.

Проведено сравнение результатов, полученных по первому минимуму $\min_1$ с данными из литературы.

Аналогично определены значения диэлектрической проницаемости водных растворов этилового спирта C_2H_5OH .

Точность определения диэлектрической проницаемости водных растворов спирта по первому минимуму сильно зависит от способа аппроксимации спектра, разброс значений по второму минимуму намного меньше, поэтому проведено сравнение результатов, полученных по второму минимуму $\min_2$ с данными из литературы.

При увеличении концентрации растворенной соли и концентрации спирта диэлектрическая проницаемость растворов уменьшается, причём диэлектрическая проницаемость насыщенного раствора соли больше диэлектрической проницаемости этилового спирта в X-диапазоне, это соответствует теории.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе проведен литературный обзор по методам измерения диэлектрической проницаемости в СВЧ-диапазоне, рассмотрены конструкции для измерения диэлектрической проницаемости в прямоугольном волноводе. Разработана конструкция для определения диэлектрической проницаемости жидких диэлектриков. В сравнении с классическими волноводными методами измерения диэлектрической проницаемости жидкостей разработанная конструкция имеет ряд **преимуществ**:

- 1) в процессе измерения используется малый объем исследуемой жидкости,
- 2) в процессе измерения не загрязняется волновод,
- 3) возможность исследования агрессивных растворов, таких как кислоты,
- 4) возможность непрерывного измерения диэлектрической проницаемости потока жидкости.

Проведено численное моделирование и экспериментальные исследования S -параметров разработанной конструкции в X -диапазоне частот. По результатам исследования можно сделать следующие **выводы**:

1) зависимость частоты резонансных пиков минимума отражения разработанной конструкции от диэлектрической проницаемости материала в трубке при использовании трубки с внутренним диаметром $d = 1$ мм практически линейна, что дает возможность экстраполировать данную зависимость;

2) зависимость частоты резонансных пиков минимума отражения разработанной конструкции от диэлектрической проницаемости материала в трубке при использовании трубки с внутренним диаметром $d = 2,4$ мм нелинейна, но при малых значениях диэлектрической проницаемости ($\epsilon < 30$) чувствительность намного выше, чем при использовании трубки с внутренним диаметром $d = 1$ мм;

4) при увеличении диаметра трубки увеличивается чувствительность результатов численного моделирования к геометрии конструкции, в связи с этим,

результаты определения диэлектрической проницаемости с использованием трубки с внутренним диаметром $d = 1$ мм более приближены к теоретическим, чем результаты, полученные с использованием трубки с внутренним диаметром $d = 2,4$ мм.

Для устранения шумов измеренных АЧХ S -параметров разработанной конструкции-выбраны аппроксимация полиномом, аппроксимация синусоидой и сглаживание интегралом свёртки. Из сравнения результатов аппроксимаций можно сделать следующие **выводы**:

1) аппроксимация полиномом более устойчива к шумам, чем сглаживание интегралом свёртки;

2) аппроксимацию синусоидой можно применять для симметричных резонансных минимумов, аппроксимация полиномом и сглаживание более универсальны;

3) спектры S_{11} -параметра в области резонансных минимумов разработанной конструкции с водными растворами соли NaCl имеют форму отличную от спектров, полученных в результате численного моделирования.

Луг