

УДК 550.82

А.У. Касимова, adina.kasimova.99@mail.ruС.Н. Верзунов, verzunov@hotmail.com

Институт машиноведения и автоматики НАН КР

ОБЗОР И АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД

В данной статье были проанализированы современные методы измерения диэлектрической проницаемости горных пород. Были рассмотрены особенности и недостатки каждого метода, а также области, в которых каждый из методов является наиболее подходящим. Продемонстрированы зависимости диэлектрической проницаемости от частоты микроволнового излучения, а также показаны методы вычисления комплексной диэлектрической проницаемости различных материалов. Проанализировав все существующие методы, авторы рекомендуют метод свободного пространства как более подходящий метод измерения, который позволит получить наиболее достоверные и полные результаты. Метод свободного пространства является более подходящим методом по следующим причинам: не требуется обработка материалов; размеры образцов могут быть достаточно большими; можно использовать при высоких температурах; отсутствие механического контакта с образцом; возможность измерения магнитных материалов.

Ключевые слова: геофизика, диэлектрическая проницаемость, микроволновое излучение метод свободного пространства

Введение

Как сказано в работе [1]: «измерение диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь в микроволновом диапазоне является актуальной задачей во многих областях фундаментальных и прикладных исследований». В качестве примеров можно привести работы [2-4]. Кроме того, «данные о диэлектрических характеристиках природных минералов (табл. 1) могут быть полезны в таких областях, как геология, сейсмология, горнодобывающая промышленность, и т.п. Экспериментальные данные о комплексной диэлектрической проницаемости (КДП), определяемой в широком частотном диапазоне, позволяют создавать и тестировать спектроскопические модели почв и горных пород, исследовать многочастотные релаксационные процессы» [1].

Таблица 1 – Диэлектрическая проницаемость минералов

Минералы	Частота поля, Гц	$\epsilon_{отн}$
<i>Самородные:</i>		
алмаз графит сера	$10^4 - 10^8$	16,5
<i>Хлориды и сульфаты:</i>		
галит сильвин ангидрит гипс барит	$10^2 - 10^7$	6,2-5,7 6,2-4,4 6,3-5,7 4,23-4,24 12,2-7
<i>Сульфиды:</i>		
галенит пирит арсенопирит сфалерит молибденит халькозин пирротин	$10^5 - 10^9$	81-17 12,1-6,9 12,1-6,9 81-33,7 -
<i>Карбонаты и фосфаты:</i>		
кальцит доломит сидерит церуссит	- - - -	8,7-7,5 9,5-7,8 7,4-6,9 25,4-19,6
<i>Силикаты:</i>		
авгит актинолит эгирин роговая обманка тремолит альмандин альбит олигоклаз андезин лабрадор анортит	$10^2 - 10^7$	10,3-6,9 6,6 7,2 5,8-4,9 7,6 4,3 5,63-5,39 6,06-6,03 6,2 6,47 6,51
<i>Окислы:</i>		
кварц лимонит рутил куприт касситерит гематит вода	$10^5 - 10^9$	4,59-4,54 11-10 173-86 6,35-5,65 170-25 [6]

«Исследование диэлектрических свойств горных пород в микроволновом диапазоне является технически сложной задачей из-за сильного поглощения электромагнитного

излучения в среде. Так как комплексная диэлектрическая проницаемость вещества, определяемая как:

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + j\varepsilon_2, \quad (1)$$

где действительная часть (ε_1) определяет поляризованность, а мнимая (ε_2) – вносимые потери, сама по себе не поддается прямому измерению, то она рассчитывается по таким измеряемым величинам, как коэффициент отражения и пропускания, тангенс угла потерь, угол Брюстера, и др.»[5].

В настоящее время существует множество методов (рис. 1) по измерению диэлектрических свойств материалов, однако не все они подходят для решения данной конкретной проблемы [7]. Согласно [8], все эти методы можно разделить на несколько групп: «резонансные, коаксиальные и волноводные, широкополосные, методы, основанные на использовании волн в свободном пространстве, а также неразрушающие методы. Выбор метода измерения зависит от величины диэлектрической проницаемости ε' , диэлектрических потерь ε'' , диапазона температур и частот, в котором производятся измерения. Измерения параметров цепей и сигналов достигаются с помощью емкостных мостов, Q-метров, измерителей коэффициента стоячей волны, анализаторов спектров частот, измерительных генераторов, измерителей импедансов и т.п.» [8].

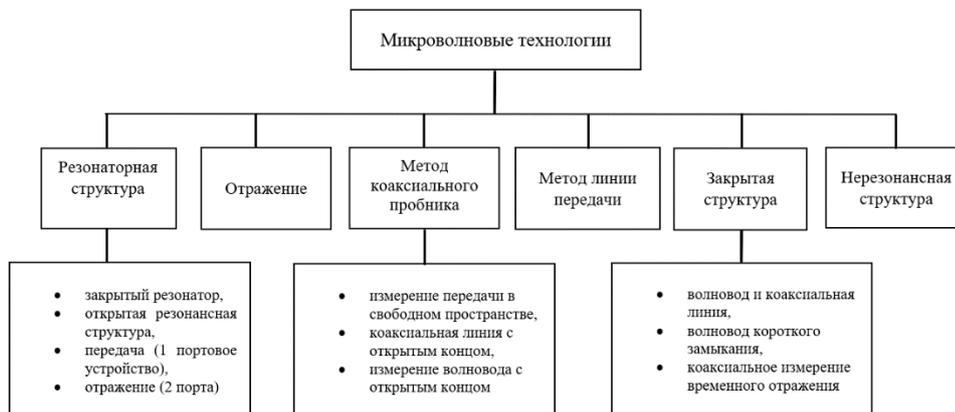


Рисунок 1 – Классификация методов измерения диэлектрической проницаемости

Конденсаторный метод

«Выбор методов измерений КДП, кроме того, определяется и частотным диапазоном, а также механическими свойствами материала, влияющими на возможности его обработки и достижение необходимой точности измерений. Так, на частотах от 100 Гц до 1 МГц применяют»[9] «конденсаторный метод, являющийся разновидностью резонансных методов» [7]. Данный метод предполагает использование конденсатора, обкладки которого изготавливаются в виде цилиндрической или сферической формы, между которыми помещается исследуемый образец (диэлектрик).

Изменение емкости конденсатора будет зависеть от свойств материала. Данный метод применяется для измерения [12] диэлектрической проницаемости ε и тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$ [8], а «измеряемыми величинами в данном случае могут быть значение импеданса цепи, добротность колебательного контура, образованного измерительным конденсатором и эталонной катушкой индуктивности»[8]. Конденсаторный метод более подробно описан в работе [12], в которой автор рассматривает несколько видов конструкции конденсаторов в зависимости от частотного диапазона и конструкции измерительной установки.

Одной из рассмотренных конструкций (рис. 2) является простейший измерительный конденсатор, обкладки которого изготовлены в виде дисков, диаметры которых

значительно превышали расстояние между ними. «Радиус обкладок конденсатора R определяется с учетом значений длины волны λ и диэлектрической проницаемости ε :

$$R \leq \frac{0,24\lambda}{2\pi\sqrt{\varepsilon}}. \quad (2)$$

Также необходимо учитывать паразитную емкость, которая складывается из краевой емкости и емкости зазоров между диэлектриком и обкладкой конденсатора». Там же говорится, что «вторым видом конструкции является плоский конденсатор, между обкладками которого в центральной части пространства размещается исследуемый образец. Данный вид позволяет уменьшить влияние паразитных емкостей» [2].

Третья конструкция представляет собой конденсатор, обкладки которого изготовлены в виде сферической или цилиндрической формы, в пространстве между которыми размещается исследуемый образец [8]. Наибольшее распространение получили конденсаторы цилиндрической формы в виду своей простоты изготовления. «Обычно они состоят из трех коаксиальных цилиндров. Наружный и внутренний цилиндры соединены между собой и при подключении к измерительному прибору заземляются. Средний цилиндр для уменьшения краевых эффектов делается на 4–6 мм короче наружного и внутреннего цилиндров» [8].

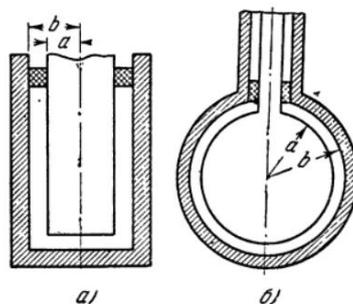


Рисунок 2 – Измерительные конденсаторы цилиндрического (а) и сферического (б) типов, где а и b – радиусы внутренней и внешней обкладок

Там же говорится, что «измерения диэлектрической проницаемости производятся путем измерения изменений емкостей конденсаторов при его заполнении исследуемым образцом. При изготовлении таких конденсаторов необходимо использовать материалы, не взаимодействующие с образцом (посеребренная латунь, золото, платина, титан)».

Паразитные емкости возникают из-за наличия воздушных зазоров между обкладками конденсатора и образцом. Влияние паразитных емкостей необходимо учитывать при вычислении импеданса конденсатора. «Наличие воздушного зазора может привести к неправильным результатам при измерении диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь из-за изменения измеряемого значения емкости» [11]. В работе [12] автором был предложен способ устранения паразитной емкости с помощью нанесения на поверхность образца электродов, которые зависят от свойств исследуемого вещества и размеров образца.

«При изучении проводящих сред, когда имеется прямой контакт образца с измерительными электродами на частотах ниже 104–105 Гц, необходимо учитывать электродную поляризацию. В работах некоторых авторов было показано ее влияние на измеряемое значение действительной части КДП образцов» [9], а также способы устранения и ослабления электродной поляризации. Так, в работе [4] кратко приведены исследования авторов по устранению электродной поляризации.

Методы линии передачи

Измерение с использованием метода линий передачи заключается в помещении образца в участок волновода или коаксиальной линии и измерение параметров комплексного рассеяния двух портов с помощью векторного анализатора цепей [14].

Метод, согласно [14], «включает измерение отраженного S_{11} и переданного сигнала S_{21} (рис. 3). Соответствующие параметры рассеяния тесно связаны с комплексной диэлектрической проницаемостью материала уравнениями. Преобразование s-параметров в комплексный диэлектрический параметр вычисляется путем решения уравнений с помощью программы.

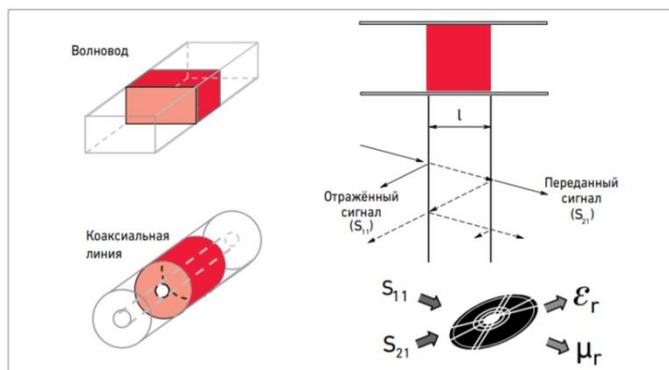


Рисунок 3 – Метод линии передачи/ отражения: волновод и коаксиальная линия

Во многих случаях метод требует подготовки образца [14], например, механической обработки, чтобы образец плотно [14] прилегал к волноводу или коаксиальной линии, которые могут быть изготовлены в прямоугольной или круглой форме.

Волноводный метод

В работе [15] была предложена методика измерения КДП минералов, основанная на измерении зависимостей отражательной и пропускательной способностей образцов «от частоты. По этим зависимостям находились действительная и мнимая части комплексной диэлектрической проницаемости» [14] материала. В данной работе измерить пропускательную способность образцов авторам не удалось, так как в исследованиях использовали достаточно толстые образцы, которые поглощали ЭМ-излучение.

Исследования показали, что отражательная способность образцов сильно зависит от частоты: при увеличении содержания рудных минералов в горной породе отражательная способность в зависимости от частоты излучения возрастала от 0,2 для пустой породы до 0,9 для практически чистых рудных пород. На рис. 4 приведен график зависимости отражательной способности от частоты. Более подробно результаты исследования описаны в [17].

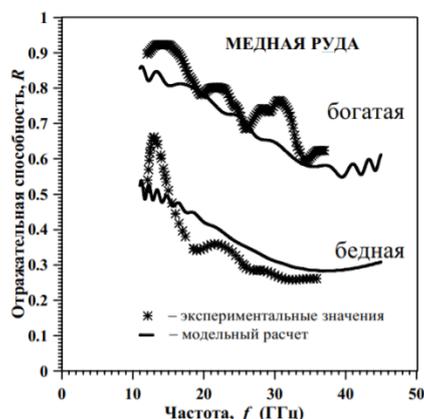


Рисунок 4– Частотные зависимости отражательной способности образцов медной руды [16]

«Неполное совпадение расчетов с экспериментальными результатами связано с тем, что исследуемые образцы медной руды представляют собой сложную дисперсную среду,

в которой имеются границы раздела между минералами, и на этих границах происходит переотражение излучения, которые в модельных расчетах не учитывались» [7,15].

В работе [17] представлены «результаты численного эксперимента при определении КДП-волноводным методом. Расчеты проводились в сантиметровом и миллиметровом диапазонах для диэлектриков с действительной частью диэлектрической проницаемости ϵ_1 , равной 10, и тангенсами угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$ 0,1 – 0,2. Ширина воздушного зазора изменялась от 0 до 0,1 мм»[17]. КДП вычислялась с помощью выражения:

$$\epsilon = \frac{\lambda_0^2}{\mu} \left(\frac{1}{\Lambda^2} + \frac{1}{\lambda_{\text{кр}}^2} \right), \quad (3)$$

«где λ_0 – длина волны в вакууме, $\lambda_{\text{кр}}$ – критическая длина волны в волноводе, μ – магнитная проницаемость образца, Λ – комплексная величина, определяемая выражением (4)

$$\frac{1}{\Lambda^2} = - \left[\frac{1}{2\pi l} \ln \left(\frac{1}{P} \right) \right]^2, \quad (4)$$

где P – коэффициент распространения ЭМ-волны через материал образца в волноводе (рис. 4).

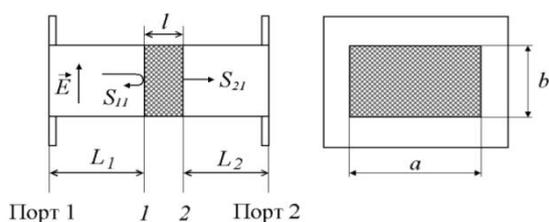


Рисунок 5 – Волноводная секция с исследуемым образцом: $a \times b$ – поперечные размеры волновода, E – вектор напряженности электрического поля, l – длина образца. S_{11} и S_{21} коэффициенты отражения и прохождения на границах 1 и 2 образца соответственно»[17]

При наличии воздушного зазора данная работа сводилась к исследованию волновода с частичным заполнением. В результате были получены зависимости диэлектрических параметров от частоты в сантиметровом и миллиметровом диапазоне частот. В сантиметровом диапазоне частот при максимальной величине зазора в 0,1 мм погрешность при определении ϵ_1 составила 4,5 %, а при определении $\text{tg}\delta$ – 5,5 %. На рис. 6 приведены графики зависимости ϵ_1 и $\text{tg}\delta$ от частоты в сантиметровом диапазоне частот.

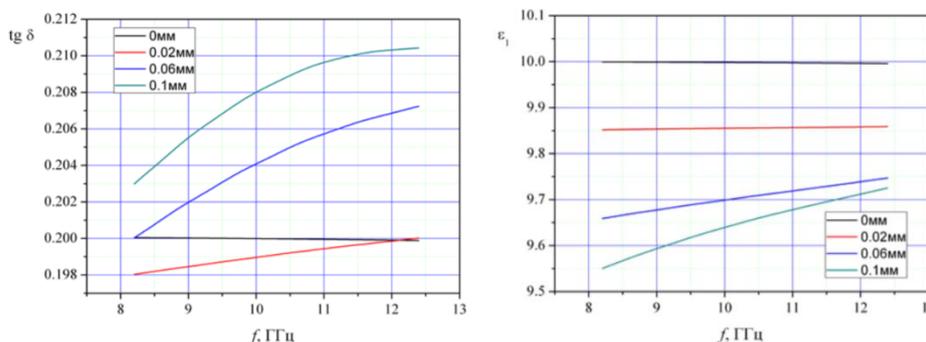


Рисунок 6 – Графики зависимостей $\text{tg}\delta$ и ϵ от частоты в сантиметровом диапазоне частот

В миллиметровом диапазоне погрешность при измерении ϵ_1 практически не меняется, а $\text{tg}\delta$ в верхней части диапазона становится больше. Также в данной работе авторы привели способы уменьшения погрешности, связанной с наличием воздушного зазора. На рис. 7 приведены графики зависимости ϵ_1 и $\text{tg}\delta$ от частоты в миллиметровом диапазоне частот.

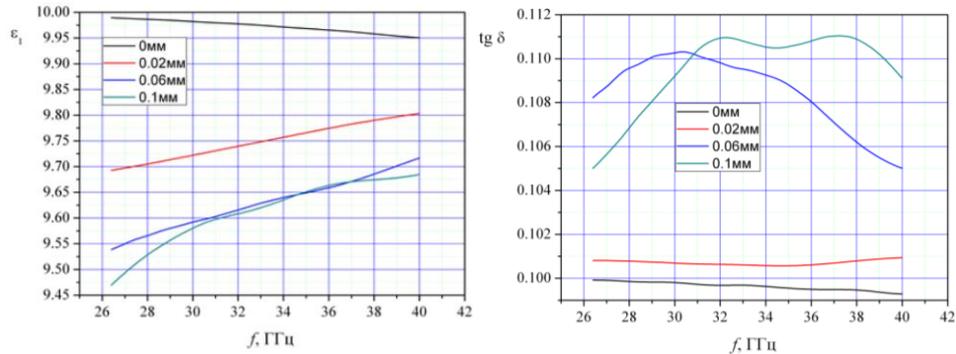


Рисунок 7– Графики зависимостей $\text{tg}\delta$ и ϵ от частоты в миллиметровом диапазоне частот

Показано, что «даже незначительный воздушный зазор между образцом и широкой стенкой волновода приводит к резкому скачку напряженности электрического поля при переходе из материала образца в воздух и сильно влияет на точность определения КДП, которая при определении $\text{tg}\delta$ достигает 11%. Для уменьшения этой погрешности предлагается заполнять воздушный промежуток электропроводящей пастой. Проведенные расчеты показали, что при заполнении этого промежутка пастой на основе серебра с удельной проводимостью $\sigma = 2 \cdot 10^6$ См/м максимальная погрешность, связанная с этим фактором, не превышает 0,5 [17] % как для ϵ_1 , так и для $\text{tg}\delta$.

Из-за неприемлемо больших размеров прямоугольные волноводы неудобно использовать на частотах ниже 1 ГГц [9]. Однако волноводы незаменимы на частотах выше 10–15 ГГц, где коаксиальные линии имеют малые размеры поперечного сечения и обладают более высокими потерями»[9].

Коаксиальные методы

Значительное количество исследований диэлектрических свойств на частотах 50 МГц–18 ГГц осуществляется с применением [9] коаксиальных методов измерения, «основную часть которых составляет коаксиальная ячейка – отрезок коаксиальной линии, заполненный исследуемым веществом и подключенный с помощью согласующих переходных устройств к векторному анализатору цепей или другому измерительному прибору. Преимущества этого метода основаны на небольшом количестве исследуемого образца, необходимом для измерений, а также возможности измерить электрофизические параметры материала в широком диапазоне частот от 0 Гц до СВЧ. Для удержания образца в заданном объеме используются центрирующие шайбы, изготовленные из химически инертного материала с низким значением диэлектрической проницаемости. Коаксиальные линии используются [18] при частотах, когда распространяются поперечные электромагнитные волны»[19].

В работе [20] рассмотрены требования, предъявляемые к «конструкции коаксиальной измерительной ячейки. Во-первых, ячейка должна иметь не менее двух центрирующих шайб для обеспечения удержания образца в заданном месте тракта. Во-вторых, одна из центрирующих шайб должна жестко фиксировать центральную жилу коаксиальной ячейки от продольного перемещения, поскольку необходимо обеспечить правильную геометрию соединительных разъемов. Проще всего этого добиться, используя шайбу, у которой меньший диаметр внутреннего проводника и больший диаметр оболочки, чем соответствующие диаметры участка волновода с воздушным

заполнением. В-третьих, должна сохраняться возможность свободного извлечения второй шайбы [20]. Это необходимо для того, чтобы обеспечить возможность загрузки исследуемого образца в коаксиальную ячейку» [20].

В работе [20] «представлены три варианта конструкции коаксиальных ячеек (рис.8), в которых скомбинированы различные варианты шайб, обеспечивающих одновременное выполнение всех требований к ячейке».

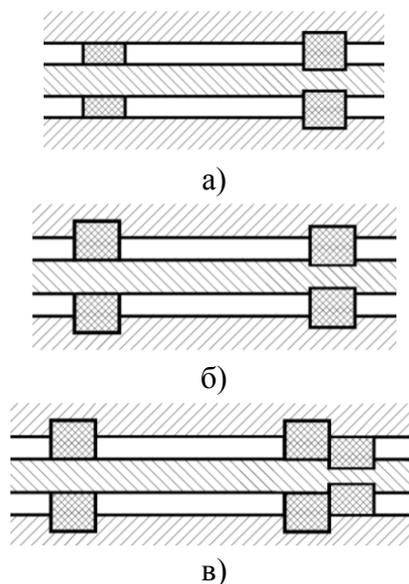


Рисунок 8 – Варианты конструкции коаксиальной ячейки [20]

С «учетом особенностей технической реализации вариант конструкции, представленный на рис. 8в, является более подходящим для измерения жидких материалов, хотя и» [20] «обеспечивает несколько худшее согласование сравнительно с вариантом конструкции рис.8б. При этом для варианта конструкции рис. 8в проще добиться герметичности объема, занимаемого образцом. Если не планируется проведение измерений» [15] жидких материалов, то предпочтение стоит отдать варианту конструкции рис.8.

В работе [17] «приведены данные экспериментальных исследований электромагнитных параметров композиционных материалов на основе углеродных наноструктур. Образцы изготавливались в форме шайб и помещались в коаксиальную ячейку. С помощью векторного анализатора цепей Agilent Technologies E8363B измерялись коэффициенты матрицы рассеяния в диапазоне частот 0,01 – 2 ГГц, затем, используя метод Никольсона-Росса, рассчитывалось значение комплексной диэлектрической проницаемости»[9].

Резонансный метод

Для определения параметров диэлектрика также применяют «резонансный метод, являющийся более точным и чувствительным методом. Однако существуют ограничения на частоты и характеристики потерь материалов, которые могут быть измерены этим методом. Существует множество типов резонансных методов, таких как входящие полости, резонаторы с разделенным цилиндром, объемные резонаторы, резонаторы» [14] Фабри-Перо и т. д. (рис. [18] 9) , однако наиболее часто используются два типа резонансных измерений.

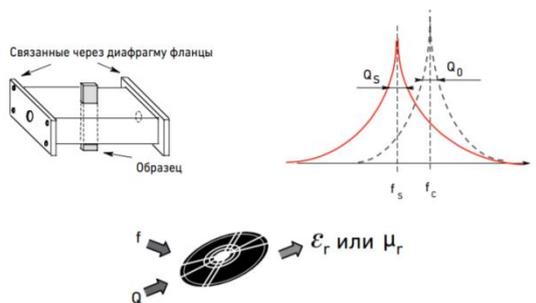


Рисунок 9 – Измерение в объёмном резонаторе

«Диэлектрическая проницаемость определяется по следующим формулам:

$$\epsilon_r' = \frac{V_c(f_c - f_s)}{2V_s f_s} + 1, \quad (5)$$

$$\epsilon_r'' = \frac{V_c}{4V_s} \left(\frac{1}{Q_s} - \frac{1}{Q_c} \right), \quad (6)$$

где V – объем, Q – добротность резонатора, индекс c – для пустого резонатора, индекс s – для резонатора с образцом.

К первой группе относят методы, основанные на возбуждении резонанса непосредственно в измеряемом образце, а ко второй – на внесении образцом возмущения в поле опорного резонатора» [17]. В работе [5] «автор рассматривает прямоугольный объёмный резонатор, в котором исследуется жидкость в кювете, ϵ' и $\text{tg} \delta$ жидкости определяются по измеренным значениям резонансной длины волны и добротности резонатора при отсутствии и наличии исследуемой жидкости в кювете. Резонаторы без диэлектрика и частично заполненные диэлектриком изображены на рис.10» [5].

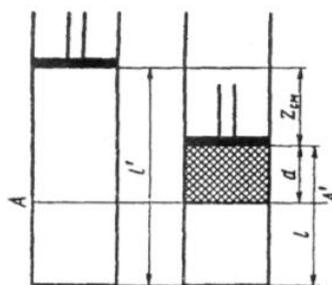


Рисунок 10 – Схемы полого резонатора без диэлектрика и частично заполненного диэлектриком

«Диэлектрическая проницаемость определяется из выражения:

$$\epsilon_r' = \frac{1 + (\lambda_c a / 2\pi d)^2}{1 + (\lambda_c / \lambda_p)^2}, \quad (7)$$

где λ_p – резонансная длина волны резонатора; λ_c – критическая длина волны резонатора [5]; d – высота столба жидкости.

Также в данной работе автор «рассматривает цилиндрический резонатор, в котором «кювета с исследуемой жидкостью устанавливается на оси резонатора; в этом случае кювета должна иметь цилиндрическую форму, тонкие стенки и малый диаметр». Все расчетные формулы, методы измерения и анализ ошибок даны в работе [20]. Погрешность» [8] этого метода составляет порядка 1% для ϵ' и 3% для ϵ'' . «Основными источниками погрешности являются неточности измерений [17], погрешности расчета, а для методов первой группы на погрешность влияет неточность определения размеров

образцов. При использовании первой группы методов необходимо, чтобы образцы были простой формы (прямоугольник или цилиндр), а также имели заданные размеры. Вторая же группа методов не предъявляет особых требований к образцам [17].

Достоинством резонаторных методов являются простота измерений, малые габариты установки, приемлемые погрешности ϵ' порядка 1,5%, а ϵ'' 3–5%, малое количество жидкости, необходимое для измерения. К недостаткам этих методов можно отнести механическую трудность изготовления резонаторов с большой добротностью, необходимость обеспечения большой стабильности генератора колебаний и невозможность измерения ϵ' и $\text{tg}\delta$ жидкостей с большими потерями»[5].

Микрополосковые линии

Для определения диэлектрических свойств различных веществ, помимо волноводов и коаксиальных ячеек, применяются [9] микрополосковые линии (МПЛ). В работе [22] авторы исследовали диэлектрические свойства жидких кристаллов в области частот 0,1 ГГц на стыке метрового и дециметрового диапазонов волн с помощью микрополосковых резонаторов, которые совмещают в себе сравнительно высокую добротность и миниатюрность. В данной работе авторы рассматривали некоторые конструкции чувствительных элементов на основе микрополосковых структур, позволяющих измерять диэлектрическую проницаемость материалов на сверхвысоких частотах (СВЧ).

В работе [22] использование микрополосковых структур для исследования диэлектрической проницаемости проводилось на трех сконструированных датчиках, показанных на рис. 11.

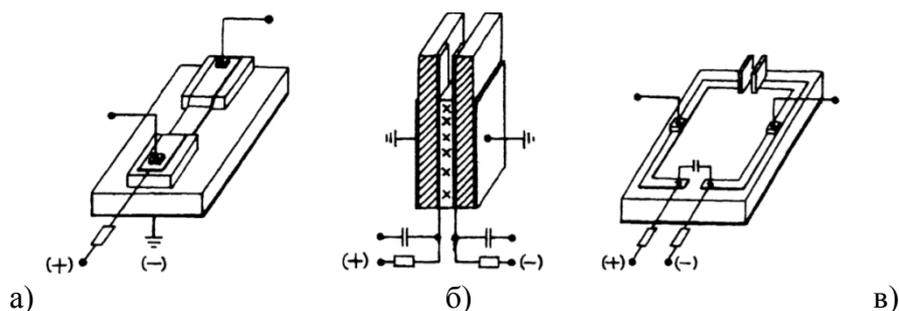


Рисунок 11– Конструкции микрополосковых СВЧ- датчиков

«Конструкция первого СВЧ-датчика состоит из двух отрезков микрополосковых линий, соединенных между собой отрезком несимметричной воздушной полосковой линии» [23], в котором и размещается исследуемый образец. Второй вид датчика выполнен на основе связанных «микрополосковых линий, которые склеивались пластмассовым компаундом так, что взаимодействующие полосы резонаторов располагались параллельно друг другу внутри конструкции, а экраны МПЛ – снаружи, в верхней части конструкции был оставлен промежуток» [24], куда и заливался исследуемый образец [22]. Третий вид датчика выполнен на основе «кольцевого резонатора», полоска которого «свернута в виде квадрата. В этом датчике образец заливался в зазор между обкладками плоского конденсатора, изготовленными из тонкой латуни и припаянными к концам полоски резонатора» [24]. Авторами были построены АЧХ для всех видов датчиков (рис. 12).

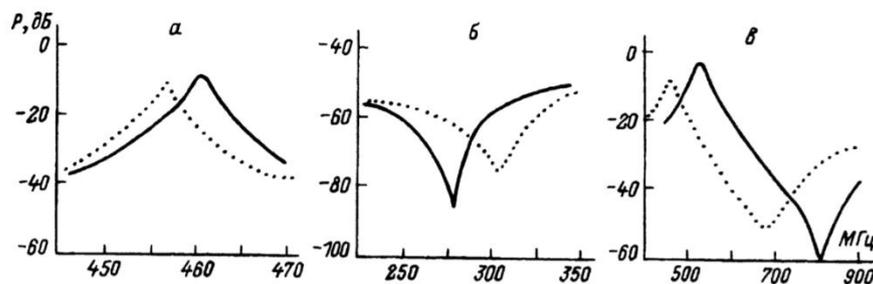


Рисунок 12 – Амплитудно-частотные характеристики микрополосковых СВЧ-датчиков

В ходе экспериментальной проверки авторами было показано, что наибольшей чувствительностью обладает датчик мостового типа на связанных микрополосковых линиях и датчик на основе «кольцевого» резонатора. Относительная чувствительность исследуемых датчиков лежит в пределах 10^{-3} - 10^{-4} , что позволяет фиксировать небольшие изменения диэлектрической проницаемости жидких кристаллов на СВЧ, связанных с изменением ориентации молекул в образце жидкого кристалла.

В «дальнейшем авторами была усовершенствована конструкция СВЧ-датчика, в которой микрополосковый измерительный резонатор включен в качестве задающего контура в автогенераторную СВЧ-схему. Задающим контуром является микрополосковый резонатор «кольцевого» типа с вертикальными измерительными позолоченными пластинами. В качестве исследуемых образцов выступили два типичных нематогена: 4-н-пентил-4-цианобифенил (5ЦБФ) и 4-метоксибензилиден-4-бутиланилин (МББА). Методика проведения эксперимента заключается в следующем: в зазор измерительных пластин СВЧ- датчика автогенератора помещался жидкий кристалл и выдерживался в течение часа для достижения равновесия. Затем для каждого образца при наложении магнитного поля снимались зависимости относительного изменения частоты и амплитуды. Аналогичные зависимости были сняты при приложении к измерительным пластинам датчика электрического напряжения. Также было исследовано совместное воздействие магнитного и электрического полей на жидкие кристаллы. СВЧ-датчик размещался в миниатюрном термостате, который располагался между полюсами электромагнита. Корпус автогенератора мог вращаться между полюсами магнита так, что направление магнитного поля могло быть как параллельно, так и перпендикулярно сверхвысокочастотному электрическому полю» [9]. Также в работе [9] автор приводит краткое исследование нескольких работ, в которых предложены различные конструкции для расчетов КДП, использующие микрополосковые линии.

Метод коаксиального пробника

Рассмотренные выше методы требуют определенной подготовки образцов для исследования КДП, что может негативно сказываться при расчетах, так как при подготовке образцов нарушается их естественная структура. В таких случаях используют методы, неразрушающие контроля.

Наиболее современным неразрушающим методом, «использующим коаксиальную линию передачи, является метод коаксиального зонда с открытым концом [8] в течение многих лет использовался в качестве метода неразрушающего контроля, так как исследование образцов происходит путем погружения коаксиального пробника в жидкость или касания пробника плоской поверхности материала. Разомкнутый коаксиальный пробник является срезом коаксиальной линии передачи. Структура полей на конце пробника искажается, как только они входят в контакт с испытуемым материалом, [25] и для определения диэлектрических параметров измеряется отраженный сигнал [26] с помощью векторного анализатора цепей» (рис. 13).

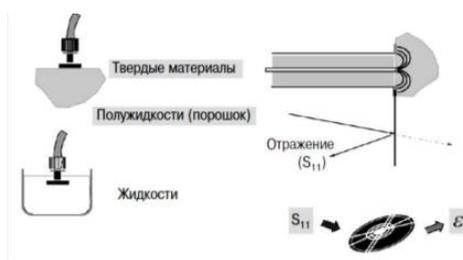


Рисунок 13 – Метод коаксиального пробника

С помощью данного метода в работе [16] авторы «измеряли КДП растворов поваренной соли концентрацией 0,5 моль/л и 1 моль/л. Измерения проводились [9] в диапазоне частот от 1 до 20 ГГц с использованием векторного анализатора цепей HP 8510. Для интерпретации результатов авторами были исследованы конденсаторная модель, антенная модель, модель виртуальной линии и модель с использованием рациональных функций. По итогам тестирования наилучшие результаты дает модель виртуальных линий. Так, для исследуемых растворов погрешность по ϵ' составляет 5–10 %, а по ϵ'' – 2–5 % для раствора 0,5 моль/л и 1–5 % для раствора 1 моль/л [9].

При использовании метода коаксиального пробника к образцу предъявляются определенные требования, а именно:

- толщина образца более половины длины волны;
- немагнитный;
- изотропный и однородный; плоская поверхность;
- отсутствие воздушных зазоров»[26].

«Основными источниками погрешностей при использовании данного метода является неточность измерения величины отраженного сигнала S_{11} , нестабильность кабеля, наличие воздушных зазоров, а также неточность измерения толщины образца» [26]. Использование коаксиального пробника для определения КДП требует хорошего контакта с исследуемым образцом», как говорится в [26].

Метод свободного пространства

«Одним из существующих методов для измерения диэлектрической проницаемости, отвечающей требованиям для неразрушающего контроля, является измерение коэффициента передачи в свободном пространстве с использованием антенн [9] для фокусировки энергии на образце или пропускании энергии через него» [9] (рис. 14).



Рисунок 14 – Метод свободного пространства

«Сущность метода исследования диэлектриков в свободном пространстве (метода свободного пространства) состоит в сравнении параметров электромагнитной волны, прошедшей через диэлектрический образец или им отраженной, с параметрами волны, проходящей то же пространство без образца, либо с волной, отраженной от идеального отражателя» [26, 27]. Кроме того, «при использовании данного метода диэлектрический образец располагается в свободном пространстве, не имея механического контакта с какими-либо узлами измерительной аппаратуры, кроме элементов крепления образца. Элементы крепления не оказывают существенного влияния на результаты измерений» [27]. Сравнивая параметры отраженной и прошедшей волн, можно вычислить собственные параметры диэлектрика [28].

«Различные варианты экспериментальной установки исследованы в работе [29]. «В работе рассмотрены три системы, используемые для измерения коэффициента передачи в свободном пространстве.

1. Система с рупорными антеннами (состоит из двух антенн, расположенных на противоположных сторонах от исследуемого объекта).

2. Система с линзами (состоит из двух рупорных антенн и двояковыпуклой линзы, расположенной между передающей антенной и исследуемым объектом).

3. Система с антенной решеткой (состоит из антенной решетки и приемной рупорной антенны). Авторами протестированы предложенные системы с целью выявления наилучшего варианта для промышленного применения. Был измерен коэффициент передачи и рассчитана КДП семи образцов (пена ПВХ, фторопласт, акрил и др.), размер которых не превышал 10 см. Измерения проводились» [9] в диапазоне частот от 10 до 12 ГГц. Полученные значения КДП сравнивались с данными, опубликованными в литературе. Анализ полученных данных позволил сделать вывод о том, что система с антенной решеткой имеет ряд преимуществ по сравнению с двумя другими системами [3, 8].

В работе [20] автор рассматривает два варианта поляризационного метода определения КДП исследуемого образца. Первый вариант заключается в том, что «если на поверхность раздела двух сред падает электромагнитная волна с круговой или эллиптической поляризацией, то отраженная волна меняет поляризационную структуру. Комплексный коэффициент поляризации отраженной волны p равен отношению коэффициентов Френеля для параллельно и перпендикулярно поляризованной волны:

$$p = \frac{r_{\parallel}}{r_{\perp}}, \quad (8)$$

где r_{\parallel} и r_{\perp} – коэффициенты Френеля для параллельно и перпендикулярно поляризованной волны.

Таким образом, экспериментальное нахождение p , например, по амплитудам вертикальной и горизонтальной составляющих поля и углу ориентации поляризационного эллипса также дает возможность вычислить ϵ .

Второй вариант основан на измерении угла Брюстера и отношения модулей коэффициентов отражения параллельно и перпендикулярно поляризованных волн [22]. Основная ошибка измерений по углу Брюстера и поляризационными методами обусловлена тем, что теория этих методов учитывает отражение волн только от границы раздела двух сред и предполагает отсутствие внутренних многократных отражений, вызываемых теневой поверхностью образца» [26].

«Комплексные коэффициенты прохождения параллельно и перпендикулярно поляризованных волн через границу раздела «свободное пространство – диэлектрик», согласно формулам Френеля, записываются в виде:

$$\dot{t}_{\parallel} = \frac{2\sqrt{\epsilon} \cos \varphi}{\epsilon \cos \varphi + \sqrt{\epsilon - \sin^2 \varphi}}, \quad (9) \quad \dot{t}_{\perp} = \frac{2 \cos \varphi}{\cos \varphi + \sqrt{\epsilon - \sin^2 \varphi}} \quad (10)$$

где \dot{t}_{\parallel} и \dot{t}_{\perp} – комплексные коэффициенты прохождения параллельно и перпендикулярно поляризованных волн, ϵ – диэлектрическая проницаемость, φ – угол падения ЭМ- волны.

Данные выражения позволяют вычислить комплексный коэффициент прохождения волны через плоскопараллельную пластину определенной толщины, по значению которого затем можно найти и ϵ » [30].

Образцы «при исследовании должны быть большими, плоскими, с параллельными сторонами, а также однородными» – [26] – «Основные источники погрешностей:

- неточность измерения величины S_{11} и S_{12} ;
- погрешность расчета;
- нарушение параллельности плоскостей, перпендикулярных к направлению распространения волны;

- низкое качество обработки поверхности плоскостей, перпендикулярных к направлению распространения волны;
- неточность измерения толщины образца»[26].

«Метод свободного пространства может быть применен: для измерений в миллиметровом и сантиметровом диапазонах, когда другие (например, резонаторные или волноводные) методы становятся неприемлемыми; при исследовании параметров однородных, неоднородных и слоистых листовых материалов как в условиях лаборатории, так и в производственных условиях, когда изготовление образцов специальной формы из листового материала нецелесообразно; при исследовании пленочных материалов; при исследовании готовых изделий из диэлектриков (например, обтекателей антенн, антенных [30] окон и других радиопрозрачных оболочек), которые нельзя разрушать для изготовления из них образцов в целях проведения измерений. Наконец, метод свободного пространства может использоваться при исследовании диэлектриков в процессе воздействия на них каких-либо внешних факторов: радиации, механических усилий, тепловых потоков, плазменных сред, при которых любая другая измерительная аппаратура, контактирующая с диэлектрическими образцами, становится либо помехой для действия этих факторов, либо сама разрушается под их воздействием» [30].

Выводы

В данной работе были проанализированы методы измерения комплексной диэлектрической проницаемости материалов. Было выяснено, что «на частотах от 100 Гц до 1 МГц используют конденсаторный метод, заключающийся в использовании конденсатора, между обкладками которого размещается исследуемый образец. Изменение емкости конденсатора будет зависеть от свойств материала» [7]. Однако в использовании данного метода для вычисления диэлектрической проницаемости ϵ и тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$ большую погрешность вносят воздушные зазоры, возникающие между обкладками конденсатора и образцом.

Метод линии передачи заключается в том, что исследуемый образец размещают в отрезке коаксиальной линии или волновода. При этом сам образец подвергается механической обработке, что может негативно сказываться при измерениях, так как при обработке изменяется структура образца. Измерения ϵ и $\text{tg}\delta$ основываются на измерении отраженного и прошедшего сигналов.

Прямоугольные и круглые волноводы целесообразно применять для измерения КДП материалов в диапазоне частот свыше 1 ГГц, что обусловлено значительными геометрическими размерами волноводов на более низких частотах. Как отмечается в [2], точность измерения диэлектрической проницаемости коаксиальными и волноводными методами может составлять 1–3%, но коаксиальный метод может быть неудобен для измерения твердых материалов, так как не всегда обеспечивается достаточный контакт исследуемого материала с внутренними и внешними проводниками ячейки.

Методы с использованием объемного резонатора можно разделить на две группы. К первой группе «относят методы, основанные на возбуждении резонанса непосредственно в измеряемом образце, а ко второй – на внесении образцом возмущения в поле опорного резонатора. В обоих методах измеряются параметры S_{11} и/или S_{21} . На основании измеренных величин рассчитывают требуемые характеристики диэлектрического материала» [6].

Для определения диэлектрических свойств различных веществ, помимо волноводов и коаксиальных ячеек, применяются полосовые линии. Методы с использованием микрополосковых резонаторов позволяют измерять КДП веществ при весьма малых его объемах, однако они не обладают достаточной широкополосностью.

Рассмотренные выше методы обладают существенным недостатком – «из-за нарушения естественной структуры материала при подготовке образцов данные,

полученные в результате лабораторных исследований, могут отличаться от значений КДП в условиях естественного залегания горных пород» [7].

Методы неразрушающего контроля используют в тех случаях, когда обработка образца нежелательна или образец имеет очень большие размеры. Метод коаксиального пробника использует коаксиальную линию с открытым концом и заключается в исследовании образцов путём погружения коаксиального пробника в жидкость или касанием пробника поверхности твердого материала. И для определения диэлектрических параметров измеряется отражённый сигнал. При соприкосновении пробника и образца необходимо, чтобы они плотно прилегали друг другу, в противном случае могут возникнуть воздушные зазоры, что негативно сказывается при измерении.

«Сущность метода исследования диэлектриков в свободном пространстве (метода свободного пространства) состоит в сравнении параметров электромагнитной волны, прошедшей через диэлектрический образец или им отраженной, с параметрами волны, проходящей то же пространство без образца, либо с волной, отраженной от идеального отражателя» [14, 20].

Метод свободного пространства является более подходящим методом по следующим причинам:

- не требуется обработка материалов;
- размеры образцов могут быть достаточно большими;
- можно использовать при высоких температурах;
- отсутствие механического контакта с образцом;
- возможность измерения магнитных материалов.

Таким образом, выбор того или иного метода определения электрофизических параметров горных пород является важной задачей, так как данные о диэлектрических характеристиках природных минералов могут быть полезны в таких областях, как геология, сейсмология, горнодобывающая промышленность, и т.п. Поэтому, проанализировав все существующие методы (табл. 2), мы рекомендуем метод свободного пространства как наиболее подходящий метод измерения, который позволит получить наиболее достоверные и полные результаты.

Таблица 2 – Методы измерения диэлектрической проницаемости

Название метода	Краткое описание	Рекомендуемый материал	Частотный диапазон	Преимущества	Недостатки
Конденсаторный метод	Материал должен быть помещен между двумя электродами, чтобы сформировать конденсатор	Материал, способный формироваться в виде плоского гладкого листа	< 100 МГц	Высокая точность, недорогой	Ограниченный частотный диапазон; толщина материала не превышает 10 мм
Схема с сосредоточенными параметрами	Образец является частью изолятора в цепи со сосредоточенными параметрами	Все материалы, кроме газов	< 100 МГц	Могут быть измерены жидкие и твердые материалы	Ограниченный диапазон частот; не подходит для материалов с очень низкими потерями
Коаксиальный зонд	Отрезанная коаксиальная линия образует плоскую границу, контактирующую с исследуемым веществом. Для измерения отражения необходимо	Жидкости и полутвердые вещества	200 МГц–20 ГГц, даже >100 ГГц	Прост в использовании, не разрушает некоторые материалы, не требует предварительной подготовки	Ограниченная точность ($\pm 5\%$). Разрешение с низкими потерями; большие образцы и твердые тела должны иметь плоскую поверхность

	векторный анализатор				
Метод линии передачи	Образец заполняет поперечное сечение замкнутой линии передачи, вызывая изменение импеданса	Жидкости и твердые вещества	< 100 МГц	Более точный и чувствительный, чем зондовый метод	Меньшая точность, чем у резонаторного метода, подготовка материала сложна и требует много времени
Объемный резонатор	Образец вводится в резонатор (высокочастотная резонансная структура), что влияет на центральную частоту и добротность резонатора	Твердые тела	1 МГц–100 ГГц	Простая подготовка материала, адаптируемая к широкому диапазону температур	Сложный анализ
Метод свободного пространства	Используются антенны для направления СВЧ-излучения, прошедший или отраженный материал. Векторный анализатор цепей измеряет коэффициенты отражения и пропускания твердых тел	Твердые тела	1 МГц–100 ГГц	Неразрушающий метод можно использовать при высоких температурах	Требуется большой плоский, тонкий, параллельный образец и специальная калибровка

Литература

1. Волноводный метод для измерения комплексной диэлектрической проницаемости материалов в сантиметровом и миллиметровом диапазонах / М. П. Пархоменко, Д. С. Каленов, И. С. Еремин [и др.] // Электронная техника. Серия 1: СВЧ-техника. – 2019. – № 1(540). – С. 20–38.
2. Анищенко, Ю. В. Численное решение и компьютерная реализация прямой и обратной задач уравнения геоэлектрики / Ю. В. Анищенко, А. Д. Сатыбаев // Проблемы автоматики и управления. – 2020. – № 2(39). – С. 72–82.
3. Устройства для информационно-управляющей системы по мониторингу масляных силовых трансформаторов / Г. Н. Ниязова, К. Сатаркулов, Т. К. Кабаев, Р. А. Мырзаканова // Проблемы автоматики и управления. – 2020. – № 2(39). – С. 43–50.
4. Григорьев, А. Д. Новый волноводный метод измерения параметров диэлектриков / А. Д. Григорьев // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. – 2018. – № 5. – С. 33–38. – DOI 10.32603/1993-8985-2018-21-5-33-38.

5. <http://netess.ru/3knigi/1223442-1-servis-virtualnih-konferenciya-pax-grid-sovremennoe-sostoyanie-mineralogii-mezhdunarodnaya-internet-konferenciya-kazan-fev.php#2> (Дата обращения: 3.10.21)
6. https://studopedia.ru/19_326977_dielektricheskaya-pronitsaemost-mineralov-i-gornih-porod.html (Дата обращения: 3.10.21)
7. Бахтерев, В. В. Первые результаты использования микроволнового излучения для изучения хромитовых руд / В. В. Бахтерев // Уральский геофизический вестник. – 2013. – № 2(22). – С. 13–17.
8. http://window.edu.ru/catalog/pdf2txt/747/21747/4960?p_page=6 (Дата обращения: 3.10.21)
9. <https://dlib.rsl.ru/01008770216> (Дата обращения: 3.10.21)
10. Иноземцев М. А. Обзор методов измерения диэлектрической проницаемости горных пород / М. А. Иноземцев // Электронные средства и системы управления. Материалы докладов Международной научно-практической конференции. – 2020. – № 1-1. – С. 279–281.
11. https://knowledge.allbest.ru/geology/3c0a65625b2ac68a5d53b88421206d36_0.html (Дата обращения: 3.10.21)
12. Брандт А. А. Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах.– М.: Изд-во физ.-мат. лит. – 1963. – 404 с.
13. Импедансная спектроскопия: теория и применение : Рекомендовано методическим советом УрФУ для студентов, обучающихся по программе специалитета и магистратуры по направлениям подготовки 04.05.01 «Фундаментальная и прикладная химия», 04.04.01 «Химия», 04.04.02 «Химия, физика и механика материалов» / Ю. В. Емельянова, М. В. Морозова, З. А. Михайловская, Е. С. Буянова ; Министерство образования и науки Российской Федерации, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. – Екатеринбург : Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2017. – 156 с. – ISBN 978-5-7996-2067-7.
14. <http://docplayer.net/21632715-Measurement-of-dielectric-material-properties.html> (Дата обращения: 3.10.21)
15. Моделирование диэлектрических свойств горных пород, содержащих рудные минералы / О. Н. Полякова, В. В. Тихонов, А. Л. Дзарданов [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2009. – Т. 6. – № 2. – С. 62–65.
16. <http://www.iki.rssi.ru/books/2011tikhonov.pdf#2> (Дата обращения: 3.10.21)
17. Волноводный метод измерений электромагнитных параметров материалов в СВЧ диапазоне и оценка погрешности измерений / М. П. Пархоменко, Д. С. Каленов, И. С. Еремин [и др.] // Журнал радиоэлектроники. – 2018. – № 9. – С. 9. – DOI 10.30898/1684-1719.2018.9.6.
18. http://izvestia.asu.ru/media/files/issue/17/articles/ru/_p56-60.pdf (Дата обращения: 3.10.21)
19. <http://diss.seluk.ru/m-fizika/30001193-2-gusev-osnovi-dielektricheskoy-spektroskopii-uchebnoe-posobie-kazan-2008-predislovie-metod-dielektricheskikh-izmereniy-vpervie-kaza.php> (Дата обращения: 3.10.21)
20. Молостов, И. П. Коаксиальная измерительная ячейка для широкополосных измерений диэлектрической проницаемости / И. П. Молостов, В. В. Щербинин // Известия Алтайского государственного университета. – 2015. – № 1-2(85). – С. 56-60. – DOI 10.14258/izvasu(2015)1.2-09.
21. Кулешов, Г. Е. Диэлектрическая проницаемость и электропроводность композиционных материалов на основе углеродных наноструктур / Г. Е. Кулешов,

- В. И. Суслев // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2014. – № 1(31). – С. 84–87.
22. Verube, D. A comparative study of four open-ended coaxial probe models for permittivity measurement of lossy dielectric/biological material at microwave frequencies / D. Verube, F. M. Ghannouchi, P. Savard // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 1996. – V. 44, № 10. – P. 1928–1934.
23. Roussi G., Boule P., J. Chim. Phys., 64, 529 (1965)
24. Беляев, Б. А. Применение микрополосковых резонаторов для исследования диэлектрических свойств жидких кристаллов на СВЧ / Б. А. Беляев, Н. А. Дрокин, В. Н. Шепов // Журнал технической физики. – 1995. – Т. 65. – № 2. – С. 189–197.
25. https://kpfu.ru/portal/docs/F_1534325453/Bakalavrskaya_Kljukin.pdf (Дата обращения: 3.10.21)
26. Диденко Ю.В., Молчанов В.И., Пашков В.М., Татарчук Д.Д., Шмыгин Д.А. СВЧ методы измерения параметров диэлектрических материалов на основе составного диэлектрического резонатора // ЕЛЕКТРОНІКА ТА ЗВ'ЯЗОК . – Т. 19.– № 6. – 2014. – С. 14–20.
27. Доценко, О. А. Использование нерегулярных микрополосковых резонаторов для измерения температурных зависимостей магнитной проницаемости порошков ферритов : специальность 01.04.03 "Радиофизика" : Дис.... на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук / Доценко Ольга Александровна. – Томск, 2007. – 115 с.
28. <http://bananabooks.net/book/1177-proektirovanie-radiovolnovyx-svch-priborov-nerazrushayushhego-kontrolya-materialov-malkov-na/17-31-izmeryaemye-parametry-i-princip-izmereniya.html> (Дата обращения: 3.10.21)
29. Дрокин, Н. А. Микрополосковые резонаторы и их применение для исследований диэлектрических свойств жидких кристаллов: специальность 01.04.01 "Приборы и методы экспериментальной физики»: Дис.... на соискание ученой степени доктора физико-математических наук / Дрокин Николай Александрович. – Красноярск, 2007. – 304 с.
30. Мищенко С.В., Малков Н.А. Проектирование радиоволновых (СВЧ) приборов неразрушающего контроля материала. – Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та. – 2003. –128 с.
31. <http://window.edu.ru/catalog/pdf2txt/747/21747/4960> (Дата обращения: 8.10.21)
32. Bogosanovich M. [et all]. A comparison of systems for non-contact and non-destructive natural product inspection // Fifth International Conference on Electromagnetic Wave Interaction with Water and Moist Substances New Zealand. – 2003. – P. 15-23.
33. https://knowledge.allbest.ru/radio/3c0b65635b3ad78b4c43b89521316c37_0.html (Дата обращения: 15.10.21)