

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.9.8>

УДК: 621.371, 621.372

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ КОМПЛЕКСНЫХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ И МАГНИТНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТЕЙ МАТЕРИАЛОВ НА СВЧ

О.А. Дьяконова, В.С. Солосин

ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал
141120, г. Фрязино, пл. Введенского, 1

Статья поступила в редакцию 20 июля 2022 г.

Аннотация. В данной работе описаны методы и средства для измерения комплексных диэлектрической и магнитной проницаемостей различных материалов в диапазоне 0,9 – 40 ГГц. Дан перечень оборудования для экспериментальных установок. В измерительных схемах использован векторный анализатор цепей компании Agilent PNA-X N5244A. Приведены шесть схем подключения стандартных рупорных антенн к анализатору цепей. Рассмотрены три методики измерения диэлектрической и магнитной проницаемостей по величинам коэффициента отражения и одна методика по величинам коэффициента отражения и коэффициента прохождения. Представлены сравнительные результаты измерения коэффициентов отражения электромагнитного излучения через образцы парафина и опилок в диапазоне 8 – 38 ГГц двумя способами. Проведенные измерения позволили провести апробацию одной из предложенных схем.

Ключевые слова: комплексная диэлектрическая проницаемость, комплексная магнитная проницаемость, коэффициент отражения, коэффициент прохождения, векторный анализатор цепей, рупорная антенна, квазиоптический рефлектометр, резонатор.

Финансирование: Работа выполнена за счет бюджетного финансирования в рамках государственного задания № 075-01133-22-00.

Автор для переписки: Дьяконова Ольга Алексеевна, doa52@mail.ru

Введение

Методы измерения комплексных диэлектрической и магнитной проницаемостей материалов определяются рядом факторов, среди которых диапазон частот, величина диэлектрических и магнитных потерь исследуемого материала. В СВЧ диапазоне чаще всего используются следующие методы [1-5]:

- волноводные методы;
- резонансные методы;
- методы «свободного пространства».

Для измерения материалов с малыми потерями (тангенс угла потерь 0.01 и менее) предпочтение отдается резонансным методам, а для материалов со средними и большими потерями – волноводным методам и методам свободного пространства. При разработке новых материалов важным фактором также является количество материала необходимое для изготовления образцов. Так в волноводных и резонаторных методах используются образцы существенно меньших размеров, чем в методах свободного пространства. С другой стороны, метод свободного пространства позволяет более полно оценить радиопоглощающие материалы с учетом не только тепловых потерь, но и потерь из-за рассеяния энергии электромагнитной волны на неоднородностях материалов.

Методики измерения комплексных диэлектрической и магнитной проницаемостей ε , μ включают в себя:

- а) схемы измерительных установок;
- б) перечень измеряемых параметров и процедуры их измерения;
- в) алгоритмы определения ε и μ по измеренным параметрам.

Методики рассчитаны на использование в измерительных схемах векторного анализатора цепей.

Описаны три методики измерения ε и μ на СВЧ по величинам коэффициента отражения и одна методика по величинам коэффициента отражения и коэффициента прохождения:

- волноводная методика измерения ε и μ по величинам коэффициента отражения;
- методика измерения ε и μ по величинам коэффициента отражения в свободном пространстве;
- резонаторная методика измерения ε и μ ;
- методика измерения ε и μ по величинам коэффициента отражения и прохождения в свободном пространстве.

В наличии у многих экспериментаторов находится дорогостоящий векторный анализатор цепей фирмы Agilent в базовом варианте. Для корректных измерений, особенно в свободном пространстве, возникла необходимость укомплектования прибора стандартным российским оборудованием (в частности, антеннами). Проведенный анализ имеющегося оборудования, позволил остановиться на ниже предложенных схемах, которые могут послужить основой для создания полноценных экспериментальных установок для исследования электродинамических характеристик различных материалов.

В данной работе собраны экспериментальные установки по одной из предложенных схем и проведены измерения коэффициента отражения от образцов парафина и опилок.

1. Оборудование для измерительных установок

Оборудование, необходимое для практической реализации методик экспериментальных оценок диэлектрической и магнитной проницаемостей (ε , μ) материалов, а также коэффициентов R отражения и T прохождения электромагнитного излучения через образцы материалов представлено в таблице 1.

В измерительных схемах используется векторный анализатор цепей PNA-X N5244.

Таблица 1. Перечень оборудования для измерительных установок

Номер позиции	Тип прибора	Расшифровка	Кол-во, шт	Примечание
1.	PNA-X N5244A компании Agilent с опциями:	Векторный анализатор цепей от 10МГц до 43,5 ГГц	1	
1а.	Опция 400 с установкой опции 080	4004-портовый измерительный блок	1	обязательная
1б.	Опция 419 с установкой опции 400	Дополнительные цепи подачи смещения и аттенюаторы источника 65дБ, 35дБ.	1	необязательная
1в.	Опция 010	Измерения во временной области	1	обязательная
1г.	Опция 080	Устанавливается частота источника независимо от настройки приемников	1	обязательная
1д.	Опция 083 с установкой опции 080	Скалярная и векторная калибровка	1	необязательная
1е.	Опция 084 с установкой опций 080, 083 и А.07.00	Измерение со встроенным гетеродином	1	необязательная
1ж.	Опция 020	Внешние входы для миллиметровых волн	1	Для перспективы
1и.	Опция 021 с установкой опции 025	Использование внутреннего импульсного модулятора	1	обязательная
1к.	Опция 008 с установкой опции 025	Измерение в импульсных режимах	1	обязательная
1л.	Опция 100 с уста- новкой 85071Е	Измерение параметров материалов по методикам фирмы Agilent	1	обязательна, но возможны другие варианты
1м.	85071Е	Прикладное программное обеспечение	1	обязательна, но возможны другие варианты
2.	85056А	Механический набор	1	
3.	85133ЕС01	Кабель 2,4х2,4 мм	12	
4.	2,4/F - 2,4/F	Адаптер	12	
5.	2,4/F - 2,9/М	Адаптер	4	
6.	2,4/F - SMA/М	Адаптер	4	
7.	П6 - 123	Антенна	2	
8.	П6 - 124	Антенна	2	
9.	П6 - 126	Антенна	2	
10.	П6 - 127	Антенна	2	
11.	П6 - 128	Антенна	2	
12.	П6 - 130	Антенна	2	
13.		Штатив	4	

Опция 400 – 4-х портовый вариант. Подключение до 4-х антенн позволяет проводить измерения в различных частотных диапазонах (одновременно подключить две пары антенн) или выполнять измерения с одновременным измерением ко (co-pol) и кросс (cross-pol) поляризационных компонент.

Опция 010 – преобразование сигналов в пространственно-временную область и обратно. Позволяет устранить переотражения между отдельными элементами тракта. Значительно повышает точность измерений.

Остальные опции не являются обязательными для описываемых видов измерений.

Опция 100 – обеспечивает измерения параметров материалов по методикам фирмы Agilent при использовании программного обеспечения **85071E**.

Наряду с рядом неоспоримых достоинств использования стандартного программного обеспечения необходимо отметить, что достижение указанных точностей измерения возможно только при соблюдении всех указанных там условий (опций, параметров антенн и требований к образцам).

В качестве дополнительных необходимых элементов измерительных установок используются адаптеры, фотографии которых представлены на рис.1.



Рис. 1. Адаптеры измерительных установок

SMA - Small Microwave Adapter – механически эквивалентен стандарту 3.5, который электрически более широкополосный, то есть 2.4/F - SMA/M можно заменить на 2.4/F - 3.5/M.

2. Схемы подключения антенн к векторному анализатору цепей

Рассмотренные схемы ориентированы на методики, представленные в работе, но могут быть использованы и с программным обеспечением **85071E**.

Схемы подключения рупорных антенн к анализатору цепей приведены на рис. 2-7. Стрелками указаны недостающие компоненты в предположении, что кабели имеют разъемы 2.4М (male). Антенны смотрят примерно в одну сторону, применяются при исследовании рассеяния волн от объектов в безэховой камере (измерения ЭПР), а также при измерении особо малых уровней коэффициента отражения.

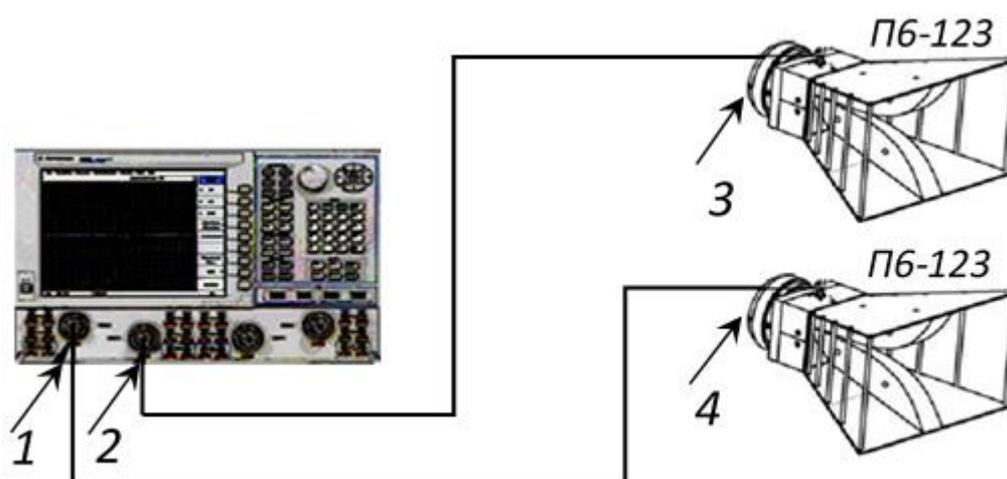


Рис. 2. Схема 1 – Диапазон 0.9 – 12 ГГц,
1 и 2 – два адаптера 2.4/F - 2.4/F, 3 и 4 – два адаптера 2.4/F - SMA/M

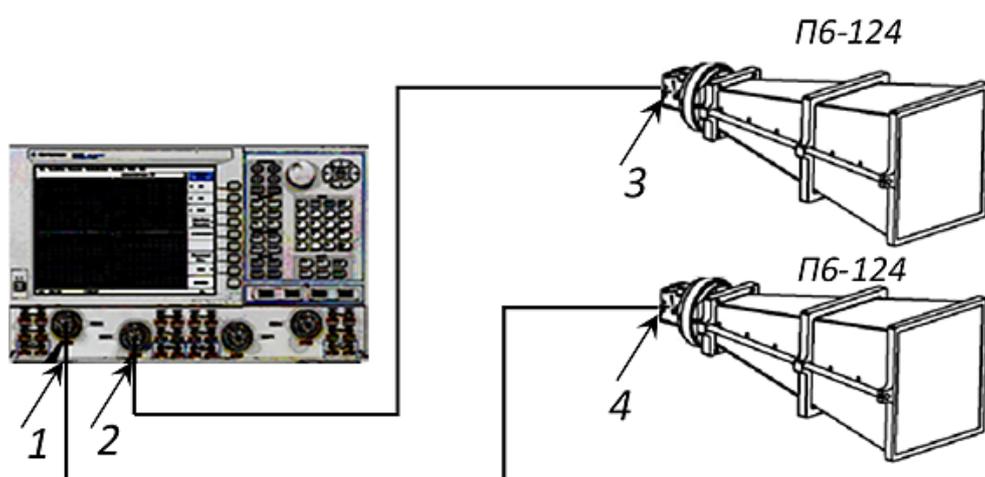


Рис. 3. Схема 2 – Диапазон 8 – 18 ГГц,
1 и 2 – два адаптера 2.4/F - 2.4/F, 3 и 4 – два адаптера 2.4/F – SMA/M

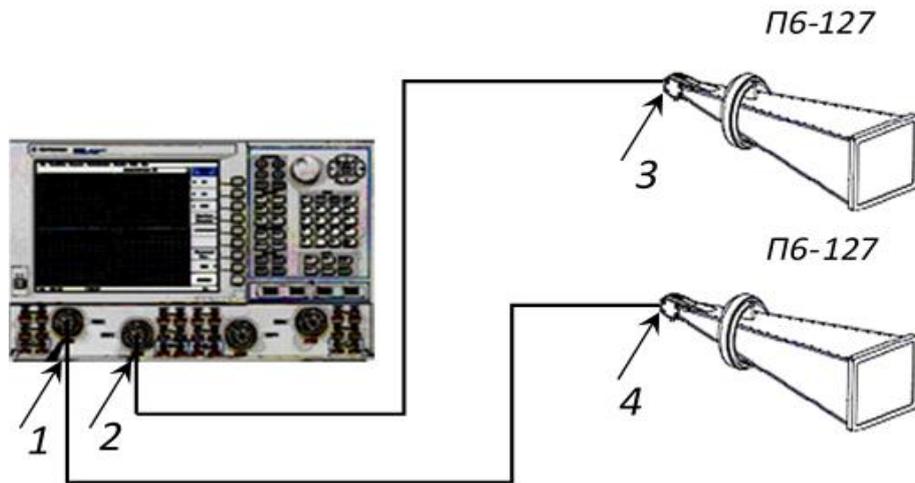


Рис. 4. Схема 3 – Диапазон 8 – 18 ГГц,
1 и 2 – два адаптера 2.4/F - 2.4/F, 3 и 4 – два адаптера 2.4/F - SMA/M

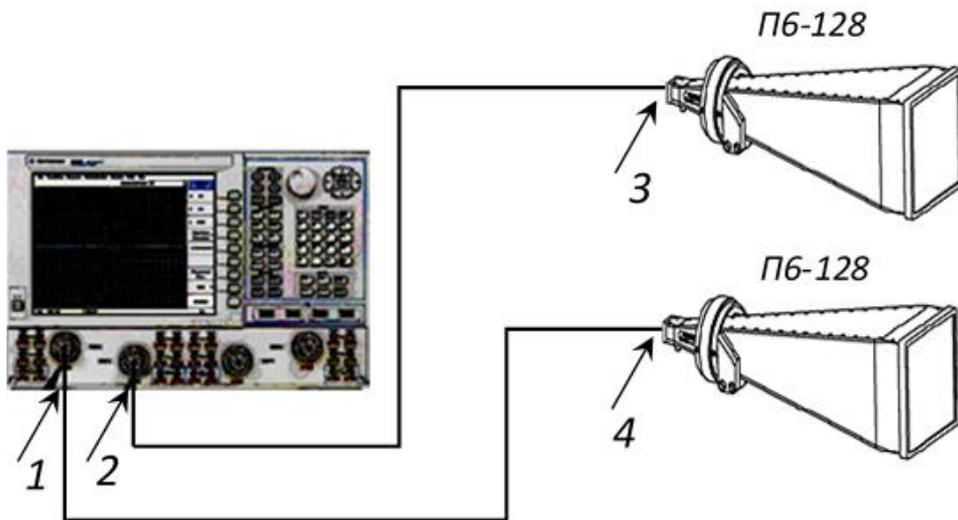


Рис. 5. Схема 4 – Диапазон 12 – 40 ГГц,
1 и 2 – два адаптера 2.4/F - 2.4/F, 3 и 4 – два адаптера 2.4/F - SMA/M

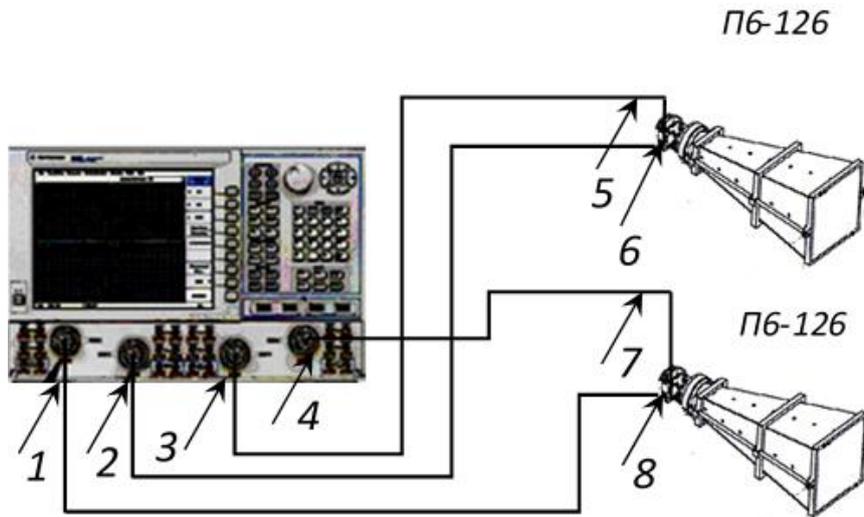


Рис. 6. Схема 5 – Диапазон 12 – 40 ГГц,
1, 2, 3, 4 – четыре адаптера 2.4/F- 2.4/F,
5, 6, 7, 8 –четыре адаптера 2.4/F- SMA/M

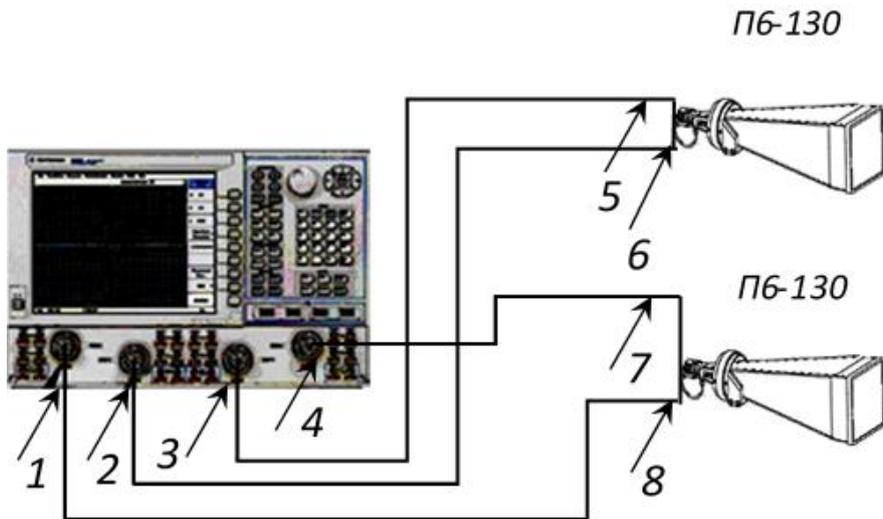


Рис. 7. Схема 6 – Диапазон 18 – 40 ГГц,
1, 2, 3, 4 – четыре адаптера 2.4/F - 2.4/F,
5, 6, 7, 8 – четыре адаптера 2.4/F - 2.9/M

Схемы 5 и 6 позволяют проводить измерения на двух поляризациях.

3. Волноводная методика измерения комплексных диэлектрической и магнитной проницаемостей по величинам коэффициента отражения

Структурная схема измерительной установки дана на рис. 8.

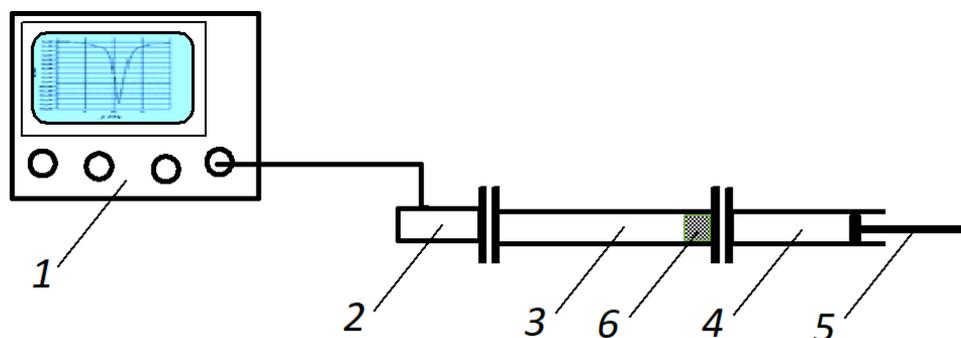


Рис. 8. Структурная схема измерительной установки для волноводного метода: 1 – векторный анализатор цепей, 2 – коаксиально-волноводный переход (КВП), 3 – волноводная секция, 4 – волноводная секция с отражателем, 5 – волноводный отражатель, 6 – образец

Первичным измеряемым параметром является частотная зависимость комплексного коэффициента отражения от системы КВП – «образец – волноводная секция с отражателем». Как результат стандартной обработки этой зависимости определяются два вторичных измеряемых параметра – коэффициент R отражения, собственно, от образца и коэффициент T прохождения через образец.

Процедура определения вторичных измеряемых параметров R и T такова. Частотная зависимость коэффициента отражения от системы КВП – «образец – волноводная секция с отражателем» преобразуется в пространственно-временную область. В этой области выделяются сигналы, отразившиеся от образца и сигнал, отразившийся от волноводного отражателя и при этом дважды прошедший через образец (туда и обратно). Далее путем преобразования этих сигналов в частотную область получают требуемые частотные зависимости коэффициентов R отражения от образца и коэффициента T прохождения через образец.

Зная коэффициенты R отражения и T прохождения через образец, можно определить комплексную диэлектрическую и магнитную проницаемости (ε и μ), используя следующие формулы:

$$n = \frac{1}{k} \sqrt{\left(\frac{2}{d} \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{(R+T-1)(R-T+1)}{(R+T+1)(R-T-1)}} \right)^2 + \left(\frac{\pi}{a} \right)^2},$$

$$W = -j \frac{\sqrt{k^2 n^2 - (\pi/a)^2}}{n \sqrt{k^2 - (\pi/a)^2}} \sqrt{\frac{(R-T-1)(R+T-1)}{(R-T+1)(R+T+1)}},$$

где n показатель преломления и W волновое сопротивление материала, d – толщина образца, a – размер широкой стенки волновода, λ – рабочая длина волны, $k=2\pi/\lambda$ – волновое число.

$$\varepsilon = n/W. \quad (1)$$

$$\mu = n W. \quad (2)$$

4. Методика измерения комплексных диэлектрической и магнитной проницаемостей по величинам коэффициентов отражения в свободном пространстве

Предлагаются две схемы измерения первичного параметра – коэффициента отражения от системы, в которую включен образец: упрощенная схема с использованием плавного рупора и более совершенная схема для точных измерений с использованием квазиоптического рефлектометра.

Структурная схема измерительной установки с использованием плавного рупора дана на рис. 9.

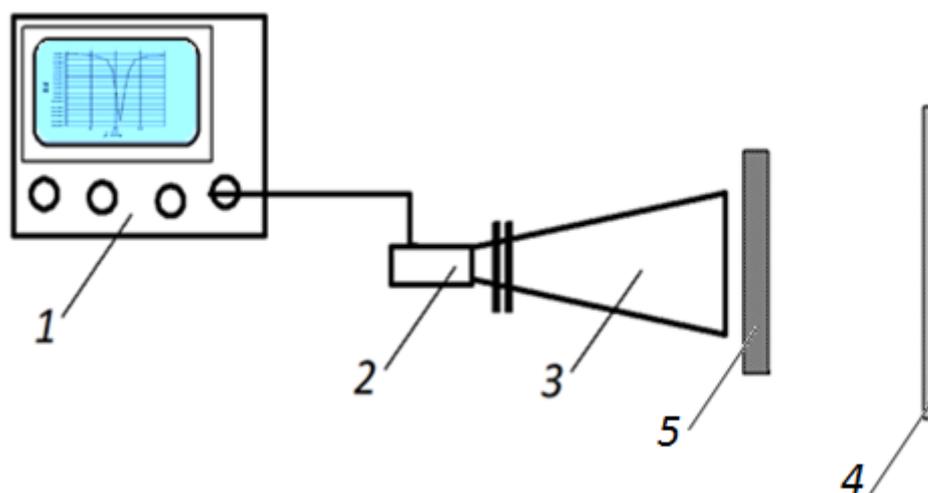


Рис. 9. Структурная схема измерительной установки с плавным рупором:
 1 – векторный анализатор цепей, 2 – коаксиально-волноводный переход (КВП),
 3 – плавный рупор, 4 – отражатель, 5 – образец

Структурная схема измерительной установки с использованием квазиоптического рефлектометра представлена на рис.10.

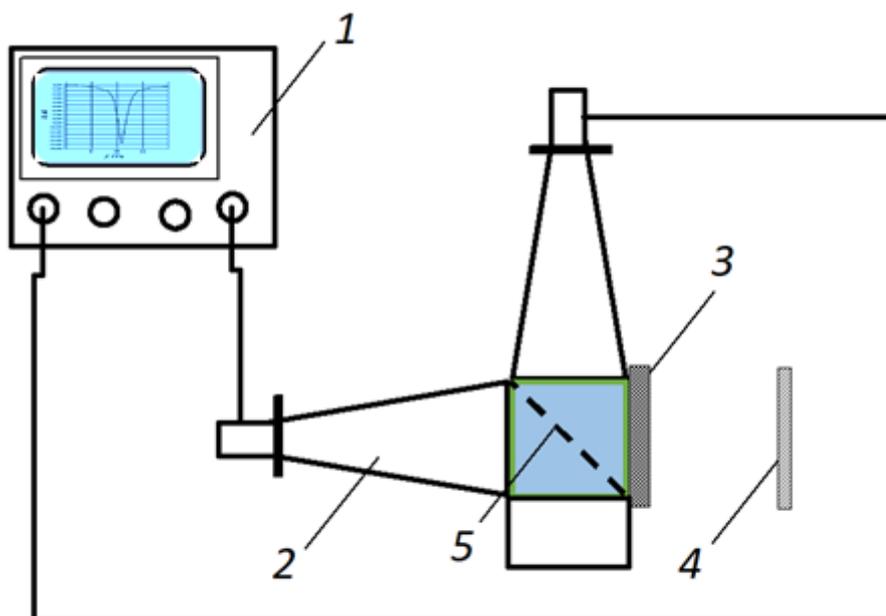


Рис. 10. Структурная схема измерительной установки с квазиоптическим рефлектометром: 1 – векторный анализатор цепей, 2 – квазиоптический рефлектометр, 3 – образец, 4 – отражатель, 5 – диафрагма связи

Первичным измеряемым параметром в схеме с плавным рупором является частотная зависимость комплексного коэффициента отражения от системы КВП – рупор – «образец – отражатель». В схеме с квазиоптическим

рефлектометром измеряемым параметром является частотная зависимость комплексного коэффициента отражения от системы «образец – отражатель».

Вторичными измеряемыми параметрами являются коэффициенты отражения R , собственно, от образца и коэффициент прохождения T через образец. Процедура определения этих параметров дана в разделе 3.

Сначала вычисляются показатель преломления n и волновое сопротивление W материала по формулам:

$$n = \frac{2}{kd} \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{(R+T-1)(R-T+1)}{(R+T+1)(R-T-1)}}, \quad W = \sqrt{\frac{(R-T-1)(R+T-1)}{(R-T+1)(R+T+1)}}. \quad (3)$$

Комплексные диэлектрическая и магнитная проницаемости рассчитываются по формулам (1) и (2) соответственно.

5. Резонаторная методика измерения комплексных диэлектрической и магнитной проницаемостей

Структурная схема измерительной установки приведена на рис. 11.

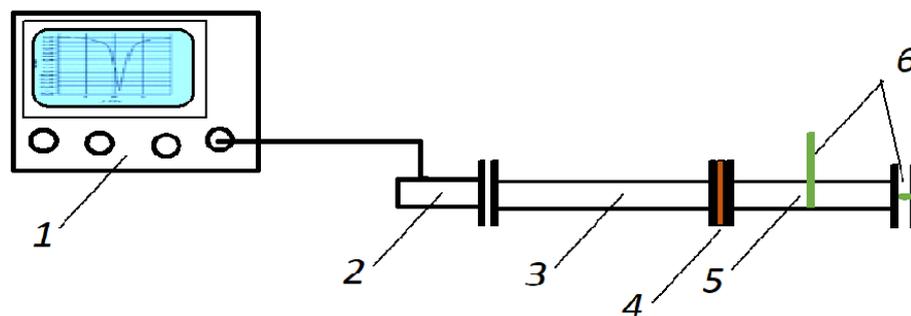


Рис. 11. Структурная схема измерительной установки для резонаторного метода: 1 – векторный анализатор цепей, 2 – коаксиально-волноводный переход (КВП), 3 – волноводная секция, 4 – диафрагма связи, 5 – измерительный резонатор, 6 – образец в виде тонкого стержня

Первичным измеряемым параметром является частотная зависимость комплексного коэффициента отражения от системы КВП – измерительный резонатор.

Вторичным измеряемым параметром является частотная зависимость коэффициента отражения от самого резонатора. Процедура определения вторичного измеряемого параметра приведена в разделе 3.

Следующим измеряемым параметром является резонансная частота и добротность резонатора с образцом и в отсутствие образца. Резонансная частота и добротность определяются по положению и форме «резонансного провала» на частотной характеристике коэффициента отражения от резонатора.

В случае использования образца в форме тонкого стержня возможно измерение как ε , так и μ материала. При измерении ε образец вводится в максимум электрического и ноль магнитного полей, т.е. в середину полуволнового резонатора. При измерении μ образец вводится в максимум магнитного поля на торцевой стенке резонатора (на рис. 11 показано зеленым цветом).

Для образца в форме тонкого стержня комплексные диэлектрическая и магнитная проницаемости рассчитываются по следующим формулам:

$$\varepsilon' = 1 + \frac{\Delta f_1}{f_0} \frac{V}{2\Delta V}, \quad \mu' = 1 + \frac{\Delta f_2}{f_0} \frac{V}{2\Delta V} \left(\frac{\lambda_b}{\lambda_0} \right)^2,$$

$$\varepsilon'' = \left(\frac{1}{Q_1} - \frac{1}{Q_0} \right) \frac{V}{4\Delta V}, \quad \mu'' = \left(\frac{1}{Q_2} - \frac{1}{Q_0} \right) \frac{V}{2\Delta V} \left(\frac{\lambda_b}{\lambda_0} \right)^2,$$

где Δf_1 и Δf_2 – сдвиги резонансной частоты при помещении образца в максимум электрического и максимум магнитного поля, соответственно; Q_1 и Q_2 – добротности резонатора при помещении образца в максимум электрического и максимум магнитного поля, соответственно; f_0 , λ_0 и Q_0 – резонансная частота, длина волны и добротность резонатора без образца; λ_b – длина волны в волноводе, образующем резонатор; V – объем резонатора; ΔV – объем образца.

6. Методика измерения комплексных диэлектрической и магнитной проницаемостей по величинам коэффициентов отражения и прохождения

Схема измерительной установки представлена на рис.12.

Рассмотрены две схемы расположения рупоров – горизонтальная (рис. 12а) и вертикальная (рис. 12б).

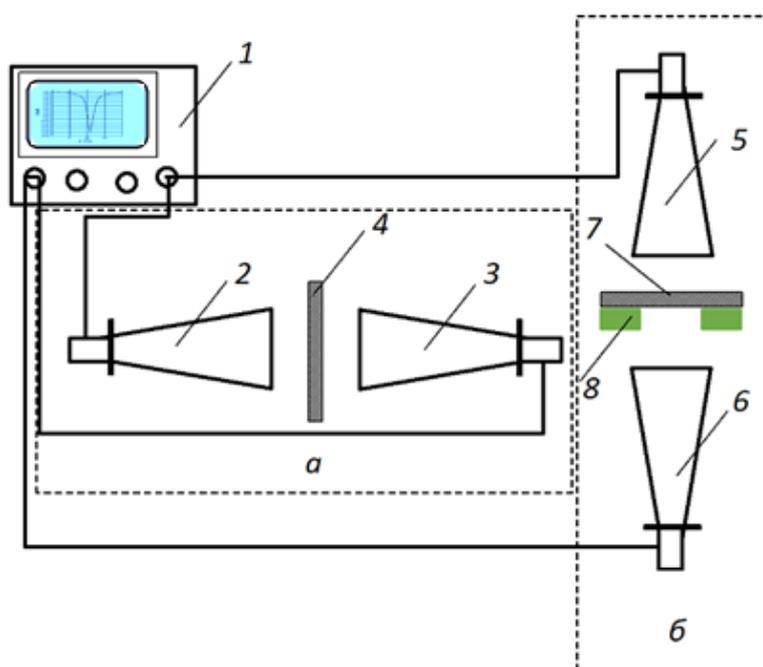


Рис. 12. Структурная схема измерительной установки с двумя рупорами:
 1 – векторный анализатор цепей, 2,3,5,6 – рупоры с коаксиально-волноводными переходами (КВП), 4,7 – образцы, 8 – диафрагма

В этой методике антенны стоят напротив друг друга (рис. 12а). Принимая во внимание размер самой большой антенны (длина 456 мм) плюс расстояние между апертурами антенн (300 – 500 мм) получается желательная длина кабеля около двух метров. (То есть длина кабеля, соединяющего антенну и прибор должна быть около двух метров). Дополнительные элементы те же, что и в схемах 1 – 6. Причем для удобства измерений в низкочастотной части исследуемого диапазона антенны располагают вертикально, в этом случае исследуемый образец, просто кладется на специальную диафрагму (см. рис. 12б).

Измеряемыми параметрами являются частотные зависимости комплексных коэффициентов отражения и прохождения через образец. Процедура измерения включает в себя предварительную калибровку установки в отсутствие образца и далее собственно измерение параметров при установленном образце. Погрешность измерения из-за переотражений в схеме исключается путем преобразования частотных зависимостей в пространственно-временные с последующим выделением сигналов, относящихся к исследуемым образцам.

Процедура вычисления показателя преломления n и волнового сопротивления W материала по формуле (3) дана в разделе 4. Комплексные диэлектрическая и магнитная проницаемости определяются по формулам (1) и (2) соответственно.

6.1. Апробация методики

В данной работе был реализован экспериментальный комплекс установок, собранных по схеме рис. 12б.

Для проверки согласования работы всех установок комплекса выполнены измерения поверочного образца. Образец представляет собой плоскопараллельную диэлектрическую пластину из полистирола толщиной 4 мм. На рис. 13 приведены частотные зависимости коэффициентов R отражения от поверочного образца, полученные экспериментально и рассчитанные по формуле:

$$R = \left| \sqrt{\frac{1 - \hat{\varepsilon}}{(\hat{\varepsilon} + 1 + 2i\sqrt{\hat{\varepsilon}} \operatorname{ctg}(kD\sqrt{\varepsilon}))}} \right|,$$

где D – толщина образца; $\hat{\varepsilon}$ – комплексная диэлектрическая проницаемость;

$k = \frac{2\pi f}{c}$, f – частота, c – скорость света в вакууме.

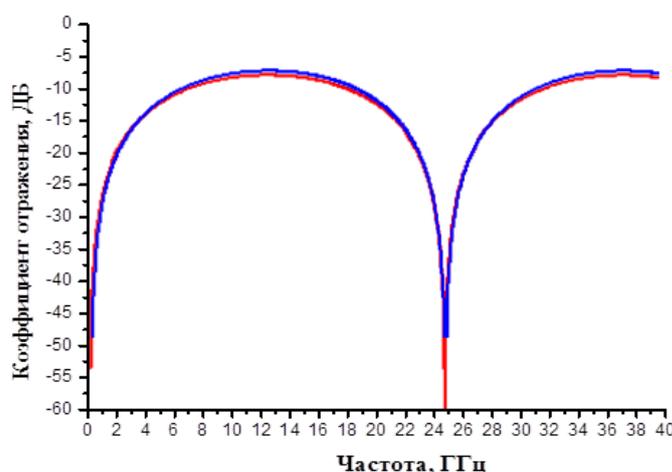


Рис. 13. Частотные спектры коэффициентов отражения от поверочного образца (расчет – красная линия, эксперимент – синяя линия)

Проведены измерения коэффициентов R отражения электромагнитного излучения от образцов из парафина и опилок в условиях свободного пространства на экспериментальном комплексе установок с векторным анализатором цепей, созданном по схеме рис. 12б, и автоматизированном измерительном комплексе, описанном в работе [3]. Исследования проведены в диапазоне 8 – 38 ГГц.

На рис. 14 и 15 представлены частотные зависимости коэффициентов отражения от образцов из парафина и опилок соответственно. На рисунках для сравнения даны частотные зависимости коэффициента отражения образцов, измеренных на установке, оборудованной векторным анализатором цепей компании Agilent PNA-X N5244A (синяя линия) и комплексе на основе панорамных измерителей КСВН (красная линия).

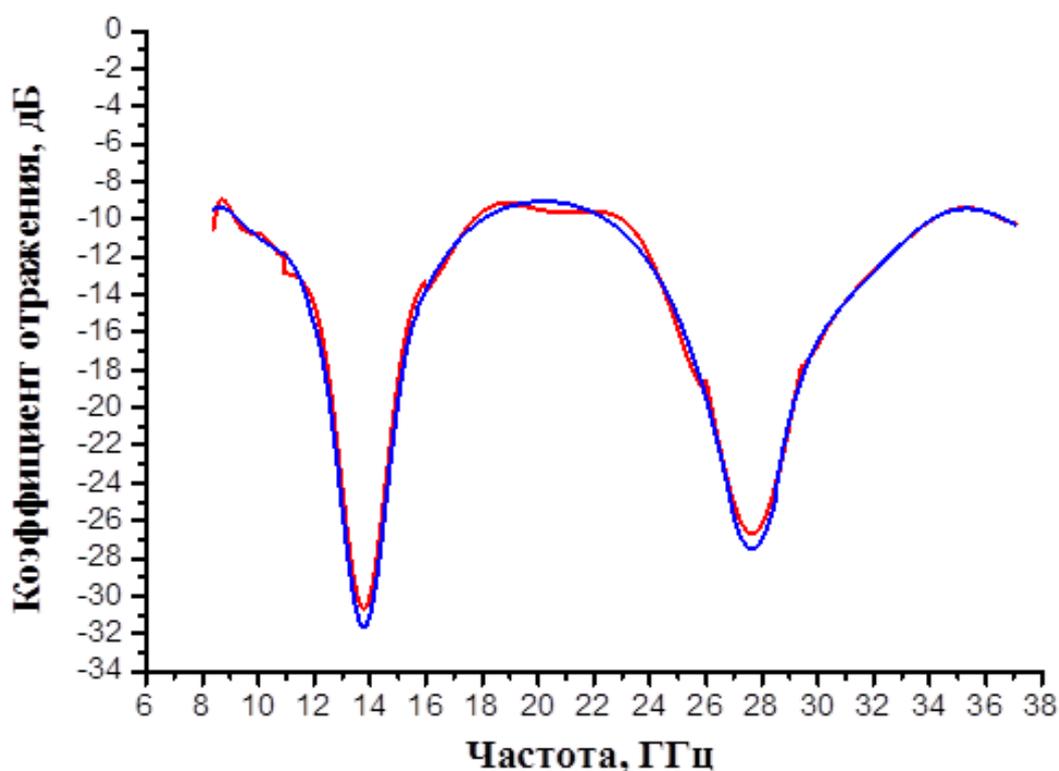


Рис. 14. Частотные спектры коэффициентов отражения от образца из парафина

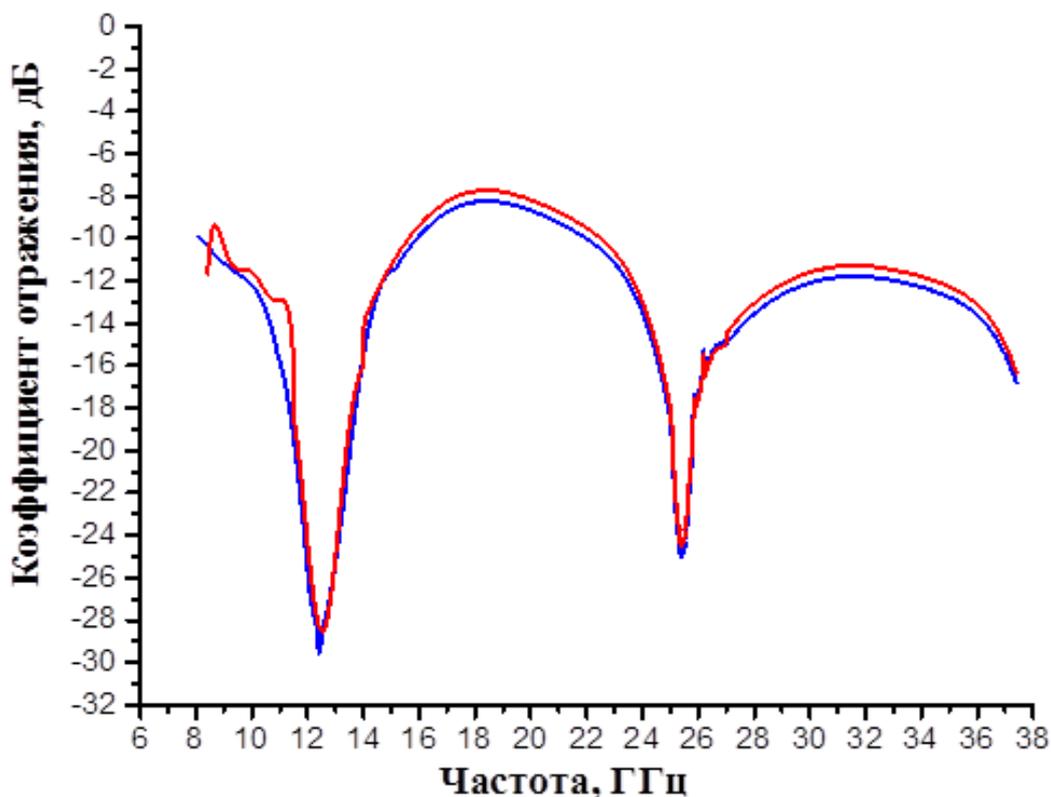


Рис. 15. Частотные спектры коэффициентов отражения от образца из опилок

Из приведенных графиков видно, что имеет место хорошее совпадение результатов измерения, полученных на разных экспериментальных комплексах.

Проведенные измерения позволили провести также апробацию этой методики.

Заключение

Предложен перечень оборудования, необходимого для практической реализации методик экспериментальных оценок диэлектрической и магнитной проницаемостей (ϵ , μ) различных материалов, а также коэффициентов R отражения и T прохождения электромагнитного излучения через образцы материалов в диапазоне 0,9 – 40 ГГц.

Разработаны измерительные схемы подключения стандартных рупорных антенн к векторному анализатору цепей.

Созданы экспериментальные установки на основе векторного анализатора цепей PNA-X N5244 по одной из рассмотренных схем.

Представлены результаты измерения коэффициентов отражения электромагнитного излучения через образцы парафина и опилок в диапазоне 8 – 38 ГГц на двух разных экспериментальных комплексах.

Проведен сравнительный анализ результатов измерения образцов, полученных на установках, оборудованных векторным анализатором цепей компании Agilent PNA-X N5244A и комплексе на основе панорамных измерителей КСВН (3).

Проведенные измерения позволили провести апробацию одной из предложенных методик.

Финансирование: Работа выполнена за счет бюджетного финансирования в рамках государственного задания № 075-01133-22-00.

Литература

1. Аплеталин В.Н., Казанцев Ю.Н., Козырьков А.Н., Солосин В.С. Измерение электромагнитных характеристик материалов резонаторным методом с помощью векторного анализатора цепей. *Электромагнитные волны и электронные системы*. 2009. Т.14. №11. С.39-43.
2. Дьяконова О.А., Казанцев Ю.Н., Маречек С.В., Воронин И.В., Горбатов С.А. Методы и средства для измерения коэффициентов отражения от плоских образцов на миллиметровых, сантиметровых и дециметровых волнах. *Приборы и техника эксперимента*. 2011. №2. С.51-57.
3. Дьяконова О.А., Каленов Д.С., Казанцев Ю.Н. Автоматизированный измерительный комплекс на основе комплекта скалярных анализаторов цепей. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2016. №10. <http://jre.cplire.ru/jre/oct16/10/text.pdf>

4. Дьяконова О.А., Казанцев Ю.Н., Каленов Д.С. Измерительный комплекс для определения электромагнитных характеристик материалов резонаторным методом с помощью скалярных анализаторов цепей. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2017. №7. <http://jre.cplire.ru/jre/jul17/7/text.pdf>
5. Дьяконова О.А., Казанцев Ю.Н. Резонатор для измерения диэлектрической проницаемости тонких плёнок. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2019. №7. <http://jre.cplire.ru/jre/jul19/13/text.pdf>

Для цитирования:

Дьяконова О.А., Солосин В.С. Методы и средства для измерения комплексных диэлектрической и магнитной проницаемостей материалов на СВЧ. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2022. №9. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.9.8>