

Измерения диэлектрических параметров компаундов и твердых диэлектриков в СВЧ диапазоне

А.В. Раков¹, В.В. Жуков¹, Ф.Г. Искандеров¹, А.М. Куканов¹, В.И. Ухандеев¹, А.М. Балбашов²

¹АО «НТЦ ЭЛИНС»

²Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Аннотация: в статье описан разработанный метод измерения диэлектрических параметров компаундов, а также сыпучих и твердых диэлектриков в СВЧ диапазоне частот. В работе дано описание измерительной оснастки и изложена процедура расчета диэлектрических параметров материала из измеренных характеристик. Также в работе представлены результаты измерений некоторых марок диэлектрических материалов при помощи разработанного метода.

Ключевые слова: Заливочный диэлектрический компаунд, диэлектрические материалы, измерение параметров диэлектриков.

1. Введение

В последнее время на фоне постоянно увеличивающейся тактовой частоты и производительности цифровых устройств и соответствующего увеличения скорости передачи данных перед разработчиками радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) встает вопрос обеспечения целостности сигналов в широком диапазоне частот. Увеличение тактовой частоты, а стало быть, увеличение верхней частоты спектра передаваемого сигнала по линиям передачи в современных разработках РЭА стимулирует производителей радиотехнических материалов с каждым годом увеличивать номенклатуру выпускаемых диэлектриков подложек, материалов металлизации печатных плат, заливочных компаундов и паяльных масок и т.д. Ведь требуется создавать новые материалы, обеспечивающие низкие потери и искажения электромагнитных сигналов, распространяющихся в радиочастотных трактах на печатных платах в достаточно широком диапазоне частот, поскольку спектр последовательности тактовых импульсов является достаточно широкополосным и может занимать полосу в несколько гигагерц. Если для измерения диэлектрических параметров подложек известно достаточно много сертифицированных методов [1], то для измерения заливочных компаундов, известных методов не так много [2,3].

На сегодняшний день процесс разработки РЭА практически полностью организован на базе имеющихся на рынке пакетов электродинамического моделирования. Таким образом, разработчик в процессе моделирования должен полагаться на точные диэлектрические параметры материалов используемых в РЭА и непосредственно влияющих на распространение сигналов по линиям.

В настоящей статье описан измерительный метод, разработанный непосредственно для измерения диэлектрических параметров заливочных компаундов, и в то же время подходящий для измерения параметров сыпучих и твердых диэлектриков.

2. Измерительная оснастка

Измерительная оснастка, изображенная на Рисунке 1, представляет собой набор из двух сборных воздушных коаксиальных линий различной длины. Центральной жилой коаксиала является металлический стержень (материал латунь), который фиксируется при помощи изоляционных пробок (материал тефлон). Воздушные полости

цилиндрического сечения заполняются исследуемым компаундом в жидкой или сыпучей фазе, при этом тефлоновые пробки удерживают исследуемый материал внутри данных полостей. На фланцы коаксиала, заполненного исследуемым материалом, монтируются СВЧ разъемы. Измерения могут производиться при помощи любого векторного анализатора цепей, так как требуется прямое измерение фазы сигнала, проходящего через оснастку для получения частотных зависимостей комплексных S-параметров.



Рисунок 1. Измерительные коаксиальные оснастки со смонтированными разъемами N-типа.

При помощи данной оснастки также можно измерить параметры твердых диэлектрических материалов. Однако в этом случае требуется изготовить деталь цилиндрической формы из материала исследуемого диэлектрика, для того, чтобы заполнить всё сечение коаксиала. В диэлектрической детали также требуется просверлить по центру продольное отверстие для размещения в нем стержня коаксиала. Изготовленная описанным способом деталь изображена на Рисунке 2.



Рисунок 2. Изготовленная деталь из исследуемого твердого диэлектрика

3. Измерительный алгоритм

Для получения точных значений параметров материала, заполняющего цилиндрическое сечение измерительных оснасток необходимо произвести два измерения: измерение комплексных S-параметров более длинной коаксиальной линии (длина составляет 116 мм) и измерение комплексных S-параметров более короткой коаксиальной линии (длина составляет 66 мм). Два измерения на коаксиальных линиях различной длины требуются в связи с используемой математической процедурой калибровки [2] [3], которая основана на свойствах волновых матриц передачи $\begin{bmatrix} T \end{bmatrix}$. Формула (1) показывает математическую формулировку волновых матриц передачи.

$$\begin{bmatrix} u_{\text{пад1}} \\ u_{\text{отр1}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} \\ t_{21} & t_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{\text{отр2}} \\ u_{\text{пад2}} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Основное свойство волновых матриц передачи заключается в том, что волновая матрица нескольких каскадно-соединенных четырехполюсников равна простому перемножению волновых матриц отдельных каскадов.

Элементы волновой матрицы передачи могут быть легко выражены через элементы матрица рассеяния (S-параметры), частотные зависимости которых измеряются при помощи векторного анализатора цепей, используемого в

измерительной установке.

$$\begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} \\ t_{21} & t_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{s_{21}} & -\frac{s_{22}}{s_{21}} \\ \frac{s_{11}}{s_{21}} & s_{12} - \frac{s_{11}s_{22}}{s_{21}} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Волновая матрица T_{Short} более короткой коаксиальной линии представляется в виде перемножения трех волновых матриц передачи: двух волновых матриц X и Y , характеризующих неидеальности при передаче сигнала от коаксиального кабеля через СВЧ разъем в сечение коаксиальной линии и единичной волновой матрицы однородного коаксиального СВЧ тракта T_{THRU} .

$$T_{Short} = X \cdot T_{THRU} \cdot Y = X \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot Y \quad (3)$$



Рисунок 3. Матричное представление короткой коаксиальной линии.

Волновая матрица более длинной коаксиальной линии T_{Long} также может быть представлена при помощи перемножения волновых матриц передачи.

$$T_{Long} = X \cdot T_{Coax} \cdot Y = X \cdot \begin{bmatrix} e^{-\gamma \cdot L} & 0 \\ 0 & e^{\gamma \cdot L} \end{bmatrix} \cdot Y \quad (4)$$



Рисунок 4. Матричное представление длинной коаксиальной линии

Собственные значения матрицы T_{Coax} равны собственным значениям произведения матрицы $T_{Long}^* (T_{Short})^{-1}$. Таким образом, можно определить откалиброванную волновую матрицу передачи T_{Coax} и рассчитать коэффициенты коррекции.

$$T_{Coax} = Eigenvalue(T_{Long} \cdot T_{Short}^{-1}) = Eigenvalue(X \cdot T_{Coax} \cdot X^{-1}) \quad (5)$$

После определения откалиброванной волновой матрицы передачи из её диагональных элементов можно с легкостью определить комплексную постоянную распространения линии передачи по формуле (6) [4].

$$\gamma = \frac{\ln t_{22}}{L} = \frac{e^{\gamma \cdot L}}{L} = \frac{e^{\gamma \cdot (L_{Coax_long} - L_{Coax_short})}}{L_{Coax_long} - L_{Coax_short}} \quad (6)$$

Где L_{Coax_long} – длина более длинной коаксиальной линии; L_{Coax_short} – длина более короткой коаксиальной линии.

Далее при помощи алгоритма «Root-omega» [5], изображенного на Рисунке 5, извлекаются диэлектрические характеристики исследуемого материала, заполняющего цилиндрическое сечение измерительных оснасток.

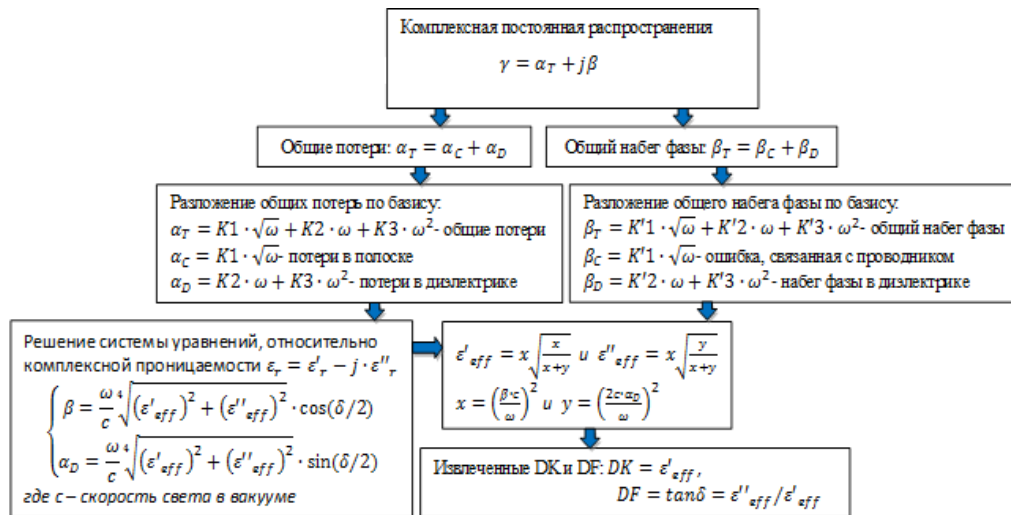


Рисунок 5. Алгоритм метода «Root-Omega»

4. Измерения параметров материалов

На данный момент разработка измерительной оснастки доведена до логического завершения. Произведен ряд измерений параметров материалов. Нижняя граница частотного диапазона измерения равна 10 МГц. Верхняя граница частотного диапазона задана выбранным диаметром коаксиала и равна 5 ГГц.

До начала процедуры измерения параметров исследуемых диэлектриков обычно производится измерения пустых коаксиальных линий с воздушным заполнением для проверки адекватности работы измерительного стенда. Влияние процедуры калибровки на измеренные частотные зависимости комплексных S-параметров изображено на Рисунке 6.

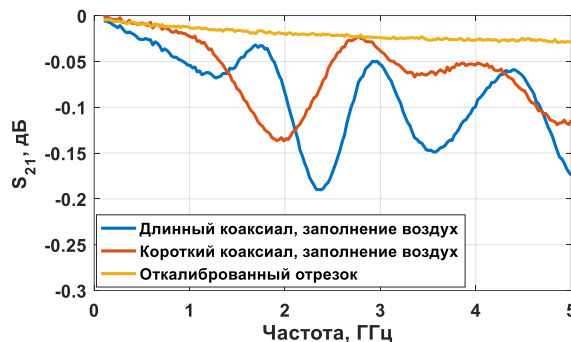


Рисунок 6. Влияние калибровки на измеренные частотные зависимости комплексных S-параметров

Извлеченные из измерений диэлектрические характеристики воздуха показаны на Рисунке 7.

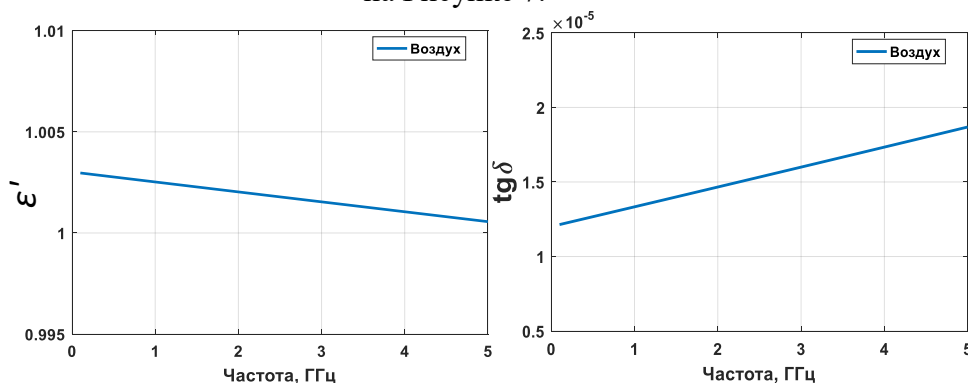


Рисунок 7. Измеренные диэлектрические параметры воздуха.

Измеренные частотные зависимости диэлектрических параметров исследуемого компаунда изображены на Рисунке 8.

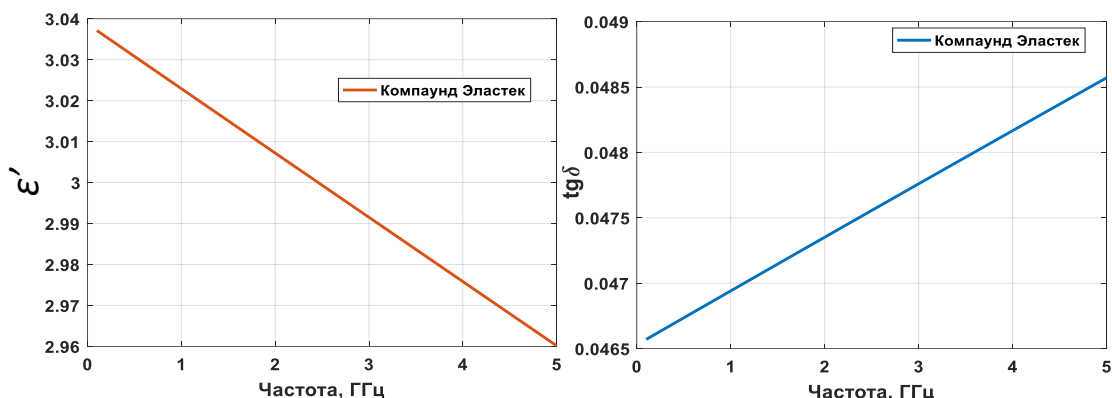


Рисунок 8. Измеренные диэлектрические параметры компаунда «Эластик».

Результаты измерений некоторых марок диэлектриков сведены в таблицу 1.

Таблица 1. Измеренные параметры диэлектриков

Диэлектрик	Диэлектрическая постоянная, f=3 ГГц	Тангенс угла диэлектрических потерь, f=3 ГГц
Воздух	1.002	0.000015
Компаунд «Эластик»	2.99	0.048
Фенилон-С2	3.16 ±2%	0,015±10%

5. Заключение

Описанный в данной статье метод является удобным решением для измерения диэлектрических параметров заливочных компаундов, достаточно часто используемых при разработке РЭА для защиты электронных модулей. Для точных измерений не требуется какая-либо дополнительная калибровка. Измерительный алгоритм позволяет выделить потери в диэлектрике на фоне других типов потерь в коаксиальной линии, что позволяет увеличить точность измерений.

Знание точных диэлектрических параметров в широком диапазоне частот позволит разработчикам моделировать эффект заливки на функционирование разрабатываемых радиоэлектронных устройств в известных пакетах электродинамического моделирования.

Список литературы

1. IPC Test Methods Manual TM-650. Available at <http://www.ipc.org/test-methods.aspx>.
2. Microwave Dielectric Measurements of Solids and Liquids over 1 to 4 GHz Using Transmission Line Technique and Coaxial Cavity. Adam Aboutaleb, Chris H Oxley.
3. An Improved Technique for Permittivity Measurements Using a Coaxial Probe David V. Blackham, Member, ZEEE, and Roger D. Pollard, Fellow, ZEEE IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT, VOL. 46, NO. 5, OCTOBER 1997.
4. Complex Permittivity Determination from Propagation Constant Measurements Michael D. Janezic, Member, IEEE, and Jeffrey A. Jargon, Member, IEEE.
5. Sensitivity of PCB Material Identification with GMS-Parameters to Variations in Test Fixtures, Simbeor Application Note #2010_03, November 2010 © 2010 Simberian Inc. Y Shlepnev.
6. D. M. Pozar, Microwave Engineering, 2nd edition, New York, John Wiley and Sons, Inc. 1998.
7. Planar Transmission Line Method for Characterization of Printed Circuit Board Dielectrics. J. Zhang, M. Y. Koledintseva, G. Antonini, J. L. Drewniak, A. Orlandi, K. N. Rozanov.