

Оценка точности и достоверности измерения электрофизических параметров анизотропных материалов и покрытий методом поверхностных электромагнитных волн с помощью имитационной модели

А. И. Казьмин, email: alek-kazmin@yandex.ru

Д. П. Федюнин, email: jr.fedyunin@yandex.ru

П. А. Федюнин, email: fpa1969@yandex.ru

Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил
«Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и
Ю. А. Гагарина» (г. Воронеж)

***Аннотация.** В статье представлена имитационная модель, позволяющая оценивать точность измерения локальных значений компонент тензора комплексной диэлектрической проницаемости образцов анизотропных диэлектрических покрытий на металлической подложке с помощью радиальных поверхностных электромагнитных волн. Модель реализована на основе системы электродинамического моделирования CST Microwave studio и системы Matlab. Приведены результаты моделирования по измерению параметров диэлектрического покрытия с одноосной анизотропией на металлической подложке.*

***Ключевые слова:** анизотропное диэлектрическое покрытие, имитационная модель, радиальная поверхностная электромагнитная волна, тензор диэлектрической проницаемости, обратная задача*

Введение

В связи с практическими потребностями в новых материалах и создаваемых на их основе покрытиях, работающих в диапазоне сверхвысоких частот (СВЧ), во многих наукоемких сферах, в том числе микроэлектронной, аэрокосмической, машиностроительной и др., появляется много новых типов композиционных материалов с широким спектром значений комплексных диэлектрической и магнитной проницаемостей и с различной внутренней структурой [1–4].

Одним из способов создания тонких, легких и работающих в широкой полосе частот материалов и покрытий, является реализация их в виде неоднородных композиционных структур, которые состоят из полимерной основы (матрицы) и соответствующего наполнителя. Для СВЧ-покрытий в роли наполнителя могут выступать [1–4]

стекловолокно, ткани из полиэфирных волокон и т.д., а для радиопоглощающих покрытий используются [4] углеродные нанотрубки, проводящие частицы нанометрового размера и др.

В качестве основного аспекта применения подобных материалов и покрытий на практике выступает получение объективных данных по их электрофизическим и геометрическим параметрам (ЭФГП).

Учитывая отличие свойств диэлектрических и магнитодиэлектрических материалов и покрытий, и, соответственно, различные подходы к измерению их ЭФГП, в данной статье основное внимание будет уделено СВЧ диэлектрическим покрытиям (ДП) на основе неоднородных композиционных структур. ДП данного типа могут обладать анизотропией диэлектрической проницаемости, которая в общем случае описывается тензором диагонального вида:

$$\dot{\underline{\underline{\varepsilon}}} = \begin{bmatrix} \dot{\varepsilon}'_{//x} & 0 & 0 \\ 0 & \dot{\varepsilon}'_{\perp y} & 0 \\ 0 & 0 & \dot{\varepsilon}'_{//z} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где $\dot{\varepsilon}'_{//x} = \varepsilon'_{//x} - j\varepsilon''_{//x}$ и $\dot{\varepsilon}'_{//z} = \varepsilon'_{//z} - j\varepsilon''_{//z}$ – тангенциальные составляющие тензора комплексной диэлектрической проницаемости (в плоскости покрытия), $\dot{\varepsilon}'_{\perp y} = \varepsilon'_{\perp y} - j\varepsilon''_{\perp y}$ – нормальная составляющая тензора комплексной диэлектрической проницаемости.

Величину анизотропии компонент тензора комплексной диэлектрической проницаемости (1) целесообразно характеризовать коэффициентами анизотропии [1]: две пары коэффициентов, характеризующих отличие между собой тангенциальных ($\varepsilon'_{//x}, \varepsilon''_{//x}, \varepsilon'_{//z}, \varepsilon''_{//z}$) и нормальной ($\varepsilon'_{\perp y}, \varepsilon''_{\perp y}$) компонент тензора комплексной диэлектрической проницаемости (1) – $\vartheta_{\varepsilon'}^{xy}, \vartheta_{\varepsilon''}^{xy}, \vartheta_{\varepsilon'}^{zy}, \vartheta_{\varepsilon''}^{zy}$, и пара коэффициентов, характеризующих различие тангенциальных составляющих ($\varepsilon'_{//x}, \varepsilon''_{//x}$ и $\varepsilon'_{//z}, \varepsilon''_{//z}$) – $\vartheta_{\varepsilon'}^{xz}, \vartheta_{\varepsilon''}^{xz}$:

$$\vartheta_{\varepsilon'}^{xy} = \left| 1 - \frac{\varepsilon'_{//x}}{\varepsilon'_{\perp y}} \right|; \quad \vartheta_{\varepsilon''}^{xy} = \left| 1 - \frac{\varepsilon''_{//x}}{\varepsilon''_{\perp y}} \right|; \quad \vartheta_{\varepsilon'}^{zy} = \left| 1 - \frac{\varepsilon'_{//z}}{\varepsilon'_{//x}} \right|; \quad \vartheta_{\varepsilon''}^{zy} = \left| 1 - \frac{\varepsilon''_{//z}}{\varepsilon''_{//x}} \right|; \quad (2)$$

$$\vartheta_{\varepsilon'}^{xz} = \left| 1 - \frac{\varepsilon'_{//z}}{\varepsilon'_{//x}} \right|; \quad \vartheta_{\varepsilon''}^{xz} = \left| 1 - \frac{\varepsilon''_{//z}}{\varepsilon''_{//x}} \right|.$$

Рассмотрим наиболее сложный случай двухосной анизотропии, при этом $\dot{\varepsilon}'_{//x} \neq \dot{\varepsilon}'_{\perp y} \neq \dot{\varepsilon}'_{//z}$.

Для измерения компонент тензора комплексной диэлектрической проницаемости (1) используется ряд СВЧ-методов контроля: резонаторные методы, методы закрытой линии передачи (волноводные и коаксиальные), методы коаксиального пробника, а также методы свободного пространства [1–4].

Между тем, несмотря на широкое распространение данных методов, вопросы разработки электродинамических моделей совместных измерений компонент тензора диэлектрической проницаемости (1) и толщины анизотропных ДП проработаны недостаточно.

В [1] развит многочастотный метод контроля ЭФП многослойных материалов и покрытий с использованием поверхностных электромагнитных (ПЭМВ) СВЧ диапазона.

Цель статьи – развитие многочастотного метода ПЭМВ для контроля диэлектрической проницаемости (компонент тензора диэлектрической проницаемости) и толщины анизотропных диэлектрических материалов и покрытий.

2. Метод радиальных поверхностных электромагнитных волн

Геометрия задачи определения анизотропных ДП с помощью радиальных ПЭМВ приведена на рис. 1.

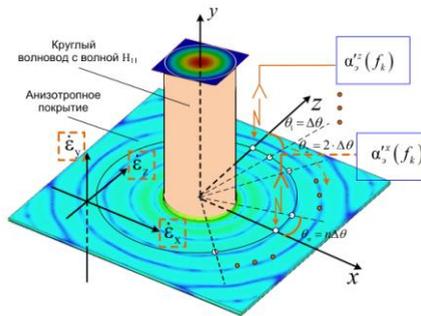


Рис. 1. Геометрия исследуемой задачи

С учетом подходов приведенных в [1], метод оценки вектора ЭФПП анизотропных ДП $\hat{\xi}_n = \{ \epsilon'_{//x}, \epsilon''_{//x}, \epsilon'_{\perp y}, \epsilon''_{\perp y}, \epsilon'_{//z}, \epsilon''_{//z}, t_n \}$, где $\epsilon'_{//x}, \epsilon'_{\perp y}, \epsilon'_{//z}$ действительные и $\epsilon''_{//x}, \epsilon''_{\perp y}, \epsilon''_{//z}$ мнимые части компонент тензора $\hat{\epsilon}$ диэлектрической проницаемости, соответственно, t_n – толщина покрытия сводится к минимизации целевой функции $Z(\xi_n, \varphi_\alpha^x, \varphi_\alpha^z)$,

построенной как невязка между вектор-столбцами полученных экспериментально \mathbf{A}_ϑ и теоретических \mathbf{A}_τ значений коэффициентов ослабления (КО) поля ПЭМВ:

$$\hat{\xi}_n = \arg \min_{\xi_n, \Phi_\alpha^x, \Phi_\alpha^z} \left\{ Z(\xi_n, \Phi_\alpha^x, \Phi_\alpha^z) \right\}, \quad (3)$$

$$Z(\xi_n, \Phi_\alpha^x, \Phi_\alpha^z) = \frac{1}{L} \left| \mathbf{A}_\vartheta - \mathbf{A}_\tau \right|^2, \quad (4)$$

где \mathbf{A}_ϑ и \mathbf{A}_τ – вектор-столбцы, со следующими компонентами:

$$\mathbf{A}_\vartheta = \left[\alpha_\vartheta^x(f_k) - j\alpha_\vartheta^{n_x}(f_k, \Phi_\alpha^x), \dots, \alpha_\vartheta^x(f_K) - j\alpha_\vartheta^{n_x}(f_K, \Phi_\alpha^x), \right. \\ \left. \alpha_\vartheta^z(f_k) - j\alpha_\vartheta^{n_z}(f_k, \Phi_\alpha^z), \dots, \alpha_\vartheta^z(f_K) - j\alpha_\vartheta^{n_z}(f_K, \Phi_\alpha^z) \right]^T;$$

$$\mathbf{A}_\tau = \left[\dot{\alpha}_\tau^x(f_k, \xi_n), \dots, \dot{\alpha}_\tau^x(f_K, \xi_n), \dot{\alpha}_\tau^z(f_k, \xi_n), \dots, \dot{\alpha}_\tau^z(f_K, \xi_n) \right]^T,$$

где $\alpha_\vartheta^x(f_k) - j\alpha_\vartheta^{n_x}(f_k, \Phi_\alpha^x)$ и $\alpha_\vartheta^z(f_k) - j\alpha_\vartheta^{n_z}(f_k, \Phi_\alpha^z)$ – экспериментальные КО поля ПЭМВ по осям поперечной анизотропии x и z , соответственно, $\Phi_\alpha^x = \{a_{n-i}^x\}$, $\Phi_\alpha^z = \{a_{n-i}^z\}$ – параметры регрессии функциональной зависимости мнимой части КО, $i = 0, \dots, n$; $\dot{\alpha}_\tau^x(f_k, \xi_n)$ и $\dot{\alpha}_\tau^z(f_k, \xi_n)$ – теоретические КО поля ПЭМВ по осям поперечной анизотропии x и z , соответственно, $k = 1, 2, \dots, K$.

Теоретические значения комплексных КО для каждой из поперечных осей анизотропии $\dot{\alpha}_\tau^x(f, \xi_n)$ и $\dot{\alpha}_\tau^z(f, \xi_n)$ ПЭМВ рассматриваемого анизотропного РПМ получали путем решения дисперсионных уравнений на частотах f_k , $k = 1, 2, \dots, K$:

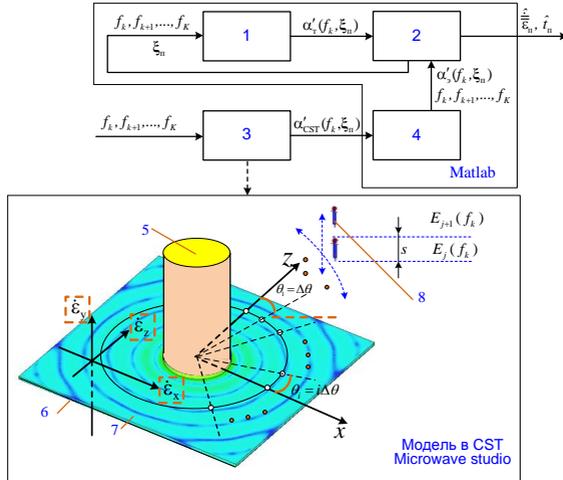
$$D \left[\dot{\alpha}^{xy}(f, \xi_n); f_k \right] = 0; \quad D \left[\dot{\alpha}^{zy}(f, \xi_n); f_k \right] = 0. \quad (5)$$

Дисперсионные уравнения (3) составляли, используя согласно [1], метод «поперечного резонанса».

3. Имитационная модель измерений анизотропных диэлектрических покрытий

Для более гибкой оценки точности и достоверности определения ЭФГП анизотропных ДП разработана имитационная модель реального измерительного комплекса [1]. Модель реализована в системах CST Microwave studio и Matlab. Структурная схема имитационной модели

приведена на рис. 2, где обозначено: 1 – блок решения прямой задачи, 2 – блок минимизации целевой функции, 3 – блок формирования КО в системе CST Microwave studio, 4 – блок формирования погрешностей измерений КО, 5 – антенная возбуждения радиальных ПЭМВ (круглый волновод), 6 – металлическая подложка, 7 – исследуемый образец анизотропного ДП, 8 – приемная антенна (измерительный зонд).



1 – блок решения прямой задачи, 2 – блок минимизации целевой функции, 3 – блок формирования КО в системе CST Microwave studio, 4 – блок формирования погрешностей измерений КО, 5 – антенная возбуждения радиальных ПЭМВ (круглый волновод), 6 – металлическая подложка, 7 – исследуемый образец анизотропного ДП, 8 – приемная антенна (измерительный зонд).

Рис. 2. Имитационная модель измерений

Такие элементы измерительного комплекса, как антенна возбуждения радиальных ПЭМВ 5, приёмная антенна (измерительный зонд) 8, а также исследуемое анизотропное ДП 7 на металлической подложке 6, реализованы в блоке формирования КО в системе CST Microwave studio. Геометрические размеры данных элементов точно соответствуют их размерам в реальном измерительном комплексе.

Экспериментальные значения КО в имитационной модели (см. рис. 2) формировали в блоке формирования погрешностей измерений КО 4 в виде суммы значений модельных КО $\alpha'_{CST}(f_k, \xi_n)$ и функции, имитирующей влияние шума. На точность определения коэффициентов

ослабления ПЭМВ влияет множество случайных факторов. Поэтому погрешность оценки указанных коэффициентов моделировалась аддитивным некоррелированным гауссовым шумом с нулевым математическим ожиданием $m[n(f_k)] = 0$ и заданным уровнем дисперсии σ_k^2 [1].

Таким образом, экспериментальные значения КО ПЭМВ $\alpha'_y(f_k, \xi_n)$ в блоке 4 (см. рис. 2) формировали на основе выражения [1]:

$$\alpha'_y(f_k, \xi_n) = \alpha'_{CST}(f_k, \xi_n) + n(f_k), \quad k = 1, 2, \dots, K, \quad (6)$$

где $n(f_k)$ – шум, воздействующий на k -измерение и обусловленный инструментальными погрешностями измерительного комплекса и другими погрешностями при проведении эксперимента.

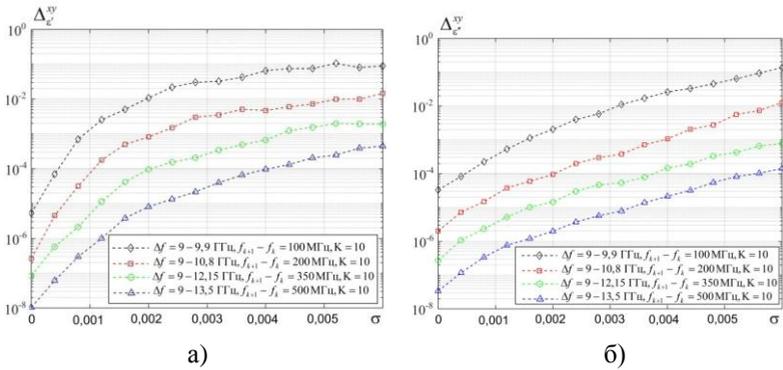
Блок решения прямой задачи 1 реализует решение дисперсионных уравнений (5), а блок минимизации целевой функции 2 реализует операцию минимизации целевой функции (3). Данные блоки реализованы в системе Matlab.

4. Результаты и их обсуждение

Для моделирования экспериментальных КО $\alpha'^x(f_k, \xi_n^x)$ к теоретическим значениям $\alpha^x_T(f_k, \xi_n^x)$, на основе модели (6), был добавлен аддитивный некоррелированный гауссовский шум со средним квадратическим отклонением (СКО) $\sigma(\alpha'^x(f_k, \xi_n^x)) = \sqrt{N_0 / 2}$.

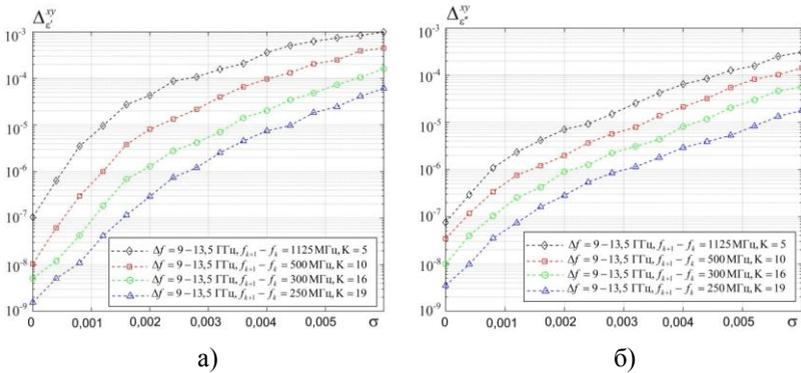
На рис. 3 приведены зависимости средних квадратов ошибок $\Delta_{\varepsilon'}^{xy}$ и $\Delta_{\varepsilon''}^{xy}$ оценки коэффициентов $\vartheta_{\varepsilon'}^{xy}$ и $\vartheta_{\varepsilon''}^{xy}$ при возрастании значений СКО уровня шума, при измерениях коэффициента ослабления на 10-ти частотах, при увеличении ширины полосы частот измерений: $\Delta f_1 = 9 - 9,9$ ГГц ($f_{k+1} - f_k = 100$ МГц), $\Delta f_2 = 9 - 10,8$ ГГц ($f_{k+1} - f_k = 200$ МГц), $\Delta f_3 = 9 - 12,15$ ГГц ($f_{k+1} - f_k = 350$ МГц) и $\Delta f_4 = 9 - 13,5$ ГГц ($f_{k+1} - f_k = 500$ МГц).

На рис. 4 приведены зависимости средних квадратов ошибок $\Delta_{\varepsilon'}^{xy}$ и $\Delta_{\varepsilon''}^{xy}$ оценки коэффициентов анизотропии $\vartheta_{\varepsilon'}^{xy}$ и $\vartheta_{\varepsilon''}^{xy}$ при возрастании значений СКО уровня шума, при фиксированной ширине полосе частот измерений $\Delta f = 9 - 13,5$ ГГц, при увеличении количества частот измерений: $K_1 = 5$, $K_2 = 10$, $K_3 = 16$, $K_4 = 19$.



а) – коэффициент $\vartheta_{\varepsilon'}^{xy}$, б) – коэффициент $\vartheta_{\varepsilon''}^{xy}$,

Рис. 3. Зависимости средних квадратов ошибок оценки коэффициентов $\vartheta_{\varepsilon'}^{xy}$ и $\vartheta_{\varepsilon''}^{xy}$ при возрастании значений СКО уровня шума, при увеличении ширины полосы частот измерений



а) – коэффициент $\vartheta_{\varepsilon'}^{xy}$, б) – коэффициент $\vartheta_{\varepsilon''}^{xy}$

Рис. 4. Зависимости средних квадратов ошибок оценки коэффициентов $\vartheta_{\varepsilon'}^{xy}$ и $\vartheta_{\varepsilon''}^{xy}$ при возрастании значений СКО уровня шума, при увеличении количества частот измерений

Анализ зависимостей рис. 3 и 4 показывает, что средние квадраты ошибок $\Delta_{\varepsilon'}^{xy}$ и $\Delta_{\varepsilon''}^{xy}$ оценки величин коэффициентов анизотропии $\vartheta_{\varepsilon'}^{xy}$ и

$\varepsilon_{xy}^{\prime\prime}$ увеличиваются при возрастании СКО уровня шума, уменьшении ширины полосы частот измерений и количества частот измерений.

В целом, относительная погрешность оценок коэффициентов анизотропии, при ширине полосы частот измерений $\Delta f = 9 - 13,5$ ГГц и СКО уровня шума 0,002–0,003 не превышает 10 %, при доверительной вероятности 0,95. Погрешности оценок толщины при этом не превышают 5 % вплоть до значения СКО уровня шума 0,006.

Заключение

Представлены результаты исследования, показавшие высокую эффективность определения значений компонентов тензора комплексной диэлектрической проницаемости, а также толщины анизотропных ДП на металлической подложке, с использованием радиальных ПЭМВ СВЧ-диапазона, возбуждаемых в исследуемом образце. Для оценки потенциальных точностных характеристик приведенных подходов разработана имитационная модель реального измерительного комплекса, реализованная на основе системы электродинамического моделирования CST Microwave Studio и системы Matlab. Численные эксперименты на имитационной модели показали, что разработанный метод в полосе частот измерений 9–13,5 ГГц обеспечивает оценку коэффициентов анизотропии ДП с погрешностью не более 10 % с доверительной вероятностью 0,95.

Список литературы

2. Казьмин А.И. Контроль диэлектрической проницаемости и толщины анизотропных диэлектрических покрытий методом поверхностных электромагнитных волн / А.И. Казьмин, П.А. Федюнин, Д.П. Федюнин // Дефектоскопия. – 2021. – № 6. – С. 57–72.
3. Казанцева Н.Е. Перспективные материалы для поглотителей электромагнитных волн сверхвысокочастотного диапазона / Н.Е. Казанцева, Н.Г. Рывкина, И.А. Чмутин // Радиотехника и электроника. 2003. – Т. 48. – №2. – С. 196–207.
4. Plamen I. Dankov Experimental Characterization of Positive and Negative Dielectric Constants and Artificial Anisotropy of Meta-materials in the Microwave Range / Plamen I. Dankov // J. Phys.: Conf. Ser. – 2020. – V. 1598 (012002).
5. Lagarkov A.N. Dielectric properties of fiber-filled composites / A.N. Lagarkov, S.M. Matytsin, K.N. Rozanov, A.K. Sarychev // Journal of Applied Physics. – 1998. – vol. – 84. – № 7. – pp. 3806–3814.