

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МАТЕРИАЛОВ И ПОКРЫТИЙ СО СЛОЖНОЙ ВНУТРЕННЕЙ СТРУКТУРОЙ С ПОМОЩЬЮ ПОВЕРХНОСТНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

© 2022 г. А.И. Казьмин^{1,*}

¹Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия
им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина», Россия 394064 Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А
E-mail: *alek-kazmin@yandex.ru

Поступила в редакцию 21.01.2022; после доработки 14.02.2022

Принята к публикации 22.02.2022

Представлено формализованное описание методов поверхностных электромагнитных волн, применяемых для определения электрофизических и геометрических параметров материалов и покрытий со сложной внутренней структурой (многослойные и анизотропные материалы и покрытия, метаматериалы, материалы и покрытия с дефектами). Разработанные принципы использования в измерительных целях поверхностных электромагнитных волн позволяют в рамках единого методического подхода определять электрофизические и геометрические параметры любых типов плоскостойких материалов и покрытий со сложной внутренней структурой в едином цикле измерения, в одних и тех же условиях (размещение на металлической подложке, конструкционном композиционном материале и др.). Разработанные подходы позволяют в зависимости от типа исследуемого материала или покрытия, набора подлежащих оценке электрофизических параметров и точности их определения выбирать требуемый набор физически измеряемых характеристик поля поверхностных электромагнитных волн, ширину полосы частот измерений и их количество. Экспериментальные исследования двухслойных и трехслойных диэлектрических покрытий показали, что при ширине полосы частот измерений 9—13 ГГц обеспечивается оценка диэлектрической проницаемости слоев не больше 6 % и толщин слоев не больше 5,5 % с достоверной вероятностью 0,95.

Ключевые слова: поверхностные электромагнитные волны, измерение, материалы и покрытия со сложной внутренней структурой, многослойные материалы и покрытия, электрофизические и геометрические параметры, операторное уравнение, дисперсионное уравнение, целевая функция.

DOI: 10.31857/S0130308222030046

ВВЕДЕНИЕ

Диэлектрические и магнитодиэлектрические материалы и покрытия (МП), предназначенные для работы в диапазоне сверхвысоких частот (СВЧ), широко востребованы во многих наукоемких сферах, в том числе микроэлектронной, аэрокосмической, машиностроительной и др. В отдельное важнейшее самостоятельное направление, связанное с повышением обороноспособности государства, выделяются разработки перспективных типов радиопоглощающих покрытий, обеспечивающих снижение радиолокационной заметности современных образцов вооружения, военной и специальной техники [1, 2].

В современных условиях качественного роста характеристик различных СВЧ-устройств требуется создание тонких, легких, широкополосных и устойчивых к внешним воздействиям МП. Большое значение имеет совершенствование их физико-химических характеристик, улучшение их стойкости, технологичности и др., что нашло отражение в Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации, в котором одним из приоритетных направлений развития является переход к новым материалам и способам конструирования» [3].

Исходя из этого, в настоящее время для достижения требуемых характеристик МП реализуются на основе перспективных материалов со сложной внутренней структурой, таких как многослойные и плавно неоднородные диэлектрические и магнитодиэлектрические структуры с диэлектрическими и магнитными потерями, метаматериалов и частотно-селективных поверхностей, материалов с высокими динамическими значениями магнитной проницаемостей, композиционных материалов с различными наполнителями (углеродные нанотрубки, проводящие сферические наночастицы, ферриты и др.) [4—13].

С точки зрения основного целевого назначения — работа в диапазоне СВЧ, эффективность МП со сложной внутренней структурой определяется их электрофизическими и геометрическими параметрами (ЭФП), к важнейшим из которых относятся комплексные диэлектрическая и магнитная проницаемости ϵ и μ , толщина МП t , а также стойкость к образованию различного рода дефектов.

Кроме того, основная специфика создания подобных МП заключается в том, что в процессе эксплуатации они будут находиться в различных, зачастую жестких, условиях применения, что приводит к изменению их ЭФГП и образованию различных дефектов.

С учетом этого, на первое место в ходе испытаний на эффективность МП выступает оценка ЭФГП МП с учетом воздействия на них основных внешних факторов (температура, вибрации, влага и др.), определяемых условиями эксплуатации и хранения МП в условиях приближенных к их реальному применению, т.е. с учетом размещения МП на металлической подложке, конструкционном композиционном материале и т.д. [14].

Специфика определения ЭФГП МП состоит в том, что измерения необходимо проводить в радиоволновом диапазоне, входящем в рабочий диапазон МП, что обеспечивает максимальное приближение условий измерений к условиям применения МП на практике.

Радиоволновые методы измерения интегральных значений ЭФГП однослойных плоскостойких МП в значительной степени отработаны. При этом определение ЭФГП МП, имеющих многослойную структуру с диэлектрическими и магнитными потерями, значительно сложнее. Кроме того, вопросы достоверного измерения ЭФГП МП на основе метаматериалов и материалов с анизотропией электрофизических параметров, с учетом размещения их на металлической подложке, практически не прорабатывались.

Между тем, несмотря на большое количество работ по данному направлению, следует отметить, что условия проведения измерений ЭФГП разнородных типов МП кардинально отличаются друг от друга и не соответствуют реальной практической ситуации использования МП, зачастую используются «разрушающие» методы измерений, подразумевающие размещение специально подготовленных образцов МП в волноводах, резонаторах или специальных измерительных ячейках.

В результате, в общем случае можно выделить следующие проблемы измерения ЭФГП основных типов МП радиоволновыми методами.

1. *Многослойные МП.* Для многослойных МП методы, использующие в качестве информативного параметра комплексный коэффициент отражения R , проработаны только для контроля материалов с малыми потерями. Для достижения приемлемой точности оценки ЭФГП слоев многослойного материала требуются измерения комплексного коэффициента отражения в широкой полосе частот ($\Delta f = 5\text{—}6$ ГГц и более), при этом частотная дисперсия электрофизических параметров материала не учитывается, или рассматриваются материалы с малой частотной дисперсией, что не позволяет использовать данные методы для контроля реальных образцов МП на металлической подложке. Кроме того, данные методы обладают низкой локальностью контроля из-за использования апертурных антенн с размером раскрытия, превышающим рабочую длину волны [15—21].

2. *Метаматериалы.* С учетом размещения метаматериала на металлической подложке его эффективные параметры начинают меняться и могут возникать новые резонансы в частотных зависимостях комплексных диэлектрической и магнитной проницаемостей. Методы свободного пространства, основанные на одновременном измерении комплексных коэффициентов отражения R и прохождения T электромагнитных волн, фактически оказываются непригодными для контроля ЭФГП метаматериалов, нанесенных на металлическую подложку. Кроме того, из-за использования апертурных антенн данные методы фактически обеспечивают получение только эквивалентных значений измеряемых параметров всего исследуемого образца в целом и не обеспечивают локальный контроль ЭФГП [22—27].

3. *Анизотропные МП.* Одним из способов создания тонких, легких и устойчивых к внешним воздействиям МП, работающих в широкой полосе частот, является реализация их в виде неоднородных композиционных структур, которые состоят из полимерной основы (матрицы) и соответствующего наполнителя. Электрофизические параметры подобных материалов могут обладать значительной анизотропией. Электродинамические модели совместных измерений компонент тензоров комплексных диэлектрической и магнитной проницаемостей анизотропных МП проработаны недостаточно. Обычно в публикациях приводятся лишь упоминания о том, что можно учесть анизотропию, но конкретных подходов к измерению не приводится [28—31].

В [32—36] на основе выявленных фундаментальных закономерностей, связывающих ЭФГП слоистых МП со сложной внутренней структурой (многослойные МП, метаматериалы, анизотропные МП) с характеристиками поля поверхностных электромагнитных волн (ПЭМВ), развиты методы, обеспечивающие достоверный контроль их ЭФГП в процессе проектирования и испытаний на эффективность. Однако реализовать свойства современных МП возможно только при строгом соблюдении технологических режимов и допусков при их нанесении на реальный объект, что возможно за счет разработки общих методологических принципов оценки ЭФГП и параметров

дефектов МП в едином цикле измерения в одних и тех же условиях (размещение на металлической подложке, конструкционном композиционном материале и др.).

Поэтому основной целью статьи является разработка на основе систематизированного формализованного описания разработанных методов поверхностных электромагнитных волн общих методологических принципов определения ЭФГП и оценки параметров дефектов различных типов МП со сложной внутренней структурой с заданными точностью и достоверностью.

ФОРМАЛИЗОВАННОЕ ОПИСАНИЕ РАЗРАБОТАННЫХ МЕТОДОВ ПОВЕРХНОСТНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

Основным информативным параметром ПЭМВ, используемым для проведения измерений ЭФГП и дефектоскопии, выступает поперечное волновое число, характеризующее распределение поля ПЭМВ в свободном пространстве по нормали к поверхности МП — комплексный коэффициент ослабления (КО) поля ПЭМВ $\dot{\alpha}(f_k, \xi_j) = \alpha'(f_k, \xi_j) - j\alpha''(f_k, \xi_j)$, где $\alpha'(f_k, \xi_j)$ — действительная часть КО ПЭМВ — коэффициент характеризующий экспоненциальное ослабление поля ПЭМВ по нормали к поверхности МП; $\alpha''(f_k, \xi_j)$ — мнимая часть КО ПЭМВ — коэффициент характеризующий фазовый набег для ПЭМВ, распространяющейся по направлению к поверхности раздела «МП—свободное пространство», $\xi_j = \{\dot{\epsilon}_n, \dots, \dot{\epsilon}_N, \dot{\mu}_n, \dots, \dot{\mu}_N, t_n, \dots, t_N\}$ — вектор, подлежащих оценке ЭФГП, $\dot{\epsilon}_n, \dots, \dot{\epsilon}_N$ — комплексные диэлектрические проницаемости, $\dot{\mu}_n, \dots, \dot{\mu}_N$ — комплексные магнитные проницаемости, t_n, \dots, t_N — толщины МП [32—37]. В [32—38] доказано, что действительную часть КО $\alpha'(f_k, \xi_j)$ можно определить по результатам косвенных измерений напряженности электрического поля ПЭМВ по нормали к поверхности МП в разнесенных точках измерений методом «зонда» [39, 40]:

$$\alpha'(f_k, \xi_j) = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J \frac{1}{s} \ln \left[\frac{E_j}{E_{j+1}} \right], \quad (1)$$

где E_j и E_{j+1} — значения напряженности электрического поля ПЭМВ, измеренные по нормали к поверхности МП в точках измерений y и $y + s$, s — расстояние между точками измерений, J — количество точек измерения.

В общем случае для определения ЭФГП МП требуется оценить КО в заданной полосе частот на сетке дискретных частот, т.е. получить частотную характеристику КО поля ПЭМВ $\alpha'(f_k, \xi_j)$, f_k , $k = 1, 2, \dots, K$. Представим задачу оценки ЭФГП МП в формализованном виде.

Задача определения вектора ЭФГП и параметров дефектов ξ_j плоскостойких образцов МП со сложной внутренней структурой по измеренным характеристикам поля ПЭМВ $\mathbf{r}_{эj}$ сводится к решению операторного уравнения первого рода:

$$\Theta_j \cdot \xi_j = \mathbf{r}_{эj}, \quad \xi_j \in \Xi_j, \quad \mathbf{r}_{эj} \in \mathbf{R}_j, \quad (2)$$

где Ξ_j — метрическое пространство векторов ξ_j для j -типа МП, \mathbf{R}_j — метрическое пространство характеристик поля ПЭМВ для j -типа МП; Θ_j — нелинейный оператор для j -типа МП, осуществляющий преобразование множества значений вектора ξ_j в множество значений характеристик поля ПЭМВ $\mathbf{r}_{эj}$; j в зависимости от типа МП может принимать значения, приведенные в табл. 1.

Решением операторного уравнения (2) на компакте Ξ_j^k из Ξ_j будет являться элемент $\xi_{0j} \in \Xi_j^k$, минимизирующий функционал (целевую функцию) $\rho_{R_j}(\Theta_j \cdot \xi_j, \mathbf{r}_{эj})$:

$$\rho_{R_j}(\Theta_j \cdot \hat{\xi}_{0j}, \mathbf{r}_{эj}) = \arg \min_{\xi \in \Xi_j^k} \rho_{R_j}(\Theta_j \cdot \xi_j, \mathbf{r}_{эj}) + \gamma_{\text{рег}j}, \quad (3)$$

где $\mathbf{r}_{эj}$ — полученные в эксперименте значения измеряемой характеристики поля ПЭМВ, то есть при наличии некоторой погрешности; $\rho_{R_j}(\Theta_j \cdot \xi_j, \mathbf{r}_{эj})$ — расстояние между $\Theta_j \cdot \xi_j$ и $\mathbf{r}_{эj}$ в метрическом пространстве \mathbf{R}_j возможных значений $\mathbf{r}_{эj}$; $\gamma_{\text{рег}j}$ — функция, регуляризирующая решение (2).

Область Ξ_j задания ξ_j определяется границами технически возможных параметров МП. Граничные значения области \mathbf{R}_j определяются максимальными значениями характеристик поля ПЭМВ.

Таким образом, для соответствующего типа МП ($j = 1, \dots, 4$), с границами технически возможных параметров $\xi_{j\min} \leq \xi_j \leq \xi_{j\max}$, необходимо найти вид нелинейного оператора Θ_j и целевой

функции $\rho_{Rj}(\Theta_j \cdot \hat{\xi}_{0j}, \mathbf{r}_{эj})$ операторного уравнения (2), обеспечивающих оценку неизвестных ЭФГП и параметров дефектов с заданными точностью и достоверностью при минимизации целевой функции, путем варьирования составляющими вектора ξ_j .

Таблица 1

Разработанные методы ПЭМВ для контроля ЭФГП МП

Тип МП	$\Theta_j \cdot \xi_j \leftarrow \boxed{\Theta_j \cdot \xi_j = \mathbf{r}_{эj}} \rightarrow \mathbf{r}_{эj}$
<p>Многослойные МП $j=1$</p>	<p>$\Theta_1 \cdot \xi_1$, где Θ_1 - оператор, описывающий модель ПЭМВ в многослойном МП; $\xi_1 = \{\hat{\epsilon}_n, \dots, \hat{\epsilon}_N, \hat{\mu}_n, \dots, \hat{\mu}_N, t_n, \dots, t_N\}$ - вектор ЭФГП многослойного МП</p>
<p>МП на основе метаматериалов $j=2$</p>	<p>$\Theta_2 \cdot \xi_2$, где Θ_2 - оператор, описывающий модель ПЭМВ в метаматериале $\xi_2 = \{\epsilon'(f_k), \epsilon''(f_k), \mu'(f_k), \mu''(f_k), t\}$ - вектор ЭФГП метаматериала, в соответствии с частотно-дисперсионными моделями Друде-Лоренца</p>
<p>МП с анизотропией комплексных диэлектрической и магнитной проницаемостей $j=3$</p>	<p>$\Theta_3 \cdot \xi_3$, где Θ_3 - оператор, описывающий модель ПЭМВ в МП с анизотропией ЭФГП $\xi_3 = \{\hat{\epsilon}, \hat{\mu}, t\}$ - вектор ЭФГП анизотропного МП, $\hat{\mu} = \begin{bmatrix} \mu_d & -j\mu_{нд} & 0 \\ j\mu_{нд} & \mu_d & 0 \\ 0 & 0 & \mu_z \end{bmatrix}$, $\hat{\epsilon} = \begin{bmatrix} \epsilon_{ x} & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{\perp y} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{ z} \end{bmatrix}$,</p>
<p>МП с дефектами $j=4$</p>	<p>$\Theta_4 \cdot \xi_4$, где Θ_4 - оператор, описывающий модель ПЭМВ в МП с дефектами $\xi_4 = \{d_1, d_2, \dots, d_N\}$ - вектор параметров дефектов МП,</p>

Для оценки качества многослойных МП ($j = 1$) определяется вектор ЭФГП $\xi_1 = \{\hat{\epsilon}_n, \dots, \hat{\epsilon}_N, \hat{\mu}_n, \dots, \hat{\mu}_N, t_n, \dots, t_N\}$, где $\hat{\epsilon}_n, \dots, \hat{\epsilon}_N$ и $\hat{\mu}_n, \dots, \hat{\mu}_N$ — комплексные диэлектрические и магнитные проницаемости слоев, t_n, \dots, t_N — толщины слоев МП. В качестве физически измеряемых характеристик поля ПЭМВ $\mathbf{r}_{э1}$ выступает вектор-столбец ее комплексных коэффициентов ослабления (КО) \dot{A}_s или вектор-столбец действительной части комплексного КО A' (см. табл. 1) [32, 33].

Для МП на основе метаматериалов ($j = 2$) оценивается вектор ЭФГП $\xi_2 = \{\varepsilon'(f_k), \varepsilon''(f_k), \mu'(f_k), \mu''(f_k), t\}$, где $\varepsilon'(f_k), \varepsilon''(f_k), \mu'(f_k), \mu''(f_k)$ описываются частотно-дисперсионными моделями Друде—Лоренца [34]. В качестве физически измеряемых характеристик поля ПЭМВ $\mathbf{r}_{3,2}$ выступает вектор-столбец ее комплексных КО \mathbf{A}_3 и вектор-столбец резонансных значений действительной части комплексного КО \mathbf{A}_R , причем $\mathbf{A}_R \subseteq \mathbf{A}_3$ (см. табл. 1) [34].

Для анизотропных МП ($j = 3$) оценивается вектор ЭФГП $\xi_3 = \{\underline{\underline{\varepsilon}}, \underline{\underline{\mu}}, t\}$, где t — толщина материала; $\underline{\underline{\varepsilon}}, \underline{\underline{\mu}}$ — тензоры комплексных диэлектрической и магнитной проницаемостей, которые имеют следующий вид [35]:

$$\underline{\underline{\varepsilon}} = \begin{bmatrix} \dot{\varepsilon}_{\parallel x} & 0 & 0 \\ 0 & \dot{\varepsilon}_{\perp y} & 0 \\ 0 & 0 & \dot{\varepsilon}_{\parallel z} \end{bmatrix}, \quad \underline{\underline{\mu}} = \begin{bmatrix} \dot{\mu}_d & -j\mu_{нд} & 0 \\ j\mu_{нд} & \dot{\mu}_d & 0 \\ 0 & 0 & \mu_z \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где $\dot{\varepsilon}_{\parallel x} = \varepsilon'_{\parallel x} - j\varepsilon''_{\parallel x}$ и $\dot{\varepsilon}_{\parallel z} = \varepsilon'_{\parallel z} - j\varepsilon''_{\parallel z}$ — 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; $\dot{\mu}_d$ — диагональная компонента тензора; $\mu_{нд}$ — недиагональная компонента тензора; μ_z — компонента тензора в направлении распространения поверхностной электромагнитной волны.

В качестве физически измеряемых характеристик поля ПЭМВ $\mathbf{r}_{3,3}$ выступает вектор-столбец комплексных КО \mathbf{A}_3 и угловые зависимости действительной части комплексного КО \mathbf{A}_θ , причем $\mathbf{A}_\theta \cup \mathbf{A}_3$ (см. табл. 1) [35].

Для МП с дефектами ($j = 4$) оценивается вектор параметров дефектов $\xi_4 = \{d_1, d_2, \dots, d_N\}$. В качестве физически измеряемых характеристик поля ПЭМВ $\mathbf{r}_{3,4}$ выступает вектор-столбец комплексных КО \mathbf{A}_3 [36, 37] и вектор-столбец дисперсий действительной части комплексного КО \mathbf{A}'_D (см. табл. 1) [38].

Нелинейные операторы $\Theta_1, \dots, \Theta_4$ описывают распространение ПЭМВ в соответствующем типе МП и представляют собой дисперсионные уравнения, составленные на основе метода «поперечного резонанса» [32—37, 39].

В качестве примера использования разработанного формализованного описания рассмотрим подходы к оценке ЭФГП многослойных МП.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФГП МНОГОСЛОЙНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ПОКРЫТИЙ

В соответствии с методологией формализованного описания (см. табл. 1) для определения ЭФГП многослойных МП с помощью ПЭМВ требуется разработать математическую модель определения частотной зависимости комплексного КО поля ПЭМВ многослойных МП в широкой полосе частот (нелинейный оператор Θ_1), целевую функцию для решения операторного уравнения (2) $\rho_{R1}(\Theta_1 \cdot \xi_{01}, \mathbf{r}_{3,1})$ и функцию γ_1 , регуляризирующую решение (2).

Геометрия задачи и обобщенная схема определения ЭФГП многослойных МП на металлической подложке с помощью ПЭМВ приведена на рис. 1.

Математическая модель определения частотной зависимости комплексного КО. Модель представляет собой обобщенное дисперсионное уравнение для ПЭМВ E - или H -типов в многослойных МП, позволяющее однозначно определять частотную зависимость комплексного коэффициента ослабления ПЭМВ $\mathbf{A}_3 = [\alpha'_{31}(f, \xi_1) - j\alpha''_{31}(f, \xi_1), \dots, \alpha'_{3K}(f, \xi_1) - j\alpha''_{3K}(f, \xi_1)]^T$, $k = 1, \dots, K$ при задании вектора ЭФГП $\xi_1 = \{\dot{\varepsilon}_n, \dots, \dot{\varepsilon}_N, \dot{\mu}_n, \dots, \dot{\mu}_N, b_n, \dots, b_N\}$ и частоты f .

В качестве примера рассмотрим дисперсионное уравнение для ПЭМВ E -типа. В общем случае уравнение «поперечного резонанса» для составления дисперсионных уравнений для любых типов МП имеет следующий вид [32, 33, 41]:

$$\dot{Z}_v(y) + \dot{Z}_n(y) \text{ при } \forall y, \quad (5)$$

где $\dot{Z}_v(y)$ и $\dot{Z}_n(y)$ — эквивалентные характеристические сопротивления «вверх» и «вниз» (см. рис. 1) относительно произвольного опорного сечения y_0 (для удобства математических преобразований выбрано сечение y_0 между слоем покрытия и металлической подложкой).

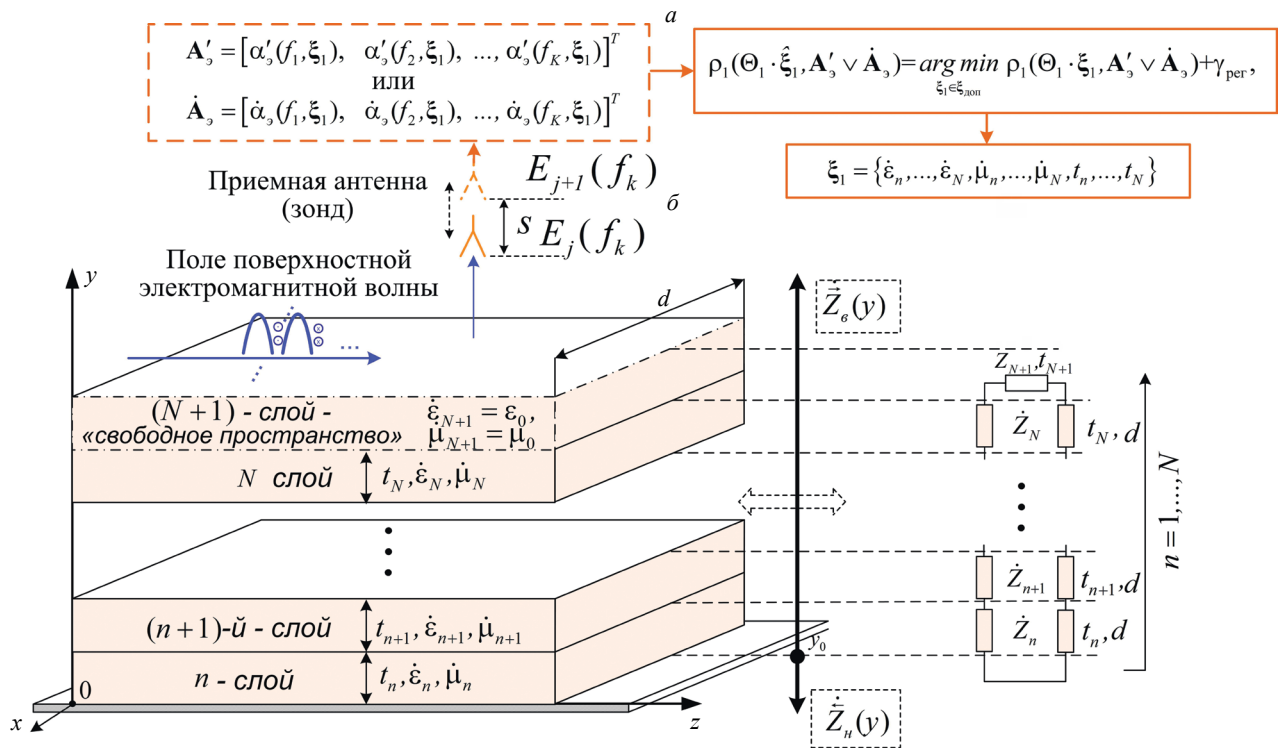


Рис. 1. Геометрия задачи и обобщенная схема определения ЭФП многослойных МП на металлической подложке с помощью ПЭМВ:
 а — геометрия задачи и обобщенная схема определения ЭФП многослойных МП; б — эквивалентная схема многослойного МП на основе метода поперечного резонанса.

Толщина типичных многослойных МП на практике обычно намного больше поверхностного слоя в металле, исходя из этого принято, что $\dot{Z}_n(y) \approx 0$. Характеристическое сопротивление $\dot{Z}_n(y)$ «вверх» относительно опорного сечения y_0 представляет собой эквивалентное характеристическое сопротивление слоев $n = 1, \dots, N + 1$ и определяется по рекуррентной формуле трансформации волновых сопротивлений [20, 32, 33]:

$$\left\{ \begin{aligned} \dot{Z}(n, n+1) &= \dot{Z}_n \frac{\dot{Z}_{n+1} + j\dot{Z}_n \text{tg}(\dot{q}_n t_n)}{\dot{Z}_n + j\dot{Z}_{n+1} \text{tg}(\dot{q}_n t_n)}, \\ \dot{Z}(n, \dots, n+2) &= \dot{Z}(n, n+1) \frac{\dot{Z}_{n+2} + j\dot{Z}(n, n+1) \text{tg}(\dot{q}_{n+1} t_{n+1})}{\dot{Z}(n, n+1) + j\dot{Z}_{n+2} \text{tg}(\dot{q}_{n+1} t_{n+1})}, \\ &\dots \\ \dot{Z}(n, \dots, N) &= \dot{Z}(n, \dots, N-1) \frac{\dot{Z}_N + j\dot{Z}(n, \dots, N-1) \text{tg}(\dot{q}_{N-1} t_{N-1})}{\dot{Z}(n, \dots, N-1) + j\dot{Z}_N \text{tg}(\dot{q}_{N-1} t_{N-1})}, \\ \dot{Z}(n, \dots, N+1) &= \dot{Z}(n, \dots, N) \frac{\dot{Z}_{N+1} + j\dot{Z}(n, \dots, N) \text{tg}(\dot{q}_N t_N)}{\dot{Z}(n, \dots, N) + j\dot{Z}_{N+1} \text{tg}(\dot{q}_N t_N)}, \\ n &= 1, \dots, N+1, \end{aligned} \right. \quad (6)$$

где $\dot{Z}(n, n+1)$ — характеристическое сопротивление n -го слоя покрытия, нагруженного на характеристическое сопротивление $n+1$ -слоя покрытия; \dot{Z}_{n+1} и \dot{Z}_n — характеристические сопротивления на границе раздела между N -слоем многослойного покрытия и свободным пространством и в слоях многослойного покрытия соответственно. Выражения для \dot{Z}_{n+1} и \dot{Z}_n имеют следующий вид [32, 33, 41]:

$$\dot{Z}_{N+1} = -j\dot{\alpha}_T(f_k, \xi_1) / (\omega\epsilon_0); \quad \dot{Z}_n = \dot{q}_n / (\omega\epsilon_0\dot{\epsilon}_n), \quad n = 1, \dots, N, \quad (7)$$

где $\dot{\alpha}_T(f_k, \xi_1)$ — теоретические комплексные КО ПЭМВ; \dot{q}_n — комплексное поперечное волновое число в n -слое покрытия, $\dot{q}_n = \sqrt{k_n^2 - k_0^2 - \dot{\alpha}_T(f_k, \xi_1) + \beta^2}$, $n = 1, \dots, N$, где $k_0 = 2\pi f / c$ и $k_n = 2\pi f \sqrt{\varepsilon_n \mu_n} / c$ — волновое число свободного пространства и в n -слое покрытия соответственно, c — скорость ЭМВ в свободном пространстве, $\beta = \pi d / d$ — волновое число, характеризующее распределение поля ПЭМВ по ширине покрытия d ; j — мнимая единица.

Итоговое дисперсионное уравнение имеет следующий вид:

$$\Theta_1 \equiv D[\dot{\alpha}_T(f_k, \xi_1); f_k] \equiv \dot{Z}(n, \dots, N+1) = 0. \quad (8)$$

Полученное дисперсионное уравнение позволяет однозначно определять значения комплексных КО поля ПЭМВ $\dot{\alpha}_T(f_k, \xi_1)$ при задании составляющих вектора ЭФГП $\xi_1 = \{\dot{\varepsilon}_n, \dots, \dot{\varepsilon}_N, \dot{\mu}_n, \dots, \dot{\mu}_N, b_n, \dots, b_N\}$ и частоты f_k .

Целевая функция и регуляризация решения. В соответствии с [21, 32, 33], решение операторного уравнения (2) (см. табл. 1) и, соответственно, определение вектора ЭФГП $\xi_1 = \{\dot{\varepsilon}_n, \dots, \dot{\varepsilon}_N, \dot{\mu}_n, \dots, \dot{\mu}_N, b_n, \dots, b_N\}$ многослойных МП сводится к минимизации целевой функции, построенной как невязка между вектор-столбцом экспериментальных \mathbf{A}_s и вектор-столбцом вычисленных теоретических значений \mathbf{A}_T комплексных КО ПЭМВ, на наборе частот f_k , $k = 1, 2, \dots, K$ в заданной полосе частот $\Delta f = f_k - f_1$:

$$\xi_1 = \arg \min_{\xi_1 \in \xi_{\text{доп}}} \rho(\Theta_1 \cdot \hat{\xi}_1, \mathbf{A}_s) = \frac{1}{K} |\mathbf{A}_s - \mathbf{A}_T|^2 + \varpi \left(\sum_{n=1}^N q_n^{\varepsilon} \|(\dot{\varepsilon}_n - \dot{\varepsilon}_{n0})\|^2 + \sum_{n=1}^N q_n^{\mu} \|(\dot{\mu}_n - \dot{\mu}_{n0})\|^2 + \sum_{n=1}^N q_n^t \|(t_n - t_{n0})\|^2 \right), \quad (9)$$

где \mathbf{A}_s и \mathbf{A}_T — вектор-столбцы со следующими компонентами:

$$\mathbf{A}'_s = [\alpha'_s(f_1) - j\alpha''(f_1, \varphi_\alpha), \alpha'_s(f_2) - j\alpha''(f_2, \varphi_\alpha), \dots, \alpha'_s(f_k) - j\alpha''(f_k, \varphi_\alpha)]^T, \\ \mathbf{A}'_T = [\alpha'_T(f_1, \xi_1), \alpha'_T(f_2, \xi_1), \dots, \alpha'_T(f_k, \xi_1)]^T,$$

$\rho(\Theta_1 \cdot \hat{\xi}_1, \mathbf{A}_s)$ — расстояние в метрическом пространстве комплексных КО ПЭМВ между экспериментально полученными \mathbf{A}_s и вычисленными теоретическими значениями \mathbf{A}_T КО поля ПЭМВ в области допустимых значений $\xi_1 \in \xi_{\text{доп}}$; q_n^{ε} , q_n^{μ} , q_n^t — веса, определяющие степень априорной информации о комплексных диэлектрических проницаемостях, комплексных магнитных проницаемостях и толщинах слоев МП; $\dot{\varepsilon}_n$, $\dot{\mu}_n$, t_n — комплексные диэлектрические проницаемости, комплексные магнитные проницаемости и толщины слоев МП; $\dot{\varepsilon}_{n0}$, $\dot{\mu}_{n0}$, t_{n0} — найденные с учетом априорной информации о составляющей среднее значение n -й составляющей вектора ЭФГП из области допустимых значений $\dot{\varepsilon}_{n0} \in [\dot{\varepsilon}_{n \min}, \dots, \dot{\varepsilon}_{n \max}]$, $\dot{\mu}_{n0} \in [\dot{\mu}_{n \min}, \dots, \dot{\mu}_{n \max}]$, $t_{n0} \in [t_{n \min}, \dots, t_{n \max}]$; ϖ — параметр регуляризации.

В соответствии с [34—36], мнимые части $\alpha''(f, \varphi_\alpha)$ экспериментальных комплексных КО учтены как дополнительный параметр при минимизации целевой функции (9) путем представления их в виде параметрической функции: $\alpha''(f, \varphi_\alpha) = \sum_{i=0}^n a_{n-i}^r f^i$, где a_{n-i} — параметры, которые представляют собой коэффициенты регрессии данной функциональной зависимости мнимой части КО; f — текущая частота измерения; $\varphi_\alpha = \{a_{n-i}\}$, $i = 0, \dots, n$ — вектор параметрических коэффициентов данной функциональной зависимости.

Фундаментальная особенность использования ПЭМВ заключается в том, что глобальный минимум целевой функции (9) довольно «острый» и расположенный в относительно узкой полосе оцениваемых ЭФГП. Выбором сред с конечным числом слоев и ограниченным диапазоном возможных значений их параметров выделяется компактный класс решений, обеспечивающий единственность решения обратной задачи при минимизации функционала (9). Регуляризация обратной задачи (9) сводится к выбору параметра регуляризации ϖ и весовых коэффициентов q_n^{ε} , q_n^{μ} , q_n^t [21, 32, 33].

Решение $\hat{\xi}_1$, обеспечивающее минимум целевой функции (7), зависит от параметра регуляризации ϖ . При больших ϖ основную роль играют критерии отбора решений, а при малых ϖ большое значение имеет близость вычисленного $\Theta_1 \cdot \hat{\xi}_1$ к измеренному $\dot{\alpha}_s(f_k, \xi_1)$. Исходя из этого, для выбора ϖ использовался принцип невязки: выбиралось максимальное ϖ , при котором выполнялось условие:

$$\|\Theta_1 \cdot \xi_1 - \dot{\alpha}_s(f_k, \xi_1)\|^2 \leq \Delta^2. \quad (10)$$

Вследствие того, что обычно точное значение Δ неизвестно, а имеется лишь оценка $\Delta_{\min} \leq \Delta \leq \Delta_{\max}$, задача (10) решалась для нескольких значений из указанного интервала (2—5 значений), а затем проводилось усреднение полученных решений.

Выбор диапазона частот измерений и их количества. На практике требуется оценка комплексных диэлектрической и магнитной проницаемостей многослойных материалов и покрытий в заданном частотном диапазоне (учет частотной дисперсии материалов). В результате, для исследуемого диапазона частот наибольшая погрешность оценки составляющих величин вектора ξ_1 будет наблюдаться в том случае, если КО, соответствующие двум разным векторам ξ_1^1 и ξ_1^2 , имеют близкие значения на частотах f_k , $k = 1, 2, \dots, K$. В этом случае становится труднее оценить различие между двумя близкими величинами ξ_1^1 и ξ_1^2 . Чтобы уменьшить эту неопределенность, количество частот и ширину полосы частот измерений необходимо выбирать такими, чтобы КО, соответствующие разным векторам ξ_1^1 и ξ_1^2 , максимально отличались друг от друга. Поэтому набор и количество частот, который обеспечивает максимальную точность оценки величины ξ_1 , следует выбирать в соответствии со следующим правилом:

$$\langle F \rangle = \arg \max_f \{Y\}, \quad (11)$$

где

$$F = \{f_1, f_2, \dots, f_K\},$$

$$Y = \frac{1}{KM} \sum_{k=1}^K \sum_{m=1, r=1}^M |\dot{\alpha}_t(f_k, \xi_1^m) - \dot{\alpha}_t(f_k, \xi_1^r)|^2.$$

Для уменьшения погрешности измерений и оценки большего числа ЭФГП (для многослойных и анизотропных МП осуществляется адаптивное управление выбором набора частот и ширины полосы частот измерений в соответствии с (11)).

Подходы к оценке ЭФГП других типов МП, приведенных в табл. 1 ($j = 2, 3, 4$), аналогичен.

Таким образом, разработаны методологические подходы к оценке ЭФГП МП со сложной внутренней структурой с помощью поверхностных электромагнитных волн, возбуждаемых непосредственно в исследуемых образцах. В общем случае определение ЭФГП подобных МП заключается в следующей последовательности действий.

1. Выбор информативных параметров поля ПЭМВ \mathbf{r}_{3j} (см. табл. 1).
2. Составление дисперсионного уравнения для ПЭМВ в соответствующем типе МП (нелинейный оператор Θ_j (см. табл. 1)).
3. Выбор и составление целевой функции $\rho_{Rj}(\Theta_j \cdot \xi_j, \mathbf{r}_{3j})$, которая чаще всего является квадратичным функционалом, определяющим разность между экспериментальными и теоретическими характеристиками поля ПЭМВ.
4. Минимизация целевой функции $\rho_{Rj}(\Theta_j \cdot \xi_j, \mathbf{r}_{3j})$, в результате которой определяются неизвестные ЭФГП исследуемого МП.

МАТЕРИАЛЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

Измерительный комплекс (ИК) для реализации метода определения ЭФГП многослойных материалов и покрытий реализован в виде стенда на основе векторного анализатора электрических цепей (ВАЦ) «Панорама Р4226» (АО «НПФ «Микран»»), системы перемещения приемной антенны (измерительного зонда) с числовым программным управлением и осциллографа Keysight DSO9404A (Agilent Technologies).

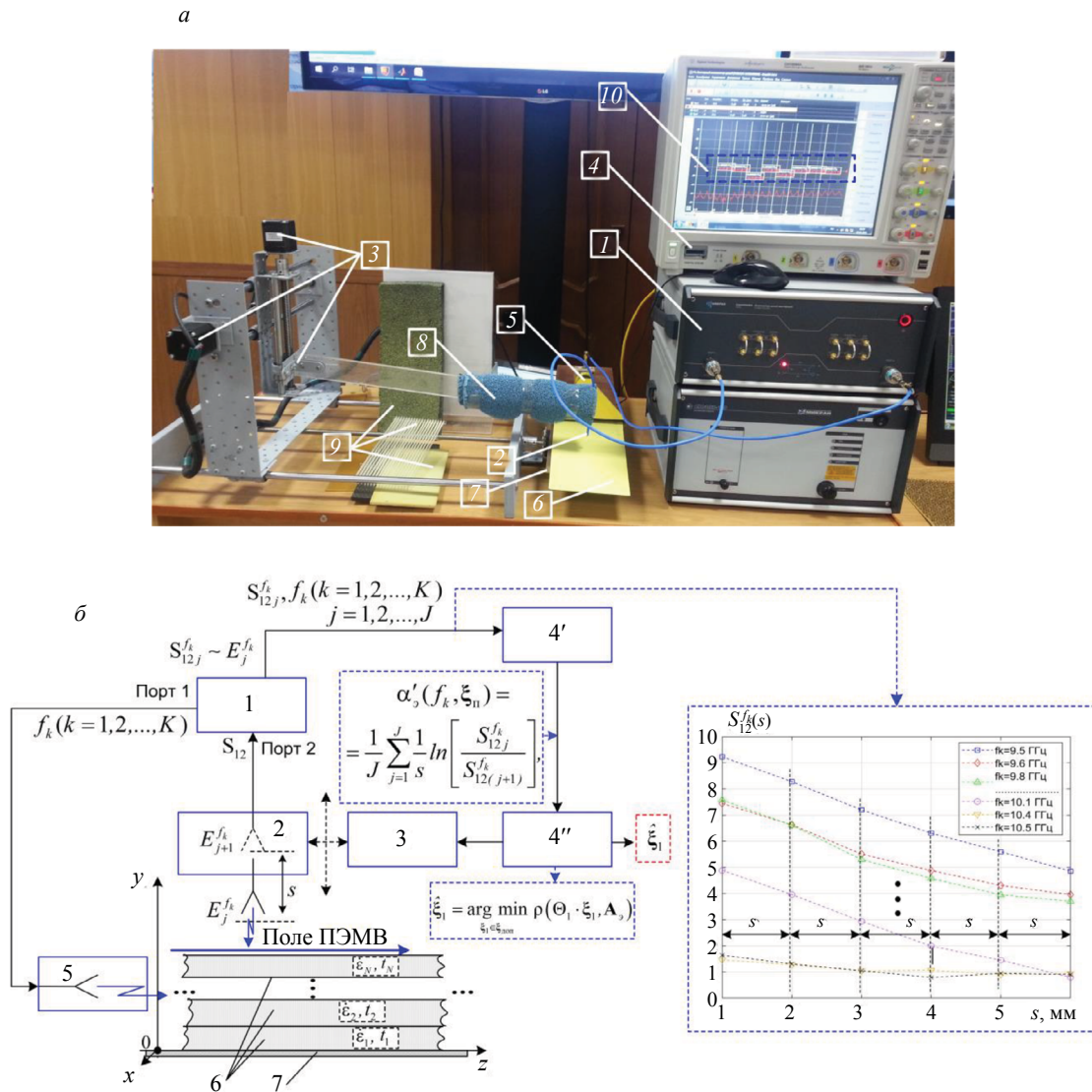


Рис. 2. Фотография (а) и структурная схема (б) ИК, реализующего метод определения ЭФГП многослойных материалов и покрытий.

На рис. 2а представлена фотография ИК, на рис. 2б — структурная схема и общая схема проведения эксперимента по оценке ЭФГП многослойных материалов и покрытий, где цифрами обозначено: 1 — векторный анализатор электрических цепей; 2 — приемная антенна с механизмом перемещения — 3; 4 — электронная вычислительная машина (осциллограф Keysight DSO9404A); 5 — антенна возбуждения ПЭМВ; 6 — исследуемый образец многослойного покрытия; 7 — металлическая подложка; 8 — радиопоглощающий материал для «экранировки» приемной антенны (измерительного зонда); 9 — набор исследуемых образцов материалов; 10 — вариант отображения частотной зависимости коэффициентов передачи S_{12} на осциллографе.

Использование ВАЦ позволило отказаться от отдельного генератора и блока детектирования, а также фактически осуществлять одновременное измерение значений КО поля ПЭМВ на всех заданных частотах ($f_k, k = 1 \dots K$) в одном цикле измерения. Для этого первый порт ВАЦ подключен к антенне возбуждения ПЭМВ, а второй порт подключен к приемной антенне (измерительному зонду). С учетом использования для измерений ПЭМВ E-типа их возбуждение в исследуемых образцах осуществлялось с помощью H-секториальной рупорной антенны. Несмотря на то, что рупорная антенна, использованная при измерениях, создает сферический фронт волны и косинусоидальное распределение амплитуды поля поперек исследуемого образца, ошибками

измерений, вызванными несинфазностью фронта волны, можно пренебречь, поскольку они проводились на малом расстоянии от поверхности (2—2,5 мм) и с малым пространственным шагом. В качестве электронной вычислительной машины использовались аппаратные возможности осциллографа Keysight DSO9404A.

Общий алгоритм работы ИК следующий. Перед началом проведения измерений проводилась калибровка ВАЦ с помощью калибровочных мер и далее с помощью стандартных образцов материалов различной толщины калибровка ИК в целом. Для калибровки ИК использовали стандартные образцы полиметилметакрилата (ПММК) ($\epsilon = 2,7 - j0,081$) различной толщины (соизмеримой с толщиной измеряемого многослойного образца).

Возбуждение ПЭМВ в исследуемом образце осуществляется с помощью передающей антенны 5, которая запитывается от первого порта ВАЦ. С помощью приемной антенны (измерительного зонда) и механизма ее перемещения осуществляется снятие зависимостей действительной части коэффициента передачи S_{12} от расстояния по нормали до поверхности исследуемого покрытия на частотах f_k , $k = 1 \dots K$ (см. рис. 2). Оценку КО поля ПЭМВ проводили по измеренным коэффициентам передачи S_{12} , которые пропорциональны значениям напряженности поля ПЭМВ, по формуле:

$$\alpha'(f_k, \xi_1) = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J \frac{1}{s} \ln \left[\frac{S_{12j}}{S_{12j+1}} \right], \quad (12)$$

где s — шаг между точками измерений; J — количество точек измерения (экспериментальные исследования показали, что для приемлемой точности оценок КО необходимо $J = 4-5$ точек измерения над поверхностью).

В качестве образцов материалов для формирования многослойных покрытий для натуральных экспериментов использовались промышленные СВЧ-ламинаты из одной серии на основе фторопласта FR-4 с керамическим наполнителем, предназначенные для изготовления СВЧ-печатных плат: Rogers Ro3010 ($\epsilon = 10,2 - j0,022$, $t = 0,64$ мм), Rogers Ro3006 ($\epsilon = 6,15 - j0,012$, $t = 1,28$ мм), Rogers Ro3003 ($\epsilon = 3 - j0,003$, $t = 0,13$ мм) [8, 42]. Данные материалы в частотном диапазоне 8—15 ГГц обладают практически частотно-независимыми значениями комплексной диэлектрической проницаемости [42]. Размеры образцов 200×100 мм.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В качестве примера оценки параметров многослойных материалов и покрытий рассмотрим результаты экспериментальных исследований по оценке ЭФГП двух- и трехслойных СВЧ диэлектрических покрытий.

Для объективной оценки возможностей метода в определении ЭФГП исследованы наиболее сложные случаи, когда исследуемые покрытия являются контрастными по диэлектрической проницаемости и имеют различные толщины слоев. Кроме того, в состав покрытий включался слой с небольшой диэлектрической проницаемостью и электрической толщиной Rogers Ro3003 ($\epsilon = 3 - j0,003$, $t = 0,13$ мм).

Исходя из этого, для исследования двухслойных покрытий изготовлено два образца покрытий на основе Rogers Ro3010 и Rogers Ro3003: «Ro3010—Ro3003» и «Ro3003—Ro3010».

В соответствии с методикой (8) для оценки параметров двухслойных покрытий приняли полосу частот измерений $\Delta f = 9 - 12$ ГГц с шагом по частоте 0,1 ГГц (количество частот $K = 31$). Согласно (2.32) параметры регуляризации для целевой функции (2.33) при определении параметров двухслойного покрытия следующие: $\varpi = 0,0018$, $q_1^{\epsilon'} = 1,8$, $q_1^{\epsilon''} = 1,8$, $q_1^t = 1,7$, $q_2^{\epsilon'} = 1,8$, $q_2^{\epsilon''} = 1,8$, $q_2^t = 1,7$.

Перед началом проведения измерений проводили калибровку ИК на двухслойном покрытии из двух слоев стандартного образца ПММК равной толщины ($t = 0,5$ мм). Частотные калибровочные зависимости КО ПЭМВ ПММК и профили диэлектрической проницаемости, полученные при решении обратной задачи (2) приведены на рис. 3.

Значения экспериментальных относительных погрешностей оценки ЭФГП проницаемостей каждого из двух одинаковых слоев соизмеримы между собой и составляют $\delta_{\epsilon'} \approx 4,8\%$, $\delta_{\epsilon''} \approx 5,5\%$, а толщины — 4,5%. Таким образом, обеспечиваются объективные оценки ЭФГП слоев двухслойного диэлектрического покрытия.

Полученные экспериментальные частотные зависимости КО ПЭМВ покрытий «Ro3010—Ro3003» и «Ro3003—Ro3010» приведены на рис. 4.

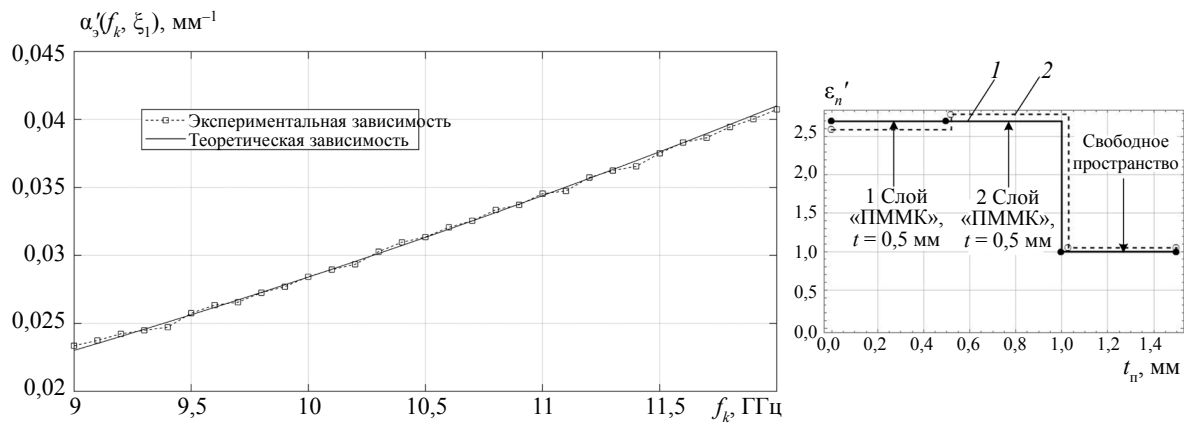


Рис. 3. Экспериментальные калибровочные частотные зависимости КО поля ПЭМВ $\alpha_3(f_k, \xi_1)$ двухслойного покрытия на основе ПММК:

1 — точный профиль; 2 — измеренный профиль.

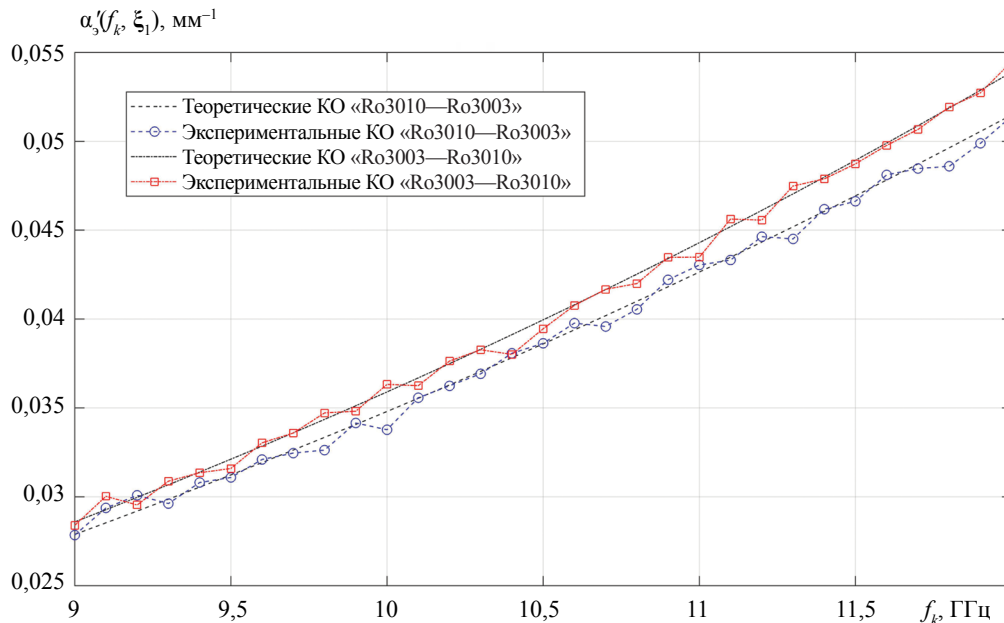


Рис. 4. Экспериментальные частотные зависимости КО поля ПЭМВ $\alpha_3(f_k, \xi_1)$ двухслойных покрытий на металлической подложке «Ro3010—Ro3003» и «Ro3003—Ro3010».

Указанные частотные зависимости для данных покрытий различаются, что позволяет надежно определять порядок сочетания слоев. Далее по ним решалась обратная задача (9). На рис. 5а и 5б показан точный профиль действительной части комплексной диэлектрической проницаемости и полученный в результате решения обратной задачи (9) по экспериментальным данным с ИК.

Получены следующие экспериментальные относительные погрешности оценки комплексной диэлектрической проницаемости и толщин материалов Ro3010 и Ro3003 при их оценке в составе двухслойных покрытий с доверительной вероятностью 0,95:

покрытие «Ro3010—Ro3003»: $\hat{\epsilon}_{\text{Ro3010}} \approx 9,67 - j0,023$, $\hat{\epsilon}_{\text{Ro3003}} \approx 2,84 - j0,0032$ (средние относительные погрешности оценки $\delta_{\epsilon'} \approx 5,2\%$, $\delta_{\epsilon''} \approx 6,1\%$); $\hat{t}_{\text{Ro3010}} \approx 0,68$ мм, $t_{\text{Ro3003}} \approx 0,138$ мм (средняя относительная погрешность оценки толщин слоев 5,2 %);

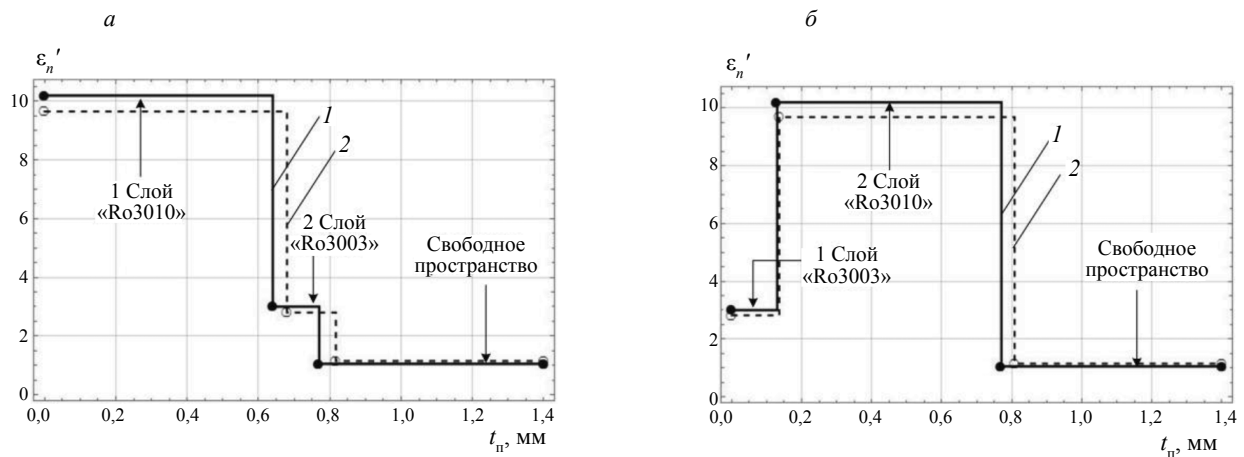


Рис. 5. Экспериментально полученные профили двухслойных покрытий на металлической подложке «Ro3010—Ro3003» (а) и «Ro3003—Ro3010» (б):
1 — точный профиль; 2 — измеренный профиль.

покрытие «Ro3003—Ro3010»: $\hat{\epsilon}_{\text{Ro3003}} \approx 2,85 - j0,0031$, $\hat{\epsilon}_{\text{Ro3010}} \approx 9,8 - j0,022$ (средние относительные погрешности оценки $\delta_{\epsilon'} \approx 5\%$, $\delta_{\epsilon''} \approx 6\%$); $\hat{t}_{\text{Ro3003}} \approx 0,137$ мм, $\hat{t}_{\text{Ro3010}} \approx 0,67$ мм (средняя относительная погрешность оценки толщин слоев 5%).

Таким образом, получено устойчивое решение обратной задачи (9). Экспериментальные относительные погрешности оценки ЭФГП слоев соизмеримы между собой, даже с учетом наличия слоя с небольшой электрической толщиной.

Для оценки возможностей метода в определении ЭФГП трехслойных покрытий сформировано четыре трехслойных диэлектрических покрытия с дополнительным слоем с небольшой электрической толщиной на основе Ro3003: «Ro3010—Ro3006—Ro3003», «Ro3010—Ro3003—Ro3006», «Ro3003—Ro3010—Ro3006» и «Ro3006—Ro3003—Ro3010».

Экспериментально установлено, что при оценке ЭФГП данных покрытий при тех же условиях что и для двухслойных ($\Delta f = 9 - 12$ ГГц, шаг по частоте 0,1 ГГц (количество частот $K = 31$)), относительные погрешности оценки возрастают в среднем на 10—12%. В результате, для повышения точности оценок в соответствии с методикой (10), ширина полосы частот измерений и их количество были увеличены. В частности, ширина полосы частот измерений была принята равной $\Delta f = 9 - 13$ ГГц с шагом по частоте 0,1 ГГц (количество частот $K = 41$). Параметры регуляризации для целевой функции (9) при определении параметров трехслойного покрытия следующие: $\varpi = 0,0017$, $q^{\epsilon'} = 1,7$, $q^{\epsilon''} = 1,7$, $q^t = 1,6$.

Полученные экспериментальные частотные зависимости КО поля ПЭМВ данных покрытий в логарифмическом масштабе приведены на рис. 6. Как и в случае двухслойных покрытий, указанные частотные зависимости для данных покрытий различаются, что позволяет определять порядок сочетания слоев. При этом следует отметить, что отличие частотных зависимостей КО покрытий при изменении положения слоя с небольшой электрической толщиной «Ro3003» незначительное. Это объясняет возрастание погрешностей при оценке ЭФГП трехслойного покрытия при тех же условиях, что и двухслойного. Далее по частотным зависимостям (см. рис. 6) решалась обратная задача (9).

На рис. 7 показаны точные профили действительной части комплексной диэлектрической проницаемости и полученные в результате решения обратной задачи (9) по экспериментальным данным с ИК для каждого образца покрытия.

Анализ экспериментальных результатов для трехслойных диэлектрических покрытий показывает, что увеличение ширины полосы частот измерений и их количества обеспечивает получение устойчивых оценок ЭФГП слоев для всех исследуемых покрытий: $\delta_{\epsilon'}$ не больше 6%, $\delta_{\epsilon''}$ не больше 7% и толщин слоев не больше 5,5%, в том числе и для слоя с малой электрической толщиной «Ro3003», $t = 0,13$ мм. При этом полученные погрешности сопоставимы с погрешностями оценки ЭФГП двухслойных покрытий.

При оценке ЭФГП многослойных покрытий минимизация целевой функции (9) осуществлялась с помощью генетического алгоритма, реализованного в виде функции «ga» приложения Global

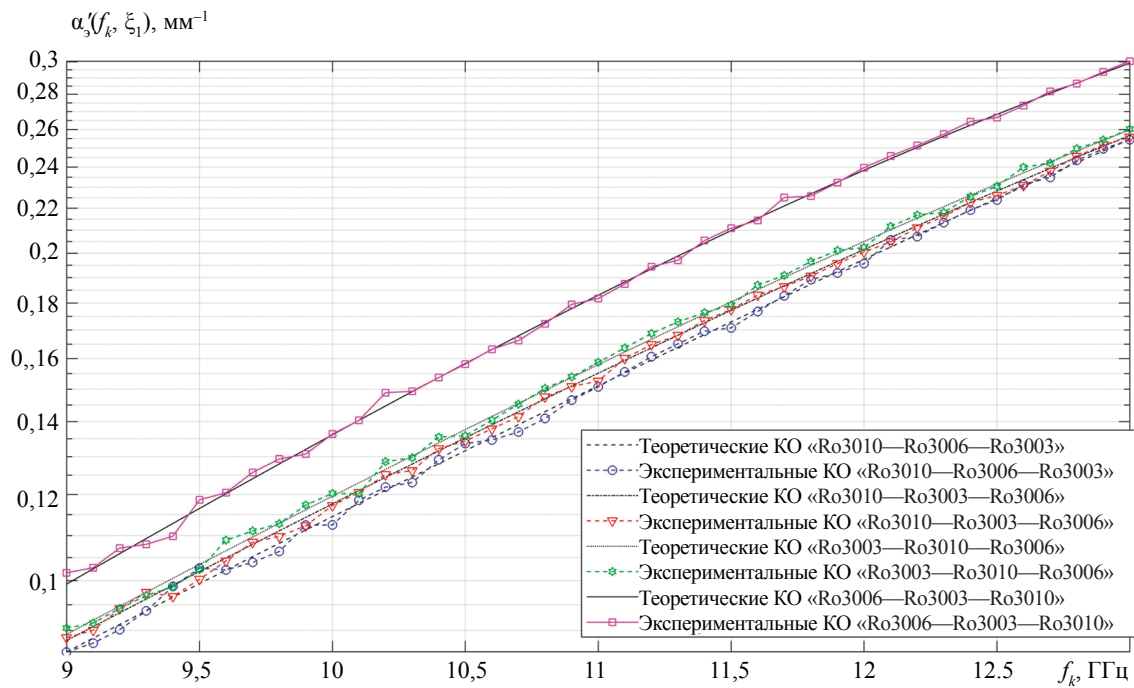


Рис. 6. Экспериментальные частотные зависимости КО поля ПЭМВ $\alpha_3(f_k, \xi_1)$ трехслойных покрытий на металлической подложке «Ro3010—Ro3006—Ro3003», «Ro3010—Ro3003—Ro3006», «Ro3003—Ro3010—Ro3006» и «Ro3006—Ro3003—Ro3010».

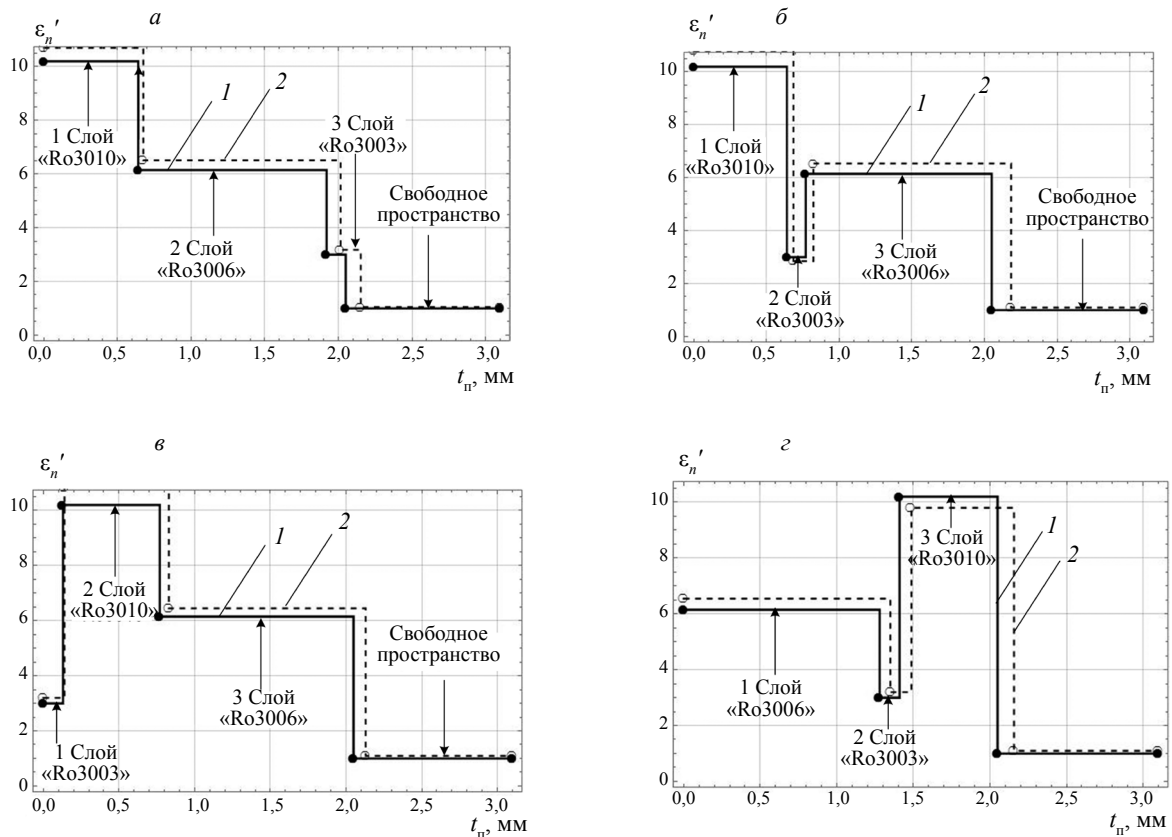


Рис. 7. Экспериментально полученные профили диэлектрической проницаемости трехслойных покрытий на металлической подложке «Ro3010—Ro3006—Ro3003» (а), «Ro3010—Ro3003—Ro3006» (б), «Ro3003—Ro3010—Ro3006» (в) и «Ro3006—Ro3003—Ro3010» (г):
1 — точный профиль; 2 — экспериментальный профиль.

Search пакета Matlab. Проведенные исследования позволили оптимальным образом подобрать параметры генетического алгоритма, обеспечивающие гарантированное нахождение глобального минимума целевой функции (9). Для двухслойных покрытий (число неизвестных ЭФГП — 6) основные из них следующие: размер популяции 150000, вероятность скрещивания 90 %, вероятность мутации 10 %. Среднее время минимизации целевой функции (9) составляет не более 3–4 мин на компьютере с процессором типа intel core i5, с тактовой частотой 2,33 ГГц и 4 Гбайт оперативной памяти. Для трехслойных покрытий (число неизвестных ЭФГП 9) размер популяции был увеличен до 250000.

В случае, если число слоев N многослойного покрытия увеличивается ($N = 3$ и более), в его составе имеются магнитодиэлектрические материалы ($\mu' \neq 1$ и $\mu'' \neq 0$), слои с анизотропией электрофизических параметров или слои на основе метаматериалов, будет соответствующим образом изменяться вид дисперсионного уравнения (8), а целевая функция (9) будет содержать большее число параметров минимизации, что влечет за собой увеличение полосы частот измерений и их количества, а также изменение параметров генетического алгоритма, в частности, размера популяции и увеличение времени оптимизации.

Более подробно вид целевых функций и дисперсионных уравнений для того или иного материала (см. табл. 1), а также оценка погрешностей измерений ЭФГП анизотропных покрытий, метаматериалов и величин отслоений покрытий от металлической подложки приведены в [32—38]. Приведем лишь основные конечные результаты.

Например, для анизотропных диэлектрических МП с толщиной и диэлектрической проницаемостью, соизмеримыми с исследованными в статье покрытиями на основе СВЧ-ламинатов при полосе частот измерений 9—13,5 ГГц, погрешности оценок коэффициентов анизотропии составляют не более 10 % с доверительной вероятностью 0,95 [35]. Для метаматериалов локальные значения их эффективных электрофизических параметров отличаются от расчетных не более, чем на 10 % [34]. Кроме того, численные и натурные эксперименты в [36] показали принципиальную возможность оценки значения регистрируемых величин отслоений диэлектрических и магнитодиэлектрических покрытий от металлической подложки 20 мкм и менее в полосе частот 9—13,5 ГГц.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, на основе выявленных фундаментальных закономерностей, связывающих электрофизические и геометрические параметры плоскостойких МП со сложной структурой, в том числе параметров, которые присущи только определенным классам материалов (метаматериалы и анизотропные материалы), с характеристиками поля ПЭМВ, развиты методы, математические модели и методики, обеспечивающие в рамках единого методического подхода проведение измерения параметров любых типов слоистых МП со сложной структурой в едином цикле измерения, в одних и тех же условиях (размещение на металлической подложке, конструкционном композиционном материале и др.).

Экспериментальные исследования двухслойных и трехслойных диэлектрических покрытий показали, что при ширине полосы частот измерений 9—13 ГГц обеспечиваются оценки действительных и мнимых частей слоев с относительной погрешностью не больше 6 и 7 % соответственно, а толщин слоев не больше 5,5 % с доверительной вероятностью 0,95.

Автор благодарит своего научного консультанта докторантуры доктора технических наук, профессора Федюнина Павла Александровича за помощь при написании статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лагарьков А.Н., Федоренко А.И., Кисель В.Н. и др. Актуальные задачи стелс-технологии [Электронный ресурс] / Ин-т теоретической и прикладной электродинамики РАН: офиц. сайт. URL: [http://www.itae.ru/science/topics/№4%20\(стелс\).pdf](http://www.itae.ru/science/topics/№4%20(стелс).pdf) (дата обращения: 12.01.2022).
2. Лагарьков А.Н., Погосян М.А. Фундаментальные и прикладные проблемы стелс-технологий // Вестник РАН. 2003. Т. 73. № 9. С. 779—787.
3. Указ Президента РФ от 01.12.2016 N 642 «О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации» [Электронный ресурс] / офиц. сайт. URL: <http://static.kremlin.ru/media/acts/files/0001201612010007.pdf> (дата обращения: 12.01.2022).
4. Казанцева Н.Е., Рывкина Н.Г., Чмутин И.А. Перспективные материалы для поглотителей электромагнитных волн сверхвысокочастотного диапазона // Радиотехника и электроника. 2003. Т. 48. № 2. С. 196—207.

5. *Lagarkov A.N., Matytsin S.M., Rozanov K.N., Sarychev A.K.* Dielectric properties of fiber-filled composites // *Journal of Applied Physics*. 1998. V. 84. No. 7. P. 3806—3814.
6. *Dankov Plamen I.* Experimental Characterization of Positive and Negative Dielectric Constants and Artificial Anisotropy of Meta-materials in the Microwave Range // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2020. V. 1598. P. 012002. DOI: 10.1088/1742-6596/1598/1/012002
7. *Dankov Plamen I.* Dielectric Anisotropy of Modern Microwave Substrates, Microwave and Millimeter Wave Technologies from Photonic Bandgap Devices to Antenna and Applications / Edited by Igor Minin. IntechOpen. Published 01 March 2010. DOI: 10.5772/9061
8. *Богданов Ю., Кочемасов В., Хасьянов Е.* Фольгированные диэлектрики — как выбрать оптимальный вариант для печатных плат ВЧ/СВЧ-диапазонов. Часть 1 // *Печатный монтаж*. 2013. № 2. С. 156—168.
9. *Михайлин Ю.А.* Специальные полимерные композиционные материалы. СПб.: Научные основы и технологии, 2008. 660 с.
10. *Лагарьков А.Н., Кисель В.Н., Сарычев А.К., Семененко В.Н.* Электрофизика и электродинамика метаматериалов // *Теплофизика высоких температур*. 2010. Т. 48. № 6. С. 1031—1048.
11. *Лагарьков А.Н., Кисель В.Н., Сарычев А.К., Семененко В.Н.* Электрофизика и электродинамика метаматериалов [Электронный ресурс] / Ин-т теоретической и прикладной электродинамики РАН: офиц. сайт. URL: [http://www.itae.ru/science/topics/№1%20\(метаматериалы\).pdf](http://www.itae.ru/science/topics/№1%20(метаматериалы).pdf) (дата обращения: 31.10.2020).
12. *Вендик И.Б., Вендик О.Г.* Метаматериалы и их применение в технике сверхвысоких частот (Обзор) // *Журнал технической физики*. 2013. Т. 83. Вып. 1. С. 3—28.
13. *Слюсар В.* Метаматериалы в антенной технике: основные принципы и результаты // *Первая декада*. 2010. № 3—4. С. 44—60.
14. *Иванова В.И., Кибец С.Г., Краснолобов И.И., Лагарьков А.Н., Политико А.А., Семененко В.Н., Чистяев В.А.* Разработка широкополосного радиопоглощающего покрытия с высокими эксплуатационными свойствами // *Журнал радиоэлектроники*. 2016. № 7. С. 1—23.
15. *Андреев М.В., Борулько В.Ф., Дробахин О.О.* О реализации метода квазирешений при определении параметров слоев диэлектрических слоистых структур // *Дефектоскопия*. 1997. № 3. С. 39—53.
16. *Андреев М.В., Борулько В.Ф., Дробахин О.О.* Экспериментальные исследования метода квазирешений при определении параметров слоев диэлектрических слоистых структур // *Дефектоскопия*. 1997. № 4. С. 70—78.
17. *Антропов О.С., Дробахин О.О.* Повышение разрешающей способности метода фурье-преобразования коэффициента отражения путем экстраполяции спектра на основе принципа минимума длительности // *Дефектоскопия*. 2009. № 5. С. 72—80.
18. *Басков К.М., Политико А.А., Семененко В.Н., Чистяев В.А., Акимов Д.И., Краснолобов И.И.* Радиоволновой контроль параметров образцов многослойных стенок радиопрозрачных укрытий // *Журнал радиоэлектроники [Электронный журнал]*. 2019. № 11. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/nov19/12/text.pdf>. DOI: 10.30898/1684-1719.2019.11.12
19. *Semenenko V.N., Chistyayev V.A., Politiko A.A., Baskov K.M.* Test Stand for Measuring the Free-Space Electromagnetic Parameters of Materials over an Ultrawide Range of Microwave Frequencies // *Measurement Techniques*. 2019. V. 62. No. 2. P. 161—166.
20. *Бреховских Л.М.* Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1973. 343 с.
21. *Гринев А.Ю., Темченко В.С., Багно Д.В.* Радары подповерхностного зондирования. Мониторинг и диагностика сред и объектов. М.: Радиотехника, 2013. 391 с.
22. *Симовский К.Р.* О материальных параметрах метаматериалов (обзор) // *Оптика и спектроскопия*. 2009. Т. 107. № 5. С. 766—793.
23. *Smith D.R., Schultz S., Markos P., Soukoulis C.M.* Determination of effective permittivity and permeability of metamaterials from reflection and transmission coefficients // *Physical Review B*. V. 65. P. 195104. Published 19 April 2002. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.65.195104>
24. *Smith D.R., Vier D.C., Koschny Th., Soukoulis C.M.* Electromagnetic parameter retrieval from inhomogeneous metamaterials // *Physical Review E*. V. 71. P. 036617. Published 22 March 2005. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.71.036617>
25. *Shelby R.A., Smith D.R., Schultz S.* Experimental Verification of a Negative Index of Refraction // *Science*. Apr 2001. V. 292. Is. 5514. P. 77—79. DOI: 10.1126/science.1058847
26. *Smith David R., Gollub Jonah, Mock Jack J., Padilla Willie J., Schuring David.* Calculation and measurement of bianisotropy in a split ring resonator metamaterial // *Journal of Applied Physics*. 2006. V. 100. P. 024507. <https://doi.org/10.1063/1.2218033>
27. *Ran L., Huangfu J., Chen H., Zhang X., Chen K., Grzegorzczak T., Kong J.* Experimental Study on Several Left-Handed Matamaterials // *Progress In Electromagnetics Research*. 2005. V. 51. P. 249—279. DOI: 10.2528/PIER04040502
28. *Hyde IV M.W., Havrilla M.J., Bogle A.E.* Nondestructive Determination of the Permittivity Tensor of a Uniaxial Material Using a Two-Port Clamped Coaxial Probe // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. Jan. 2016. V. 64. No. 1. P. 239—246. DOI: 10.1109/TMTT.2015.2502242
29. *Crowgey B.R., Crowgey Benjamin R., Tuncer Ozgur, Tang Junyan, Rothwell Edward J., Shanker B., Kempel Leo C., Havrilla Michael J.* Characterization of Biaxial Anisotropic Material Using a Reduced Aperture

Waveguide // Transactions on Instrumentation and Measurement. Oct. 2013. V. 62. No. 10. P. 2739—2750. DOI: 10.1109/TIM.2013.2259752

30. *Boybay M.S., Ramahi O.M.* Open-Ended Coaxial Line Probes With Negative Permittivity Materials // Transactions on Antennas and Propagation. May 2011. V. 59. No. 5. P. 1765—1769. DOI: 10.1109/TAP.2011.2123056

31. *Li Zhen, Haigh Arthur, Soutis Constantinos, Gibson Andrew, Sloan Robin.* A Simulation-Assisted Non-destructive Approach for Permittivity Measurement Using an Open-Ended Microwave Waveguide // Journal of Nondestructive Evaluation. 2019. No. 37, 39. <https://doi.org/10.1007/s10921-018-0493-1>

32. *Kaz'min A.I., Fedyunin P.A.* Evaluating the Accuracy of Reconstruction of the Electrical and Geometric Parameters of Multilayer Dielectric Coatings by a Multifrequency Radio-Wave Method for Slow Surface Electromagnetic Waves // Measurement Techniques. November 2020. V. 63. No. 8. P. 645—652. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11018-020-01834-9> [*Казьмин А.И., Федюнин П.А.* Оценка точности реконструкции электрофизических и геометрических параметров многослойных диэлектрических покрытий многочастотным радиоволновым методом поверхностных медленных электромагнитных волн // Измерительная техника. 2020. № 8. С. 51—58].

33. *Chernyshov V., Kaz'min A., Fedyunin P.* Testing Electrophysical Parameters of Multilayer Dielectric and Magnetodielectric Coatings by the Method of Surface Electromagnetic Waves // 2021 3rd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA), 2021. P. 372—377. DOI: 10.1109/SUMMA53307.2021.9632211.

34. *Kaz'min A.I., Fedyunin P.A.* Testing Electrophysical Parameters of Metamaterials by the Method of Surface Electromagnetic Waves // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2021. V. 57. No. 4. P. 320—336. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1061830921040070> [*Казьмин А.И., Федюнин П.А.* Контроль электрофизических параметров метаматериалов методом поверхностных электромагнитных волн // Дефектоскопия. 2021. № 4. С. 51—67].

35. *Kaz'min A.I., Fedyunin P.A., Fedyunin D.P.* Evaluation of Permittivity and Thickness Gaging for Anisotropic Dielectric Coatings by the Method of Surface Electromagnetic Waves // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2021. V. 57. No. 6. P. 500—516. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1061830921060085> [*Казьмин А.И., Федюнин П.А., Федюнин Д.П.* Контроль диэлектрической проницаемости и толщины анизотропных диэлектрических покрытий методом поверхностных электромагнитных волн // Дефектоскопия. 2021. № 6. С. 57—72].

36. *Kaz'min A.I., Fedyunin P.A.* Estimating the Extent of Exfoliation of Dielectric and Magnetodielectric Coatings with Surface Microwaves // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2020. V. 56. No. 9. P. 727—741. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1061830920090053> [*Казьмин А.И., Федюнин П.А.* Оценка степени отслоения диэлектрических и магнетодиэлектрических покрытий с использованием поверхностных электромагнитных волн СВЧ диапазона // Дефектоскопия. 2020. № 9. С. 50—63].

37. *Казьмин А.И., Федюнин П.А.* Контроль дефектов в многослойных диэлектрических материалах СВЧ-методом // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2020. Т. 86. № 2. С. 37—43.

38. *Федюнин П.А., Казьмин А.И., Кирьянов О.Е.* Алгоритмы контроля и оценки неоднородностей в радиопоглощающих покрытиях // Контроль. Диагностика. 2010. № 7 (145). С. 60—65.

39. *Уолтер К.* Антенны бегущей волны / Пер. с англ., под общ. ред. А.Ф. Чаплина. М.: Энергия, 1970. 448 с.

40. *Ваганов Р.Б., Коршунов И.П., Коршунова Е.Н., Олейников А.Д.* Экспериментальное исследование структуры поверхностной электромагнитной волны в анизотропно проводящей ленте // Радиотехника и электроника. 2013. Т. 58. № 2. С. 136—142.

41. *Фелсен Л., Маркувиц Н.* Излучение и рассеяние волн / Под ред. М.Л. Левина, пер. с англ. М.: Мир, 1978. Т. 1. 546 с. Т. 2. 550 с.

42. Data Sheet RO3000® Series Circuit Materials RO3003™, RO3006™, RO3010™ and RO3035™ High Frequency Laminates / <https://www.rogerscorp.com/>.