

DOI: 10.26896/1028-6861-2018-84-7-38-41

УДК (UDC) 537.226.621.317

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СВОЙСТВ МНОГОКОМПОНЕНТНОГО МАТЕРИАЛА

© **Виталий Петрович Крылов**

ОНПП «Технология» имени А. Г. Ромашина, г. Обнинск, Россия; e-mail: info@technologiya.ru

Статья поступила 6 февраля 2017 г.

Существующие теории гетерогенных сред описывают неоднородные материалы как естественные, так и искусственно синтезируемые структуры. В настоящее время все большее развитие получает синтез неоднородных многокомпонентных материалов с заданными электродинамическими свойствами, которые характеризуются магнитными и диэлектрическими проницаемостями. При моделировании многокомпонентной структуры в виде однородного материала с эффективной диэлектрической проницаемостью (без учета магнитных свойств) по разработанным моделям для компонент с известными диэлектрическими проницаемостями возникают погрешности при расчете коэффициента прохождения плоской волны через стенку обтекателя. В отличие от известных, описывающих статистически неоднородные среды только для одного электродинамического параметра, представленная электродинамическая модель для расчета эффективных магнитной и диэлектрической проницаемостей многокомпонентного материала основана на законах оптики. В ней используется возможность характеристики поляризованного материала суммарным дипольным моментом, возникающим под действием переменного поля, и выражении угла Брюстера в виде суммы углов поляризации, пропорциональных объемному содержанию компонент смеси.

Ключевые слова: диэлектрическая проницаемость; антенный обтекатель; многокомпонентный материал; угол Брюстера.

MODELLING OF ELECTROMAGNETIC PROPERTIES OF MULTICOMPONENT MATERIAL

© **Vitalii P. Krylov**

A. G. Romashin ONPP «Tekhnologiya», Obninsk, Russia; e-mail: info@technologiya.ru

Submitted February 6, 2017.

Current theories of heterogeneous media consider non-uniform materials as natural and artificially synthesizable structures. Nowadays, synthesis of the non-uniform multicomponent materials with given electrodynamic properties and characterized by magnetic and dielectric permeability, is gaining increasing development. When modeling a multicomponent structure as a uniform material with effective dielectric permeability (ignoring the magnetic properties) using the developed models for the components with known dielectric permeability, the errors arise in calculation of the transmission coefficient of a plane wave through the antenna dome wall. We present a heuristic model based on the laws of optics which is intended for simultaneous determination of the effective magnetic and dielectric permeability of multicomponent material in contrast to known models describing statistically non-uniform media only for one electrodynamic parameter. The electrodynamic model developed for description of the effective magnetic and dielectric permeability of non-uniform material suggests a possibility of characterizing a polarized material with the total dipole moment arising in alternating field and expressing the Brewster angle as a the sum of the polarization angles proportional to volume content the mixture components.

Keywords: dielectric permeability; antenna dome; multicomponent material; Brewster angle.

Для создания материалов с заданными электромагнитными свойствами большое внимание уделяют синтезу неоднородных материалов. При решении задачи прохождения электромагнитной волны через многокомпонентный материал его представляют квазиоднородным с эффективной

диэлектрической проницаемостью, которую определяют по формулам, полученным с помощью различных моделей статистических нерегулярных сред [1 – 3]. Условия, применяемые при выводе формул расчета эффективной диэлектрической проницаемости смеси многоком-

понентного материала, имеют множество ограничений (рассматриваются только один параметр, например, диэлектрическая проницаемость, и преимущественно двухкомпонентные смеси) и не позволяют получить точные результаты.

Цель работы — разработка модели для расчета эффективных диэлектрической и магнитной проницаемостей многокомпонентного материала, основанной на основополагающих законах оптики.

В предлагаемой электродинамической модели поляризованный материал характеризуется суммой дипольных моментов, возникающих под действием переменного поля для каждой компоненты смеси [1].

На рис. 1 представлена схема прохождения электромагнитной волны через однородный слой материала.

Характерный угол падения, связывающий поляризационные и магнитно-диэлектрические свойства среды, — угол Брюстера. В случае плоской волны с вектором электрического поля, лежащим в плоскости падения, угол Брюстера

$$\alpha_{\parallel} = \operatorname{tg}^{-1} \sqrt{\frac{\varepsilon_2(\varepsilon_2\mu_2 - \varepsilon_1\mu_1)}{\varepsilon_1(\varepsilon_2\mu_2 - \varepsilon_1\mu_1)}}, \quad (1)$$

где ε_2, μ_2 — диэлектрическая и магнитная проницаемости рассматриваемого однородного материала; ε_1, μ_1 — диэлектрическая и магнитная проницаемости воздушной среды, в которую помещен исследуемый материал.

Соответственно, в случае вектора электрического поля, перпендикулярного плоскости падения,

$$\alpha_{\perp} = \operatorname{tg}^{-1} \sqrt{\frac{\mu_2(\varepsilon_1\mu_2 - \varepsilon_2\mu_1)}{\mu_1(\varepsilon_2\mu_2 - \varepsilon_1\mu_1)}}. \quad (2)$$

Если многокомпонентная смесь состоит из объемных весовых долей, то

$$1 = \sum_{i=1}^N p_i, \quad (3)$$

где p_i — объемная часть i -й компоненты; N — общее число компонент смеси.

С учетом электромагнитных свойств i -й компоненты в слое материала, расположенного в воздушной среде ($\varepsilon_1 = 1, \mu_1 = 1$), углы Брюстера составят

$$\alpha_{i\parallel} = \operatorname{tg}^{-1} \sqrt{\frac{\varepsilon_i(\varepsilon_i - \mu_i)}{\varepsilon_i\mu_i - 1}}, \quad (4)$$

$$\alpha_{i\perp} = \operatorname{tg}^{-1} \sqrt{\frac{\mu_i(\mu_i - \varepsilon_i)}{\varepsilon_i\mu_i - 1}} \quad (5)$$

(ε_i, μ_i — диэлектрическая и магнитная проницаемости i -й компоненты материала) в случае плоской волны с вектором электрического поля, лежащим в плоскости падения и перпендикулярным ей.

С учетом электромагнитных свойств эффективной среды и условия (3) углы падения, соответствующие однородному материалу, для случая плоской волны с вектором электрического поля, лежащим в плоскости падения и перпендикулярным ей,

$$\alpha_{\text{эфф}\parallel} = \operatorname{tg}^{-1} \sqrt{\frac{\varepsilon_{\text{эфф}}(\varepsilon_{\text{эфф}} - \mu_{\text{эфф}})}{\varepsilon_{\text{эфф}}\mu_{\text{эфф}} - 1}} = \sum_{i=1}^N p_i \alpha_{i\parallel}, \quad (6)$$

$$\alpha_{\text{эфф}\perp} = \operatorname{tg}^{-1} \sqrt{\frac{\mu_{\text{эфф}}(\mu_{\text{эфф}} - \varepsilon_{\text{эфф}})}{\varepsilon_{\text{эфф}}\mu_{\text{эфф}} - 1}} = \sum_{i=1}^N p_i \alpha_{i\perp}, \quad (7)$$

где $\varepsilon_{\text{эфф}}, \mu_{\text{эфф}}$ — диэлектрическая и магнитная проницаемости, соответствующие однородному материалу, моделирующему многокомпонентную смесь.

Подставляя (4) и (5) в (6) и (7), получаем:

$$\operatorname{tg}^{-1} \sqrt{\frac{\varepsilon_{\text{эфф}}(\varepsilon_{\text{эфф}} - \mu_{\text{эфф}})}{\varepsilon_{\text{эфф}}\mu_{\text{эфф}} - 1}} = \sum_{i=1}^N p_i \operatorname{tg}^{-1} \sqrt{\frac{\varepsilon_i(\varepsilon_i - \mu_i)}{\varepsilon_i\mu_i - 1}}, \quad (8)$$

$$\operatorname{tg}^{-1} \sqrt{\frac{\mu_{\text{эфф}}(\mu_{\text{эфф}} - \varepsilon_{\text{эфф}})}{\varepsilon_{\text{эфф}}\mu_{\text{эфф}} - 1}} = \sum_{i=1}^N p_i \operatorname{tg}^{-1} \sqrt{\frac{\mu_i(\mu_i - \varepsilon_i)}{\varepsilon_i\mu_i - 1}}. \quad (9)$$

Окончательно система уравнений для определения эффективных электромагнитных магнитно-диэлектрических параметров многокомпонентной смеси имеет вид:

$$\frac{\varepsilon_{\text{эфф}}(\varepsilon_{\text{эфф}} - \mu_{\text{эфф}})}{\varepsilon_{\text{эфф}}\mu_{\text{эфф}} - 1} = \operatorname{tg}^2 \left\{ \sum_{i=1}^N p_i \operatorname{tg}^{-1} \sqrt{\frac{\varepsilon_i(\varepsilon_i - \mu_i)}{\varepsilon_i\mu_i - 1}} \right\}, \quad (10)$$

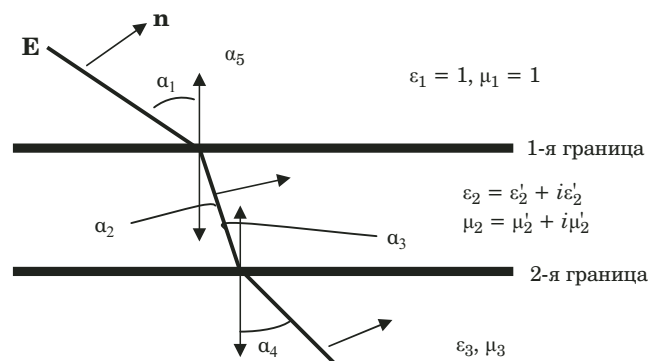


Рис. 1. Схема прохождения волны через плоский слой

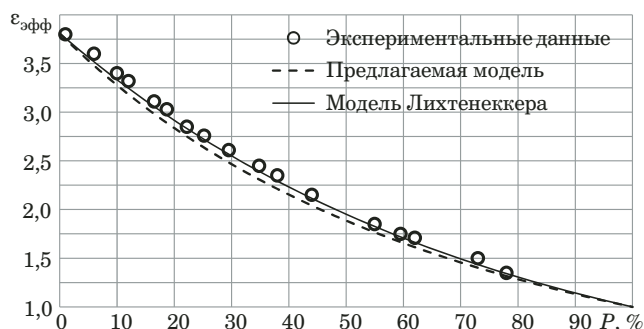


Рис. 2. Экспериментальная и расчетные зависимости диэлектрической проницаемости от пористости

$$\frac{\mu_{\text{эфф}}(\mu_{\text{эфф}} - \varepsilon_{\text{эфф}})}{\varepsilon_{\text{эфф}}\mu_{\text{эфф}} - 1} = \text{tg}^2 \left\{ \sum_{i=1}^N p_i \text{tg}^{-1} \sqrt{\frac{\varepsilon_i(\varepsilon_i - \mu_i)}{\varepsilon_i\mu_i - 1}} \right\}. \quad (11)$$

Упростим уравнение (10) для многокомпонентной смеси диамагнитных диэлектриков при условии $\mu_{\text{эфф}} = \mu_i = 1$. Получим

$$\varepsilon_{\text{эфф}} = \text{tg}^2 \sum_{i=1}^N \frac{p_i}{\text{tg} \sqrt{\varepsilon_i}}. \quad (12)$$

По формуле (12) рассчитывали эффективную диэлектрическую проницаемость для применяемой в радиотехнических конструкциях обтекателей кварцевой керамики, представляя её как двухкомпонентный материал, состоящий из смеси аморфного кварцевого стекла (диэлектрическая проницаемость $\varepsilon_1 = 3,81$) и воздушных пор ($\varepsilon_2 = 1,00058$). Полученные результаты сравнивали с расчетами эффективной диэлектрической проницаемости по формуле Лихтенеккера:

$$\varepsilon_{\text{эфф}} = \varepsilon_2^P \varepsilon_1^{1-P}, \quad (13)$$

где P — пористость материала характеризующая объемное содержание воздуха [3, 4].

Диаметр исследуемых образцов кварцевой керамики с различной пористостью в виде дисков составлял 49,5 мм. Диэлектрическую проницаемость образца, соответствующую эффективной диэлектрической проницаемости $\varepsilon_{\text{эфф}}$ из (12), как

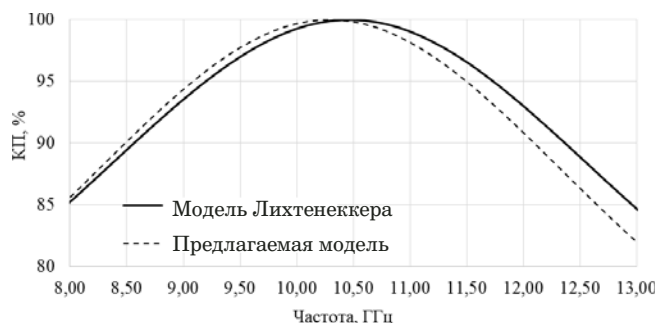


Рис. 3. Расчетные частотные зависимости коэффициента прохождения стенки обтекателя

интегральную величину, измеряли на сверхвысоких частотах в волноводном цилиндрическом резонаторе с волной H_{01} [5].

На рис. 2 представлены экспериментальные и расчетные зависимости диэлектрической проницаемости кварцевой керамики от пористости. Видно, что расчетные модельные зависимости имеют допустимое для практических расчетов отклонение от экспериментальных данных.

В таблице приведены экспериментальные и расчетные по моделям значения эффективной диэлектрической проницаемости многокомпонентной (число компонент больше двух) смеси на основе кварцевой ткани с алюмофосфатным связующим.

Расчетная $\varepsilon_{\text{эфф}}$ (модель Лихтенеккера) отличается от экспериментально измеренной величины на 3,3 %. Эффективная диэлектрическая проницаемость, рассчитанная по предлагаемой модели, находится в пределах погрешности измерения.

Влияние моделей представления многокомпонентного материала на точность определения радиотехнических характеристик системы антенна — обтекатель оценивали, рассчитывая частотную зависимость коэффициента прохождения (КП) плоской волны через стенку обтекателя матричным методом [6].

Результаты расчетов частотной зависимости КП плоской волны (вектор электрического поля перпендикулярен плоскости падения, падение

Экспериментальные и расчетные значения эффективной диэлектрической проницаемости композиционного многокомпонентного материала из кварцевой ткани с алюмофосфатным связующим

Компоненты материала	Плотность, г/см ³	Рассчитанная объемная часть, %	Диэлектрическая проницаемость	Эффективная диэлектрическая проницаемость		
				Экспериментальная	Модель Лихтенеккера	Предлагаемая модель
Смола кремнийорганическая	1,6	29,25	4,0	3,32 ± 0,05	3,21	3,32
Оксид алюминия (корунд)	4,0	6,3	9,0			
Кварцевая ткань	2,65	35	3,81			
Пористость (воздух)	0,0012928	35	1,00058			

волны на стенку обтекателя нормальное, толщина стенки $h = 8,00$ мм) представлены на рис. 3. Видно, что частотные зависимости КП носят резонансный характер, но максимумы сдвинуты друг относительно друга на $\Delta F = 200$ МГц, что для современных радиоэлектронных систем существенно.

Таким образом, при расчете КП системы антенна – обтекатель с использованием предлагаемой электродинамической модели на основе физической оптики поле на внутренней поверхности оболочки находят способом моделирования прохождения волны через бесконечную пластину, поэтому точность определения амплитуды и фазы прошедшего поля значительно влияет на точность расчетов выходных характеристик системы [7]. Электродинамическая модель не требует никаких ограничений и позволяет получить удовлетворительное совпадение с экспериментальными данными не только для двухкомпонентных смесей. Совместным использованием формул (10) и (11) можно проводить вычисления и для многокомпонентных материалов (в отличие от известных моделей для расчетов только диамагнитных материалов, условно принимающих $\mu_{\text{эфф}} = 1$).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Сканави Г. И.** Физика диэлектриков. Область слабых полей. — М., Л.: Гос. изд-во технико-теоретической литературы, 1949. — 500 с.

2. **Нетушил А. В.** Модели электрических полей в гетерогенных средах нерегулярных структур / Электричество. 1975. № 10. С. 1 – 8.
3. **Хиппель А. Р.** Диэлектрики и волны. — М.: Изд-во иностр. литературы, 1960. — 439 с.
4. **Суздальцев Е. И.** Свойства кварцевой керамики / Огнеупоры и техническая керамика. 2009. № 7 – 8. С. 21 – 34.
5. **Егоров В. Н.** Резонансные методы исследования диэлектриков на С.В.Ч. / Приборы и техника эксперимента. 2007. № 2. С. 5 – 38.
6. **Борн М., Вольф Э.** Основы оптики. — М.: Наука, 1973. — 720 с.
7. **Крылов В. П., Подольхов И. В., Ромашин В. Г.** Определение амплитуды трактовой волны приемной антенны в присутствии рассеивающего тела / Радиотехника. 2002. № 11. С. 41 – 44.

REFERENCES

1. **Skanavi G. I.** Physics of dielectrics. Area of weak fields. — Moscow, Leningrad: Gos. izd-vo tekhniko-teor. lit., 1949. — 500 p. [in Russian].
2. **Netushil A. V.** Models of electric fields in heterogeneous environments of irregular structures / Electricity. 1975. N 10. P. 1 – 8 [in Russian].
3. **Hippel A. R.** Dielectrics and waves. — Moscow: Izd-vo inostr. lit., 1960. — 439 p. [Russian translation].
4. **Suzdaltsev E. I.** Properties of quartz ceramics / Ogneupory Kvarts. Keram. 2009. N 7 – 8. P. 21 – 34 [in Russian].
5. **Egorov V. N.** Resonant methods of a research of dielectrics on S.H.F. / Pribory Tekhn. Éksper. 2007. N 2. P. 5 – 38 [in Russian].
6. **Bourne M., Wolf E.** Fundamentals of optics. — Moscow: Nauka, 1973. — 720 p. [Russian translation].
7. **Krylov V. P., Podolkhov I. V., Romashin V. G.** Determination of amplitude of a traktovy wave of the reception antenna in the presence of the disseminating body / Radiotekhnika. 2002. N 11. P. 41 – 44 [in Russian].