

УДК 621.317:372.22

Моделирование диэлектрических свойств толсто пленочных полимерных нанокомпозитов на основе полиэтилена низкой плотности в УВЧ, СВЧ и КВЧ диапазонах радиоволн

© Авторы, 2014

© ЗАО «Издательство «Радиотехника», 2014

Н.М. Ушаков – д.ф.-м.н., профессор, кафедра «Радиотехника», Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А. E-mail: nmu@bk.ru

С.Ю. Молчанов – магистрант, кафедра «Радиотехника», Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А. E-mail: canishe@yandex.ru

На основе моделей Коул–Коула, Дэвидсона–Коула и Максвелла–Гарнетта проведено моделирование диэлектрических свойств полимерных композитных наноматериалов в широком частотном диапазоне (от 1 ГГц до 50 ГГц). Приведены результаты численного эксперимента дисперсии диэлектрической проницаемости и частотных свойств электронного затухания электромагнитных волн (ЭМВ) в композитных наноматериалах с полимерными матрицами из неполярных и полярных диэлектриков. В качестве базовой полимерной матрицы выбран неполярный диэлектрик – полиэтилен высокого давления (низкой плотности). В качестве наночастиц с размерами не более 30 нм выбраны материалы с проводимостью от 10^{-2} до 1 См/м. На основании полученных результатов показана возможность использования полимерных композитных наноматериалов в качестве радиопоглощающих покрытий для различных приложений в СВЧ и КВЧ диапазонах радиоволн.

Ключевые слова: полимер, нанокомпозит, наночастица, диэлектрическая проницаемость, диэлектрические потери, электронное затухание

The dielectric properties of polymer composite nanomaterials based on Cole-Cole, Cole-Davidson, and Maxwell-Garnett models in a wide frequency range (from 1 GHz to 50 GHz) have been simulated. The results of numerical experiment for dispersion of the permittivity and the frequency properties of the electronic attenuation of electromagnetic waves (EMW) in composite nanomaterials with polymeric matrices of nonpolar and polar dielectrics are shown. Non-polar dielectric (LDPE) is selected as the base polymer matrix. A virtual material for nanoparticles with dimensions not exceeding 30 nm with conductive materials from 10^{-2} to 1 S/m has been selected. Based on these results of simulation, the possibility of using polymer composite nanomaterials as radar absorbing coatings for various applications in the MW band is shown.

Keywords: polymer, composite, nanoparticle, dielectric constant, dielectric loss, radio absorbing

Введение

Исследование диэлектрических свойств полимерных нанокомпозитных материалов на основе органических матриц с неорганическими включениями в виде наночастиц в широком частотном диапазоне от единиц МГц до сотен ГГц представляет важное фундаментальное и практическое значение. Такие исследования представляют собой, с одной стороны, изучение поляризационных и релаксационных процессов на разных частотах в нанокомпозитных материалах с другой – поиск новых полимерных композиций, отвечающих требованиям электромагнитной совместимости (ЕМС) или электромагнитной интерференции (ЕМИ), практической реализации в устройствах спутниковой связи, радарной антенной техники и т.д. [1, 2]. Важность применения полимерных композитных наноматериалов состоит и в том, что они позволяют в результате широкой вариации сочетания материалов матрицы и наночастиц, концентрации наночастиц в матрице и их размеров получать композиционные материалы с требуемыми свойствами и сравнительно низкой себестоимостью [3].

В работе проведен сравнительный анализ частотных свойств комплексной диэлектрической проницаемости полимерных материалов, рассчитанных по моделям Коула–Коула и Дэвидсона–Коула и используемых в качестве матрицы в полимерных композитах. Диэлектрические свойства композитных наноматериалов рассчитывались на основании модели Максвелла–Гарнетта. В качестве наночастиц рассматривались полупроводниковые материалы с омической удельной проводимостью от 10^{-2} до 10 См/м, размером не более 30 нм и концентрацией в матрице $10^{22} \dots 10^{23} \text{ м}^{-3}$. Разработка радиопоглощающих материалов и покрытий на основе композитных наноматериалов в последнее время особенно актуальна из-за появившихся технологических возможностей создания материалов и покрытий с хорошими радиопоглощающими свойствами в широком диапазоне СВЧ частот [4].

Цель работы – проведение численного эксперимента по исследованию частотных диэлектрических свойств (диэлектрической проницаемости, тангенса угла диэлектрических потерь

и приведенных вносимых потерь) полимерных композитных наноматериалов на основе полиэтилена высокого давления (низкой плотности) в частотном диапазоне от 1 ГГц до 50 ГГц.

Модели

В модели Дебая предполагается, что все диполи ведут себя одинаково. Однако на практике, особенно в полимерных диэлектриках, композитах и сегнетоэлектриках, где много разных полярных групп, модель Дебая не всегда корректна. Для описания разнородного диэлектрического поведения были предложены полуэмпирические формулы, являющиеся обобщением формулы Дебая. Среди этих функций наиболее известны следующие:

$$\frac{\varepsilon^* - n^2}{\varepsilon_0 - n^2} = \left\{ \begin{aligned} & \left[1 + (j\omega\tau_{CC})^{1-\alpha} \right]^{-1} \\ & (1 + j\omega\tau_{DC})^{-\gamma} \\ & \left[1 + (j\omega\tau_{NM})^{1-\alpha} \right]^{-\gamma} \end{aligned} \right\}. \quad (1)$$

Формулы (1) представляют соответственно функции Коул–Коула (τ_{CC} , $0 \leq \alpha < 1$), Дэвидсона–Коула (τ_{DC} , $0 < \gamma \leq 1$) и Гавриляка–Негами (τ_{NM}).

Для матричной композитной среды с диэлектрической проницаемостью ε_m , заполненной случайным образом наночастицами сферической формы с диэлектрической проницаемостью ε_s , применяют модель Максвелла–Гарнетта:

$$\frac{\varepsilon_{CM} - \varepsilon_m}{\varepsilon_{CM} + 2\varepsilon_m} = f \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_m}{\varepsilon_s + 2\varepsilon_m}. \quad (2)$$

Здесь ε_{CM} – эффективная диэлектрическая проницаемость полимерного материала. Модель Максвелла–Гарнетта справедлива для небольших долей заполнения объема наночастицами. Считается, что доля заполнения не должна превышать 30 % ($f \leq 0,3$).

На основе моделей Максвелла–Гарнетта (М–Г), Коул–Коула (К–К) и Дэвидсона–Коула (Д–К) рассмотрим частотные свойства реальной и мнимой частей диэлектрической проницаемости композитного наноматериала. Для этого в уравнении (2) все представленные диэлектрические проницаемости надо записать в комплексной форме: $\varepsilon_{CM} = \varepsilon'_{CM} - j\varepsilon''_{CM}$, $\varepsilon_s = \varepsilon'_s - j\varepsilon''_s$ и $\varepsilon_m = \varepsilon'_m - j\varepsilon''_m$. Проведя разделение реальной и мнимой частей в (2) и введя новые обозначения, получим для реальной и мнимой частей диэлектрической проницаемости композитного материала следующие выражения (3)–(10):

$$a_{11}(\omega) = \operatorname{Re} \varepsilon_m^*(\omega), \quad b_{11}(\omega) = \operatorname{Im} \varepsilon_m^*(\omega); \quad (3)$$

$$c_1(\omega) = \operatorname{Re} \varepsilon_s^*(\omega), \quad d_1(\omega) = \operatorname{Im} \varepsilon_s^*(\omega) = \frac{\sigma_s}{\varepsilon_0 \omega}; \quad (4)$$

$$\operatorname{Re} \varepsilon_{CM}^*(\omega) = e_1(\omega) = -[A_1(\omega) + B_1(\omega)]; \quad (5)$$

$$\operatorname{Im} \varepsilon_{CM}^*(\omega) = A_2(\omega) - B_2(\omega); \quad (6)$$

$$A(\omega) = f \frac{[c_1 - a_{11}(\omega)][c_1 + 2a_{11}(\omega)] + [d_1 - b_{11}(\omega)][d_1 + 2b_{11}(\omega)]}{[c_1 + 2a_{11}(\omega)]^2 + [d_1 + 2b_{11}(\omega)]^2}; \quad (7)$$

$$B(\omega) = f \frac{[d_1 - b_{11}(\omega)][c_1 + 2a_{11}(\omega)] - [c_1 - a_{11}(\omega)][d_1 + 2b_{11}(\omega)]}{[c_1 + 2a_{11}(\omega)]^2 + [d_1 + 2b_{11}(\omega)]^2}; \quad (8)$$

$$A_1(\omega) = \frac{a_{11}(\omega)[1 - 4A(\omega)]}{2[1 - A(\omega)]}, \quad (9)$$

$$B_1(\omega) = \frac{\sqrt{8A(\omega)b_{11}^2(\omega) - 16A^2(\omega)b_{11}^2(\omega) + 9a_{11}^2(\omega) + 8b_{11}^2(\omega)}}{2[1 - A(\omega)]},$$

$$A_2(\omega) = \frac{3a_{11}(\omega) - 4B(\omega)b_{11}(\omega)}{2B(\omega)},$$

$$B_2(\omega) = \frac{1}{2B(\omega)} \left(9a_{11}^2(\omega) - 16B^2(\omega)a_{11}(\omega)e_1(\omega) - 4B^2e_1^2(\omega) - \right. \\ \left. - 24b_{11}(\omega)a_{11}(\omega)B(\omega) - 12b_{11}(\omega)B(\omega)e_1(\omega) - 16B^2(\omega)a_{11}^2(\omega) \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (10)$$

где f – объемная доля наночастиц (включений) в матрице, σ_s – омическая проводимость материала наночастиц. Как было сказано выше для модели Максвелла–Гарнетта, объемная доля наночастиц в матрице не должна превышать 0,3. Следует заметить, что данная модель способна с точностью 5 % описать частотные свойства композитного материала с мнимой частью $\operatorname{Im} \varepsilon_{CM}^*(\omega) \leq 1$.

Диэлектрические потери в материалах вызывают преобразование части электромагнитной энергии, переносимой ЭМВ, в тепловую энергию. При этом, строго говоря, изменяются структура поля, фазовая скорость и другие характеристики волны. Однако, если потери невелики, то этими изменениями можно пренебречь. Энергетические потери на сверхвысоких частотах в полимерных композитных наноматериалах, представляющих собой гетерогенные структуры, обусловлены механизмом Максвелла–Вагнера (межповерхностная дипольная релаксация) и омическими потерями, связанными с проводимостью материала наночастиц [5]. При этом важно правильно выбрать диапазон частот в качестве диапазона измерения электрофизических параметров материалов, в котором можно пренебречь с одной стороны перераспределением зарядов за счет их рекомбинации и инерционностью зарядов с другой стороны. Известно [6], что этот диапазон выбирается из условия:

$\tau_2 > T > \tau_1$, где T – период СВЧ ЭМВ, τ_1 , τ_2 – среднее время релаксации подвижности зарядов в материале и среднее время рекомбинации зарядов противоположного знака соответственно или $(10^3 \div 10^6) \leq \omega / 2\pi \leq (10^{11} \div 10^{12})$ Гц. Согласно теории Максвелла–Вагнера неоднородные включения в диэлектрической матрице эквивалентно можно представить как параллельно включенные омическую и емкостную проводимости. С ростом частоты емкостная проводимость начинает преобладать и «закорачивает» участки с малой омической проводимостью, что приводит в целом к росту общей проводимости образца. Межповерхностная дипольная релаксация Максвелла–Вагнера связана с образованием и ориентационными механизмами для диполей на границе наночастица–матрица. Такая межфазная граница в зависимости от концентрации и размеров наночастиц может составлять $10^5 \dots 10^6$ см². Существует частота ω_0 , на которой релаксационные потери максимальны. Эта частота получила название частоты дисперсии:

$$\omega_0 = \left(\frac{4\pi\sigma_s}{\varepsilon_0} \right) \left(\frac{1}{\varepsilon_s + \varepsilon_m} \right),$$

где σ_s – омическая проводимость материала наночастиц.

Для частот $\omega > \omega_0$ проводимость композитного материала стремится к некоторому предельному значению. Так, для наночастиц сферического вида

$$\sigma_{CM} \rightarrow \sigma_\infty = \alpha \frac{9\sigma_s \varepsilon_s^2}{(2\varepsilon_m + \varepsilon_s)^2},$$

где $\alpha = \pi d_s^3 N / 6$, d_s – размер наночастицы; N – объемная концентрация наночастиц в матрице. Если учесть соотношение среднего размера наночастиц d_s и ширины диэлектрической прослойки матрицы между ними d_m , то предельную проводимость композитного материала можно определить, как $\sigma_\infty = \sigma_s (1 + a)^{-2}$, где $a = (d_m / d_s)(\varepsilon_s / \varepsilon_m)$. В отличие от релаксационных потерь омические потери, связанные со сквозной проводимостью в наночастицах, обратно пропорциональны частоте $\text{Im} \varepsilon_{CM}^* = \sigma_s / (\varepsilon_0 \omega)$, так как сама омическая сквозная проводимость σ_s от частоты не зависит. Коэффициент затухания ЭМВ α_w на единице длины волновода связан с переносимой мощностью P и мощностью тепловых потерь P_T известным соотношением: $\alpha_w = P_T / (2P)$, Неп/м. Если композитный наноматериал выбрать в качестве внутренней среды диэлектрического волновода, то затухание ЭМВ в нем можно определить, как

$$\alpha_w = \frac{27.3 \sqrt{\text{Re} \varepsilon_{CM}^*} \text{tg} \delta_{CM}}{\lambda} K_{ie},$$

где K_{ie} – безразмерный структурный коэффициент для внутренней ($i=1$) и внешней ($i=2$) среды волновода [7]. Вблизи критической частоты волновода $K_{1e} \rightarrow 0$ и $K_{2e} \rightarrow 1$, и ЭМВ ведут себя как в безграничной среде.

Результаты и их обсуждение

На основе вышеприведенных теоретических соотношений для комплексной диэлектрической проницаемости композитного материала проведем вычислительный эксперимент по изучению частотных диэлектрических свойств различных полимерных композитных наноматериалов. Рассмотрим композитные полимерные материалы матричного типа. В качестве матрицы выберем неполярный диэлектрик – полиэтилен высокого давления (низкой плотности, LDPE matrix). Наночастицы, стабилизированные в матрице обладают комплексной диэлектрической проницаемостью. Модель Максвелла–Гарнетта используется при расчетах в качестве основной. Доля заполнения матрицы наночастицами будет иметь максимальное значение, равное $f=0,3$. Рассмотрим частный случай $\omega \geq \omega_0$. Пусть в матрицу полиэтилена высокого давления внедрены наночастицы условного материала с комплексной диэлектрической проницаемостью $\varepsilon_s = 10 + jX$, где $X = \sigma_s / (\varepsilon_0 \omega)$, а σ_s – удельная проводимость материала наночастицы. Средний размер наночастиц составляет 30 нм, а их концентрация в матрице 10^{16} см⁻³. Для проводимости материала наночастиц $\sigma_s = 0,1$ См/м частота дисперсии составляет примерно 1,8 ГГц. Для наночастиц с меньшей сквозной проводимостью $\sigma_s = 0,01$ См/м, но с равной концентрацией частота дисперсии составляет 180 МГц. И, наоборот, для проводимости $\sigma_s = 1$ частота дисперсии составит 18 ГГц. Важно заметить, что неоднородность матрицы по временам релаксации дипольно-полярных групп слабо сказывается на эффективных диэлектрических свойствах полимерного нанокомпозита в целом. Другими словами не имеет принципиального значения какая модель используется для расчета диэлектрической проницаемости матрицы. Рассмотрим, как влияет диэлектрическая проницаемость наночастиц на комплексную диэлектрическую проницаемость полимерного композитного материала и затухание ЭМВ в нем.

На рис. 1 показаны частотные зависимости действительной части диэлектрической проницаемости матричного композитного наноматериала с разными значениями омической проводимости наночастиц. Для наночастиц с проводимостью $\sigma_s = 0,1$ (кривая 1) частотная зависимость диэлектрической проницаемости практически не проявляет себя в рассматриваемом частотном диапазоне за исключением небольшого участка аномальной дисперсии в его

начале. С ростом проводимости наночастиц аномальный характер дисперсии начинает преобладать во всем частотном диапазоне. Однако условие $\omega \geq \omega_0$ в этом случае выполняется на верхних частотах диапазона.

Рассмотрим частотные зависимости тангенса угла диэлектрических потерь в таких композитных наноматериалах. Здесь следует отметить, что сами полимерные материалы в качестве диэлектрической матрицы обладают низкой омической проводимостью. Даже для нелегированных органических полупроводников, для которых характерен повышенный уровень проводимости значения, проводимости не превышают 10^{-3} См/см. Например, полиакрилонитрил имеет проводимость $\sigma = 10^{-8} \div 10^{-4}$ См/см, полифталоцианин – $\sigma = 10^{-3}$ См/см, а полинитрилы обладают проводимостью меньше 10^{-5} См/см.

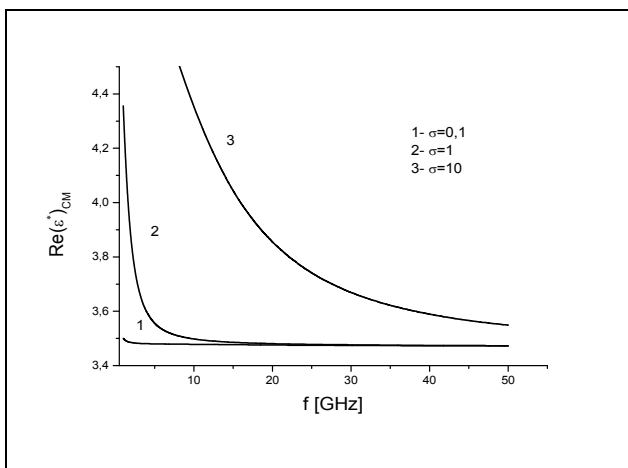


Рис. 1. Частотные зависимости действительной части диэлектрической проницаемости матричного композитного наноматериала с различными значениями омической проводимости наночастиц

Неполярные диэлектрики, к которым относится и полиэтилен высокого давления имеют очень низкую проводимость порядка $\sigma = 10^{-17}$ См/см [8]. Основной вклад в потери в композитном наноматериале вносят наночастицы. На рис. 2 показаны частотные зависимости тангенса угла диэлектрических потерь композитных наноматериалов с различной электропроводностью наночастиц ($\sigma = 0,01$ См/м, кривая 1) и ($\sigma = 0,1$ См/м, кривая 2). С ростом частоты, как уже было сказано выше, работают два механизма диэлектрических потерь в композитных материалах – механизм Максвелла–Вагнера, приводящий к росту омической проводимости с ростом частоты, и сквозная проводимость самих наночастиц, приводящая к обратной зависимости проводимости от частоты. Действие этих механизмов хорошо проявляется для наночастиц с проводимостью $\sigma = 0,01$ См/м (кривая 1).

Известно, что коэффициент затухания однородной плоской электромагнитной волны в диэлектриках определяется в виде $\alpha = \pi \sqrt{\epsilon} \operatorname{tg} \delta / \lambda$, где λ – длина ЭМ волны, ϵ и $\operatorname{tg} \delta$ – диэлектрическая проницаемость и тангенс угла потерь в диэлектрике [7]. Проведем сравнительный анализ затухания ЭМВ в композитном наноматериале α_{CM} и диэлектрической матрице α_m , как $\alpha = 20 \lg(\alpha_{CM} / \alpha_m)$.

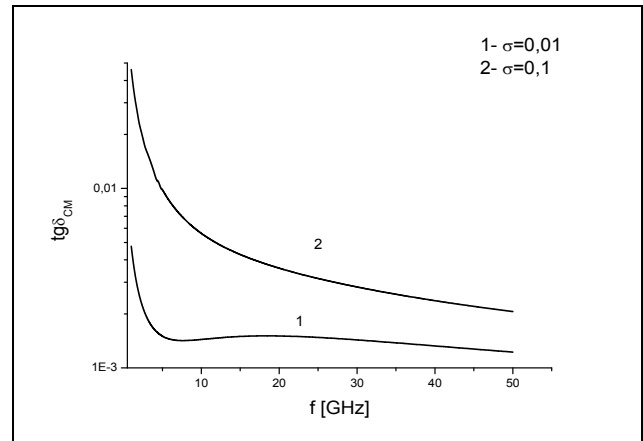


Рис. 2. Частотные зависимости тангенса угла диэлектрических потерь композитных наноматериалов с различной электропроводностью наночастиц

На рис. 3 приведены частотные зависимости коэффициента затухания α однородной плоской электро-магнитной волны в композитных наноматериалах с различной электропроводностью наночастиц. Как следует из рисунка наночастицы с малой проводимостью $\sigma = 0,01$ См/м (кривая 1) создают максимальное затухание в 4 дБ/см в начале частотного диапазона.

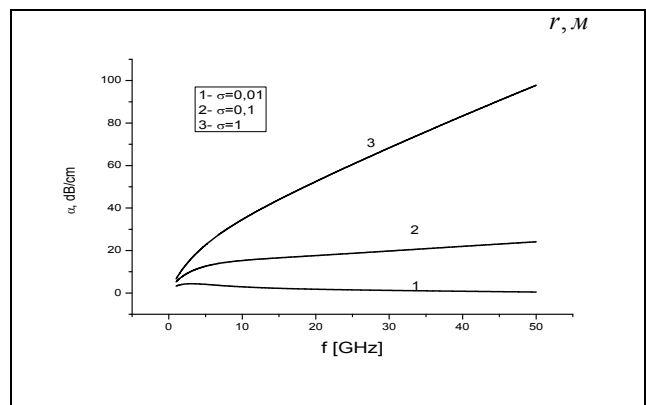


Рис. 3. Частотные зависимости затухания ЭМВ в композитной среде с различной электропроводностью наночастиц

По мере роста частоты вклад наночастиц в затухание композитного материала снижается, что связано с уменьшением тангенса диэлектрических потерь с ростом частоты и небольшим вкладом потерь, связанным с механизмом Максвелла–Вагнера. Однако

со значения $\sigma = 0,1$ См/м вклад потерь Максвелла-Вагнера становится преобладающим и затухание ЭМВ в таком композитном материале начинают расти с ростом частоты. Использование в композитных наноматериалах наночастиц с проводимостью $\sigma_s = 1$ См/м и более позволяет создавать эффективные полимерные материалы для задач радиопоглощения в СВЧ- и КВЧ-диапазонах.

Заключение

Результаты численного эксперимента по исследованию частотных диэлектрических свойств полимерных композитных наноматериалов и затухания ЭМВ в таких материалах показали, что путем выбора материала матрицы и наночастиц с определенными размерами, концентрацией в матрице можно создавать искусственные материалы с управляемыми диэлектрическими свойствами для использования их в качестве толстополюсочных диэлектрических и радиопоглощающих покрытий для различных приложений в СВЧ- и КВЧ-диапазонах.

Литература

1. *Rajabi M., Mohammadirad M., and Komjani N.* Simulation of ultra wideband microstrip antenna using EPML-TLM. // Progress In Electromagnetics Research B. 2008. Vol. 2. P. 115-124.
2. *Wong K.-L.*, Compact and Broadband Microstrip Antennas. John Wiley and Sons, 2002.
3. *Ушаков Н.М., Кособудский И.Д., Юрков Г.Ю., Губин С.П., Запис К.В., Кочубей В.И., Ульзутуев А.Н.* Новые композиционные наноматериалы с управляемыми свойствами для радиотехники и электроники // Радиотехника. 2005. № 10. С. 105-108.
4. *Петров В., Николайчук Г., Яковлев С., Луцев Л.* Исследование радиопоглощающих свойств материалов на основе наноструктур // Компоненты и технологии. 2008. № 12. С. 141-146.
5. *Шевченко В.Г.* Основы физики полимерных композиционных материалов. 2010. М.: Изд. МГУ. 99 с.
6. *Трухан Э.М.* Разработка радиофизических методов исследования и квантово-электронный анализ. Дисс. докт. физ.-мат. наук, 1980.
7. *Взятых В.Ф.* Диэлектрические волноводы. М: Сов. Радио. 1970. 216 с.
8. *Казарновский Д.М., Яманов С.А.* Радиотехнические материалы. М.: Высшая школа. 1972. 312 с.

Поступила 01 января 2014 г.

Microwave simulation of dielectric properties of polymer nanocomposites based on low density polyethylene

© Authors, 2014
© Radiotekhnika, 2014

N.M. Ushakov – Dr.Sc. (Phys.-Math.), Professor, Department "Radioengineering", Saratov State Technical University.
E-mail: nmu@bk.ru

S.Yu. Molchanov – Master student, Department "Radioengineering", Saratov State Technical University. E-mail: canishe@yandex.ru

The results of numerical experiment regarding investigation of frequency dielectric characteristics of polymer composite nanomaterials and attenuation of electromagnetic wave in them at the frequency range from 1 to 50 GHz are presented in this paper. The comparative analysis of frequency characteristics of dielectric matrix (Cole-Cole model and Cole-Davidson model) and composite material based on it (Maxwell-Garnett model) is given. Polymers represented by non-polar dielectrics such as high pressure polyethylene, polystyrene and fluoroplast ($\epsilon' = 2.2...2.3$, $\epsilon'' = (1...5) \cdot 10^{-4}$) are considered as matrix. As polar dielectric matrix polyvinyl chloride, polymethylmethacrylate, polyamides, epoxides and polyimides ($\epsilon' = 3.5...5.5$, $\epsilon'' = (1...8) \cdot 10^{-2}$) are chosen. But low density polyethylene is considered as a basic matrix. The virtual material with dielectric constant equal to 10 and ohmic conductance values from 0,01 to 1 S/m is chosen as material for nanoparticles. The concentration of nanoparticles in matrix was $1016 \div 1017 \text{ sm}^{-3}$ that corresponds to average value. The nanoparticles size did not exceed 30 nm. The frequency dependence of real part of dielectric constant and dielectric loss with different values of dielectric constant frequency increment and width of doublet distribution of relaxation time are given separately for low density polyethylene matrix. Influence of dielectric constant of nanoparticles on complex dielectric constant of polymer composite material and attenuation of electromagnetic wave in it are examined. It is shown that with the rising of frequency two models of dielectric loss work in composite materials – they are Maxwell-Wagner model that leads to growth of ohmic conductivity with the rising of frequency and reach-through conductivity of nanoparticles themselves that leads to inverse relation between conductivity and frequency. The frequency dependence of attenuation coefficient of homogeneous plane electromagnetic wave in composite nanomaterials with nanoparticles having different electric conductivity is given. The possibility of using polymer composite nanomaterials as radar absorbing coatings for various applications in the MW band is shown.

References

1. *Rajabi M., Mohammadirad M., and Komjani N.* Simulation of ultra wideband microstrip antenna using EPML-TLM. // Progress In Electromagnetics Research B. 2008. Vol. 2. P. 115-124.
2. *Wong K.-L.*, Compact and Broadband Microstrip Antennas. John Wiley and Sons, 2002.

3. Ushakov N.M., Kosobudskii I.D., Yurkov G.Yu., Gubin S.P., Zapsis K.V., Kochubei V.I., Ulzutuev A.N. Novye kompozitsionnye materialy s upravlyaemymi svoistvami dlya radiotekhniki i elektroniki // Radiotekhnika. 2005. No. 10. P. 105–108. (in Russian)
4. Petrov V., Nikolaichuk G., Yakovlev S., Lutsev L. Issledovanie radiopogloshchayushchikh svoistv materialov na osnove nanostruktur // Komponenty i tekhnologii. 2008. No. 12. P. 141–146. (in Russian)
5. Shevchenko V.G. Osnovy fiziki polimernykh kompozitsionnykh materialov. Moscow: MSU, 2010. 99 p. (in Russian)
6. Trukhan E.M. Razrabotka radiofizicheskikh metodov issledovaniya i kvantovo-elektronnyi analiz. Thesis, Dr.Sc. (Phys.-Math.), 1980. (in Russian)
7. Vzyatyshev V.F. Dielektricheskie volnovody. Moscow: Sov. Radio, 1970. 216 p. (in Russian)
8. Kazarnovskii D.M., Yamanov S.A. Radiotekhnicheskie materialy. Moscow: Vysshaya shkola, 1972. 312 p. (in Russian)