

**С.Ю. Молчанов¹, Н.М. Ушаков^{1,2}, И.Д. Кособудский^{1,2},
Подвигалкин В.Я.²**

¹ ФГБОУ высшего профессионального образования «Саратовский
государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.»

² Саратовский филиал Института радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН

СВЧ радиопоглощающие покрытия на основе толстых пленок полимерных композитных наноматериалов

Представлены результаты измерения вносимых потерь СВЧ фильтров в диапазоне от 2 до 8 ГГц на основе полосковой линии передачи, нагруженной на толстую полимерную пленку из композитного наноматериала, представляющего собой матрицу полиэтилена высокого давления, в объем которой внедрены наночастицы железа или сульфида кадмия. Полосовые фильтры в полосе непрозрачности при длине пленки 1 см на частотах 2-6 ГГц имеют вносимые потери 2-4 дБ.

Ключевые слова: толстая пленка, полимер, композит, наночастица, радиопоглощение

Разработка радиопоглощающих материалов и покрытий на основе композитных наноматериалов в последнее время особенно актуально из-за появившихся технологических возможностей создания материалов и покрытий с хорошими радиопоглощающими свойствами в широком диапазоне СВЧ частот [1,2]. Среди таких материалов особое место, на наш взгляд, могут занять полимерные композитные наноматериалы. Такие нанокompозиты обладают уникальными свойствами и малой себестоимостью при изготовлении, особенно в промышленных условиях.

Целью настоящей работы явились измерения вносимых потерь в СВЧ диапазоне в толстопленочных образцах полимерных железо и сульфида содержащих нанокompозитов с разной концентрации наночастиц, стабилизированных в матрице полиэтилена высокого давления.

При лабораторных исследованиях комплексной диэлектрической проницаемости ϵ диэлектрических материалов в диапазоне СВЧ используются разные методы, среди которых известен метод с использованием стандартной панорамной аппаратуры для автоматизированного измерения коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН) в волноводно-коаксиальных и полосковых трактах [3], которая существенно облегчает измерения по сравнению с методиками, основанными на измерительных линиях. В настоящей работе измерения вносимых потерь проводились на панорамных измерителях КСВН типа P2-102, 103 и 104.

Образцы исследовались в диапазоне частот 2-8 ГГц и представляли собой толстые полимерные пленки толщиной 0.08-0.1 мм, длиной 10 мм и шириной 7-8 мм. Состав материала, из которого были изготовлены пленки, состоял из композиции полиэтилена высокого давления (низкой плотности) в виде матрицы, в объем которой были внедрены наночастицы либо Fe/Fe₂O₃, либо CdS. Способ синтеза порошковых полимерных композиций широко описан в литературе (см. например [4, 5]).

На рис. 1(А, Б) приведена микрофотография ТЕМ(А) и распределение (Б) частиц по размерам (средний размер $2,84 \pm 0,6$ нм) для образца $Fe_2O_3 + ПЭВД$. На фотографии видно, что темные образования, соответствующие наночастицам, имеют сферическую форму и небольшой разброс по размерам. Форма более крупных частиц позволяет предполагать, что это результат наложения поглощения от нескольких мелких частиц, расположенных одна над другой; распределение частиц в материале также достаточно однородное. Приведенное на рис. 1 распределение частиц по размерам построено по 81 точке; средний размер частиц составляет 2.84 нм, среднее отклонение – 0.6 нм (21%). Судя по огибающей, распределение частиц близко к логарифмически нормальному. Оценка формы частиц свидетельствует о том, что при низких концентрациях железа форма частиц близка к сферической, при увеличении концентрации железа форма частиц становится частично эллипсоидальной.

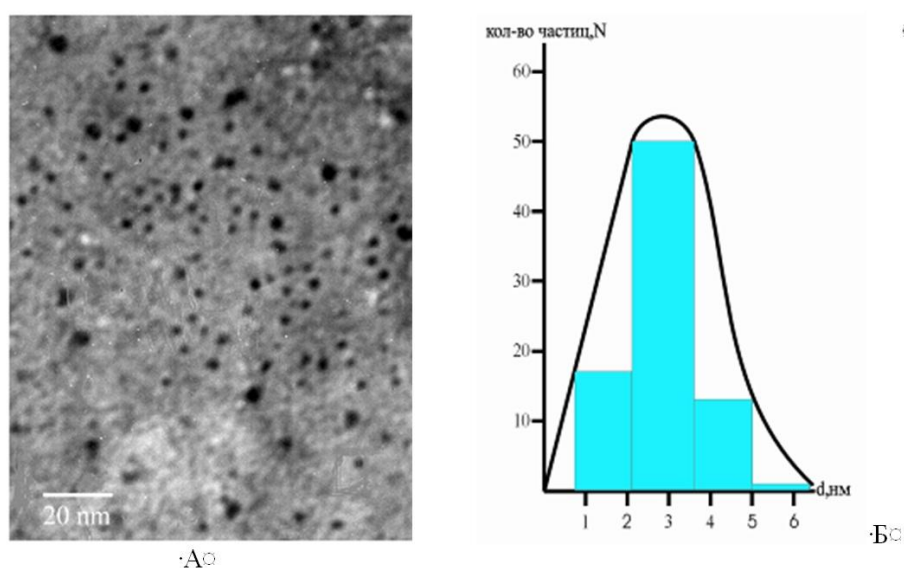


Рис. 1

На рис. 2 приведены микрофотография (а) и зависимость среднего размера наночастиц сульфида кадмия (5 % масс.) от концентрации сульфида (б) в матрице полиэтилена высокого давления. Из рисунка видно, что разработанная методика позволяет получать образцы нанокompозитных материалов с однородным распределением частиц по объему полимера; средний размер наночастиц, определенный из микрофотографий, зависит от концентрации частиц и достаточно монотонно увеличивается с ростом концентрации частиц (рис.2б).

На основе полученных нанопорошков методом термокомпрессии [6] изготавливались толсто пленочные образцы толщиной 0,1 мм, используемые в дальнейшем при измерениях.

Измерения вносимых потерь в образцах проводились с помощью асимметричной неоднородной полосковой линии передачи (АНПЛП), в центральном проводнике которой имелся емкостной зазор. Образец в прижатом состоянии помещался сверху над разрывом центрального проводника АНПЛП. Отражённые волны от образца, расположенного у короткозамкнутого конца линии передачи и опорные сигналы от СВЧ генератора поступали через детекторную головку на индикаторный блок.

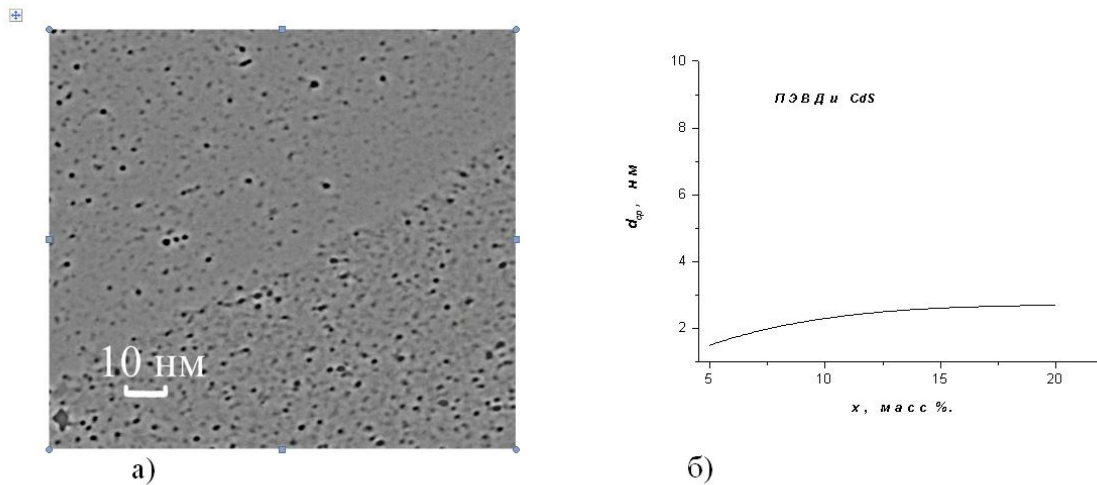


Рис. 2

Для количественной оценки вносимых потерь или коэффициента затухания СВЧ волны в композитном материале α воспользуемся методикой предложенной в [3]. Рассматривая нагруженную АНПЛП как полосовой фильтр можно вносимые потери такого фильтра $L(\text{дБ})$ оценить на границе полос пропускания и непропускания с помощью величины измеренного КСВН, как

$$L(\text{дБ} / \text{м}) = -(10 / l) Lg |\tau|^2 = -(8.686 / l) Ln |\tau|^2,$$

где l - длина образца вдоль линии передачи; $|\tau|$ - коэффициент передачи полосового фильтра. Из [3] известно, что

$$|\tau| = \frac{2\sqrt{КСВН}}{1 + КСВН}$$

На рис. 3 показаны зависимости приведенных вносимых потерь $L(\text{дБ} / \text{м})$ для АНПЛП, нагруженной на толстую пленку полимерного композитного материала на основе Fe_2O_3 + ПЭВД с разной массовой долей наночастиц железа в матрице. Были исследованы образцы с массовой долей наночастиц железа 6 масс.% (кривая 1), 15 масс. % (кривая 2) и 20 масс. % (кривая 3). Для полимерных нанокомпозиций с малой массовой долей наночастиц в матрице характерны и малые размеры самих наночастиц. Как правило, эти частицы сферической формы. В то время, как для больших массовых долей характерны большие размеры наночастиц и эллипсоидальная форма. Изменение размеров и формы наночастиц железа приводит к тому, что вносимые потери в диапазоне 3-8 ГГц растут с ростом размеров наночастиц железа. Особенно это заметно на частотах до 6 ГГц. Уменьшение вносимых потерь с ростом частоты связано с уменьшением потерь, связанных с омической проводимостью образцов.

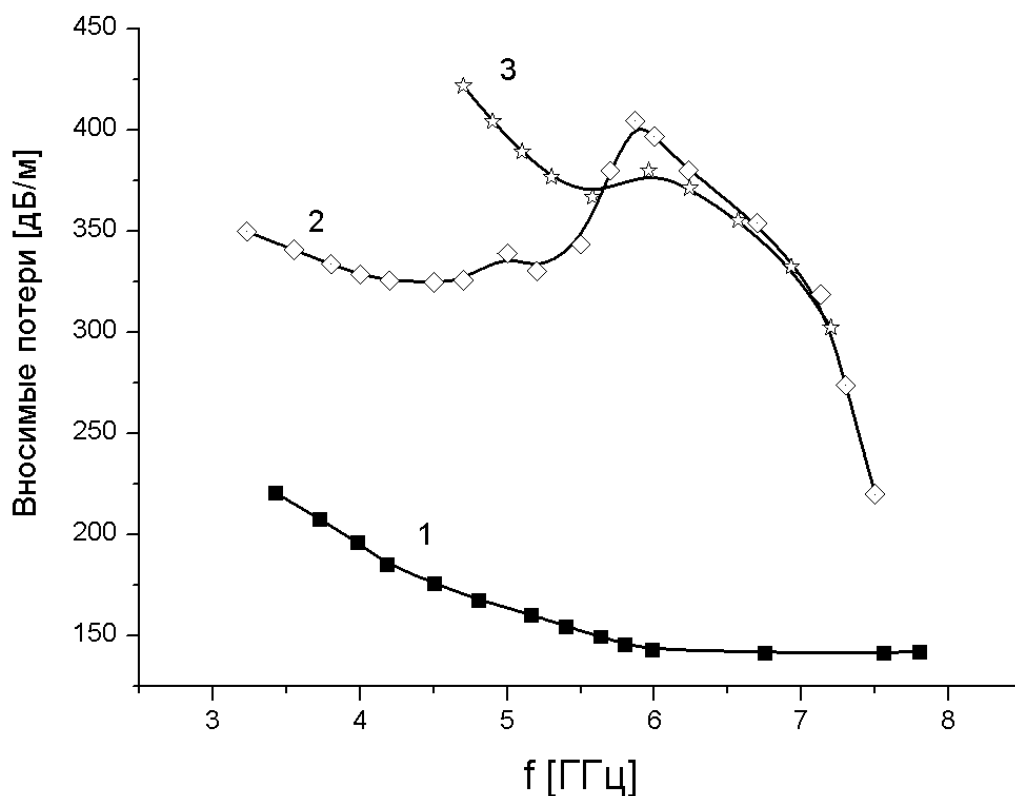


Рис. 3

На рис. 4 показаны частотные зависимости приведенных вносимых потерь образцов на основе наночастиц сульфида кадмия с массовой долей 10 масс. %, стабилизированных в объеме матрицы из полиэтилена высокого давления (кривая 1). Для сравнения на этом же рисунке приведена частотная зависимость АНПП, нагруженной на толстую пленку из чистого полиэтилена высокого давления (кривая 2). Введение полупроводниковых наночастиц в матрицу полиэтилена высокого давления приводит значительному росту вносимых потерь. Однако наличие ряда максимумов и минимумов на кривой 1 свидетельствует о незначительных потерях в таких пленках в целом. Поскольку слабо влияют на гашение отраженных СВЧ волн в линии передачи от короткозамкнутого конца линии.

Сравнение измеренных вносимых потерь в толстых полимерных пленках из композитных наноматериалов на основе металлических наночастиц ($Fe_2O_3 + ПЭВД$) и полупроводниковых наночастиц ($CdS + ПЭВД$) показало, что металлические наночастицы более перспективны для разработки радиопоглощающих покрытий в СВЧ диапазоне, чем полупроводниковые. В целом полученные уровни вносимых потерь линии передачи с толстыми пленками на основе полимерных композитных наноматериалов $Fe_2O_3 + ПЭВД$ и $CdS + ПЭВД$ позволяют считать их перспективными для фильтров протяженной длины (несколько сантиметров). Для этого разработанная авторами технология создания полимерных толсто пленочных образцов вполне позволяет это сделать.

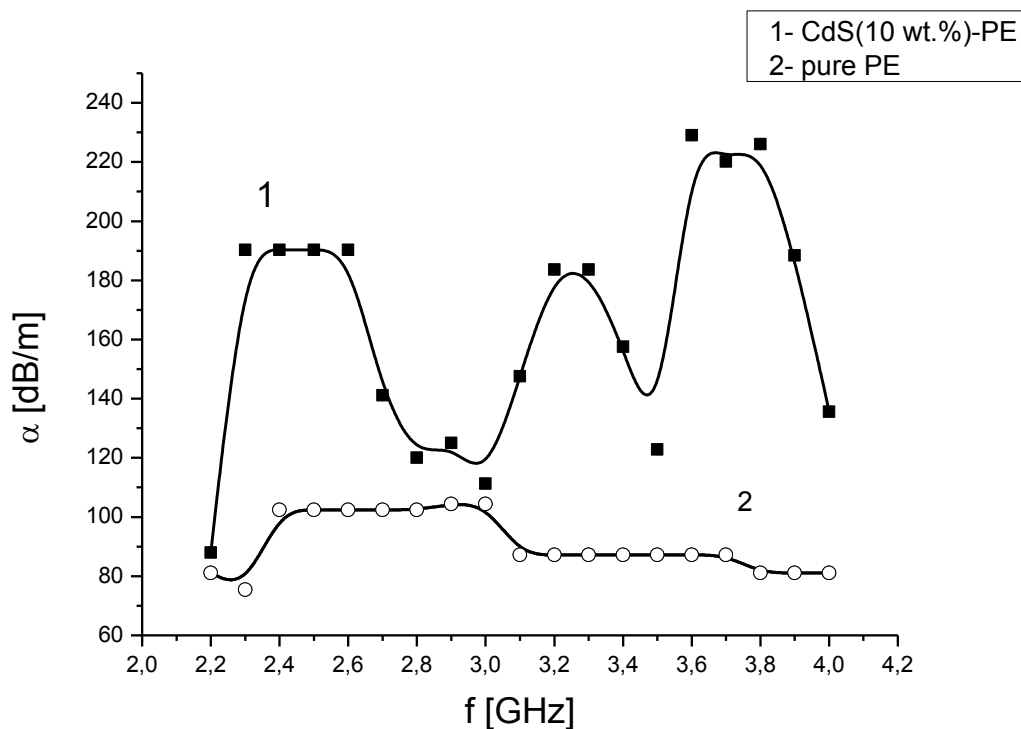


Рис. 4

Авторы данной работы благодарят Российский Фонд фундаментальных исследований за финансовую поддержку (грант РФФИ № 11-08-00351-а).

Библиографический список

1. Воронин И.В. Многослойные радиопоглощающие нанокompозитные материалы и покрытия / И.В. Воронин, С.А. Горбатов, В.Ю. Науменко, В.Ф. Петрунин // - Физика и химия обработки материалов. - 2007. - №4, - С.5-10
2. Петров В. Исследование радиопоглощающих свойств материалов на основе наноструктур / В. Петров, Г. Николайчук, С. Яковлев, Л. Луцев // - Компоненты и технологии – 2008 - № 12 – С. 141-146
3. Тишер Ф. Техника измерений на сверхвысоких частотах /Ф. Тишер // – Москва: ФизМатЛит. – 1963. – 367с.
4. Кособудский И.Д. Однофазные металлополимеры / И.Д. Кособудский , С.П. Губин // - ДАН СССР. - 1983. - Т. 273, № 5. - С. 1155-1158
5. Кособудский И.Д. Физическая химия наноразмерных объектов: композиционные материалы / И.Д. Кособудский, В.В. Симаков, Н.М. Ушаков, Г.Ю. Юрков. //- Саратов: ООО «РАТА» - 2009. - 230 с.
6. Пат. №2404915 Российская Федерация, МПК В82В 3/00. Способ получения полимерных нанокompозитных толстых пленок и устройство для его осуществления / Подвигалкин В.Я., Ушаков Н.М., Кособудский И.Д.; заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Саратовский государственный технический университет". – № 2009139520; заявл. 26.10.09; опубл. 27.11.10, Бюл. № 33. – 17 с.