

**О. И. Тюленкова, А. В. Семченко, В. В. Сидский,  
В. Е. Гайшун, Д. Л. Коваленко, Д. В. Слепенков**  
*г. Гомель, ГТУ имени Ф. Скорины*

## **ЗАВИСИМОСТЬ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ОТ ВИДА ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ НАПОЛНИТЕЛЕЙ И КОНЦЕНТРАЦИИ КОМПОНЕНТОВ**

### **Введение**

Основными наполнителями при создании экранов и радиопоглотителей на основе композиционных материалов являются диэлектрические, магнитные и проводниковые материалы.

Удельное сопротивление металлов при комнатной температуре находится в пределах  $10^{-8} \div 10^{-5}$  Ом·м; полупроводников  $10^{-6} \div 10^{+8}$  Ом·м; диэлектриков  $10^8 \div 10^{18}$  Ом·м.

Физической величиной, характеризующей свойства диэлектрической среды, является относительная диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$ . Диэлектрическая проницаемость является безразмерной величиной, которая обусловлена эффектом поляризации диэлектриков под действием электрического поля и определяется характеризующей этот эффект величиной диэлектрической восприимчивости среды. Значение  $\epsilon$  для реальных сред больше 1 [1–3].

Величина диэлектрической проницаемости, а также влияние на нее температуры и частоты приложенного напряжения определяются строением и видом химической связи. Для большинства неполярных твердых диэлектриков  $\epsilon$  находится в пределах 2,0–4,5. Диэлектрическая проницаемость большинства полярных твердых диэлектриков в большей степени зависит от температуры и частоты приложенного напряжения и составляет  $\epsilon \approx 4,5\text{--}8,0$ .

Диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$  в общем случае является комплексной величиной и характеризуется двумя величинами – действительной частью  $\epsilon'$  и мнимой частью  $\epsilon''$  (потерями), зависящими от частоты переменного поля. Величина  $\delta$  называется углом диэлектрических потерь, т. к. наличие разности фаз  $\delta$  приводит к поглощению энергии переменного электрического поля в диэлектрике.

В технике СВЧ используются твердые диэлектрические материалы различного типа: полимеры, слоистые пластики, ситаллы, керамика. Диапазон технического применения этих материалов весьма широк. В случае применения диэлектрика в качестве составляющей радиопоглощающего материала определяющим является требование высоких диэлектрических потерь, от которых зависит величина ослабления ЭМИ. Необходимая величина диэлектрической проницаемости зависит от рабочей частоты, температуры эксплуатации, типа возбуждаемых волн и требований к оптимальным геометрическим размерам. Так в области дециметровых волн желательны материалы с величиной  $\epsilon = 100\text{--}500$ , а в диапазоне миллиметровых волн лучше располагать материалами с  $\epsilon = 15\text{--}30$ .

Одним из основных физико–химических условий создания РПМ СВЧ диапазона является использование таких диэлектрических компонентов и материалов, которые обладали бы высокой стабильностью структуры, состава и свойств при тепловых, коррозионных, механических и других воздействиях.

#### Методы исследования

Измерения радиопоглощающих свойств образцов композиционных материалов в диапазоне частот 8 ÷ 12 ГГц производились с использованием векторного анализатора цепей VNA MS4644B Anritsu с волноводным измерительным трактом. Образцы помещались в волноводную ячейку, которая закреплялась между плечами волноводного тракта. Измерения проводились после стандартных калибровочных операций.

Радиопоглощающие свойства образцов композиционных материалов на основе диоксида титана, карбонильного железа и углеродного волокна оценивались по измеренным коэффициентам отражения S11 и передачи S21 электромагнитного излучения в волноводном тракте с установленным образцом.

#### Экспериментальная часть

В качестве материалов с диэлектрическими потерями предложено использовать диоксид титана, рутиловая модификация которого обладает высокими значениями диэлектрической проницаемости. Из проводников электрического тока выбраны углеродсодержащие материалы, обладающие высокими значениями электропроводности и не подвергающиеся окислению. Карбонильное железо помимо электропроводности также обладает магнитными свойствами, что также позволяет повысить эффективность поглощения электромагнитной энергии.

Композиционные материалы изготавливались путем механического смешивания порошка наполнителя с полимерным и кремнийорганическим связующими в различных соотношениях, заливки в форму и сушки на воздухе. Затем из полученного слоя вырезался образец с требуемыми для измерений размерами.

#### Результаты и обсуждения

На рисунке 1 приведены частотные зависимости коэффициентов отражения и передачи электромагнитного излучения для образцов с различной концентрацией наполнителя. Максимальная концентрация наполнителя определялась экспериментально, исходя из сохранения целостности образцов. Характеристика коэффициента отражения образцов на основе TiO<sub>2</sub> относительно равномерна в исследованном диапазоне частот.

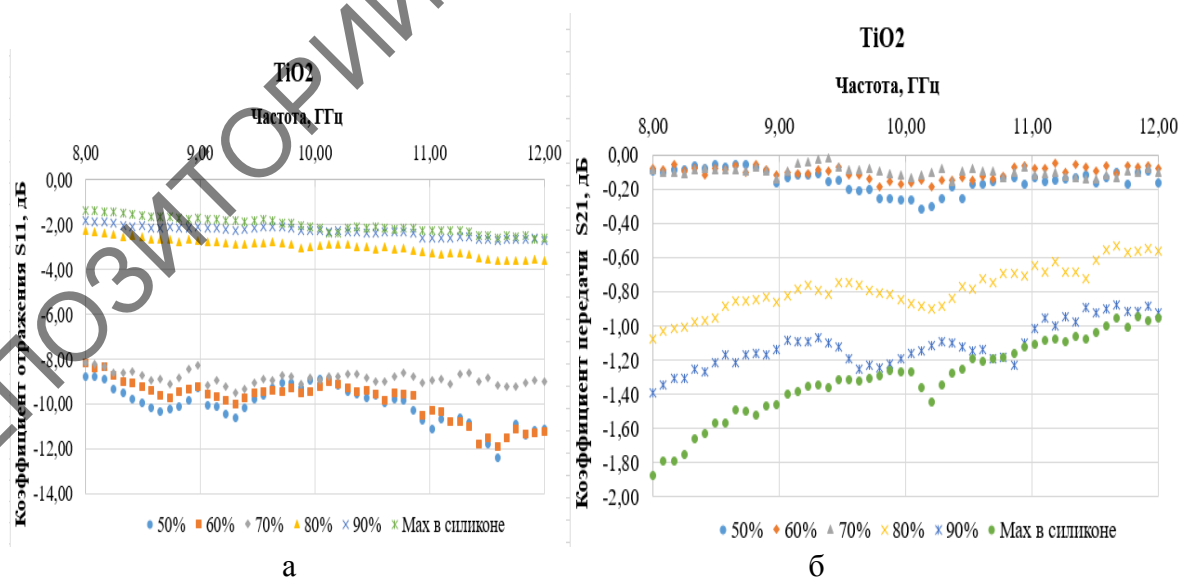


Рисунок 1 – Частотные зависимости коэффициентов отражения (а) и передачи (б) электромагнитного излучения для образцов на основе диоксида титана с различной концентрацией (50–90 %)

Для образцов с концентрацией наполнителя 50–70 % величина коэффициента отражения составляет до минус 8,00 дБ. Превышение концентрации наполнителя до 70 % приводит к увеличению коэффициента отражения до минус 3,9 ÷ 1,6 дБ вследствие роста диэлектрической проницаемости образцов. Это приводит к изменению коэффициента передачи с минус 0,1 до минус 1,8 ÷ 0,8 дБ (рисунок 1).

Концентрация наполнителя в образцах на основе карбонильного железа в полимерном связующем составляла 10, 30, 50, 70 масс. %. Коэффициент передачи для таких образцов составляет от минус 0,4 до минус 0,05 дБ, при этом коэффициент отражения варьируется от минус 17,3 до минус 6,00 дБ и возрастает по мере увеличения концентрации наполнителя (рисунок 2).

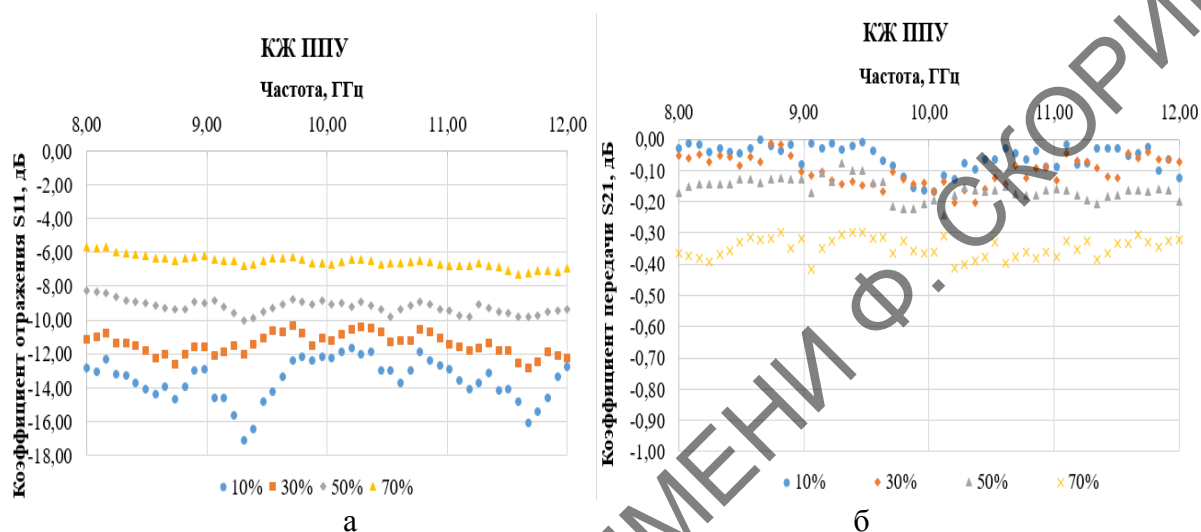


Рисунок 2 – Частотные зависимости коэффициентов отражения (а) и передачи (б) электромагнитного излучения для образцов на основе карбонильного железа с различной концентрацией (10–70 %)

Концентрация наполнителя в образцах на основе карбонильного железа в кремнийорганическом связующем составляла 10, 20, 30, 40, 50 масс. %. Коэффициент передачи для таких образцов составляет от минус 2,75 до минус 0,8 дБ, при этом характеристики коэффициента отражения близки и составляет от минус 4,00 до минус 1,5 дБ (рисунок 3).

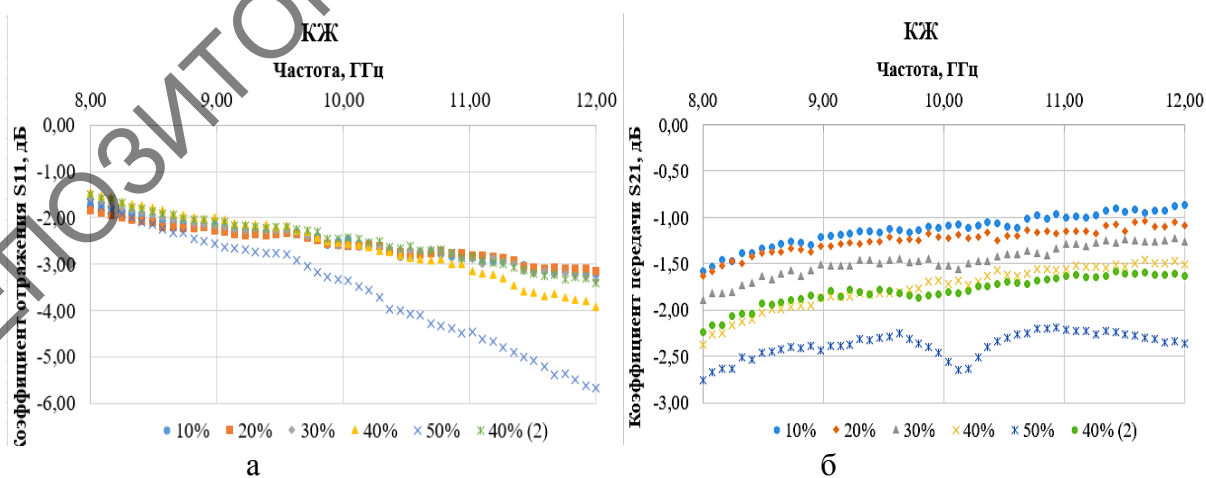


Рисунок 3 – Частотные зависимости коэффициентов отражения (а) и передачи (б) электромагнитного излучения для образцов на основе карбонильного железа с различной концентрацией

Характеристики отражения и передачи электромагнитного излучения образцами на основе углеродного волокна относительно равномерны в диапазоне частот 8 ÷ 12 ГГц. Наименьший коэффициент передачи за счет высокого уровня отражения электромагнитного излучения обеспечивается образцом с концентрацией углеродного волокна 40 масс. % (рисунок 4).

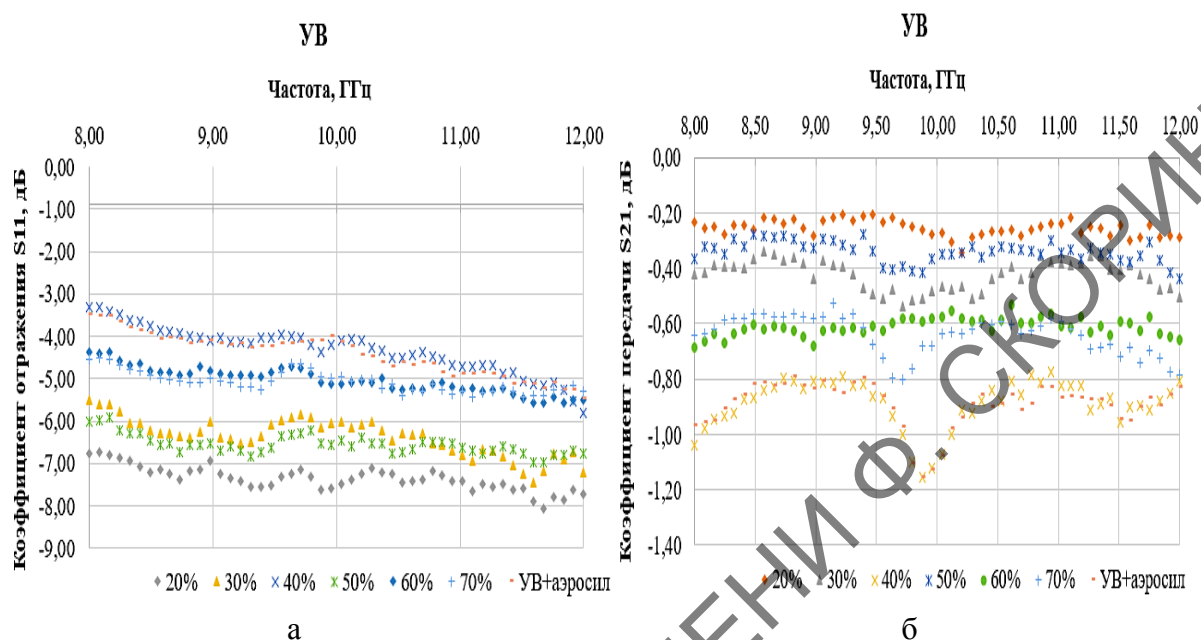


Рисунок 4 – Частотные зависимости коэффициентов отражения (а) и передачи (б) электромагнитного излучения для образцов на основе углеродного волокна с различной концентрацией (20–70 %)

Установлены закономерности формирования многослойных радиопоглощающих материалов на основе полимерного связующего и функциональных наполнителей с проводящими и магнитными свойствами, обладающими радиопоглощающими свойствами в СВЧ-диапазоне, а также установлено влияние состава и структуры отдельных слоев на радиопоглощающие свойства разрабатываемых материалов.

Установлена зависимость радиопоглощающих свойств композиционных материалов от толщины составляющих слоев. Композиционные материалы на основе карбонильного железа в кремнийорганическом связующем позволяют обеспечить условия минимального отражения на металлической подложке при толщине 3,3 мм.

#### Список использованных источников

1 Иванов, Д. А. Дисперсноупрочненные волокнистые и слоистые неорганические композиционные материалы: учеб. пособие / Д. А. Иванов, А. И. Ситников, С. Д. Шляпин; под ред. А. А. Ильина. – Москва : МГУИ, 2010. – 230 с.

2 Miazaki, Y. Tapered and grated index tipe electromagnetic absorbers using inhomogeneous lossy dielectric layers / Y. Miazaki, K. Tanoe // Intern. symp. electromagnetic compability. – 1989. – Vol. 2. – P. 504 – 508.

3 Стеклопластики – свойства, применение, технологии / А. И. Преображенский [и др.] / Главный механик. – 2015. – № 5. – С. 27–36.