# РАЗРАБОТКА ШИРОКОПОЛОСНОГО ПОГЛОТИТЕЛЯ СВЧ ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК

Д.Н. Мейсак, Г.В. Горохов, Д.С. Быченок, П.П. Кужир Белорусский государственный университет, Институт ядерных проблем, ул. Бобруйская 11, 220030 Минск, Беларусь, dariameysak@gmail.com

Производятся дисперсные композиционные материалы на основе углеродных нанотрубок в матрице эпоксидной смолы и исследуется их электромагнитный отклик в Ка-диапазоне. Теоретические и экспериментальные результаты показывают, что представленные композиты могут быть использованы в качестве компактных эффективных поглотителей в диапазоне 26-37 ГГц.

#### Введение

Разработка многофункционального компактного сильного поглотителя СВЧ-излучения является очень важной задачей для многих практических применений. Многие исследователи во всем мире сосредоточены на разработке поглотителей для различных частотных диапазонов.

В настоящей работе исследуются композиционные материалы на основе углеродных нанотрубок для производства эффективного широкополосного поглотителя в Ка-диапазоне (26-37 ГГц). Композиты будут иметь концентрацию включений выше порога перколяции, а, следовательно, являться макроскопически проводящими и обладать выраженной частотной дисперсией диэлектрической проницаемости [1].

#### Нормальное рассеяние

Рассмотрим нормальное рассеяние падающей плоской электромагнитной волны на плоскопараллельный слой композиционного материала, расположенного на металлической подложке. В этом случае амплитуда отраженного сигнала в волноводе определяется как [2-3]:

$$S_{11}(\lambda,\tau,\varepsilon) = \frac{-k_z (\exp[2i\pi_{2z}] - 1) + k_{2z} (1 + \exp[2i\pi_{2z}])}{k_z (1 - \exp[2i\pi_{2z}]) + k_{2z} (1 + \exp[2i\pi_{2z}])},$$
(1)

где

$$k_{z} = \frac{\pi}{\lambda a} \sqrt{4a^{2} - \lambda^{2}}, k_{2z} = \frac{\pi}{\lambda a} \sqrt{4\epsilon a^{2} - \lambda^{2}}, \qquad (2)$$

где  $\tau$  - толщина композита, а - ширина волновода (устанавливается равной 7.2 мм),  $\lambda = c/v$  - длина волны, с - скорость света в вакууме, v - частота и  $\varepsilon = \varepsilon' + \varepsilon''$  - комплексная диэлектрическая проницаемость композита. Уравнение (1) может быть использовано и в свободном пространстве, в этом случае следует использовать другие волновые вектора  $k_z = 2\pi/\lambda$  и  $k_{2z} = 2\pi\sqrt{\varepsilon}/\lambda$ . Из уравнения (1) легко вычислить коэффициент поглощения  $A = 1 - S_{11}^2$ .

Из уравнения (1) следует, что коэффициент поглощения, а, значит, и положения максимумов поглощения, сильно зависят от частоты, поэтому невозможно разработать широкополосный поглотитель с использованием недисперсных материалов. При использовании недисперсных композитов можно получить поглотитель с коэффициентом поглощения, колеблющимся от 65% до 100% в пределах Ка-диапазона [2]. Этот результат может быть улучшен за счет использования дисперсных материалов.

#### Использование дисперсных материалов

Самый простой способ получения дисперсных материалов – это использование проводящих включений внутри композита [3]. Как правило, композиционные материалы с проводящим наполнителем выше порога перколяции имеют ярко выраженную дисперсию  $\epsilon \sim 1/v$  в микроволновом диапазоне частот. Будем использовать этот тип дисперсии для разработки эффективно поглощающих материалов в Ка-диапазоне.

Сравнение зависимостей S<sub>11</sub> параметров от частоты для недисперсных ( $\epsilon = \epsilon_{opt} = 5.39 + 2.80i$ ) и дисперсных ( $\epsilon(v) = \epsilon_{opt}$  ( $v_0/v$ )) материалов толщиной 1.12 мм ( $v_0=30$  ГГц), расположенных на металлической подложке в свободном пространстве представлено на рис. 1.



Рис. 1. Зависимость S<sub>11</sub> параметров от частоты для недисперсных и дисперсных материалов толщиной 1.12 мм в свободном пространстве (Вставка: то же самое в логарифмической шкале)

Из рис. 1 видно, что дисперсия диэлектрической проницаемости приводит к значительному уширению пика поглощения. Анализ рис. 1 показывает, что при использовании дисперсии ε~1/v для дисперсных немагнитных материалов теоретически возможно добиться поглощения до 97-100% в пределах полного Ка-диапазона.

#### Методика измерений

Для получения композитов использовались коммерчески доступные эпоксидная смола ЭД-22 и отвердитель триэтилентетрамин (ТЭТА). Многослойные углеродные нанотрубки (МУНТ), полученные с использованием CVD технологии [4], были использованы в качестве проводящего наполнителя в композитах.

12-я Международная конференция «Взаимодействие излучений с твердым телом», 19-22 сентября 2017 г., Минск, Беларусь 12th International Conference "Interaction of Radiation with Solids", September 19-22, 2017, Minsk, Belarus

Композиты на основе МУНТ/эпоксидная смола были приготовлены по технологии, описанной подробно в работе [5]. Образцы были получены при различных концентрациях МУНТ: 0%, 1.5% и 2% мас. Во-первых, смола была дегазирована под вакуумом (13 мбар) в течение 12-14 ч и нагрета в печи при 65°С. Затем МУНТ были диспергированы в этаноле с использованием ультразвукового щупа в течение 30 мин. Затем раствор смешивался со смолой и снова обрабатывался ультразвуковым щупом в течение 60 мин при температуре около 80°С. После этого шага диспергирование было завершено, а спирт испарен. После добавления отвердителя (ТЕТА) к смеси смолы и МУНТ она хорошо размешивалась течение нескольких минут. Затем смесь выливали в форму для отверждения в течение 20 ч, а затем помещали в печь при 80°С на 2 ч для окончательной полимеризации.

Микроволновые измерения проводились с использованием скалярного анализатора цепей ELMIKAR2-408R [2]. Все измерения проводились в 7.2×3.4 мм волноводной системе, в которой распространялась только одна H<sub>10</sub>-мода. В эксперименте плоскопараллельный слой композита помещался нормально к волновому вектору падающего излучения. Измеряемые коэффициенты матрицы рассеяния S<sub>11</sub> и S<sub>21</sub> образца представляют собой отношение амплитуды отраженного и прошедшего сигнала к входному сигналу.

Кроме того, для исследования поглощательных свойств позади образца размещалась металлическая подложка (то есть, зеркало с коэффициентом отражения 100%), и также были измерены соответствующие S<sub>11</sub>-параметры.

#### Экспериментальные результаты

Экспериментально измеренные S<sub>11</sub>параметры композиционного материала толщиной 1.12 мм с концентрацией МУНТ 1.5% (по массе), расположенные на металлической подложке внутри волновода, представлены на рис. 2 черными квадратами.

Как видно из рис. 2, композиты с 1.5% содержанием МУНТ внутри волновода имеют коэффициент поглощения во всем Ка-диапазоне от 84 до 100%. Кроме того, на рис. 2 синими треугольниками представлены ожидаемые S<sub>11</sub>-параметры для свободного пространства, полученные с помощью формулы (1). Эти результаты показывают, что используемые композиты с 1.5% содержанием МУНТ могут быть потенциально использованы в качестве эффективных поглотителей в пределах диапазона частот 26-37 ГГц.



Рис. 2. Экспериментально измеренные  $S_{11}$ -параметры для композита толщиной 1.12 мм с концентрацией МУНТ 1.5% (по массе) внутри волновода и ожидаемые  $S_{11}$ -параметры для композиционного материала толщиной 1.20 мм в свободном пространстве (Вставка: то же самое в логарифмической шкале)

#### Заключение

Простая дисперсия ε~1/v была эффективно реализована в полимерных композиционных материалов с концентрацией МУНТ выше порога перколяции. Таким образом, для поглощательных применений в Ка-диапазоне следует использовать дисперсные материалы. Общий механизм поглощения исследованных композитов – это омические потери в проводящем вещества. В случае Ка-диапазона, этот механизм позволяет добиться значительного затухания электромагнитного излучения.

## Список литературы

- 1. Gaylor K., Radar absorbing materials-mechanisms and materials. № MRL-TR-89-1. 1989.
- Bychanok D.S., Gorokhov G.V., Meisak D.N. et al. // Prog. In Elect. R. 2016. V. 66. P. 77-85.
- Bychanok D.S., Li S. et al. // Appl. Phys. Lett. 2016 V. 108, P. 013701.
- Okotrub A.V., Bulusheva L.G. et al. // Nanotechnologies in Russia. 2008. V.3. P. 191200.
- Bychanok D.S, Kuzhir P.P. et al. // J. Appl. Phys. 2013. V. 113. P. 124103-6.

### THE DEVELOPMENT OF CARBON NANOTUBES BASED BROADBAND ABSORBER OF MICROWAVE RADIATION

Darya Meisak, Gleb Gorokhov, Dzmitry Bychanok, Polina Kuzhir Research Institute for Nuclear Problems, Belarusian State University, 11 Bobruiskaya str., 220030 Minsk, Belarus, dariameysak @gmail.com

The dispersive multiwall carbon nanotube-epoxy composites are produced and their electromagnetic response is investigated in the Ka-band frequency range. Experimental and theoretical results show that this composites may be utilized as the compact effective absorbers of microwave radiation.

12-я Международная конференция «Взаимодействие излучений с твердым телом», 19-22 сентября 2017 г., Минск, Беларусь 12th International Conference "Interaction of Radiation with Solids", September 19-22, 2017, Minsk, Belarus