

05.2

Исследование прохождения и отражения СВЧ-излучения в многослойных композитных материалах $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ –графит

© И.В. Бычков, И.С. Зотов, А.А. Федий

Челябинский государственный университет
E-mail: bychkov@csu.ru

Поступило в Редакцию 21 февраля 2011 г.

Представлены результаты экспериментального исследования коэффициентов прохождения и отражения электромагнитного излучения от многослойных композитных материалов, состоящих из картона, гипса ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) и природного чешуйчатого графита. Исследования проводились в диапазоне 8–12 GHz.

В последнее время активно разрабатываются и создаются различные виды радиопоглощающих материалов и покрытий (РПМ и РПП), предназначенных для снижения коэффициентов отражения и прохождения электромагнитных волн. Они широко применяются во многих областях науки и техники для защиты от электромагнитного излучения, его экранирования и поглощения, а также для снижения радиолокационной заметности. РПМ по своей основе — композитные материалы (КМ), которые имеют уникальные электродинамические характеристики. Композитные материалы — это материалы, представляющие собой гетерогенные системы, состоящие из двух или более компонентов, отличающихся по химическому составу и разделенных в материале четко выраженной границей. Композитные материалы классифицируют по следующим признакам: материалу матрицы и наполнителя (включений), геометрии компонентов, их структуре и расположению. С физической точки зрения РПП характеризуются главным образом толщиной, коэффициентами прохождения (T) и поглощения (R) электромагнитного излучения, а также рабочим диапазоном длин волн.

Наиболее часто при создании РПМ СВЧ-диапазона в качестве наполнителей используют порошки металлов, графита, ферритов или

их смеси. Матрица изготавливается из диэлектрика с требуемыми электрическими и механическими параметрами.

Важна также форма используемого поглотителя, которая влияет на процессы поглощения и рассеивания электромагнитного излучения. В настоящее время изготавливаются РПМ в виде слоистых, пирамидальных, „шахтных“, „ячеистых“, „шиповидных“ и других сложных структур [1]. Электродинамические характеристики таких поглотителей плавно возрастают в направлении движения электромагнитной волны от значений, соответствующих окружающему пространству, до необходимых для поглощения ее энергии. Минимальный коэффициент отражения, как известно, достигается при условии, что значение эффективной диэлектрической проницаемости ϵ_{eff} в поверхностном слое минимально отличается от свободного пространства и увеличивается от слоя к слою по мере продвижения в глубь образца [2]. Этот принцип используется в радиопоглощающих покрытиях градиентного типа, где происходит постепенное изменение волнового сопротивления Z и проводимости σ от величин, характерных для свободного пространства в первом слое, до низкого сопротивления и высокой проводимости конечного слоя поглотителя, вследствие чего достигается максимальный коэффициент поглощения при достаточно небольшом коэффициенте отражения РПП.

В данной статье рассматриваются слоистые КМ, состоящие из картона, гипса ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) и природного чешуйчатого графита. Для исследования коэффициента отражения композитных материалов градиентного типа были изготовлены модельные образцы слоистых поглотителей трех видов (рис. 1, $a-c$): a — двухслойный образец, состоящий из слоя картона и слоя $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$; b — трехслойный образец, аналогичный первому образцу, к которому добавлен слой

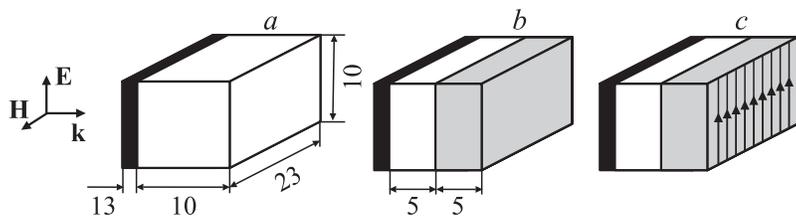


Рис. 1. Исследуемые образцы.

$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ с 5 mass. равномерно распределенной по объему образца примеси графита; c — четырехслойный образец, аналогичный второму образцу, к которому добавлен тонкий слой частично ориентированных чешуек графита.

Сечение образцов 23×10 mm под размер стандартного волновода, толщина образцов 13 mm. Картон использовался для формирования наружного согласующего со свободным пространством слоя с $\epsilon_{eff} = 1.5$. Материалы остальных слоев подбирались исходя из значений их эффективных диэлектрических проницаемостей, для наилучшего согласования слоев и наименьшего коэффициента отражения. Слой $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ имеет $\epsilon_{eff} = 2.8$. Слой $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ с добавкой 5% mass равномерно распределенного природного чешуйчатого графита имеет $\epsilon_{eff} = 3.3$ [3]. Для достижения высокой проводимости в конечном слое был сформирован тонкий слой частично ориентированных чешуек графита, что в целом сильно увеличивает коэффициент поглощения РПП [4].

Измерения коэффициентов R и T проводились двумя методами: в волноводе и в открытом пространстве с применением рупорных антенн, в диапазоне частот 8–12 GHz с использованием панорамного измерителя P2-61.

Результаты измерений коэффициента отражения от модели полубесконечной среды в волноводе приведены на рис. 2.

Максимальный коэффициент отражения наблюдался на двухслойном образце картон, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (кривая 1, рис. 2). Добавление третьего слоя $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ с примесью графита снизило R (кривая 2). Минимальный коэффициент отражения имел образец, в котором был сформирован тонкий слой с ориентированными чешуйками графита (кривая 3). Аналогичные зависимости наблюдаются при измерении в волноводе коэффициента прохождения электромагнитного излучения через многослойные образцы (рис. 3).

Максимальную прозрачность в диапазоне СВЧ имеет двухслойный образец картон, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (рис. 3, кривая 1). Немного меньше пропускает трехслойный образец (кривая 2). Добавление тонкого слоя частично ориентированных чешуек графита позволило добиться минимального пропускания СВЧ-излучения (кривая 3).

Для измерения коэффициентов отражения и прохождения в открытом пространстве были изготовлены образцы размерами 150×150 mm, толщиной 13 mm. Исследования проводились в трехсантиметровом

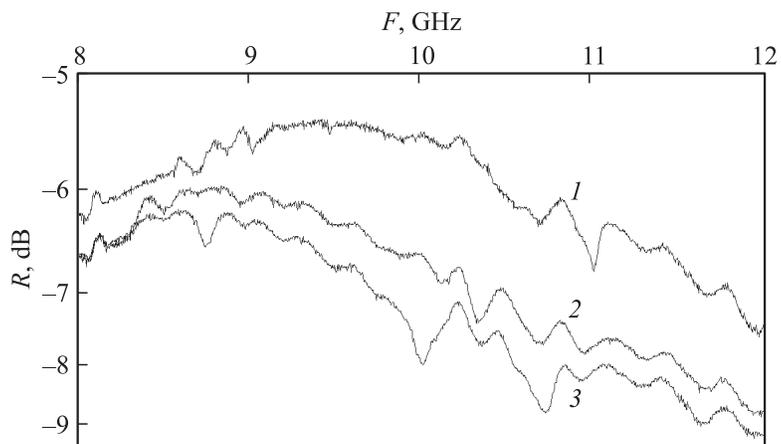


Рис. 2. Частотная зависимость коэффициента отражения (R): 1 — двухслойный образец, 2 — трехслойный образец, 3 — четырехслойный образец.

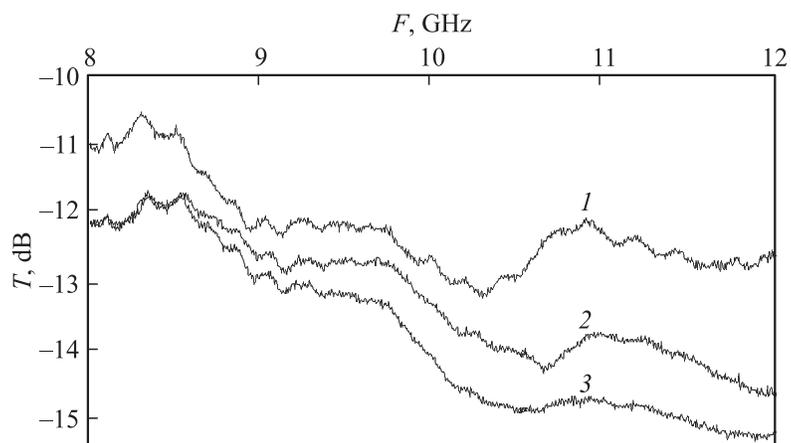


Рис. 3. Частотная зависимость коэффициента прохождения (T): 1 — двухслойный образец, 2 — трехслойный образец, 3 — четырехслойный образец.

диапазоне с использованием приемопередающей антенны рупорного типа. Результаты измерений коэффициентов отражения и прохождения электромагнитного излучения качественно согласуются с данными, полученными при измерениях образцов в волноводе. Минимальный коэффициент отражения и пропускания электромагнитного излучения имеет образец с тонким слоем частично ориентированных чешуек графита. Возможные численные отличия объясняются существенными различиями в методиках проведения измерений, в частности различиями в распространении электромагнитной волны в волноводе и свободном пространстве.

Результаты измерений показывают возможность практического создания высокоэффективных радиопоглощающих покрытий с заданными функциональными свойствами из простых и доступных строительных материалов, широко применяемых в промышленном и гражданском строительстве.

Список литературы

- [1] Казанцева Н.Е., Рывкина Н.Г., Чмутин И.А. // Радиотехника и электроника. 2003. Т. 48. № 2. С. 196.
- [2] Островский О.С., Одаренко Е.Н., Шматько А.А. // ФИПИ. 2003. Т. 1. № 2. С. 161.
- [3] Федий А.А., Зотов И.С., Бычков И.В. // Сб. трудов Международной конференции „Фазовые переходы, критические и нелинейные явления в конденсированных средах“. 2009. С. 392.
- [4] Bychkov I.V., Zotov I.S., Fediy A.A. // 3rd International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics. 2009. Metamorphose-VI. P. 602.