УДК 621.396

А.М. СОТНИКОВ

Харьковский университет Воздушных Сил им. Ивана Кожедуба

ОПРЕДЕНИЕ ВЛИЯНИЯ НЕСТАЦИОНАРНОЙ СТРУКТУРЫ ПРОВОДИМОСТИ НА ОТРАЖАЮЩИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИТНЫХ РАДИОИЗОТОПНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Рассмотрена возможность использования нестационарной структуры проводимости композитных радиоизотопных материалов в интересах снижения радиолокационной заметности летательных аппаратов. Определены условия возникновения нестационарной структуры проводимости в материале.

композитные радиоизотопные материалы, нестационарная структура проводимости, треки α–частиц, коэффициент отражения

Постановка задачи и анализ литературы

В современных технологиях создания малозаметных летательных аппаратов широкое применение находят композиционные материалы, являющиеся частью их конструкции. К основным методам уменьшения эффективной поверхности рассеяния (ЭПР) различных объектов относятся [1, 2]:

1) методы, основанные на формировании рациональной архитектуры конструкции объектов;

2) методы, основанные на управлении рассеиванием электромагнитных волн (ЭМВ);

3) методы, в основу которых положено применение радиопоглощающих покрытий (РПП) и материалов (РПМ).

Основными средствами управления рассеиванием ЭМВ являются управляемые покрытия и управляемые структуры. Они размещаются на поверхности защищаемых объектов или вблизи них. В их состав входят управляемые элементы, которые изменяют свои электрофизические или пространственные параметры под действием управляющих сигналов от внешних источников. Наиболее распространенными конструкциями управляемых структур являются управляемые нагрузки, экраны, отражатели-антенны, отражательные решетки. В качестве управляемых элементов используются металлические, ферритовые, сегнетоэлектрические, жидкостные, плазменные элементы, расположенные в нагрузках антенн или областях фокусировки лучей [2].

Наиболее часто для уменьшения ЭПР объектов используются РПП и РПМ, отличающиеся большим разнообразием, характеристиками, принципами построения и возможностями по применению.

Известны три основных типа РПП и РПМ: плоскослоистые (интерференционные), градиентные и геометрически неоднородные [1, 2].

Учитывая стремление к повышению эффективности РПП, в настоящее время все более широкое применение приобретают композитные материалы с диэлектрической основой, в частности, полупроводниковой и, так называемые, искусственные среды [3 – 7]. В частности, в работах [8, 9] рассматривается возможность применения в интересах снижения ЭПР различных объектов композитных материалов с радиоизотопными включениями (КМРВ), обладающих одновременно свойствами композитных материалов и управляемых структур, приводящих к изменению электродинамических свойств покрытий и прилегающей к ним воздушной среды. Эти материалы за счет радиоизотопных включений приобрели ряд новых свойств, связанных не только с неравновесным состоянием электронной подсистемы материала и прилегающей к объекту воздушной среды,

© А.М. Сотников

но и с нестационарностью внутренней структуры проводимости, вызванной изменением числа треков α-частиц от продуктов распада радиоизотопных включений. В известных работах, посвященных электродинамике композитных материалов, авторы ограничиваются рассмотрением материалов с неупорядоченными стационарными структурами [5 − 7]. Нестационарные свойства КМРВ должны приводить к искажению вторичного излучения, следовательно, к снижению радиолокационной заметности объектов.

В этой связи **целью данной работы** является определение возможности использования нестационарных свойств проводимости композитных материалов, обусловленных радиоизотопными включениями, в интересах снижения радиолокационной заметности различных объектов.

Основной материал

Известно, что поглощающие свойства РПМ принято характеризовать величиной коэффициента отражения плоской волны R_0, падающей нормально на бесконечный плоский лист поглощающего материала [3]. Исходя из этого, нестационарный коэффициент отражения от КМРВ можно записать в следующем виде

$$\tilde{R}_{mp}(t) \approx \frac{\dot{Z}_м - \dot{Z}_{mp}(t)}{\dot{Z}_м + \dot{Z}_{mp}(t)} = \frac{1 - \dfrac{\dot{Z}_{mp}(t)}{\dot{Z}_м}}{1 + \dfrac{\dot{Z}_{mp(t)}}{\dot{Z}_м}}, \qquad (1)$$

где $\dot{Z}_м$ − импеданс матрицы КМРВ;

$\dot{Z}_{mp}(t)$ −импеданс высокопроводящих областей-треков α-частиц от продуктов распада радиоизотопных включений.

В соответствии с выражением (1) для определения вклада в коэффициент отражения внутренней структуры проводимости, обладающей нестационарными свойствами, необходимо определить зависимость импеданса КМРВ от изменения его внутренней пространственной структуры во времени.

Необходимо учесть, что изменение числа треков α-частиц определяется величиной активности радиоизотопных включений Q, определяемой в соответствии с выражением

$$\mathrm{Q} = 3{,}7 \cdot 10^{10} \chi \frac{E}{I} \frac{1}{R_d}, \qquad (2)$$

где χ − поток частиц в Ku/cm^2;

E − энергия ионизации;

I − энергия возбуждения;

R_d − длина пробега α-частицы в материале.

Очевидно, что при использовании радиоизотопных включений с активностью порядка нескольких десятков $mkKu/cm^2$ изменение числа треков, приводящее к изменению импеданса КМРВ, будет происходить за время порядка нескольких сотен микросекунд. Поскольку время накопления сигнала в радиолокационных системах составляет десятки – сотни миллисекунд, а время изменения числа треков, определяемое активностью включений, составляет сотни микросекунд, то нестационарность структуры материала будет приводить к изменению радиолокационных характеристик объекта.

Треки α-частиц, представляющие собой металлические включения, можно рассматривать как области, которые обладают индуктивностью, а диэлектрические области между треками − емкостью. Такой подход дает возможность нестационарность радиофизических свойств КМРВ, обусловленную изменением его внутренней структуры за счет появления все новых и новых треков от продуктов распада радиоизотопных включений, качественно представить изменением числа звеньев в схеме, моделирующей эту структуру. Схема приведена на рис. 1.

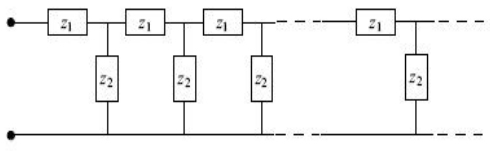

Рис. 1. Радиофизическая модель внутренней пространственной структуры КМРВ

В схеме на рис. 1 z_1 − индуктивная составляющая импеданса, z_2 − емкостная составляющая импеданса.

Представленная на рис. 1 радиофизическая модель внутренней пространственной структуры КМРВ не что иное, как LC -цепь лестничного типа.

Импеданс Z бесконечной лестничной цепи можно представить в следующем виде [10]:

$$Z_{n=1} = z_1 + \frac{Z_n z_2}{Z_n + z_2}, \quad n = 1, 2, ..., \infty, \qquad (3)$$

где z_1, z_2 − комплексные сопротивления − кондактансы элементов цепи.

При любых соотношениях z_1 и z_2 всегда есть неподвижная точка Z^*, определяемая из уравнения

$$Z^* = \frac{z_1}{2} \pm \sqrt{\frac{z_1^2}{4} + z_1 z_2}. \qquad (4)$$

Для неподвижной точки Z^*, если она устойчива, импеданс Z бесконечной лестничной цепи существует и является пределом $\lim\limits_{n\to\infty} Z_n = Z^*$. В противном случае предел $\lim\limits_{n\to\infty} Z_n$ не существует.

В соответствии с результатами работы [11] при соотношении импедансов цепи $t = {-z_1}/{z_2}$ и нахождении параметра t в пределах

$$0 \le t \le 4 \qquad (5)$$

неподвижная точка является неустойчивой. Для этой точки зависимость импеданса лестничной цепи от числа элементов имеет вид, представленный на рис. 2.

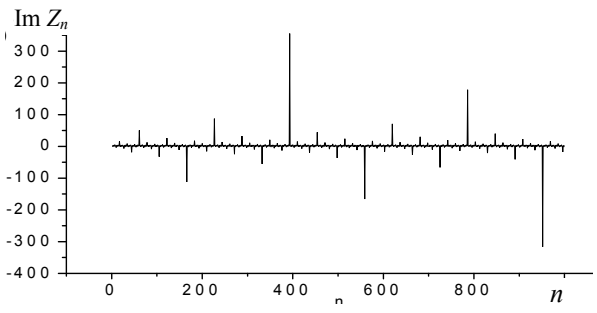

Рис. 2. Зависимость импеданса лестничной цепи от числа элементов n для значения $t = 3,2$

Таким образом, при обеспечении чисто мнимых значений z_1 и z_2, а также соотношения импедансов в пределах $t = 3,2$ в КМРВ возникает нестационарная структура проводимости, приводящая в соответствии с расчетами, приведенными на рис. 2, к нестационарным изменениям коэффициента отражения материала в пределах до 25дБ.

Оценим условия реализуемости соотношения импедансов емкостной и индуктивной составляющих $0 \le t \le 4$ в КМРВ.

Поскольку импеданс трека α-частицы определяется энергией потерь (характерными размерами), а импеданс диэлектрических областей размерами радиоизотопных включений при концентрации на пороге протекания, то выполнение соотношения (5) будет определяться выбором размеров включений, при которых обеспечивается необходимое значение емкостной составляющей импеданса.

В соответствии с результатами работы [12] диэлектрическая проницаемость трека определяется выражением

$$\varepsilon_{mp} \approx \varepsilon_м - \frac{2\pi\varepsilon_м}{(\kappa\ell)^2 \ell g \frac{\ell}{2d} - i\frac{2\kappa\ell^2}{d}\frac{z_{mp}}{z_в}}, \qquad (6)$$

где $\varepsilon_м$ − диэлектрическая проницаемость матрицы КМРВ;

ℓ −длина трека;

d − диаметр трека;

κ −волновое число;

$z_в$ −импеданс воздуха.

Для характерных размеров трека (ℓ=100мкм, d=0,02мкм) значения собственных резонансных частот лежат в диапазоне области неустойчивого импеданса.

В предположении, что диэлектрические области имеют сферическую форму, их импеданс можно оценить в соответствии с выражением [13]:

$$z_2 = \frac{1}{\omega c} = \frac{1}{4\pi\varepsilon d\omega}, \qquad (7)$$

где ε – диэлектрическая проницаемость диэлектри-

ческой области; d − диаметр диэлектрической области; ω − частота.

Выводы

Таким образом, при выборе размеров включений порядка 0,1 мм в КМРВ будет выполняться соотношение (5), а, следовательно, существовать нестационарный характер внутренней структуры проводимости, при которой изменения коэффициента отражения за время, определяемое значением активности радиоизотопных включений, достигать величин до 25 дБ. Наличие нестационарной составляющей коэффициента отражения КМРВ приведет не только к уменьшению ЭПР объекта, но и к искажению его радиолокационных характеристик. На наш взгляд, использование аналогичных принципов построения композиционных материалов, используемых в авиационной технике, может привести к созданию малозаметных летательных аппаратов.

Литература

1. Шнейдерман А.Я. Радиопоглощающие покрытия // Зарубежная радиоэлектроника. – 1975. – № 2. – С. 95-96.

2. Масалов С.А., Рыжак А.В., Сухаревский О.И., Шкиль В.М. Физические основы диапазонных технологий типа «Стелс».– СПб.: ВИКУ им. А.Ф. Можайского. – 1999. – 250 с.

3. Захарьев Л.Н., Леманский А.А. Рассеяние волн черными телами. − М.: Сов. радио, 1972. – 288 с.

4. Емец Ю.П. Эффективная диэлектрическая проницаемость трехкомпонентных композиционных материалов с анизотропной структурой // ЖТФ. − 2005. −Т. 75, вып. 2. − С. 67-72.

5. Емец Ю.П. Моделирование электрофизических характеристик диэлектрической среды с периодической структурой // ЖТФ. − 2004. − Т. 74, вып. 12. − С. 1-9.

6. Виноградов А.П. Электродинамика композитных материалов / Под ред. Б.З. Каценеленбаума. − М.: Эдиториал УРСС, 2001. − 208 с.

7. Пономаренко В.И. Эффективная диэлектрическая проницаемость искусственного диэлектрика с проводящими волокнами // Радиотехника. – 1990. – № 5. – С. 82-84.

8. Сотников А.М. Механизмы управления электрофизическими свойствами и принципы построения широкодиапазонных композитных материалов // Моделювання та інформаційні технології. – К.: НАНУ, Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова, 2005. – Вип. 33. – С.160-164.

9. Сотников А.М., Коняхин Г.Ф., Рыбалка Г.В., Кононенко С.И., Клепиков В.Ф., Литвиненко В.В., Новиков В.Е. Особенности электродинамических свойств фрактальных композитных материалов с α-радиоактивными включениями // Системи обробки інформації. – Х.: НАНУ, ПАНМ, ХВУ, 2002. – Вип. 6 (22). – С. 142-154.

10. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике Т.6. – М.: Мир, 1966. − 432 с.

11. Дыхне А.М., Снарский А.А., Женировский М.И. Устойчивость и хаос в двумерных случайно-неоднородных средах и LC – цепочках // Успехи физических наук. – 2004.– Т. 174, № 8. – С. 887-894.

12. Масловский С.И. К возможности создания искусственных сред с одновременно отрицательными диэлектрической и магнитной проницаемостями // Письма в ЖТФ. − 2003. − Т. 29, вып. 1. − С. 69-74.

13. Гольдштейн Л.Д., Зернов Н.В. Электромагнитные поля и волны. – М.: Сов. радио, 1971. − 664 с.

Поступила в редакцию 10.06.2006

Рецензент: д-р техн. наук, ст. научн. сотр. В.И. Антюфеев, Объединенный научно-исследовательский институт Вооруженных Сил Украины, Харьков.