

УДК 537.876.4

Р.Г. Сидоренко, В.А. Лупандин, А.И. Резниченко

*Харьковский университет Воздушных Сил имени Ивана Кожедуба, Харьков*

## ПОГЛОЩАЮЩИЕ СВОЙСТВА БАЗОВОЙ МОДЕЛИ КОМПОЗИТНОГО МАТЕРИАЛА С РАДИОИЗОТОПНЫМИ ВКЛЮЧЕНИЯМИ В УСЛОВИЯХ ПЕРЕМЕННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

*Рассмотрена возможность применения модели композитного материала с радиоизотопными включениями в условиях переменного магнитного поля для защиты радиоэлектронных средств от мощного электромагнитного излучения и определены основные физические механизмы, которые влияют на поглощающие свойства материала. Показано, что применение композитного материала с радиоизотопными включениями в условиях переменного магнитного поля приводит к увеличению поглощения мощных электромагнитных излучений в расширенном частотном диапазоне*

**Ключевые слова:** композитные материалы, радиоизотопные включения, переменное магнитное поле.

### Введение

**Постановка проблемы и анализ последних исследований и публикаций.** Анализ последних исследований и публикаций [1, 2] показал, что в настоящее время методы защиты радиоэлектронных средств (РЭС) от мощного электромагнитного излучения (ЭМИ) ультракороткой длительности в расширенном частотном диапазоне на основе известных радиопоглощающих покрытий (РПП) не в полной мере удовлетворяют поставленным требованиям: увеличение поглощения энергии падающего излучения; уменьшение отражения энергии падающего излучения и существенное искажение отраженного от покрытия излучения (резкая неоднородность по углу); обеспечение нестационарности отраженного сигнала; формирование нелинейных эффектов в облучаемых средах с целью изменения спектральных характеристик отраженного сигнала (искажения радиолокационных характеристик объекта локации).

Решение комплексного использования выше перечисленных механизмов является весьма актуальной задачей. Одной из возможностей реализации этих механизмов для защиты РЭС от мощного ЭМИ ультракороткой длительности в расширенном частотном диапазоне является использование базовой модели композитного материала с радиоизотопными включениями в условиях переменного магнитного поля.

**Цель статьи.** Оценить использование базовой модели композитного материала с радиоизотопными включениями в условиях переменного магнитного поля для защиты РЭС от мощного ЭМИ ультракороткой длительности.

### Основная часть

Базовая модель композитного материала с радиоизотопными включениями (КМРВ) представлена на рис. 1. Базовой моделью композитного материала с радиоизотопными включениями является многослойная

структура, имеющая в своем составе один ионизованный воздушный (газообразный) слой и несколько полупроводниковых (твердотельных) слоев с различными по активности радиоизотопными включениями [3].

Падающая электромагнитная волна первым на своем пути встречает ионизованный воздушный слой (рис. 1), прилегающий к полупроводниковому слою материала покрытия, который возникает за счет как наносимых на его поверхность радиоактивных пятен, так и за счет вылетающих из него  $\alpha$ -частиц, вызванных радиоизотопными включениями.

Эти источники ионизации приводят к созданию самосогласованной части покрытия за счет плавного уменьшения по мере удаления от него концентрации заряженных частиц (на интервале до максимальной длины свободного пробега заряженной  $\alpha$ -частицы в воздухе), что в свою очередь может обеспечить снижение отражения падающих на покрытие электромагнитных волн (ЭМВ). Кроме того, они являются источниками модификации воздушной среды, непосредственно прилегающей к материалу, за счет создания в ней неравновесного состояния электронной подсистемы воздушной среды, приводящей к увеличению поглощающих свойств КМРВ в целом.

Полупроводниковые слои КМРВ, количество, которых определяется как требованиями к поглощающим свойствам, так и требованиями к массогабаритным характеристикам покрытия, обеспечивают работу покрытия в различных частотных поддиапазонах за счет использования радиоизотопных включений с разной по величине активностью, определяющей как число треков  $\alpha$ -частиц, так и макроскопические свойства твердотельной плазмы (плотность частиц, электропроводность, теплопроводность и т. д.), возникающей вдоль треков. Необходимо отметить, что по мере удаления от источника ионизации (радиоизотопного включения) концентрация заряженных частиц будет уменьшаться из-за процессов релаксации.

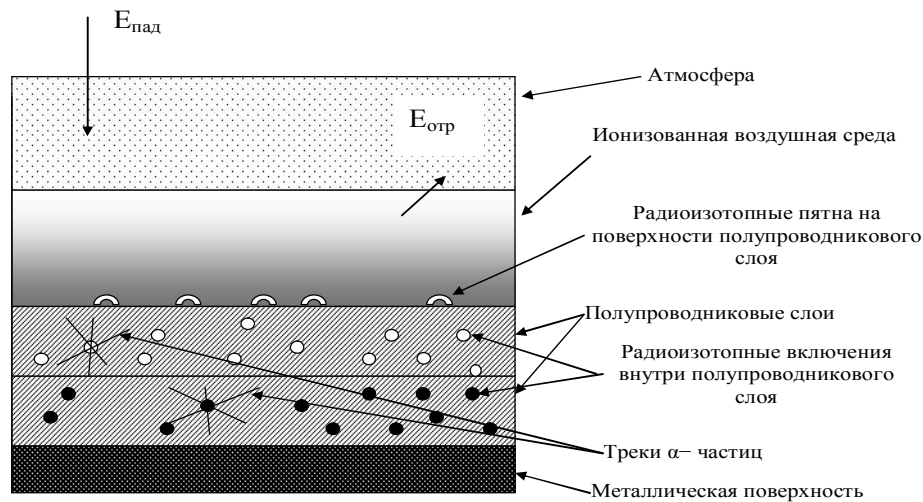


Рис. 1. Базовая модель композитного материала с радиоизотопными включениями

Ионизация атомов вещества покрытия вдоль треков приводит к созданию неоднородности в импульсном пространстве, ограниченном размерами полупроводниковых слоев, и, как следствие, к образованию неравновесных состояний электронов, что может привести к существенному увеличению затухания ЭМВ в покрытии. Причем в зависимости от величины активности радиоизотопных включений, определяющей механизмы ионизации и рекомбинации, диссипативные процессы могут иметь разную природу происхождения. Кроме того, неравновесное распределение электронной компоненты твердотельной части покрытия может привести как к изменению дисперсии плазменных колебаний, так и к появлению мнимой части диэлектрической проницаемости, рост которой обеспечит увеличение тангенса угла потерь  $\operatorname{tg} \delta$ , а, соответственно, уменьшение толщины покрытия.

Использование источников ионизирующего излучения для создания неоднородности в импульсном пространстве твердотельной части материала неразрывно связано с созданием неоднородности в координатном пространстве – треков  $\alpha$  – частиц. Испускаемые радиоизотопными включениями  $\alpha$  – частицы приведут к образованию в полупроводниковой (диэлектрической) матрице покрытия треков, которые представляют собой сложную рассеивающую нестационарную систему тонких проводящих нитей, обеспечивающую за счет своих резонансных свойств поглощение прошедших вглубь материала ЭМВ.

Таким образом, поскольку основной материал покрытия (полупроводник) обладает диэлектрическими свойствами, а  $\alpha$ – радиоактивные включения имеют хорошую проводимость, то твердотельная часть КМРВ по отношению к поглощению ЭМВ будет представлять собой одновременно среду трех перечисленных выше типов, реализуемых в традиционных РПП: плоскостойких, градиентных и геометрически неоднородных.

Поскольку распределение высокопроводящих радиоактивных включений в материале покрытия имеет нерегулярный характер, то по отношению к распределению проводящих элементов среда является фрактальной. Одним из основных свойств такой среды является инвариантность геометрических и физических свойств в широком диапазоне изменения масштабов, что показывает целесообразность использования такого построения материала в целях расширения рабочего диапазона частот покрытия.

Для оценки предложенной модели композитного материала с радиоизотопными включениями в условиях переменного магнитного поля необходимо определить его коэффициент отражения и возможные в нем потери ЭМВ.

Известно, что коэффициент отражения ЭМВ от слоя определяется в соответствии с выражением [4]:

$$\dot{\tau}_{12} = \dot{E}_{отр} / \dot{E}_{пад} = (\dot{Z}_{n_2} - \dot{Z}_{n_1}) / (\dot{Z}_{n_2} + \dot{Z}_{n_1}), \quad (1)$$

а коэффициент пропускания определяется как

$$\dot{\tau}_{12} = \dot{E}_{пр} / \dot{E}_{пад} = 2\dot{Z}_{n_2} / (\dot{Z}_{n_2} + \dot{Z}_{n_1}), \quad (2)$$

где  $\dot{E}_{пад}$  – комплексная амплитуда напряженности электрического поля падающей волны;  $\dot{E}_{отр}$  – комплексная амплитуда напряженности электрического поля отраженной волны;  $\dot{E}_{пр}$  – комплексная амплитуда напряженности электрического поля прошедшей волны;  $\dot{Z}_{n_1}, \dot{Z}_{n_2}$  – приведенные волновые сопротивления слоев 1 и 2.

Таким образом, в соответствии с результатами работы [5] коэффициент отражения КМРВ –  $R_0$  на длине волны  $\lambda$  определяется диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_i$  и проводимостью  $\sigma_i$  отдельных слоев. Значит, выражение для диэлектрической проницаемости базовой модели композитного материала с радиоизотопными включениями в общем случае может быть представлено следующим видом:

$$\varepsilon(\omega, \vec{k}) = 1 + \varepsilon_m + \sum_{i=1}^N \delta\varepsilon(\omega, \vec{k}) + \sum_{j=1}^M \delta\varepsilon_1(\omega, \vec{k}) + i \left\{ \frac{4\pi}{\omega} \left[ \sigma_{\text{eff}}(\omega, \vec{k}) + \alpha_e E^2 \right] \right\}, \quad (3)$$

где  $\varepsilon_m$  – диэлектрическая проницаемость полупроводникового слоя;  $\sum_{i=1}^N \delta\varepsilon(\omega, \vec{k})$  – вклад в диэлектриче-

скую проницаемость стационарных и нестационарных включений (радиоактивных включений и треклов);  $\sum_{j=1}^M \delta\varepsilon_1(\omega, \vec{k})$  – вклад в диэлектрическую проницае-

мость неравновесных состояний электронных подсистем композитного материала и слабоионизованной воздушной (газовой) среды;  $\frac{4\pi}{\omega} (\sigma_{\text{eff}}(\omega, \vec{k}) + \alpha_e E^2)$  –

вклад в мнимую часть диэлектрической проницаемости радиоактивных пятен с учетом нелинейных составляющих;  $\alpha_e$  – эффективная нелинейная проводимость;  $E$  – среднее электрическое поле;  $\omega, \vec{k}$  – частота и волновой вектор, соответственно.

Кроме того, в условиях переменного магнитного поля, появляется возможность увеличения значения тангенса угла магнитных потерь  $\text{tg}\delta_\mu = \mu'' / \mu'$ , который определяет магнитные потери в материале, за счет увеличения величины мнимой составляющей  $\mu''$  комплексной магнитной проницаемости  $\mu = \mu' + j\mu''$  [6].

Дополнительно в условиях переменного магнитного поля увеличивается поглощение ЕМИ (увеличивается площадь петли гистерезиса материала) за счет потерь [6]:

– на гистерезис  $P_\Gamma$ , при перемагничивании с частотой  $f$  (Гц):

$$P_\Gamma = (f \oint H - dB) / \gamma, \quad (4)$$

где  $\gamma$  – плотность материала;

– на вихревые токи  $P_B$ , для листового образца:

$$P_B = 1,64d^2 f^2 B_{\text{max}}^2 / (\gamma \cdot \rho), \quad (5)$$

где  $B_{\text{max}}$  – амплитуда магнитной индукции,  $f$  – частота,  $d$  – толщина листа,  $\gamma$  – плотность материала покрытия,  $\rho$  – удельное сопротивление; – дополнительных потерь  $P_d$ .

## Выводы

Таким образом, применение композитного материала с радиоизотопными включениями в условиях переменного магнитного поля приводит к появлению комплексной магнитной проницаемости, причем мнимая часть магнитной проницаемости становится соразмерной с реальной частью, кроме того увеличивается площадь петли гистерезиса материала за счет потерь на гистерезис, вихревые токи и дополнительных потерь. Все это приводит к увеличению поглощения электромагнитных излучений.

## Список литературы

1. Зброя на нетрадиційних принципах дії (стан, тенденції, принципи дії та захист від неї): Моногр. / О.П. Ковтуненко, В.В. Богучарський, В.І. Слюсар, П.М. Федоров. – Полтава: ПВІЗ, 2006. – 247 с.
2. Кравченко В.И. Электромагнитное оружие / В.И. Кравченко. – Х.: НТУ «ХПИ», 2008. – 185 с.
3. Сотников А.М. Механизмы управления электрофизическими свойствами и принципы построения широкодиапазонных композитных материалов / А.М. Сотников // Моделирование та інформаційні технології. – К.: НАНУ, ІПМЕ ім. Г.Е. Пухова, 2005. – Вип. 33. – С. 160–164.
4. Гольдштейн Л.Д. Электромагнитные поля и волны / Л.Д. Гольдштейн, Н.В. Зернов. Изд. 2-е, перераб. и дополненное. – М.: Сов. радио, 1971. – 664 с.
5. Сидоренко Р.Г. Захист радіоелектронних засобів від потужних електромагнітних випромінювань / Р.Г. Сидоренко, В.А. Лупандін, А.В. Челпанов // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2014. – № 1(14). – С. 133–136.
6. Толмасский И.С. Высокочастотные магнитные материалы / И.С. Толмасский. – М.: Энергия, 1968. – 72 с.

Поступила в редколлегию 2.06.2014

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. А.М. Сотников, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

## ПОГЛІНАЮЧІ ВЛАСТИВОСТІ БАЗОВОЇ МОДЕЛІ КОМПОЗИТНОГО МАТЕРІАЛУ З РАДІОІЗОТОПНИМИ ВКЛЮЧЕННЯМИ В УМОВАХ ПЕРЕМІННОГО МАГНІТНОГО ПОЛЯ

Р.Г. Сидоренко, В.А. Лупандін, А.І. Резніченко

Розглянута можливість використання моделі композитного матеріалу з радіоізотопними включеннями в умовах перемінного магнітного поля для захисту радіоелектронних засобів від потужного електромагнітного випромінювання та визначені основні фізичні механізми, які впливають на поглинаючі властивості матеріалу. Показано, що використання композитного матеріалу з радіоізотопними включеннями в умовах перемінного магнітного поля приводить до збільшення поглинання потужних електромагнітних випромінювань в розширеному частотному діапазоні.

**Ключові слова:** композитні матеріали, радіоізотопні включення, перемінне магнітне поле.

## SUCTIVE PROPERTIES OF BASE MODEL OF COMPOSITE MATERIAL WITH RADIOISOTOPE INCLUDING IN THE CONDITIONS OF VARIABLE MAGNETIC FIELD

R.G. Sydorenko, V.A. Lupandin, A.I. Reznichenko

The article examines the possibility of applying the composite material model with radioisotope inclusions in the conditions of an alternating magnetic field for the protection of electronic equipment from powerful electromagnetic radiation and identifies the basic physical mechanisms that affect the material absorption properties. It is shown that use of a composite material with radioisotope inclusions in the conditions of the alternating magnetic field increases the absorption of high electromagnetic radiation in the extended frequency range.

**Keywords:** composite materials, radioisotope including, alternating magnetic field.