

УДК 537.876.4(06)

А.М. Сотников, Р.Г. Сидоренко, Г.В. Рыбалка

Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков

БАЗОВАЯ МОДЕЛЬ КОМПОЗИТНОГО МАТЕРИАЛА С РАДИОИЗОТОПНЫМИ ВКЛЮЧЕНИЯМИ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ МЕХАНИЗМОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ОТРАЖАЮЩИЕ И ИЗЛУЧАТЕЛЬНЫЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛА

Рассмотрена модель композитного материала с радиоизотопными включениями и определены основные физические механизмы, которые влияют на отражающие и излучательные свойства материала; разработана математическая модель диэлектрической проницаемости композитного материала с радиоизотопными включениями, сущность которой заключается в более полном формализованном описании закона ее изменения, определяющего его отражающие и излучательные свойства.

Ключевые слова: композитные материалы, радиоизотопные включения.

Введение

Постановка проблемы. Современные методы снижения отражающих и формирования необходимых излучательных свойств наземных объектов, а также искажения отраженных сигналов в расширенном частотном диапазоне предопределяют комплексное использование следующих физических механизмов:

- 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 (РЛХ) объекта локации).

Решение комплексного использования выше перечисленных механизмов для снижения отражающих и формирования необходимых излучательных свойств объектов, а также искажения отраженных сигналов является весьма актуальной.

Анализ последних исследований и публикаций. Анализ последних публикаций [1 – 5] показал, что в настоящее время реализация выше перечисленных физических механизмов невозможна в известных радиопоглощающих покрытиях (РПП). Поэтому одной из возможностей реализации этих механизмов является использование диэлектрического (полупроводникового) материала с радиоизотопными включениями.

Цель статьи. Разработка математической модели композитного материала с радиоизотопными включениями, описание его диэлектрической проницаемости.

Основная часть

Базовая модель композитного материала с радиоизотопными включениями (КМРВ) представлена на рис. 1. В соответствии с показанной на рис. 1 базовой моделью композитный материал с радиоизотопными включениями представляет собой многослойную структуру, имеющую в своем составе один ионизованный воздушный (газообразный) слой и несколько полупроводниковых (твердотельных) слоев с различными по активности радиоизотопными включениями [1].

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 α -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 α -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 отражающим 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 α -частиц, так и макроскопические свойства твердотельной плазмы

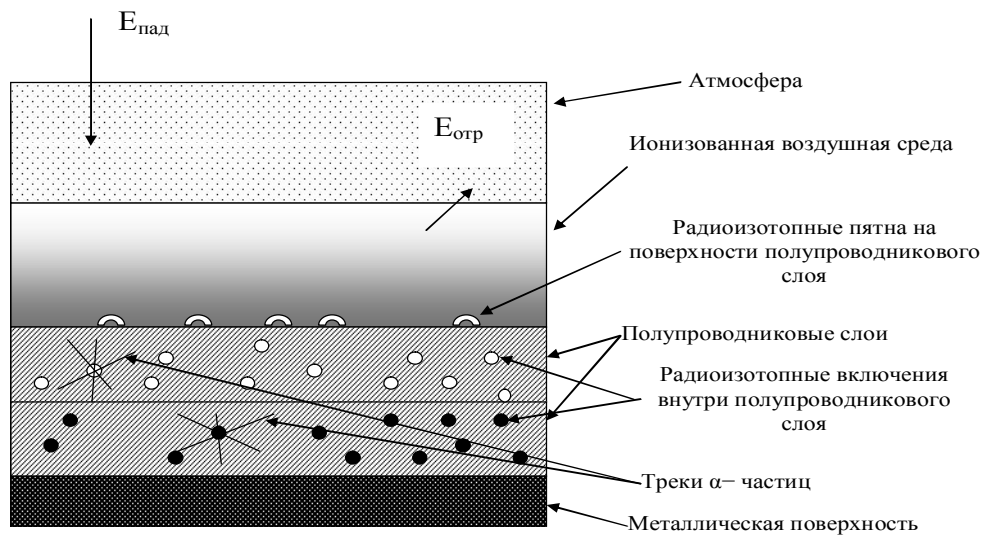


Рис. 1. Базовая модель композитного материала с радиоизотопными включениями

(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.

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 $\text{tg } \delta$, 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 α – частиц. Испускаемые радиоизотопными включениями α – 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 диэлектриче-

скими свойствами, а α – радиоактивные включения имеют хорошую проводимость, то твердотельная часть КМРВ по отношению к поглощению и рассеянию ЭМВ будет представлять собой одновременно среду трех перечисленных выше типов, реализуемых в традиционных РПП: плоскостойких, градиентных и геометрически неоднородных.

Кроме того, поскольку многие радиоактивные материалы являются металлами, то наносимые на поверхностный слой покрытия пятна радиоактивного материала приведут к образованию на поверхности полупроводникового слоя неоднородной по проводимости структуры, которая может привести к увеличению рассеяния падающей на покрытие ЭМВ, а также к преобразованию радиолокационного сигнала системы обнаружения и/или самонаведения на возникающей при концентрации проводящей компоненты вблизи порога протекания (перколяции) нелинейности проводимости и, как следствие, к искажению радиолокационных характеристик объекта. То есть, выбирая геометрические параметры пятен радиоактивного материала, так и радиоизотопных включений в полупроводниковые слои, определяющих внутреннюю структуру проводимости материала за счет треков α – частиц, можно существенно уменьшить уровень вторичного излучения в направлении облучателя, а, соответственно, снизить ЭПР защищаемого объекта.

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.

В соответствии с выше изложенным основная идея разработки КМРВ направлена на создание и использование специфических неоднородностей фазового пространства покрытия в целом, ограниченного размерами всех слоев материала, для обеспечения в широком частотном диапазоне требуемых отражающих и поглощающих свойств. То есть в основу разработки покрытия положено использование радиоизотопных включений, применение которых позволит использовать не только естественную неоднородность, связанную с присутствием самих включений, но и ряд дополнительных эффектов, а, соответственно, и преимуществ на основе того, что возникают линейные области повышенной проводимости – треки; появляется прилегающий к объекту защиты воздушный слой повышенной ионизации и возникает эффект, связанный с неравновесностью электронной подсистемы материала вдоль треков.

В дальнейшем будет исследован процесс изменения отражающих и формирования требуемых излучательных свойств диэлектрических (полупроводниковых) материалов за счет α -радиоактивных включений [2 – 5].

Поскольку основной характеристикой любого радиопоглощающего материала является его коэффициент отражения $R(\lambda, \theta)$, который существенно зависит от длины волны, вида и направления распространения падающей волны, формы отражающего объекта, то поглощающие свойства РПМ принято характеризовать величиной коэффициента отражения плоской волны R_0 , падающей нормально на бесконечный плоский лист поглощающего материала [6].

В соответствии с предложенной выше базовой моделью композитного материала с радиоизотопными включениями рассмотрим прохождение через него плоской волны и определим коэффициент отражения R_0 .

Рассмотрим КМРВ, имеющий один полупроводниковый слой. (В общем случае полупроводниковый слой может представлять собой многослойную структуру с различной активностью радиоизотопных включений). Исходя из этого, представим структуру КМРВ в следующем виде, приведенном на рис. 2.

В рассматриваемом случае из-за наличия радиоизотопных включений возникает двухслойная структура материала.

Известно, что коэффициент отражения ЭМВ от слоя определяется в соответствии с выражением [7]:

$$\dot{\tau}_{12} = \frac{\dot{E}_{1\delta\delta}}{\dot{E}_{1\alpha\alpha}} = \frac{\dot{Z}_{n_2} - \dot{Z}_{n_1}}{\dot{Z}_{n_2} + \dot{Z}_{n_1}}, \quad (1)$$

а коэффициент пропускания определяется следующим образом

$$\dot{\tau}_{12} = \frac{\dot{E}_{1\delta}}{\dot{E}_{1\alpha\alpha}} = \frac{2\dot{Z}_{n_2}}{\dot{Z}_{n_2} + \dot{Z}_{n_1}}, \quad (2)$$

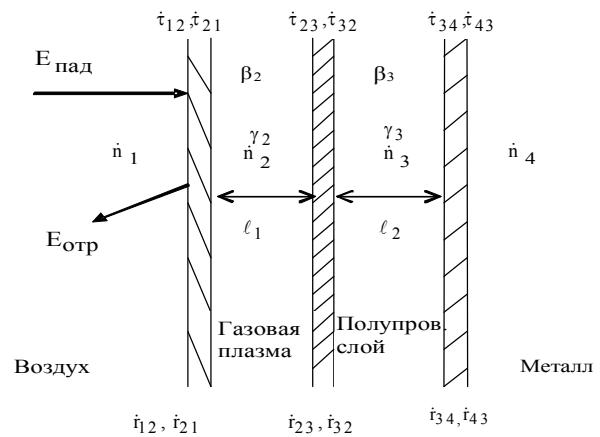


Рис. 2. Структура композитного материала с радиоизотопными включениями

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

Учитывая, что для всех составляющих структуры материала можно принять $\mu = 1$, тогда в выражениях (1) и (2) вместо приведенного волнового сопротивления \dot{Z}_n можно использовать коэффициент преломления $\dot{n} = \sqrt{\epsilon}$ [8].

В соответствии с результатами работы [9] можно показать, что выражение для комплексного коэффициента отражения R_0 от КМРВ будет иметь вид:

$$R_0 = \dot{\tau}_{14} = \frac{\dot{\tau}_{12} + (\dot{\tau}_{12}\dot{\tau}_{21} - \dot{\tau}_{12}\dot{\tau}_{21})\dot{\tau}_{23}e^{-\gamma_2\beta_2}e^{-\gamma_2}}{1 + \dot{\tau}_{12}\dot{\tau}_{23}e^{-\gamma_2\beta_2}e^{-\gamma_2} + \dot{\tau}_{23}\dot{\tau}_{34}e^{-\gamma_3\beta_3}e^{-\gamma_3}} + \frac{(\dot{\tau}_{23}\dot{\tau}_{32} - \dot{\tau}_{23}\dot{\tau}_{32})\dot{\tau}_{34}e^{-\gamma_3\beta_3}e^{-\gamma_3}}{1 + \dot{\tau}_{12}\dot{\tau}_{23}e^{-\gamma_2\beta_2}e^{-\gamma_2} + \dot{\tau}_{23}\dot{\tau}_{34}e^{-\gamma_3\beta_3}e^{-\gamma_3}}, \quad (3)$$

где β_2, β_3 – набег фазы для ЭМВ на длине волны λ в среде между отражающими слоями при отражении излучения, соответственно, от первого и второго слоев ($\beta = \frac{4\pi}{\lambda}nl$, где l – толщина слоя); γ_2, γ_3 – показатели затухания отраженного излучения, соответственно, от второго и третьего слоев, обусловленные поглощением в средах между слоями.

В соответствии с [7] показатель затухания отраженного излучения определяется выражением

$$\gamma = \frac{4\pi}{\lambda}l\alpha, \quad (4)$$

где α – мнимая часть показателя преломления $\dot{n} = n - j\alpha$.

В ММ ДВ зависимость \dot{n} и α от длины волны λ и проводимости σ определяются следующими соотношениями [6]

$$\dot{n} = \sqrt{\varepsilon} \sqrt{\frac{1}{2} \sqrt{1 + \left(\frac{60\sigma\lambda}{\varepsilon}\right)^2} + 1}; \quad (5)$$

$$\alpha = \sqrt{\varepsilon} \sqrt{\frac{1}{2} \sqrt{1 + \left(\frac{60\sigma\lambda}{\varepsilon}\right)^2} - 1}. \quad (6)$$

Таким образом, в соответствии с выражениями (1 – 6) коэффициент отражения КМРВ – R_0 на длине волны λ определяется диэлектрической проницаемостью ε_i и проводимостью σ_j отдельных слоев.

Каждая из выше определенных составляющих структуры КМРВ дает свой вклад в диэлектрическую проницаемость, которая в общем случае может быть представлена следующим выражением

$$\varepsilon(\omega, \vec{k}) = 1 + \varepsilon_m + \sum_{i=1}^N \delta\varepsilon_{\hat{a}\hat{e}\hat{e}_i}(\omega, \vec{k}) + \sum_{j=1}^M \delta\varepsilon_{\hat{i}\hat{a}\hat{n}\hat{e}\hat{n}_j}(\omega, \vec{k}) + i \left\{ \frac{4\pi}{\omega} \left[\sigma_{\text{eff}}(\omega, \vec{k}) + \alpha_e E^2 \right] \right\}, \quad (7)$$

где ε_m – диэлектрическая проницаемость полупроводникового слоя;

$$\sum_{i=1}^N \delta\varepsilon_{\hat{a}\hat{e}\hat{e}_i}(\omega, \vec{k})$$

– вклад в диэлектрическую проницаемость стационарных и нестационарных включений (радиоактивных включений и трекров);

$$\sum_{j=1}^M \delta\varepsilon_{\hat{i}\hat{a}\hat{n}\hat{e}\hat{n}_j}(\omega, \vec{k})$$

– вклад в диэлектрическую проницаемость неравновесных состояний электронных подсистем композитного материала и слабоионизированной воздушной (газовой) среды;

$$\frac{4\pi}{\omega} \left(\sigma_{\text{eff}}(\omega, \vec{k}) + \alpha_e E^2 \right)$$

– вклад в мнимую часть диэлектрической проницаемости радиоактивных пятен с учетом нелинейных составляющих;

α_e – эффективная нелинейная проводимость;

E – среднее электрическое поле; ω, \vec{k} – частота и волновой вектор, соответственно.

В соответствии с законом излучения Кирхгофа излучательная способность для непрозрачных сред может быть определена через их коэффициент отражения.

То есть выражение для излучательной способности КМРВ на металлической подложке ($\dot{\tau}_{11} = 0$) можно представить в следующем виде

$$\chi_i(\varepsilon_i, \theta, \lambda) = 1 - R(\varepsilon_i, \theta, \lambda). \quad (8)$$

Составляющие диэлектрической проницаемости, описываемой выражением (7) являются частотно-зависимыми, что может обеспечить при опреде-

ленных условиях необходимые отражающие и излучательные свойства композитного материала с радиоизотопными включениями в широком частотном диапазоне. Эти физические механизмы определяются диэлектрической проницаемостью ε_i и проводимостью σ_j отдельных его слоев.

Выводы

Использование радиоизотопных включений приводит как минимум к двухслойной структуре материала с различными физическими механизмами, определяющими необходимые отражающие и излучательные свойства каждого из слоев и их совокупности.

Таким образом, разработана математическая модель диэлектрической проницаемости композитного материала с радиоизотопными включениями, сущность которой заключается в более полном формализованном описании закона ее изменения, определяющего отражающие и излучательные свойства.

Список литературы

1. Сотников А.М. Механизмы управления электрофизическими свойствами и принципы построения широкодиапазонных композитных материалов // *Моделирование та інформаційні технології*. – К.: НАНУ, ИПМЕ ім. Г.Е. Пухова, 2005. – Вип. 33. – С. 160-164.
2. Сотников А.М. Электродинамические свойства полупроводниковых радиоизотопных покрытий // *Моделирование та інформаційні технології*. – К.: НАНУ, ИПМЕ ім. Г.Е. Пухова, 2004. – Вип. 26. – С. 196-200.
3. Пристрій для зменшення інтенсивності відбиття електромагнітного випромінювання в широкому діапазоні частот: Деклараційний патент на корисну модель. Україна: МКВ Н04К3/00 / Сотніков О.М., Карпенко В.І., Клепінков В.Ф., Новіков В.С. Судаків О.Г. – №7486; Заявл. 27.12.2004; Опубл. 15.06.2005. – Бюл. №6. – 8 с.
4. Пристрій для зменшення інтенсивності відбиття радіохвиль: Деклараційний патент на корисну модель. Україна: МКВ Н01Р1/62, Н01Q17/00 / Карпенко В.І., Сотніков О.М., Новіков В.С. Судаків О.Г. – №3496; Заявл. 22.03.2004; Опубл. 15.11.2004. – Бюл. №11. – 6 с.
5. Пристрій для зменшення інтенсивності відбиття радіохвиль: Деклараційний патент на корисну модель. Україна: МКВ Н01Р1/62, Н01Q17/00 / Сотніков О.М., Судаків О.Г. №3485; Заявл. 12.03.2004; Опубл. 15.11.2004. – Бюл. №11. – 4 с.
6. Захарьев Л.Н., Леманский А.А. *Рассеяние волн «черными» телами*. – М.: Мир, 1972. – 318 с.
7. Гольдштейн Л.Д., Зернов Н.В. *Электромагнитные поля и волны*. – М.: Сов. радио, 1971. – 664 с.
8. Гуткин Л.С. *Проектирование радиосистем и радиоустройств: Учеб. пособие для вузов*. – М.: Сов. радио, 1986. – 288 с.
9. Борн М., Вольф Э. *Основы оптики / Пер. с англ.*: Под ред. Г.П. Мотулевич. – М.: Наука, 1970. – 856 с.

Поступила в редколлегию 10.07.2008

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.И. Карпенко, Харьковский университет Воздушных Сил, им. И. Кожедуба, Харьков.

**БАЗОВА МОДЕЛЬ КОМПОЗИТНОГО МАТЕРІАЛУ З РАДІОІЗОТОПНИМИ ВКЛЮЧЕННЯМИ ТА ВИЗНАЧЕННЯ
ОСНОВНИХ ФІЗИЧНИХ МЕХАНІЗМІВ, ЯКІ ВПЛИВАЮТЬ НА ВІДБИВАЮЧИ
ТА ВИПРОМІНЮЮЧИ ВЛАСТИВОСТІ МАТЕРІАЛУ**

О.М. Сотніков , Р.Г. Сидоренко , Г.В. Рибалка

Розглядається модель композитного матеріалу з радіоізотопними включеннями, його відбиваючі та випромінюючі властивості, визначені основні фізичні механізми, які впливають на властивості матеріалу, що відображають і випромінювальні; розроблена математична модель діелектричної проникності композитного матеріалу з радіоізотопними включеннями, суть якої полягає в повнішому формалізованому описі закону її зміни, що визначає його властивості, що відображають і випромінювальні.

Ключові слова: композитні матеріали, радіоізотопні включення.

**BASE MODEL COMPOSITION MATERIAL WITH RADIO ISOTOPE BY CUT-IN AND DETERMINATION MAIN PHYSICAL
MECHANISM, INFLUENCING UPON REFLECTING AND RADIATE CHARACTERISTIC MATERIAL IS**

A.M. Sotnikov, R.G. Sidorenko, G.V. Rybalka

Considered model composition material with radio isotope by cut-in, his reflecting and radiating characteristic, basic physical mechanisms which influence on reflecting and radiate properties of material are certain; the mathematical model of dielectric permeability of composite material is developed with including of radioisotopes, essence of which consists in more complete formalize description of law of its change, determining his reflecting and radiate properties.

Keywords: composite materials, radioisotopic inclusions.