

УДК 538.876

Р.Г. Сидоренко

Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

ВИЗНАЧЕННЯ ОСНОВНИХ ФІЗИЧНИХ МЕХАНІЗМІВ, ЯКІ ВПЛИВАЮТЬ НА ВІДБИВНІ ТА ВИПРОМІНЮВАЛЬНІ ВЛАСТИВОСТІ КОМПОЗИТНОГО МАТЕРІАЛУ З РАДІОІЗОТОПНИМИ ВКЛЮЧЕННЯМИ

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

Ключеві слова: відбивні, випромінювальні властивості матеріалів.

Вступ

Постановка проблеми. Сучасні методи зниження відбивних і формування необхідних випромінювальних властивостей наземних об'єктів, а також спотворення відбитих сигналів в розширеному частотному діапазоні зумовлюють комплексне використання наступних фізичних механізмів:

- збільшення поглинання енергії падаючого випромінювання;
 - зменшення відбиття енергії падаючого випромінювання і істотне спотворення відбитого від покриття випромінювання (різка неоднорідність по куту);
 - забезпечення нестационарності відбитого сигналу;
 - формування нелінійних ефектів в опромінюваних середовищах з метою зміни спектральних характеристик відбитого сигналу (спотворення радіолокаційних характеристик (РЛХ) об'єкту локації).
- Вирішення комплексного використання вище перерахованих механізмів для зниження відбивних і формування необхідних випромінювальних властивостей об'єктів, а також спотворення відбитих сигналів є вельми актуальним.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз останніх публікацій [1-5] показав, що в даний час реалізація вище перерахованих фізичних механізмів неможлива у відомих радіопоглинаючих покриттях (РПП). Тому однією з можливостей реалізації цих механізмів є використання діелектричного (напівпровідникового) матеріалу з радіоізотопними включеннями.

Мета статті. Розробка математичної моделі композитного матеріалу з радіоізотопними включеннями, опис його діелектричної проникності.

Основна частина

Композитний матеріал з радіоізотопними включеннями є багатошаровою структурою, що має

в своєму складі один іонізований повітряний (газо-подібний) шар і декілька напівпровідникових (твердотілих) шарів з різними по активності радіоізотопними включеннями.

Падаюча електромагнітна хвиля першим на своїй дорозі зустрічає іонізований повітряний шар, прилеглий до напівпровідникового шару матеріалу покриття, який виникає за рахунок як радіоактивних плям, що наносяться на його поверхню, так і за рахунок тих, що вилітають з нього α – часток, викликаних радіоізотопними включеннями.

Ці джерела іонізації приводять до створення самоузгодженої частини покриття за рахунок плавного зменшення у міру видалення від нього концентрації заряджених часток (на інтервалі до максимальної довжини вільного пробігу зарядженої α – частки в повітрі), що у свою чергу може забезпечити зниження віддзеркалення падаючих на покриття електромагнітних хвиль (ЕМХ).

Крім того, вони є джерелами модифікації повітряного середовища, безпосередньо прилеглого до матеріалу, за рахунок створення в ньому нерівноважного стану електронної підсистеми повітряного середовища

Напівпровідникові шари композитного матеріалу з радіоізотопними включеннями (КМРВ), кількість, яких визначається як вимогами до відбивних властивостей, так і вимогами до масогабаритних характеристик покриття, забезпечують роботу покриття в різних частотних піддіапазонах за рахунок використання радіоізотопних включень з різною по величині активністю, що визначає як число треків α – часток, так і макроскопічні властивості твердотілої плазми (щільність часток, електропровідність, теплопровідність і т. д.), що виникає уздовж треків. Необхідно відзначити, що по мірі видалення від джерела іонізації (радіоізотопного включення) концентрація заряджених часток зменшуватиметься із-за процесів релаксації.

Іонізація атомів речовини покриття уздовж треків приводить до створення неоднорідності в імпульсному просторі, обмеженому розмірами напівпровідникових шарів, і, як наслідок, до утворення нерівноважних станів електронів, що може привести до істотного збільшення загасання ЕМХ в покритті. Причому залежно від величини активності радіоізотопних включень, що визначає механізми іонізації і рекомбінації, дисипативні процеси можуть мати різну природу походження. Крім того, нерівноважний розподіл електронної компоненти твердотілої частини покриття може привести як до зміни дисперсії плазмових коливань, так і до появи уявної частини діелектричної проникності, зростання якої забезпечить збільшення тангенса кута втрат $\text{tg } \delta$, а, відповідно, зменшення товщини покриття.

Використання джерел іонізуючого випромінювання для створення неоднорідності в імпульсному просторі твердотілої частини матеріалу нерозривно пов'язане із створенням неоднорідності в координатному просторі – треків α – часток. Випускаємі радіоізотопними включеннями α – частки приведуть до утворення в напівпровідниковій (діелектричній) матриці покриття треків, які є складною розсіюючою нестационарною системою тонких провідних ниток, що забезпечує за рахунок своїх резонансних властивостей поглинання ЕМХ.

Таким чином, оскільки основний матеріал покриття (напівпровідник) володіє діелектричними властивостями, а α – радіоактивні включення мають хорошу провідність, то твердотіла частина КМРВ по відношенню до поглинання і розсіяння ЕМХ буде одночасно середовищем трьох перерахованих вище типів, що реалізуються в традиційних РПП: плоскостістих, градієнтних і геометрично неоднорідних.

Крім того, оскільки багато радіоактивних матеріалів є металами, то плями, які наносяться на поверхневий шар покриття радіоактивного матеріалу приведуть до появи на поверхні напівпровідникового шару неоднорідної по провідності структури, яка може привести до збільшення розсіяння падаючих на покриття ЕМХ, а також до перетворення сигналу системи радіолокації на провідні компоненти, що виникають при концентрації, поблизу порогу протікання (перколяції) нелінійності провідності і, як наслідок, до спотворення радіолокаційних характеристик об'єкту. Тобто, вибираючи геометричні параметри плям для радіоактивного матеріалу, так і радіоізотопних включень в напівпровідникові шари, які визначають внутрішню структуру провідності матеріалу за рахунок треків α – часток, можна суттєво зменшити рівень вторинного випромінювання у напрямі випромінювача, а, відповідно, понизити ЕПР об'єкту, що захищається.

Оскільки розподіл високопровідних радіоактивних включень в матеріалі покриття має нерегуляр-

ний характер, то по відношенню до розподілу провідних елементів середовище є фрактальним. Однією з основних властивостей такого середовища є інваріантність геометричних і фізичних властивостей в широкому діапазоні зміни масштабів, що показує доцільність використання такої побудови матеріалу в цілях розширення робочого діапазону частот покриття.

Відповідно до вище викладеним основна ідея розробки КМРВ направлена на створення і використання специфічних неоднорідностей фазового простору покриття в цілому, обмеженого розмірами всіх шарів матеріалу, для забезпечення в широкому частотному діапазоні необхідних відбивних та випромінювальних властивостей.

Тобто в основу розробки покриття покладено використання радіоізотопних включень, використання яких дозволить вживати не лише природну неоднорідність, пов'язану з присутністю самих включень, але і ряд додаткових ефектів, а, відповідно, і переваг на основі того, що виникають лінійні області підвищеної провідності – треки; з'являється прилеглий до об'єкту захисту повітряний шар підвищеної іонізації і виникає ефект, пов'язаний з нерівновісністю електронної підсистеми матеріалу уздовж треків.

Надалі буде досліджений процес зміни відбивних і формування необхідних випромінювальних властивостей діелектричних (напівпровідникових) матеріалів за рахунок α –радіоактивних включень [2 – 5].

Оскільки основною характеристикою будь-якого радіопоглинаючого матеріалу є його коефіцієнт відбиття $R(\lambda, \theta)$, який істотно залежить від довжини хвилі, вигляду і напрямку поширення падаючої хвилі, форми об'єкту, то поглинаючі властивості РПП прийнято характеризувати величиною коефіцієнта відбиття плоскої хвилі R_0 , яка падає нормально на безконечний плоский лист поглинаючого матеріалу [6].

Відповідно до запропонованої вище базової моделі композитного матеріалу з радіоізотопними включеннями розглянемо проходження крізь нього плоскої хвилі і визначимо коефіцієнт відбиття R_0 .

Розглянемо КМРВ, що має один напівпровідниковий шар (у загальному випадку напівпровідниковий шар може бути багат шаровою структурою з різною активністю радіоізотопних включень). Виходячи з цього, представимо структуру КМРВ в наступному вигляді, приведенному на рис. 1.

В даному випадку із-за наявності радіоізотопних включень виникає двошарова структура матеріалу.

Відомо, що коефіцієнт відбиття ЕМХ від шару визначається відповідно до виразу [7].

$$\dot{\Gamma}_{12} = \frac{\dot{E}_{\text{ââ}}}{\dot{E}_{\text{r ââ}}} = \frac{\dot{Z}_{n2} - \dot{Z}_{n1}}{\dot{Z}_{n2} + \dot{Z}_{n1}}, \quad (1)$$

а коефіцієнт пропускання визначається таким чином

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

де $\dot{E}_{\tau\delta}$ – комплексна амплітуда напруженості електричного поля падаючої хвилі;

$\dot{E}_{\dot{a}\dot{a}\dot{a}}$ – комплексна амплітуда напруженості електричного поля відбитої хвилі;

$\dot{E}_{\tau\delta}$ – комплексна амплітуда напруженості електричного поля хвилі, що пройшла;

$\dot{Z}_{n_1}, \dot{Z}_{n_2}$ – приведені хвильові опори шарів 1 і 2.

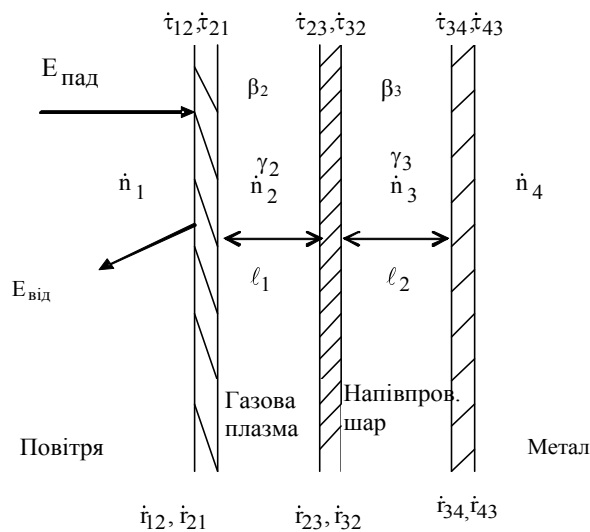


Рис. 1. Структура композитного матеріалу з радіоізотопними включеннями

Враховуючи, що для всіх складових структури матеріалу можна прийняти $\mu = 1$, тоді у виразах (1) і (2) замість приведеного хвильового опору \dot{Z}_n можна використовувати коефіцієнт переломлення $\dot{n} = \sqrt{\epsilon}$ [8].

Відповідно до результатів роботи [9] можна показати, що вираз для комплексного коефіцієнта відбиття R_0 від КМРВ матиме вигляд:

$$R_0 = i_{14} = \frac{i_{12} + (\tau_{12}\tau_{21} - i_{12}i_{21})i_{23}e^{-\gamma_2\beta_2}e^{-\gamma_2}}{1 + i_{12}i_{23}e^{-\gamma_2\beta_2}e^{-\gamma_2} + i_{23}i_{34}e^{-\gamma_3\beta_3}e^{-\gamma_3}} + \frac{(\tau_{23}\tau_{32} - i_{23}i_{32})i_{34}e^{-\gamma_3\beta_3}e^{-\gamma_3}}{1 + i_{12}i_{23}e^{-\gamma_2\beta_2}e^{-\gamma_2} + i_{23}i_{34}e^{-\gamma_3\beta_3}e^{-\gamma_3}},$$

де β_2, β_3 – набіги фази для ЕМХ на довжині хвилі λ в середовищі між відбиваючими шарами, при відбитті випромінювання, відповідно, від першого і другого шарів ($\beta = \frac{4\pi}{\lambda}nl$, де l – товщина шару);

γ_2, γ_3 – показники загасання відбитого випромінювання, відповідно, від другого і третього

шарів, обумовлені поглинанням в середовищах між шарами.

Відповідно до роботи [7] показник загасання відбитого випромінювання визначається виразом

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

де α – уявна частина показника переломлення $\dot{n} = n - j\alpha$.

В ММ ДХ залежність \dot{n} і α від довжини хвилі λ і провідності σ визначаються наступними співвідношеннями [6]

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

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

Таким чином, відповідно до виразів (1 – 6) коефіцієнт відбиття КМРВ – R_0 на довжині хвилі λ визначається діелектричною проникністю ϵ_i і провідністю σ_i окремих шарів.

Кожна з вище визначених складових структури КМРВ дає свій вклад в діелектричну проникність, яка в загальному випадку може бути представлена наступним виразом

$$\epsilon(\omega, \vec{k}) = 1 + \epsilon_m + \sum_{i=1}^N \delta\epsilon_{\delta\dot{a}\dot{a}\dot{a}i}(\omega, \vec{k}) + \quad (7)$$

$$+ \sum_{j=1}^M \delta\epsilon_{\dot{e}\dot{e}i i j}(\omega, \vec{k}) + i \left\{ \frac{4\pi}{\omega} \left[\sigma_{\text{eff}}(\omega, \vec{k}) + \alpha_e E^2 \right] \right\},$$

де ϵ_m – діелектрична проникність напівпровідникового шару;

$$\sum_{i=1}^N \delta\epsilon_{\delta\dot{a}\dot{a}\dot{a}i}(\omega, \vec{k})$$

– вклад в діелектричну проникність стаціонарних і нестаціонарних включень (радіоактивних включень і треків);

$$\sum_{j=1}^M \delta\epsilon_{\dot{e}\dot{e}i i j}(\omega, \vec{k})$$

– вклад в діелектричну проникність нерівноважних станів електронних підсистем композитного матеріалу і слабоіонізованого повітряного (газового) середовища;

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

– вклад в уявну частину діелектричної проникності радіоактивних плям з врахуванням нелінійних складових;

α_e – ефективна нелінійна провідність;

E – середнє електричне поле;

ω, \vec{k} – частота і хвильовий вектор, відповідно.

Відповідно до закону випромінювання Кирхгофа випромінювальна здатність для непрозорих середовищ може бути визначена через їх коефіцієнт відбиття.

Тобто вираз для випромінювальної здатності КМРВ на металевій підкладці ($\dot{\tau}_{11} = 0$) можна представити в наступному вигляді

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

Складові діелектричної проникності, що описується виразом (7) є частотно-залежними, що може забезпечити за певних умов необхідні відбивні та випромінювальні властивості композитного матеріалу, з радіоізотопними включеннями в широкому частотному діапазоні. Ці фізичні механізми визначаються діелектричною проникністю ϵ_i і провідністю σ_j окремих його шарів

Висновки

Використання радіоізотопних включень приводить як мінімум до двохшарової структури матеріалу з різними фізичними механізмами, що визначають необхідні відбивні та випромінювальні властивості, кожного з шарів і їх сукупності.

Таким чином, розроблена математична модель діелектричної проникності композитного матеріалу з радіоізотопними включеннями, суть якої полягає в повнішому формалізованому описі закону її зміни, що визначає відбивні та випромінювальні властивості.

Список літератури

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

2. Сотников А.М. Электродинамические свойства полупроводниковых радиоизотопных покрытий / А.М. Сотников // *Моделирование та інформаційні технології*. – К.: НАНУ, Інститут проблем моделювання в енергетиці 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/ О.М. Сотников, В.І. Карпенко, В.Ф. Клепиков, В.Є. Новіков, О.Г. Судаков. – №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/ В.І. Карпенко, О.М. Сотников, В.Є. Новіков, О.Г. Судаков. – №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/ О.М. Сотников, О.Г. Судаков №3485; Заявл. 12.03.2004; Опубл. 15.11.2004. – Бюл. №11. – 4 с.

6. Захарьев Л.Н. Рассеяние волн "черными" телами. / Л.Н. Захарьев, А.А. Леманский. – М: Мир, 1972. – 318 с.

7. Гольдштейн Л.Д. Электромагнитные поля и волны. Изд.2-е, перераб. и дополненное. / Л.Д. Гольдштейн, Н.В. Зернов. – М.: Сов. Радио, 1971. – 664 с.

8. Гуткин Л.С. Проектирование радиосистем и радиоустройств: Учеб. пособие для вузов. / Л.С. Гуткин. – 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.

Надійшла до редколегії 12.03.2012

Рецензент: д-р техн. наук проф. О.М. Сотников, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ МЕХАНИЗМОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ОТРАЖАЮЩИЕ И ИЗЛУЧАЮЩИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИТНОГО МАТЕРИАЛА С РАДИОИЗОТОПНЫМИ ВКЛЮЧЕНИЯМИ

Р.Г. Сидоренко

Рассмотрена модель композитного материала с радиоизотопными включениями и определены основные физические механизмы, которые влияют на отражающие и излучающие 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 излучающие свойства.

Ключевые слова: отражающие, излучающие свойства материалов.

DETERMINATION OF BASIC PHYSICAL MECHANISMS, INFLUENCING ON REFLECTING AND RADIATE PROPERTIES OF COMPOSITE MATERIAL WITH THE RADIOISOTOPE INCLUDING

R.G. Sydorenko

The model of composite material is considered with the radioisotope including and basic physical mechanisms which influence on reflecting and radiate properties of material are determinate; the mathematical model of inductivity of composite material is developed with the radioisotope including, sense of which consists in more complete punctual description of law of its change, determining his reflecting and radiate properties.

Keywords: reflecting, radiative properties of materials.