

ОТРАЖЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ ОТ ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА СРЕД ПРИ НАЛИЧИИ НА НЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

Бобученко Д.С.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Получены выражения и проведены расчеты для коэффициентов отражения от границы раздела сред при наличии электрического тока на ней.

Ключевые слова: коэффициент отражения, диэлектрическая и магнитная проницаемости, напряженности электрического и магнитного полей.

REFLECTION OF ELECTROMAGNETIC WAVES FROM THE INTERFACE IN THE PRESENCE OF CURRENT

Babuchenka D.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Belarus*

Abstract. The expressions and calculations for the reflection coefficients from the boundary of the media partition in the presence of current on it have been obtained.

Key words: reflection coefficient, dielectric and magnetic permeability, electric and magnetic field strengths.

*Адрес для переписки: Бобученко Д.С., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: dbobuchenko@gmail.com*

Коэффициенты отражения электромагнитной волны от плоской границы двух сред, известные как формулы Френеля, получены при условии отсутствия свободных зарядов и токов на этой границе. Поэтому представляло интерес исследовать, как будут изменяться значения коэффициентов отражения при наличии свободных зарядов и токов на границе. В работе сначала рассмотрено изменения электрического и магнитного полей на границе раздела двух сред с диэлектрическими и магнитными проницаемостями $\epsilon_1, \mu_1, \epsilon_2, \mu_2$ для этих сред при наличии на границе свободных зарядов и тока.

Граничные условия для вектора напряженности электрического поля E. Выделим на границе прямоугольный замкнутый контур (длины а, ширины в), и используем закон электромагнитной индукции:

$$\oint_L \vec{E} d\vec{l} = -\frac{\partial}{\partial t} \int_S \vec{B} d\vec{S}.$$

Устремим ширину контура в к нулю, поток вектора магнитной индукции В обратится в нуль. $\oint_L \vec{E} d\vec{l} = 0$ или $E_{1\tau}a - E_{2\tau}a = 0$. Т.е. $E_{1\tau} = E_{2\tau}$. На границе раздела двух сред касательная составляющая напряженности электрического поля не изменяется.

Граничные условия для вектора электрического смещения D. Выделим на границе раздела объем в виде симметричного цилиндра. По теореме Гаусса:

$$\oint_S \vec{D} d\vec{S} = \int_V \rho dV,$$

где ρ – объемная плотность свободных зарядов. Устремим высоту цилиндра h к нулю, получим:

$$D_{1n}S - D_{2n}S = \rho hS.$$

Т.к.: $\lim_{h \rightarrow 0} \rho h = \sigma$, σ = поверхностная плотность свободных зарядов. В результате: $D_{1n} - D_{2n} = \sigma$. На границе раздела двух сред разность нормальных составляющих электрического смещений равна поверхностной плотности свободных зарядов.

Граничные условия для вектора напряженности магнитного поля H. Выделим на границе прямоугольный замкнутый контур, и используем теорему для полного тока:

$$\oint_L \vec{H} d\vec{l} = \int_S \vec{j} d\vec{S},$$

где j – плотность тока, А/м². Устремим ширину контура к нулю, получим:

$$H_{1\tau}a - H_{2\tau}a = j b a.$$

Т.к.: $\lim_{b \rightarrow 0} j b = j_p$, получим $H_{1\tau} - H_{2\tau} = j_p$, j_p – поверхностная плотность тока (А/м). На границе раздела двух сред разность касательных составляющих напряженности магнитного поля равна поверхностной плотности тока.

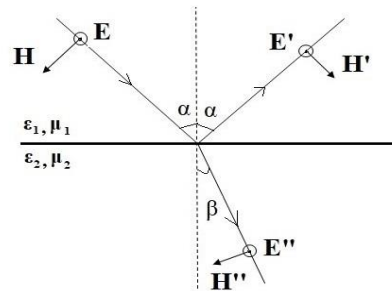


Рисунок 1 – Отражение s-поляризованной волны от границы раздела двух сред

Отражение плоскополяризованной, в плоскости перпендикулярной плоскости падения (*s*-поляризация), электромагнитной волны на границу раздела двух сред представлено на рис. 1. По поверхности протекает ток с поверхностной плотностью j_p . Согласно граничным условиям: для тангенциальных составляющих электрического поля :

$$E_{1\tau} = E_{2\tau}; \quad (1)$$

для тангенциальных составляющих магнитного поля:

$$H_{1\tau} = H_{2\tau} + j_p. \quad (2)$$

Поскольку, напряженность магнитного поля является быстро осциллирующей функцией времени по сравнению с плотностью тока, уравнение (2) возвели в квадрат, и усреднили по времени за период колебаний, в результате получили для амплитуд:

$$H_{1\tau}^2 = H_{2\tau}^2 + 2j_p^2. \quad (3)$$

Согласно, направлениям напряженностей полей в *s*-поляризованной волне, показанным на рис. 1, получили систему уравнений:

$$E + E' = E''; \quad (4)$$

$$(H - H')^2 \cos^2 \alpha = (H'')^2 \cos^2 \beta + 2j_p^2, \quad (5)$$

где напряженности без штрихов относятся к амплитуде падающей волны, с одним штрихом – к отраженной, с двумя – к преломленным волнам. Введя амплитудный коэффициент отражения: $r_{\perp} = \frac{E'}{E}$, и используя связь между E , H в электромагнитной волне, из уравнений (4), (5) получим:

$$r_{\perp} = \frac{-c_2 \pm \sqrt{c_2^2 - c_1(c_1 + 2j_e^2)}}{c_1},$$

где

$$c_1 = \frac{\epsilon_0}{\mu_0} \left\{ \frac{\epsilon_2}{\mu_2} - \frac{\epsilon_1 \mu_1}{\mu_2^2} \sin^2 \alpha - \frac{\epsilon_1}{\mu_1} \cos^2 \alpha \right\};$$

$$c_2 = \frac{\epsilon_0}{\mu_0} \left\{ \frac{\epsilon_2}{\mu_2} - \frac{\epsilon_1 \mu_1}{\mu_2^2} \sin^2 \alpha + \frac{\epsilon_1}{\mu_1} \cos^2 \alpha \right\}; \quad j_e = \frac{j_p}{E}.$$

Коэффициент отражения R_{\perp} интенсивности излучения ($R_{\perp} = r_{\perp}^2$) зависит от поверхностной плотности тока, и также от амплитуды напряженности электрического поля в падающей волне.

Падение плоскополяризованной, в плоскости падения (*p*-поляризация), электромагнитной волны на границу раздела двух сред, с протекающим по ней током, показано на рис. 2. По граничным условиям: для тангенциальных составляющих электрического поля:

$$E_{1\tau} = E_{2\tau}; \quad (6)$$

для тангенциальных составляющих магнитного поля:

$$H_{1\tau} = H_{2\tau} + j_p. \quad (7)$$

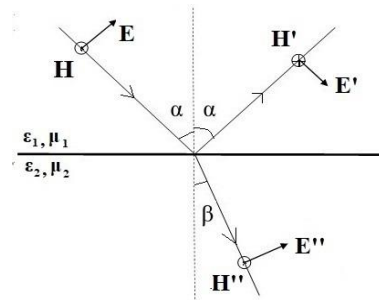


Рисунок 2 – Отражение *p*-поляризованной волны от границы раздела двух сред

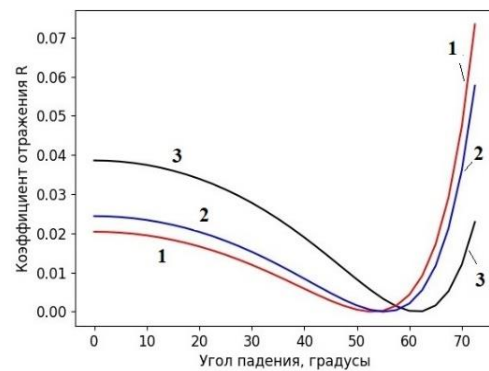


Рисунок 3 – Зависимость коэффициента отражения для *s*-поляризованной волны при $j_e = 0$ (1); $5 \cdot 10^{-4}$ (2); 10^{-3} (3) [$A^2 c^3 \text{кг}^{-1} \text{м}^{-2}$].

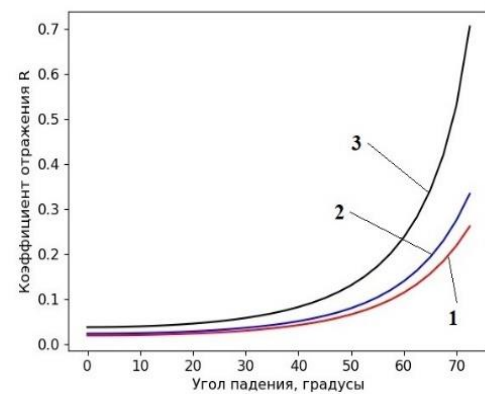


Рисунок 4 – Зависимость коэффициента отражения для *p*-поляризованной волны при $j_e = 0$ (1); $5 \cdot 10^{-4}$ (2); 10^{-3} (3) [$A^2 c^3 \text{кг}^{-1} \text{м}^{-2}$].

В результате преобразований, как для *s*-поляризованной волны, получили для амплитуд:

$$H_{1\tau}^2 = H_{2\tau}^2 + 2j_p^2. \quad (8)$$

Согласно, направлениям напряженностей полей в *p*-поляризованной волне, показанным на рис. 2, получили систему уравнений:

$$(E + E') \cos \alpha = E'' \cos \beta; \quad (9)$$

$$(H - H')^2 = (H'')^2 + 2j_e^2, \quad (10)$$

где напряженности без штрихов относятся к амплитуде падающей волны, с одним штрихом – к отраженной, с двумя – к преломленным волнам. Введя амплитудный коэффициент отражения: $r_{||} = \frac{E'}{E}$, и используя связь между E, H в электромагнитной волне, из уравнений (9), (10) получили

$$r_{||} = \frac{-c_2 \pm \sqrt{c_2^2 - c_1(c_1 + 2j_e^2)}}{c_1},$$

где

$$c_1 = \frac{\varepsilon_0}{\mu_0} \left\{ \frac{\varepsilon_2}{\mu_2} * \frac{\cos^2 \alpha}{1 - \frac{\varepsilon_1 \mu_1}{\varepsilon_2 \mu_2} \sin^2 \alpha} - \frac{\varepsilon_1}{\mu_1} \right\};$$

$$c_2 = \frac{\varepsilon_0}{\mu_0} \left\{ \frac{\varepsilon_2}{\mu_2} * \frac{\cos^2 \alpha}{1 - \frac{\varepsilon_1 \mu_1}{\varepsilon_2 \mu_2} \sin^2 \alpha} + \frac{\varepsilon_1}{\mu_1} \right\}; \quad j_e = \frac{j_p}{E}.$$

Коэффициент отражения R интенсивности излучения равен: $R_{||} = r_{||}^2$.

Результаты расчетов коэффициентов отражения R_{\perp} и $R_{||}$ от угла падения α при различных значениях эффективной поверхностной плотности тока j_e на границе воздух-вода, представлены на рисунках 3 и 4. Они показывают, что коэффициент отражения для s -поляризованной волны R_{\perp} с увеличением j_e возрастает при всех углах падения. Коэффициент отражения для p -поляризованной волны $R_{||}$ с увеличением j_e возрастает при углах падения меньших угла Брюстера, и уменьшается при углах падения меньших угла Брюстера.

УДК 537.874

ГИБКИЕ РАДИОПОГЛОЩАЮЩИЕ СТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ ФОЛЬГИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Бойправ О.В., Богущ Н.В., Лыньков Л.М.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Предложена методика изготовления структур, содержащих в своем составе фольгированные материалы и характеризующихся гибкостью и низкой массой на единицу площади. Выполнены измерения значений коэффициентов отражения и передачи электромагнитного излучения в диапазоне частот 0,7–17,0 ГГц структур, изготовленных в соответствии с предложенной методикой. С использованием результатов выполненных измерений рассчитаны значения коэффициента поглощения электромагнитного излучения таких структур. На основании анализа рассчитанных значений установлено, что структуры, изготовленные в соответствии с предложенной методикой, характеризуются радиопоглощающими свойствами. Эти структуры рекомендованы для использования в целях изготовления перегородок типа «занавес», предназначенных для функционального зонирования помещений, направленного на электромагнитную развязку расположенных внутри этих помещений радиоэлектронных приборов.

Ключевые слова: воздухопроницаемость, гибкость, радиопоглощающая структура, фольгированный материал.

FLEXIBLE RADIO-ABSORBING STRUCTURES BASED ON FOILED MATERIALS

Boiprav O., Bogush N., Lynkou L.

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
Minsk, Belarus*

Abstract. The technique for the making of structures containing foiled materials and characterized by flexibility and low mass per unit area has been proposed. The measurements of the electromagnetic radiation reflection and transmission coefficients values in the frequency range 0.7–17.0 GHz of the structures made in accordance with the proposed method have been performed. Using the measurements results, the electromagnetic radiation absorption coefficient values of such structures have been calculated. Based on the analysis of the calculated values, it was found that the structures made in accordance with the proposed technique are characterized by radio-absorbing properties. These structures are recommended for use in the manufacture of partitions of the “curtain” type, intended for functional zoning of premises, aimed at the electromagnetic decoupling of the electronic devices located inside these premises.

Key words: air permeability, flexibility, radio-absorbing structure, foiled material.

*Адрес для переписки: Бойправ О.В., ул. П. Бровки, 6, г. Минск 220013, Республика Беларусь
e-mail: smu@bsuir.by*

Обеспечение электромагнитной развязки радиоэлектронных приборов – одна из ключевых

задач, которую необходимо решать в целях создания условий для корректной работы этих