

УДК 537.876

ПОВЕРХНОСТНЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ НА ГРАНИЦЕ ДВУХ СРЕД

¹Кудусова И.А., Сейтқали М.Е.

Карагандинский университет имени академика Е.А. Букетова, г. Караганда, Казахстан

sarinzhipova.meruert@mail.ru

Поверхностные электромагнитные волны - это направленное электромагнитное излучение, которое накапливается у поверхностной границы двух сред и распространяется вдоль этой поверхности. При определенных условиях поверхностные электромагнитные волны могут возникать в волноводах. Характеристики поверхностных электромагнитных волн часто не включаются в общие курсы электродинамики, поэтому в этой статье мы рассмотрим более подробно наиболее важные характеристики поверхностных электромагнитных волн.

Поверхностные волны не возникают ни на всякой поверхности, они возникают на границе двух сред, одна из которых оптически активна. Рассмотрим монохроматическую электромагнитную волну на границе между двумя средами с комплексными диэлектрическими проводниками. ε_1 и ε_2 .

$$\left\{ \begin{array}{l} E \\ H \end{array} \right\} \sim \exp(-i\omega t) \quad (1)$$

где, E – напряженность электрического поля, B/m ; H – напряженность магнитного поля A/m ; ω – частота, $Гц$; t – время, c .

Подставим зависимость (1) в уравнения Максвелла:

$$\text{rot}E = -\frac{\partial B}{\partial t}, \text{rot}H = \frac{\partial D}{\partial t}$$

здесь, B – магнитная индукция, $Тл$; D – электрическая индукция, $Кл/м^2$. Получим стандартное уравнение, описывающее монохроматическую электромагнитную волну для квазинейтральной среды $\text{div}E = 0$:

$$\Delta \left\{ \begin{array}{l} E \\ H \end{array} \right\} + \varepsilon\mu \frac{\omega^2}{c^2} \left\{ \begin{array}{l} E \\ H \end{array} \right\} = 0 \quad (2)$$

где, ε – диэлектрическая проницаемость среды; μ – магнитная проницаемость среды; c – скорость электромагнитной волны в вакууме.

Одним из решений этого уравнения является свободная электромагнитная волна, векторы E и H которой перпендикулярны волновому вектору k . Но есть и другие решения, характеризующие поверхностные электромагнитные волны, и мы их рассмотрим.

Направим ось x в направлении волны, распространяющейся вдоль границы, а ось z перпендикулярно границе между средами (рисунок 1 а). Считая, что характеристики электромагнитного поля не зависят от координаты y :

$$\left\{ \begin{array}{l} E \\ H \end{array} \right\} \sim \exp[k_s x - \omega t] \quad (3)$$

где, k_s – волновой вектор, направленный по координате x , $k_s = k_x$

Подставив (3) в (2) получим:

$$\frac{\partial^2 E}{\partial z^2} - \left(k_s^2 - \varepsilon\mu \frac{\omega^2}{c^2} \right) E = 0 \quad (4)$$

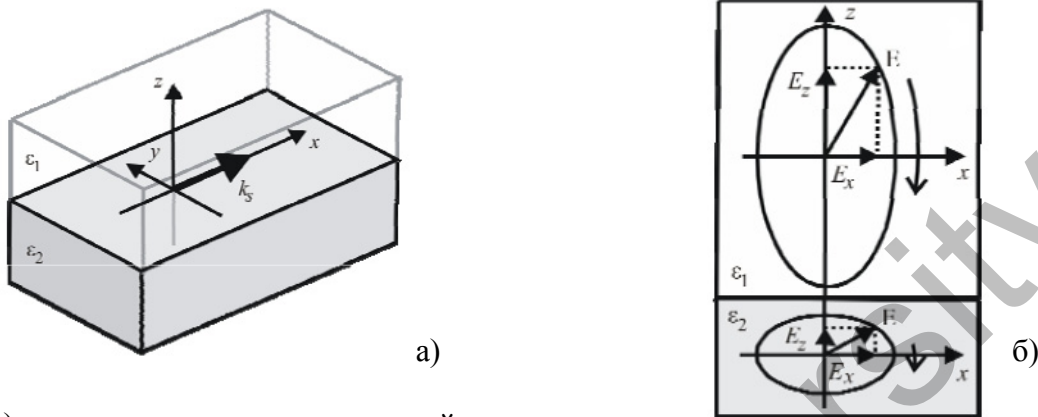
Этот вектор экспоненциально совпадает при удалении от границ среды (экспоненциально растущие компоненты волны не учитываются):

$$E = E_0 \exp(\mp k_{1,2} z) \exp(ik_s x - i\omega t) \quad (5)$$

здесь

$$k_{1,2} = \left(k_s^2 - \varepsilon_{1,2} \mu_{1,2} \frac{\omega^2}{c^2} \right) \quad (6)$$

это составляющая волнового вектора, направленная к поверхности нормально



а) система координат для плоской системы

б) диаграммы вектора электрического поля в первой и второй средах

Рисунок 1. – Схема формирования поверхностных электромагнитных волн

Волновой вектор k_s одинаков в обеих средах в соответствии с граничными условиями. Следовательно, вектор магнитного поля волны должен быть одинаковым для обеих сред на границе. Это требование может быть выполнено, только если вектор H лежит в плоскости, перпендикулярной вектору k_s , и ориентирован вдоль оси.

Вектор E , согласно формуле (5), состоит из x - и z -компонент. Соответственно, поверхностные электромагнитные волны могут существовать только как часть продольной ТМ-волны.

Подставляя решение формулы (5) в уравнение Максвелла, получаем следующую систему уравнений:

$$\frac{i\omega}{c} \varepsilon_{1,2} E_x = \mp k_{1,2} H_y \quad (7) \quad -\frac{i\omega}{c} = \varepsilon_{1,2} E_y = 0 \quad (8) \quad -\frac{i\omega}{c} \varepsilon_{1,2} E_z = ik_s H_y \quad (9)$$

Учитывая граничные условия $H_{y1} = H_{y2} = H_y$, $E_{x1} = E_{x2} = E_x$, для x -компонент получим:

$$\frac{i\omega}{c} \varepsilon_{1,2} E_x = \mp k_{1,2} H \quad (10)$$

Поскольку $\text{Re}(k_{1,2}) > 1$ по определению (выражение (5)) это решение справедливо только для сред, характеризующиеся следующим соотношением:

$$\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = -\frac{k_1}{k_2} \quad (11)$$

Согласно этому условию, что для возникновения поверхностной волны определенные части диэлектрической проницаемости среды должны иметь разные знаки или значения (в общем случае k и ε являются комплексными величинами). При $\text{Re}(k_{1,2}) < 0$ среда является оптически активной (в нашем случае это вторая среда).

Поверхностные волны в отдельных случаях возникают на границе металл-диэлектрик для частот выше оптического диапазона. Поверхностные электромагнитные волны также возникают на границе двух диэлектриков.

Подставив (11) в (6) получим

$$k_1 = \sqrt{\frac{\varepsilon_1^2 (\mu_2 \varepsilon_2 - \mu_1 \varepsilon_1)}{\varepsilon_1^2 - \varepsilon_2^2}} k_s \quad (12)$$

Для немагнитных сред ($\mu_1 = \mu_2 = 1$) волновые вектора, нормальных к поверхности, имеют вид:

$$k_1 = \sqrt{-\frac{\varepsilon_1^2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}} k_s \quad (13)$$

$$k_2 = \sqrt{-\frac{\varepsilon_2^2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}} k_s \quad (14)$$

Следовательно, для выполнения соотношения (11) диэлектрическая проницаемость должна удовлетворять следующим условиям:

$$\varepsilon_2 < 0 \text{ или } |\varepsilon_2| > \varepsilon_1$$

Нетрудно получить дисперсионное соотношение поверхностных волн из уравнений (6) и (11):

$$k_s = n(\omega) \frac{\omega}{c} \quad (15)$$

здесь $n(\omega) = \sqrt{\frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}}$ – комплексный показатель преломления поверхностных электромагнитных волн.

Используя формулу (15), запишем выражения (13) и (14) следующим образом:

$$k_1 = \sqrt{-\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}} k_s \quad (16)$$

$$k_2 = \sqrt{-\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}} k_s \quad (17)$$

По формулам (16) и (17) можно найти составляющую вектора электрического поля, на граничащем участке комплексные амплитуды которой равны:

$$E_x = E_{x1} = E_{x2} = iH \sqrt{\frac{1}{-(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)}} \quad (18)$$

$$E_{z1} = -H \sqrt{\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1 (\varepsilon_1 + \varepsilon_2)}} \quad (19)$$

$$E_{z2} = -H \sqrt{\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2 (\varepsilon_1 + \varepsilon_2)}} \quad (20)$$

Из этого видно, что E_x относительно H смещен по фазе на 90° . Из формул (18) - (20):

$$|E_{z1}| > |E_x| > |E_{z2}|$$

Следовательно, если мы запишем координаты $x = X$, тогда вектор $E(X, t)$ будет вращаться по часовой стрелке в обеих средах и описывать эллипс, как показано на рисунке 1 б. Траектория вектора, описываемого в оптически активной среде, сужается, а в положительной - растягивается.

Литература:

1 Башкуев Ю. Б., Хаптанов В. Б., Дембелов М. Г. Экспериментальное доказательство существования поверхностной электромагнитной волны. / Ю. Б. Башкуев // Журнал технической физики. – 2010. – Т. 3. – №3. – 88-95 с.

2 Князев Б. А., Кузьмин А. В. Поверхностные электромагнитные волны: основные свойства, формирование, транспортировка. / Б. А. Князев // Журнал «Вестник НГУ». – 2003. – Т. 3. – №2. – 99-106 с.

3 Князев Б. А., Кузьмин А. В. Поверхностные электромагнитные волны: от видимого диапазона до микроволн. / Б.А. Князев // Журнал «Вестник НГУ». – 2010. – Т. 2. – №1. – 95-112 с.