

# TOTAL INTERNAL REFLECTION ON THE BOUNDARY OF FERRITE - DIELECTRIC

Glushchenko A.<sup>1</sup>, Glushchenko E.<sup>2</sup>, Bondarenko A.<sup>3</sup>, Muzicantov D.<sup>4</sup>

## ПОЛНОЕ ВНУТРЕННЕЕ ОТРАЖЕНИЕ НА ГРАНИЦЕ ФЕРРИТ - ДИЭЛЕКТРИК

Глущенко А. Г.<sup>1</sup>, Глущенко Е. П.<sup>2</sup>, Бондаренко А. И.<sup>3</sup>, Музыкантов Д. В.<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Глущенко Александр Григорьевич / Glushchenko Alexander - доктор физико-математических наук, профессор;

<sup>2</sup>Глущенко Евгения Павловна / Glushchenko Evgenija - кандидат физико-математических наук, доцент;

<sup>3</sup>Бондаренко Артем Игоревич / Bondarenko Artem – студент;

<sup>4</sup>Музыкантов Дмитрий Валерьевич / Muzicantov Dmitry – студент,

кафедра физики, факультет базового телекоммуникационного образования,

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, г. Самара

**Аннотация:** рассмотрены особенности эффекта полного внутреннего отражения на границе раздела феррит – диэлектрик. Показано, что эффект полного внутреннего отражения на границе раздела феррит – диэлектрик для волн, падающих с разных сторон, наблюдается в разных диапазонах частот и разных полях намагничивания. Эффект полного внутреннего отражения на границе феррит - диэлектрик наблюдается в областях ниже и выше ферромагнитного резонанса, на границе диэлектрик - феррит – вблизи области поперечного ферромагнитного резонанса. Представлены результаты расчета зависимости угла полного внутреннего отражения от величины внешнего магнитного поля.

**Abstract:** the peculiarities of the effect of total internal reflection at the interface between the ferrite - dielectric. It is shown that the effect of total internal reflection at the interface between the ferrite - dielectric for waves incident from different angles observed in different frequency ranges and different fields of magnetization. The effect of total internal reflection at the boundary of ferrite - dielectric is observed in the areas above and below the ferromagnetic resonance on a dielectric - ferrite - near the cross of the ferromagnetic resonance. The results of the calculation according to the angle of total internal reflection from the external magnetic field.

**Ключевые слова:** феррит, диэлектрик, эффект полного внутреннего отражения.

**Keywords:** ferrite, dielectric, the effect of total internal reflection.

Введение. При переходе волн из более плотной среды в менее плотную среду может наблюдаться эффект полного внутреннего отражения [1-4], получивший широкое применение в построении оптических линий связи. Эффект заключается в полном отражении падающих на границу раздела сред волн при условии, что угол падения превосходит некоторый критический угол, называемый предельным углом полного внутреннего отражения [2]. Этот эффект объясняет многие оптические и акустические явления, наблюдающиеся в природе и является основой работы волоконных оптических линий связи. Угол полного внутреннего отражения на границе раздела сред определяется отношением скоростей волн в граничащих средах и его дисперсия обычно не рассматривается. Однако в общем случае дисперсионные свойства граничащих сред в определенных условиях существенно влияют на характер эффекта [3]. В настоящей работе рассматриваются особенности угла полного внутреннего отражения на границе раздела феррит – диэлектрик, связанные с дисперсионными свойствами ферритов, широко применяемых в магнитооптике. Показано, что эффект полного внутреннего отражения зависит от внешнего поля подмагничивания и направления падения волн.

1. Рассмотрим сначала падение Н волны в области подмагниченного вдоль оси Oz феррита (характеризуемого изотропной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_f$  и тензором магнитной

проницаемости  $\|\mu\|$  [1]:

$$\|\mu\| = \begin{bmatrix} \mu & -i\mu_a & 0 \\ i\mu_a & \mu & 0 \\ 0 & 0 & \mu_{||} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

с компонентами тензора:  $\mu = 1 - \frac{\omega_H \omega_M}{\omega^2 - \omega_H^2}$ ,  $\mu_a = \frac{\omega \omega_M}{\omega^2 - \omega_H^2}$ ,  $\mu_z = 1$ ,  $\omega_M = \gamma M_S$ ,

$M_S$  – величина намагниченности,  $\omega_H = \gamma H_0 = \frac{ge}{2mc} H_0$  – частота резонанса,  $H_0$  – величина поля подмагничивания,  $g \approx 2$  – фактор спектроскопического расщепления) под углом  $\theta$  на границу раздела (рис.1a) с изотропным диэлектриком с параметрами диэлектрической проницаемости  $\epsilon_2$  и магнитной проницаемости (для диэлектрика  $\mu_2 = 1$ ).

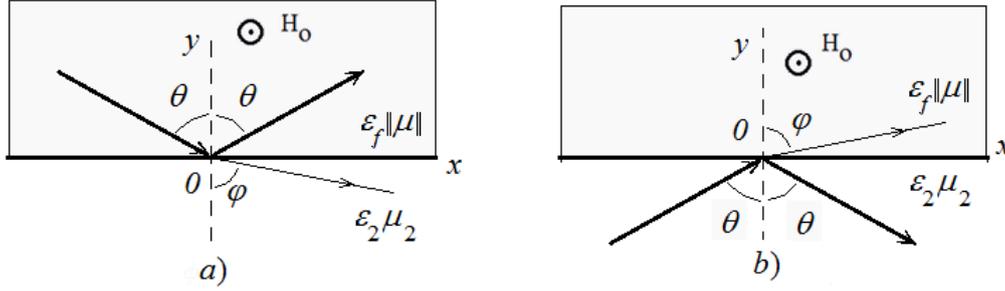


Рис. 1. Прохождение луча через границу феррит-диэлектрик

Из уравнений Максвелла следует, что волновые уравнения  $H(H_x, H_y, E_z)$  волн для компонент  $E_z$  в подмагниченном вдоль оси  $Oz$  феррите и в диэлектрике имеют вид:

$$(2) \quad \frac{\partial^2 E_{z1}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_{z1}}{\partial y^2} + k_0^2 \epsilon_f \mu_{\perp} E_{z1} = 0, \quad \frac{\partial^2 E_{z2}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_{z2}}{\partial y^2} + k_0^2 \epsilon_2 \mu_2 E_{z2} = 0,$$

где  $\mu_{\perp} = \frac{\mu^2 - \mu_a^2}{\mu}$  – поперечная магнитная проницаемость. Учет граничных условий в плоскости

раздела сред  $E_{z1}(y=0) = E_{z2}(y=0)$  приводит к обобщенному соотношению Снеллиуса, связывающему углы падения  $\theta$ , преломления  $\varphi$  и параметры граничащих сред, которое (рис. 1a) можно представить в виде:

$$\frac{\sin \theta}{\sin \varphi} = \frac{\sqrt{\epsilon_2 \mu_2}}{\sqrt{\epsilon_f \mu_{\perp}}} \quad \text{или} \quad \frac{\sin \theta}{\sin \varphi} = \frac{\sqrt{\epsilon_2 \mu_2 \mu}}{\sqrt{\epsilon_f (\mu^2 - \mu_a^2)}}$$

Полное внутреннее отражение наблюдается при  $\varphi \rightarrow \pi/2$ . В этом случае угол полного внутреннего отражения для границы феррит-диэлектрик определяется соотношением:

$$\theta_{crfd} = \arcsin \left( \sqrt{\frac{\epsilon_2 \mu_2}{\epsilon_f \mu_{\perp}}} \right) = \arcsin \sqrt{\frac{\epsilon_2 \mu_2}{\epsilon_f} \frac{\omega^2 - (\omega_H + \omega_M) \omega_H}{\omega^2 - (\omega_H + \omega_M)^2}}, \quad (2)$$

$$\text{где } \mu_{\perp} = \frac{\mu^2 - \mu_a^2}{\mu} = \frac{\omega^2 - (\omega_H + \omega_M)^2}{\omega^2 - (\omega_H + \omega_M)\omega_H} \quad [1]. \text{ Полное внутреннее отражение наблюдается}$$

при условии  $\varepsilon_f \mu_{\perp} > \varepsilon_2 \mu_2$  в области прозрачности феррита (в областях частот вне области ферромагнитного резонанса (ФМР)  $\omega < \sqrt{\omega_H(\omega_H + \omega_M)}$ ,  $\omega > \omega_H + \omega_M$  (рис. 2)).

2. Если волна падает из диэлектрика на границу раздела с ферритом (рис. 1б) угол полного внутреннего отражения определяется в виде:

$$\theta_{crdf} = \arcsin\left(\sqrt{\frac{\varepsilon_1 \mu_{\perp}}{\varepsilon_2 \mu_2}}\right) = \arcsin\sqrt{\frac{\varepsilon_f}{\varepsilon_2 \mu_2} \frac{\omega^2 - (\omega_H + \omega_M)^2}{\omega^2 - (\omega_H + \omega_M)\omega_H}} \quad (3)$$

и полное внутреннее отражение наблюдается при выполнении соотношения  $\varepsilon_2 \mu_2 > \varepsilon_f \mu_{\perp}$  (при  $\mu_{\perp} > 0$ ) в другой области частот (или полей подмагничивания). На рис. 2 показаны значения угла полного внутреннего отражения для одной и той же границы раздела сред феррит-диэлектрик для волн, падающих на границу со стороны феррита (кривые 1, 3) и волн, падающих на границу раздела с другой стороны - со стороны диэлектрика (кривые 2, 4) при разных соотношениях диэлектрических постоянных граничащих сред  $\varepsilon_f / \varepsilon_2$ .

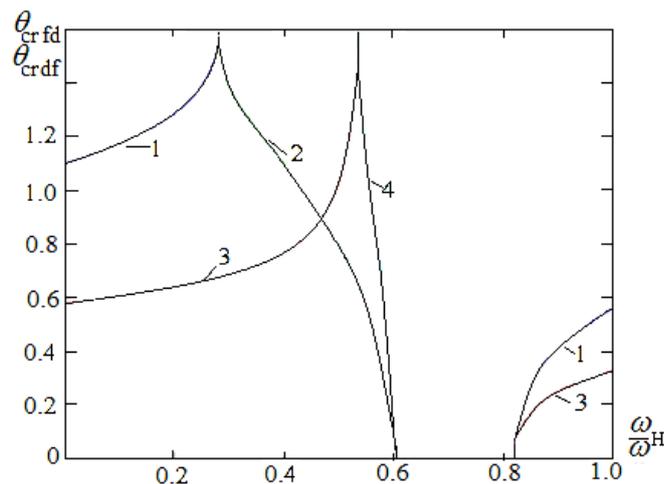


Рис. 2. Зависимость углов полного внутреннего отражения на границе феррит-диэлектрик (1-  $\varepsilon_f / \varepsilon_2 = 1,5$ , 3-  $\varepsilon_f / \varepsilon_2 = 4$ ) и на границе диэлектрик-феррит (2-  $\varepsilon_f / \varepsilon_2 = 1,5$ , 4-  $\varepsilon_f / \varepsilon_2 = 4$ ) от параметра  $\omega_H / \omega$

Выводы. Эффект полного внутреннего отражения в дисперсных средах имеет ярко выраженную частотную зависимость, области отсечки. На границе феррит-диэлектрик при отражении во взаимно противоположных направлениях эффект ПВО проявляется в различных полях подмагничивания (при заданной частоте) или в различных диапазонах частот (при фиксированном поле подмагничивания).

#### Литература

1. Гуревич А. Г. Ферриты на СВЧ.- М.: Физматгиз, 1960. - 720 с.
2. Волоконно-оптические датчики. Под ред. Э. Удда 2008. -526 с.
3. Глуценко А. Г., Глуценко Е. П., Жуков С. В., Агаповичева А. Эффект полного внутреннего отражения на границе намагниченной плазмы // Успехи современной науки и образования, 2016. № 12. Т. 8. С. 114-116.
4. Глуценко А. Г., Глуценко Е. П., Устинова Е. С. Невзаимные волновые процессы // European research, 2015. № 10 (11). С. 9.