

# Модуль 3. ПЛОСКИЕ ЭМВ В НЕОГРАНИЧЕННЫХ СРЕДАХ

## Лекция №8. Электромагнитные волны в гиротропных средах

1. Физические явления, возникающие в ферритах при наличии подмагничивания. Резонансное поглощение
2. Особенности распространения ЭМВ в продольно намагниченном феррите.
3. Особенности распространения ЭМВ в поперечно намагниченном феррите.

# 1 Физические явления, возникающие в ферритах при наличии подмагничивания. Резонансное поглощение

*Ферриты*, относящиеся к классу ферримагнетиков, представляют собой соединения оксида железа с оксидами других металлов и обладают высоким большим (до  $10^7 \times 10^8$  Ом·м) электрическим сопротивлением.

Электродинамические свойства ферритов зависят от частоты, но изменяются в различных пределах.

В диапазоне СВЧ на сантиметровых волнах величина относительной магнитной проницаемости приближенно равна единице.

Рабочий диапазон частот ферритов - от 20МГц до 150ГГц. Для работы на разных частотах используются различные материалы.

**В ненамагниченном состоянии ферриты - обычный диэлектрик.**

**При воздействии постоянного магнитного поля возникает прецессия** вокруг исходного положения оси вращения электрона.

**Частота прецессии (частота гиромагнитного резонанса)  $\omega_m$**  зависит от

- величины постоянного магнитного поля  $H_0$  ;
- **гиромагнитного отношения**  $\gamma = -2.21 \cdot 10^5$  [Гц/(А·м)], связывающего заряд и массу электрона:

$$\omega_m = |\gamma| H_0$$

и соответствует угловой скорости вращения электрона.

**При воздействии еще и переменного высокочастотного поля**

$$\vec{H} = H_0 \exp(i\omega t)$$

ось вращения электрона будет отклоняться, если переменное магнитное поле будет действовать перпендикулярно оси вращения.

Без подмагничивания	Воздействие поля подмагничивания $\vec{H}_=$	Воздействие поля подмагничивания $\vec{H}_=$ и высокочастотного поля $\vec{H}_\sim = H_0 \exp(i\omega t)$
Обычный диэлектрик	<p><b>Гиромагнитный резонанс</b> на частоте <math>\omega_m</math></p> <p><b>Условие:</b> <math>\omega_m =</math> угловая скорость вращения электрона</p>	<p><b>Ферромагнитный резонанс</b></p> <p><b>Условие:</b> <math>\omega = \omega_m =</math> угловая скорость вращения электрона</p> <p>Энергия, подводимая от высокочастотного магнитного поля, рассеивается в виде тепла в кристаллической решетке феррита, т.е. поглощается. Система как резонансный контур в теории цепей.</p>

**Математическое описание** явлений в феррите отражается в тензорной записи магнитной проницаемости:

$$\underline{\mu} = \begin{pmatrix} \mu_x & -ia & 0 \\ ia & \mu_x & 0 \\ 0 & 0 & \mu_0 \end{pmatrix}$$

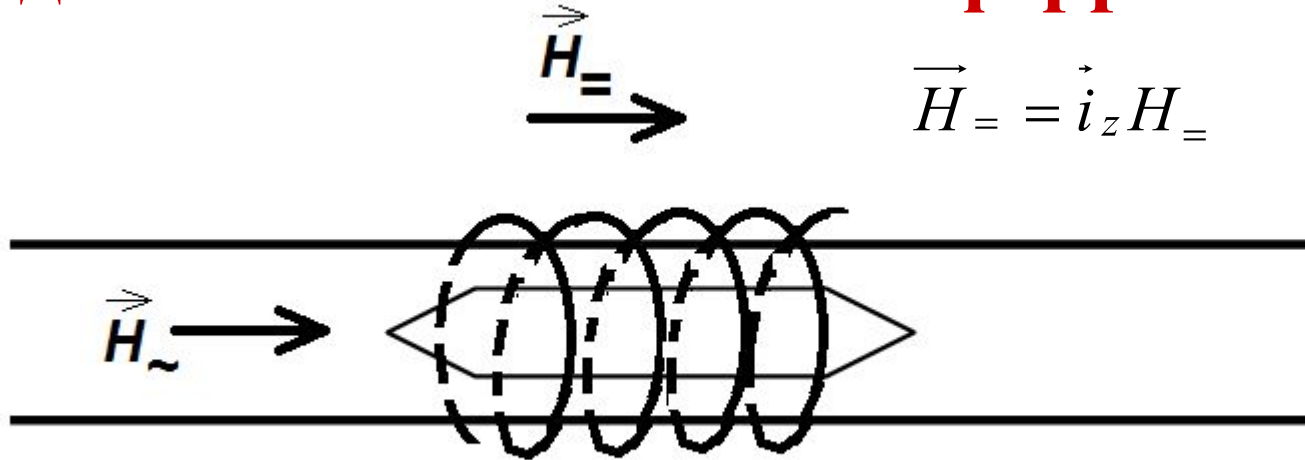
где 
$$\mu_x = \mu_0 \left( 1 - \frac{\omega_M \omega_0}{\omega^2 - \omega_M^2} \right), \quad a = \mu_0 \frac{\omega_M \omega_0}{\omega^2 - \omega_M^2},$$

$$\omega_0 = |\gamma| \mu_0 \chi^M H_{=} = |\gamma| \mu_0 (\mu - 1) H_{=},$$

$\chi^M$  - магнитная восприимчивость среды.

Ферромагнитный резонанс возникает, когда  $\omega_M = \pm \omega$  (в нуль обращается знаменатель).

## 2 Особенности распространения ЭМВ в продольно намагниченном феррите



В рассматриваемом случае  $\partial / \partial x = \partial / \partial y \equiv 0$ ,  $E_z = 0$ ,  $H_z = 0$   
Уравнения Максвелла принимают вид:

$$\frac{\partial H_y}{\partial z} = -i\omega\epsilon E_x$$

$$\frac{\partial H_x}{\partial z} = i\omega\epsilon E_y$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial z} = i\omega(\mu_x H_x - iaH_y)$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial z} = -i\omega(\mu_x H_y + iaH_x)$$

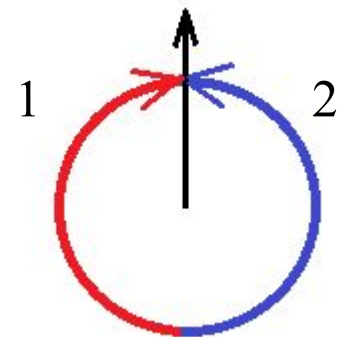
## Решение уравнений Максвелла:

- волновое число  $k_{1,2} = \omega \sqrt{\varepsilon(\mu_x \pm a)}$  ;

- волновое сопротивление среды  $Z_{1,2} = \sqrt{\frac{\mu_x \pm a}{\varepsilon}}$ .

Индекс «1» соответствует волне круговой поляризации с левым направлением вращения, индекс «2» – волне с правым направлением вращения.

Таким образом, волна линейной поляризации представляется в виде суперпозиции двух волн круговой поляризации.



## *Анализ структуры поля*

### *1. Изменение поляризации волны.*

Если обе волны круговой поляризации имеют равные амплитуды на входе, то компоненты суммарного ЭМП на выходе обладают следующими свойствами:

- суммарная компонента вектора напряженности *магнитного поля* сохраняют поляризацию исходной волны;
- *электрическое поле* суммарной волны становится эллиптически поляризованным, поскольку волновые сопротивления волн разные).

### *2. Эффект Фарадея.*

Угол наклона вектора  $\vec{H}$  :  $\theta = \operatorname{arctg}\left(\frac{H_y}{H_x}\right) = \theta' z$

где  $\theta' = \frac{k_1 - k_2}{2}$  - постоянная Фарадея.

Явление поворота поляризационного эллипса в зависимости от пройденного волной расстояния называется ***эффектом Фарадея***.

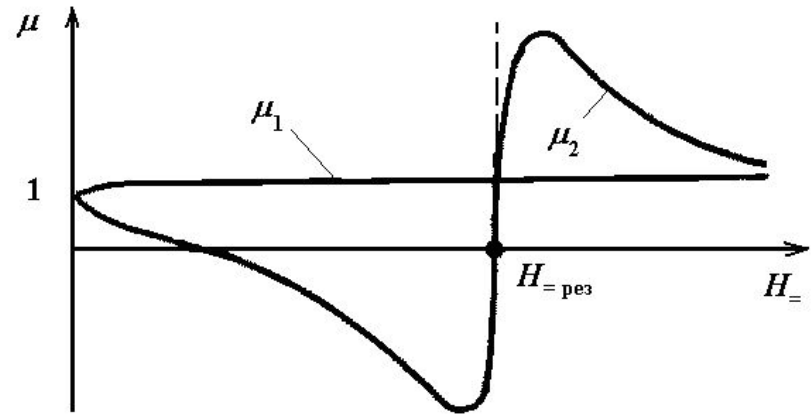
***Среды***, в которых происходит данный эффект, называются ***гиротропными***.



### 3. Различие фазовых скоростей волн с левым и правым направлением вращения.

где 
$$\mu_{1,2} = \mu_0 \left( 1 + \frac{\omega_0}{\omega_m \pm \omega} \right)$$

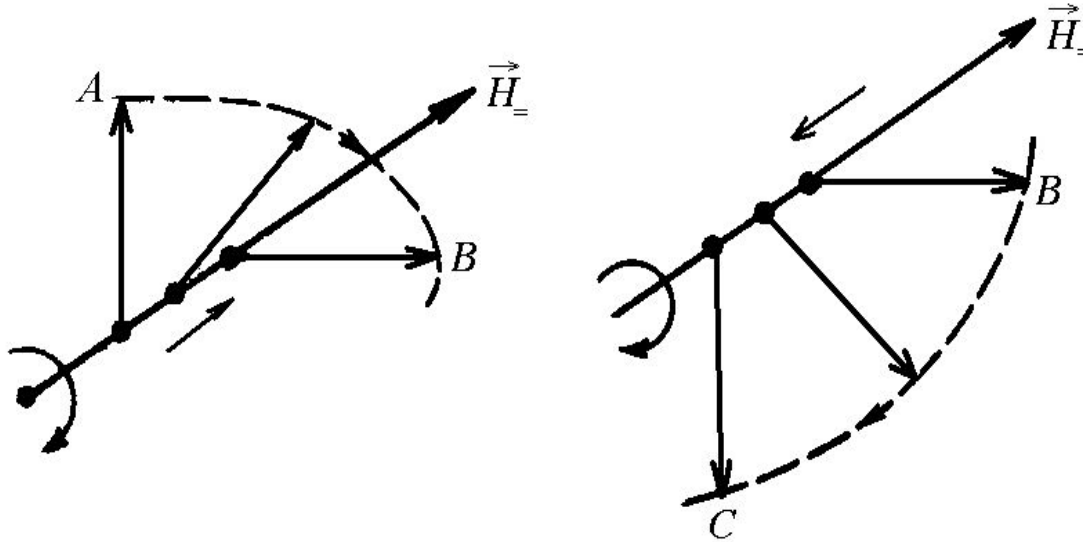
$$v_{\phi 1,2} = \frac{\omega}{k_{1,2}} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \mu_{1,2}}}$$



#### Следствие различия фазовых скоростей волн:

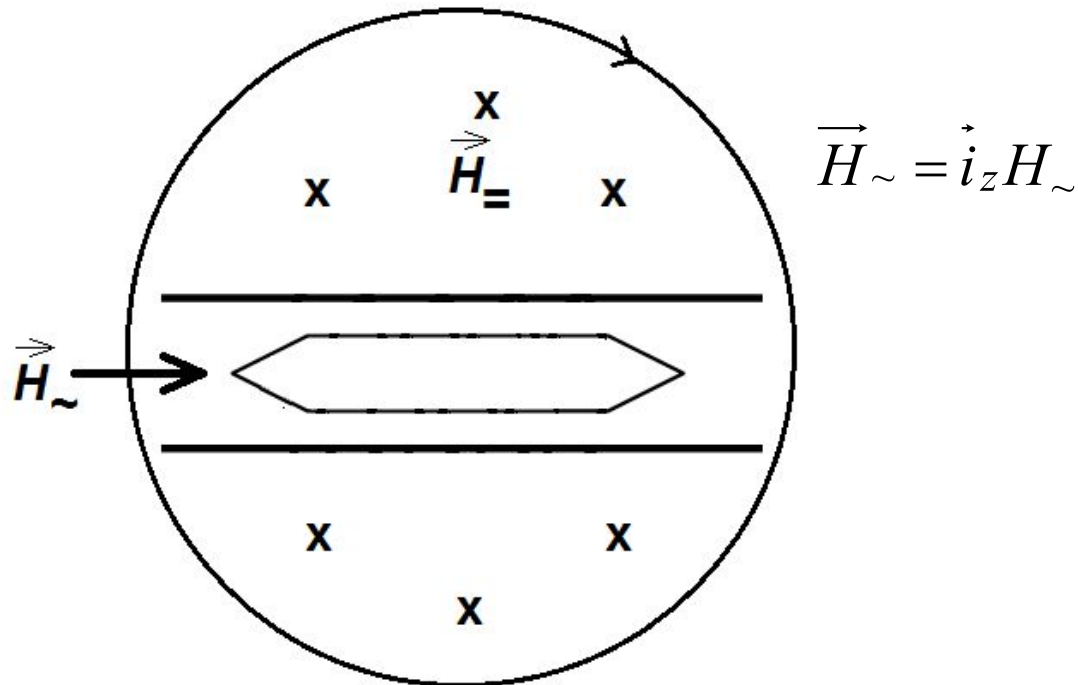
- 1) резонансное поглощение при ферромагнитном резонансе испытывает волна правого направления вращения, индекс «2» (ее фазовая обращается в нуль);
- 2) изменением величины  $\omega_0$ , т.е. постоянного магнитного поля, можно управлять параметрами феррита;
- 3) в ферритах конечных размеров в поперечном сечении наблюдается **эффект смещения поля** (при отрицательных значениях  $\mu_2$  волновое число  $k_2$  становится комплексным. В результате имеем волны с экспоненциально убывающей амплитудой вследствие эффекта вытеснения поля средой).

#### 4. Феррит – невзаимная среда.



Вектор при движении волны в прямом направлении поворачивается в положение  $B$ , а при обратном – не возвращается в  $A$ , а, продолжая вращаться в ту же сторону, приходит в положение  $C$ .

# 3 Особенности распространения ЭМВ в поперечно намагниченном феррите



Уравнения Максвелла принимают вид:

*обыкновенная волна*

$$\begin{cases} E_{0x} = 0, \\ kH_{0z} = \omega \varepsilon E_{0y}, \\ kH_{0y} = -\omega \varepsilon E_{0z}, \end{cases}$$

*необыкновенная волна*

$$\begin{cases} \mu_x H_{0x} = iaH_{0y}, \\ -kE_{0z} = \omega (iaH_{0x} + \mu_x H_{0y}), \\ kE_{0y} = \omega \mu H_{0z}. \end{cases}$$

**Анализ структуры поля**  
**Различие фазовых скоростей**  
**- для обыкновенной волны**

$$\mu_{об} = \mu_a$$

$$v_{ф об} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon\mu}}$$

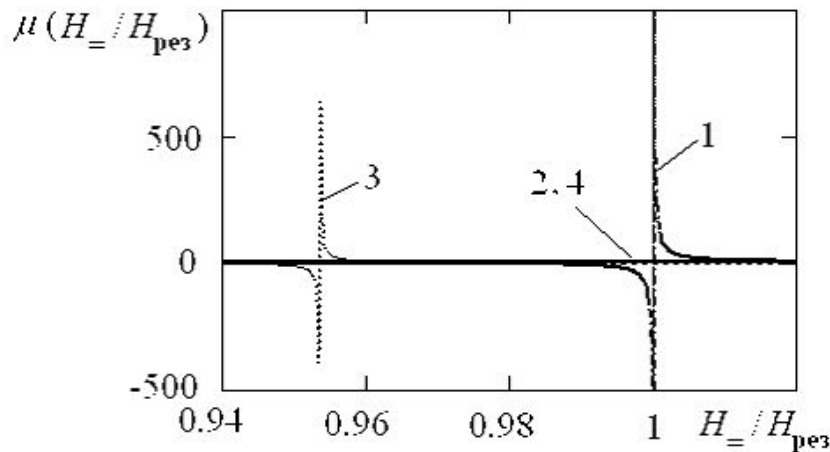
**- для необыкновенной волны:**  
**Следствия:**

$$\mu_{\perp} = \frac{\mu_x^2 - a^2}{\mu_x},$$

$$v_{ф необ} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon\mu_{\perp}}}$$

Возможность создания **поперечного резонанса** для необыкновенной волны при

$$\mu_x = 0 \quad \mu_{\perp} \rightarrow \infty \quad v_{необ} = 0$$



Условия возбуждения поперечного и ферромагнитного резонансов:

1, 2 -  $\mu_2$  ;

3 -  $\mu_{\perp}$  ;

4 -  $\mu_1$

2) Изменение поляризации суммарной волны при изменении пройденного расстояния (**эффект Коттона-Мутона**):

$$\psi = (k_{необ} - k_{об})x$$