

# **СПІН-ХВИЛЬОВА ЕЛЕКТРОНІКА**

**№1**

**Основні уявлення та  
рівняння**

- Спін-хвильова електроніка, як один з напрямків функціональної електроніки, базується на використанні елементарних збуджень феро-, фері- та антиферомагнетикі в, які пов'язані з прецесією вектора намагнічування.

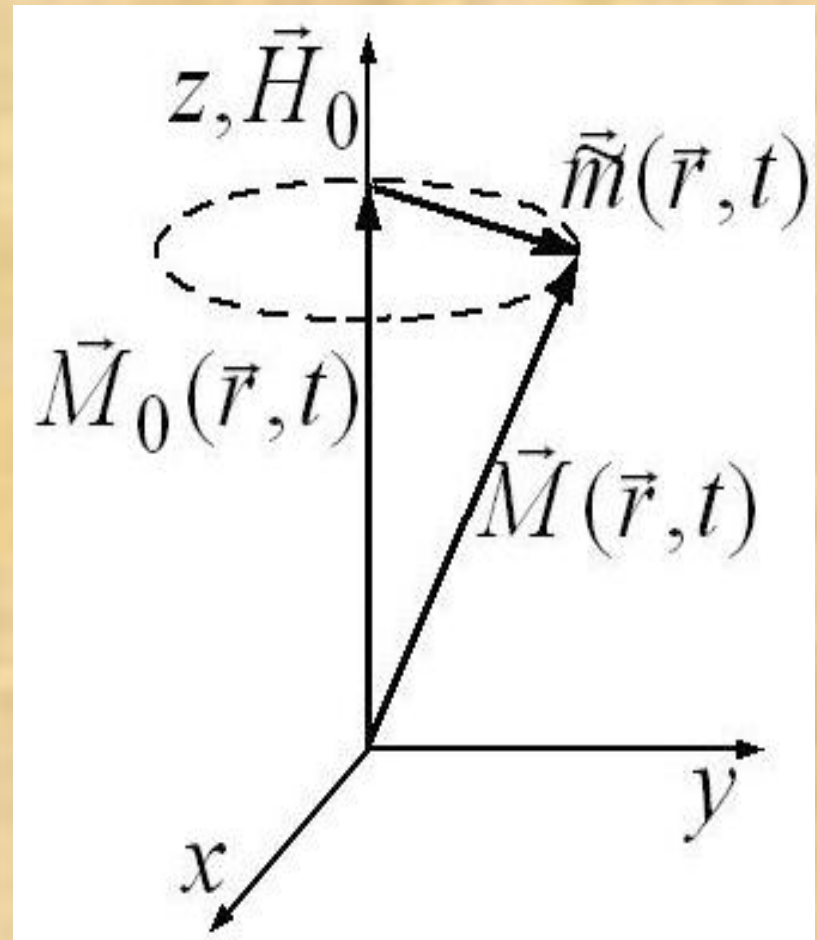


Рис.1.1. Система координат для опису прецесії вектора намагніченості

Взаємодії, що забезпечують  
існування спінових хвиль

Обмінна взаємодія

Диполь-дипольна  
взаємодія

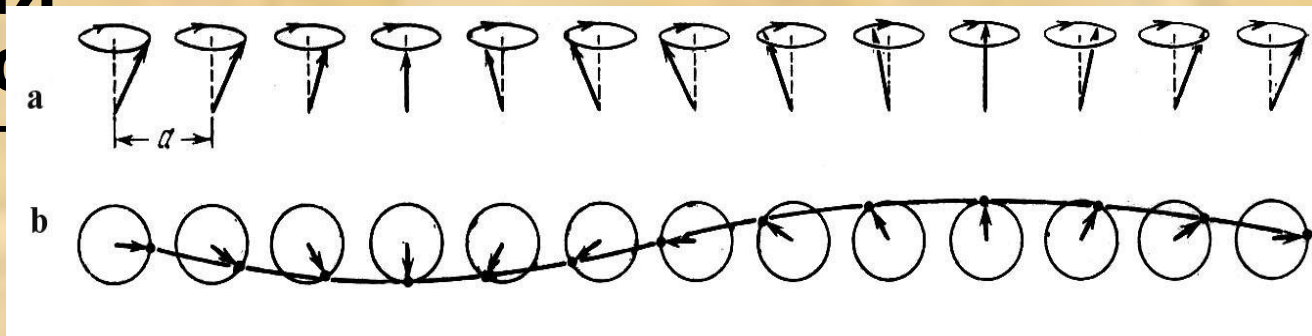
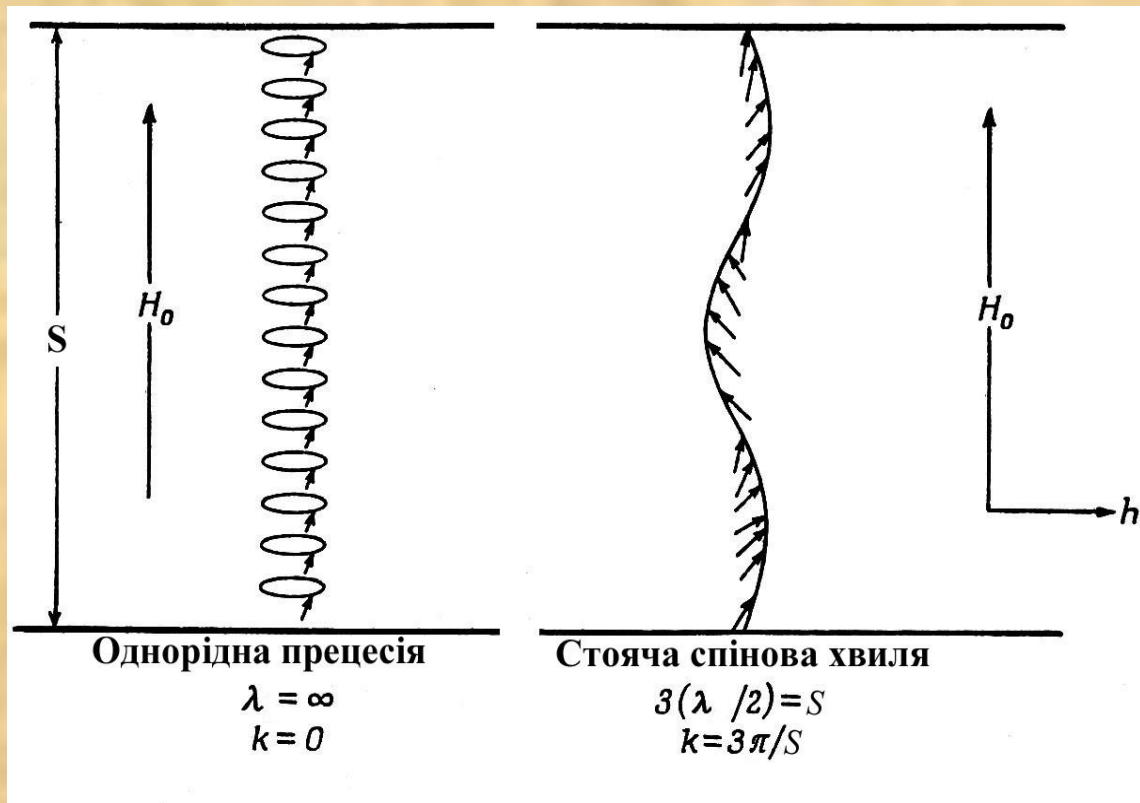
Ця короткодійча взаємодія  
забезпечує поширення СХ із  
хвильовим вектором та  
довжиною хвилі ; відповідна  
ділянка спектру СХ зветься  
**обмінними СХ**

Ця дальнодійча взаємодія  
забезпечує поширення СХ із  
хвильовим вектором та  
довжиною хвилі ; відповідна  
ділянка спектру СХ зветься  
**дипольними СХ**

## **Перевага магнітних плівок, як середовища поширення МСХ:**

- забезпечують різноманітність законів дисперсії хвиль, які керуються величиною зовнішнього сталого магнітного поля,
- достатньо просто збуджуються та реєструються МСХ,
- МСХ в них є доступними з поверхні плівки на всьому шляху їх поширення,
- вирощуються за сучасною технологією рідинно-фазової епітаксії,
- сумісні з методами планарної технології

Обмінна взаємодія між сусідами змушує спіни, сусідні із поверхневими, збільшити кут прецесії, тобто, кристалом може поширюватись збудження кута прецесії, яке має вигляд хвилі.





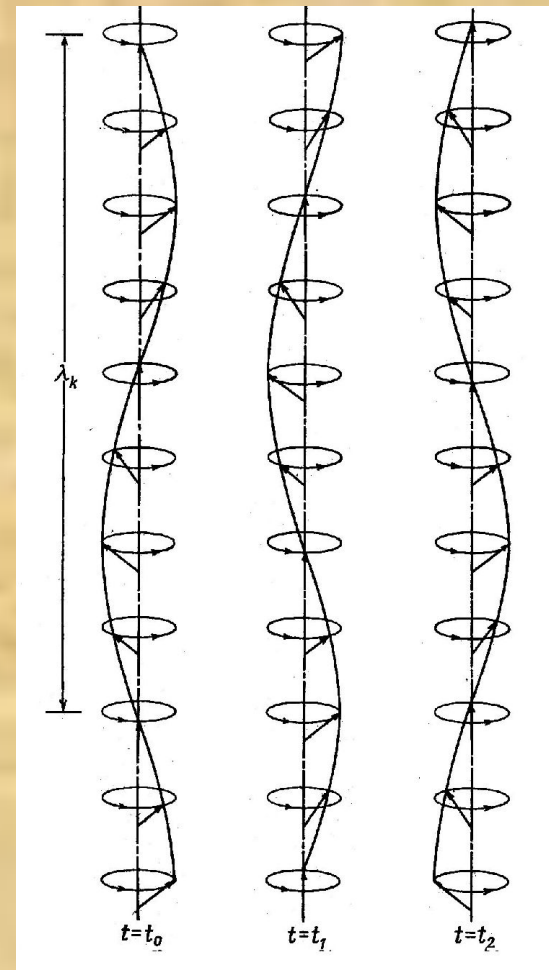
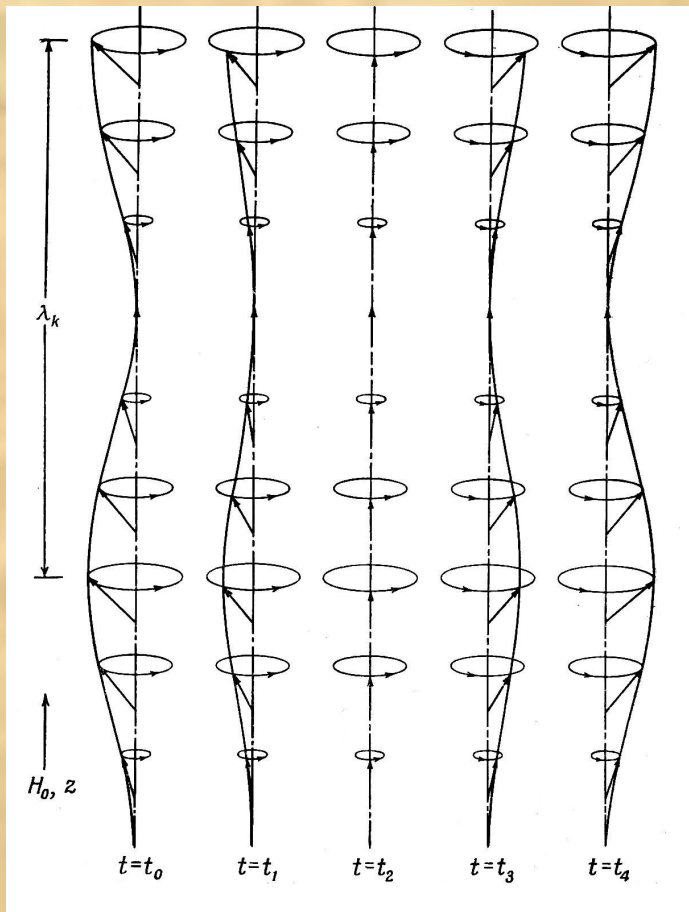
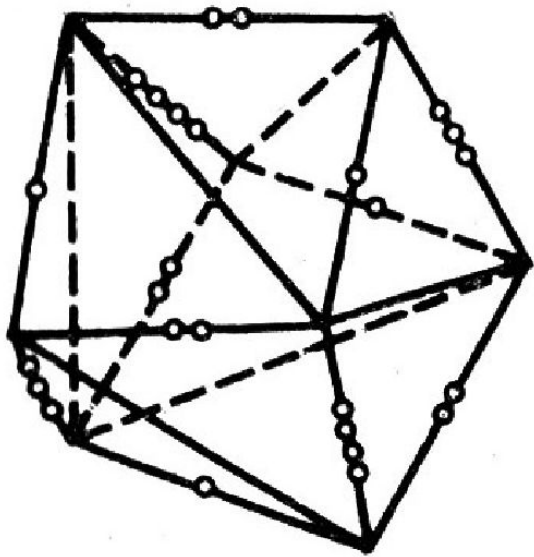


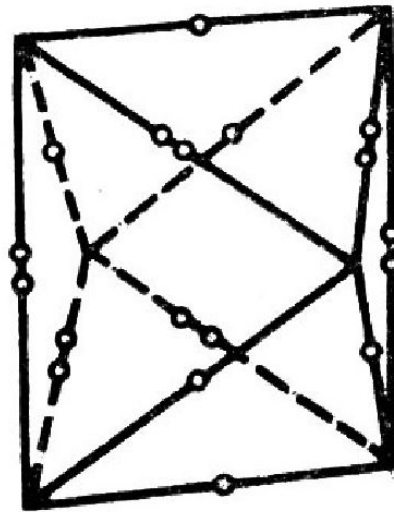
Рисунок спрощено зображає прецесування спінів в стоячій (зліва) та біжучій (справа) спіновій хвилі в початковий момент та в подальші моменти, коли магнітні диполі вже обернулись на певний кут.

## Кристал залізо-ітрієвого гранату (ЗІГ)

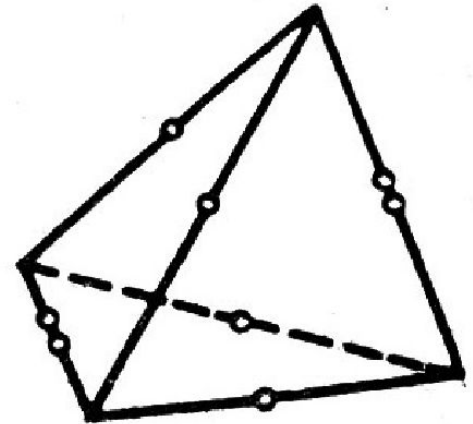
$Y_3Fe_3O_{12}$  - найбільш розповсюджений матеріал спін-хвильової електроніки для досліджень та застосувань в дециметровому та сантиметровому діапазонах довжин. Його природні аналоги - **андрадит**  $Ca_3Fe_2Si_3O_{12}$  або **шпесарит**  $Mn_3Al_2Si_3O_{12}$  - належать до кристалів кубічної сингонії. Хімічна формула ферит-гранатів в рамках **трьохпідграткової моделі**:  $\{R^{3+}\}_3[Fe^{3+}]_2(Fe^{3+})_3O_{12}$ , де R – рідкоземельні іони чи іон ітрію.



**Додекаедр**



**Октаедр**



**Тетраедр**

В межах елементарної комірки металеві катіони можуть розміщуватись у вузлах трьох типів, які розрізняються просторовим розташуванням сусідніх аніонів кисню: фігурні дужки відповідають **додекаедричному оточенню** іону ітрію іонами кисню (**c - підгратка**), квадратні дужки відповідають **октаедричному оточенню** іону залізу іонами кисню (**a - підгратка**), круглі дужки відповідають **тетраедричному оточенню** іону залізу іонами кисню (**d - підгратка**). **Додекаедр** має 12 граней та 20 вершин, **октаедр** має 8 граней та 6 вершин, **тетраедр** має 4 грані та 4 вершини.

**Сумарна намагніченість гранату** через намагніченість підграток:

$$M_{\Sigma} = (M_d - M_a) - M_c$$

Зокрема, для кристалу **чистого ЗІГ** (іони ітрію  $Y^{3+}$  є діамагнітними), маємо:

$$M_{\Sigma} = M_d - M_a = 5\mu_B \Big|_{T=0 \text{ К}}$$



# Вирощування об'ємних монокристалів та епітаксійних гранатових плівок

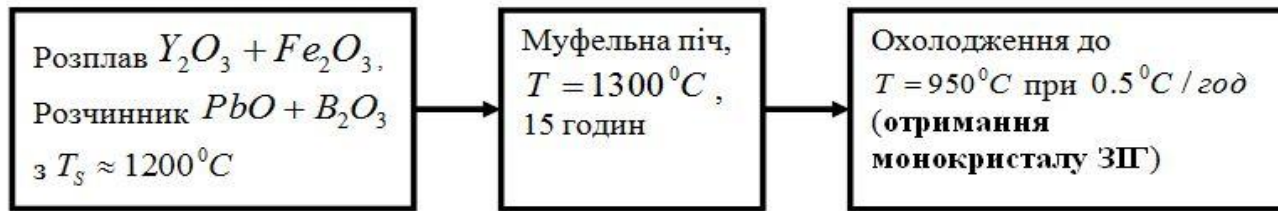
## метод спонтанної кристалізації

(Технологія вирощування монокристалів ферит-гранатів при  $t=1200^{\circ}\text{C}$ .)

Найбільш поширені **розчинники** - **легкоплавкі окиси та їх суміші**:  $PbO, B_2O_3, PbO - PbF_2 - B_2O_3, PbO - Bi_2O_3, BaO - B_2O_3$ .

При вирощуванні **кристалу ЗІГ** компонентами **розплаву є окиси ітрію та заліза**  $Y_2O_3$  та  $Fe_2O_3$ , **розчинниками** -  $PbO, B_2O_3$ . Вміст домішок у окисах ітрію та залізу не повинен перебільшувати  $10^{-5}\%$ .

Загальна схема вирощування монокристалу ЗІГ за методом спонтанної кристалізації:



## метод кристалізації на затравках

можливе повне керування технологічним процесом. Затравка - монокристал, отриманий методом спонтанної кристалізації та спеціально оброблений (наприклад, у вигляді призми). Затравку опускають у розчин, а на неї осаджується надлишок речовини.

# Вирощування об'ємних монокристалів та епітаксійних гранатових плівок

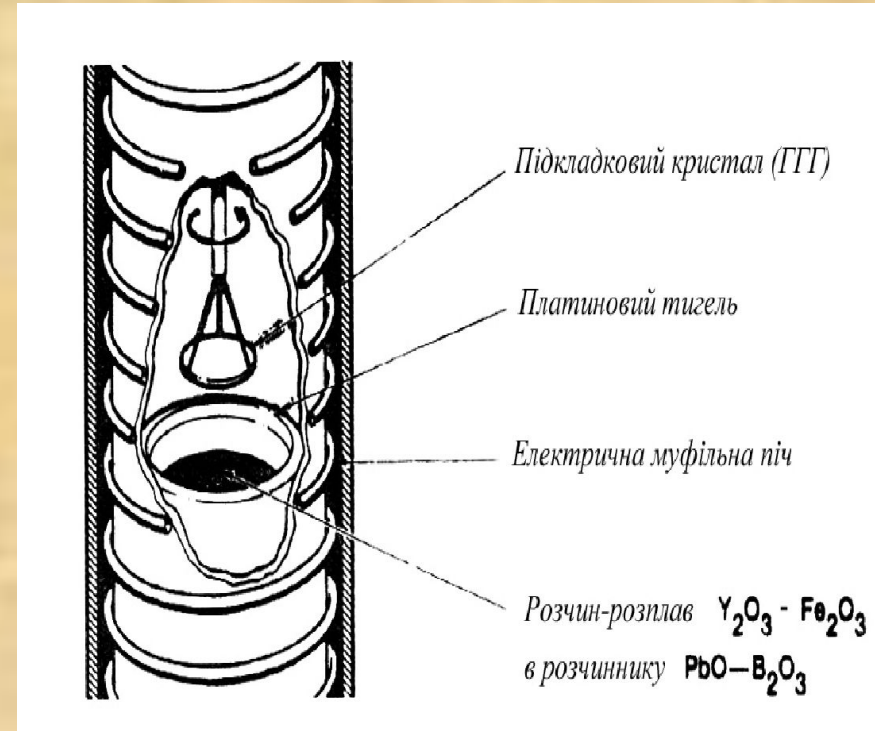
## метод рідинно-фазової

## епітаксії

вирощування тонких плівок гранатів.

**Затравка - підкладки**, які мають ту ж кристалографічну структуру, що й плівка. Для ЗІГ це - гадоліній-галієвий гранат (ГГГ) із постійною ґратки, що співпадає з постійною ґратки ЗІГ.

**Температура розчину підтримується постійною.** За рахунок обертання підкладки забезпечується регулярний приплив рідини та гарне об'ємне перемішування розчину при рівномірному переносу маси по поверхні плівки. **Швидкість росту** – 0,05-0,1 мкм/хв. **Максимальні товщини** епітаксійних плівок ЗІГ сягає **120 мкм**.



Матеріал спін-хвильової електроніки в міліметровому діапазоні - **барієвий гексаферит**  $BaFe_{12}O_{19}$ . Його сумарний магнітний момент  $M_{\Sigma} = 20 \mu_B |_{T=0 K}$

# Рівняння Ландау-Ліфшиця

густина магнітного моменту (намагніченість)

$$\vec{M}(\vec{r}, t) = \frac{\sum \vec{m}(\vec{r}, t)}{\Delta V}$$

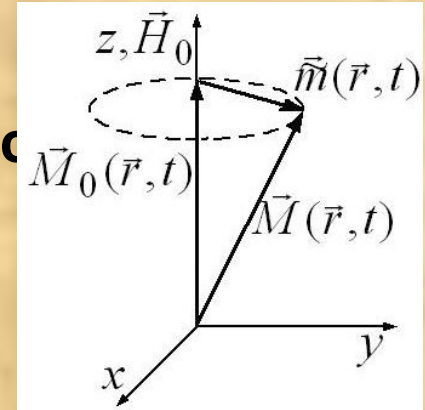
рівняння Ландау-Ліфшиця

$$\frac{\partial \vec{M}(\vec{r}, t)}{\partial t} = -\gamma [\vec{M}(\vec{r}, t) \times \vec{H}_e(\vec{r}, t)] + \vec{R},$$

Важлива властивість рівняння Ландау-Ліфшиця: воно забезпечує збереження довжини вектора намагніченості

Ефективне магнітне поле включає в себе:

- електродинамічне поле  $\vec{H}(\vec{r}, t)$ , яке складається з магнітного поля  $\vec{H}_0(\vec{r}, t)$  (створюється зовнішніми джерелами при відсутності магнетика) і дипольного (розмагнічуючого) поля  $\vec{H}_p(\vec{r}, t)$  зразку скінченої форми,
- ефективне поле магнітної кристалографічної анізотропії  $\vec{H}_i(\vec{r}, t)$ ,
- ефективне поле обмінної взаємодії  $\vec{H}_{обм}(\vec{r}, t)$ .





# Тензор магнітної проникності

Найбільш поширені **розчинники** - легкоплавкі окиси та їх суміші:  $PbO$ ,  $B_2O_3$ ,  
 $PbO - PbF_2 - B_2O_3$ ,  $PbO - Bi_2O_3$ ,  $BaO - B_2O_3$ .

При вирощуванні **кристалу ЗІГ** компонентами **розплаву** є окиси ітрію та заліза  
 $Y_2O_3$  та  $Fe_2O_3$ , **розчинниками** -  $PbO$ ,  $B_2O_3$ . Вміст домішок у окисах ітрію та залізу  
не повинен перебільшувати  $10^{-5}\%$ .

Найбільш поширені **розчинники** - легкоплавкі окиси та їх суміші:  $PbO$ ,  $B_2O_3$ ,

$PbO - PbF_2 - B_2O_3$ ,  $PbO - Bi_2O_3$ ,  $BaO - B_2O_3$ .

При вирощуванні **кристалу ЗІГ** компонентами **розплаву** є окиси ітрію та заліза

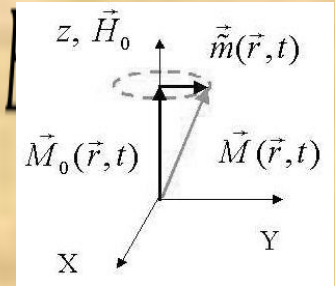
$Y_2O_3$  та  $Fe_2O_3$ , **розчинниками** -  $PbO$ ,  $B_2O_3$ . Вміст домішок у окисах ітрію та залізу

не повинен перебільшувати  $10^{-5}\%$ .

Найбільш поширені **розчинники** - легкоплавкі окиси та їх суміші:  $PbO$ ,  $B_2O_3$ ,  
 $PbO - PbF_2 - B_2O_3$ ,  $PbO - Bi_2O_3$ ,  $BaO - B_2O_3$ .

При вирощуванні **кристалу ЗІГ** компонентами **розплаву** є окиси ітрію та заліза  
 $Y_2O_3$  та  $Fe_2O_3$ , **розчинниками** -  $PbO$ ,  $B_2O_3$ . Вміст домішок у окисах ітрію та залізу  
не повинен перебільшувати  $10^{-5}\%$ .

Найбільш поширені розчинники - легкоплавкі окиси та їх суміші:  $PbO$ ,  $PbO - PbF_2 - B_2O_3$ ,  $PbO - Bi_2O_3$ ,  $BaO - B_2O_3$ .



При вирощуванні кристалу ЗІГ компонентами розплаву є окиси ітрію та заліза  $Y_2O_3$  та  $Fe_2O_3$ , розчинниками -  $PbO$ ,  $B_2O_3$ . Вміст домішок у окисах ітрію та залізу не повинен перебільшувати 10-5%.

$$\tilde{h} = h e^{i\omega t} \quad \tilde{m} = m e^{i\omega t}$$

Найбільш поширені розчинники - легкоплавкі окиси та їх суміші:  $PbO$ ,  $B_2O_3$ ,  $PbO - PbF_2 - B_2O_3$ ,  $PbO - Bi_2O_3$ ,  $BaO - B_2O_3$ . При вирощуванні кристалу ЗІГ компонентами розплаву є окиси ітрію та заліза  $Y_2O_3$  та  $Fe_2O_3$ , розчинниками -  $PbO$ ,  $B_2O_3$ . Вміст домішок у окисах ітрію та залізу не повинен перебільшувати 10-5%.

У тензорній формі  $\tilde{m} = \hat{\chi} \tilde{h}$  (Полдер, 1949 р.)

$$\hat{\chi} = \frac{M_0}{H_0^2 - (\omega/\gamma)^2} \begin{vmatrix} H_0 & i\frac{\omega}{\gamma} \\ -i\frac{\omega}{\gamma} & H_0 \end{vmatrix}$$

У тензорній формі  $\tilde{m} = \hat{\chi} \tilde{h}$  (Полдер, 1949 р.)



Використаємо матеріальне співвідношення  $\hat{\mu} \tilde{h}$  Для вектора магнітної індукції:

$$\hat{b} = \hat{h} + 4\pi \hat{m} = \hat{h} + 4\pi \hat{\chi} \hat{h} = (\hat{I} + 4\pi \hat{\chi}) \hat{h}$$

Найбільш поширені розчинники - легкоплавкі окиси та їх суміші:  $PbO, B_2O_3,$

$PbO - PbF_2 - B_2O_3, PbO - Bi_2O_3, BaO - B_2O_3.$

При вирощуванні кристалу ЗІГ компонентами розплаву є окиси ітрію та заліза  $Y_2O_3$  та  $Fe_2O_3$ , розчинниками -  $PbO, B_2O_3$ . Вміст домішок у окисах ітрію та залізу не повинен перебільшувати  $10^{-5}\%$ .

Найбільш поширені розчинники - легкоплавкі окиси та їх суміші:  $PbO, B_2O_3,$

$PbO - PbF_2 - B_2O_3, PbO - Bi_2O_3, BaO - B_2O_3.$

При вирощуванні кристалу ЗІГ компонентами розплаву є окиси ітрію та заліза

$Y_2O_3$  та  $Fe_2O_3$ , розчинниками -  $PbO, B_2O_3$ . Вміст домішок у окисах ітрію та залізу

не повинен перебільшувати  $10^{-5}\%$ .

$$\hat{\mu} = \begin{vmatrix} \mu & -i\mu_a & 0 \\ i\mu & \mu & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

Його компоненти:

$$\mu = (\omega^2 - \omega_1^2) / (\omega^2 - \omega_H^2), \quad \mu_a = \omega \omega_M / (\omega^2 - \omega_H^2),$$

$$\omega_1^2 = \omega_H (\omega_H + \omega_M) \quad \omega_H = \gamma H_0,$$

$$\omega_M = \gamma 4\pi M$$

Змінне магнітне поле, спрямоване, наприклад, вздовж вісі x, створює компоненти намагніченості та магнітної індукції як в напрямку x, так і в напрямку y - це зумовлено прецесійним характером руху вектора намагніченості.

# Рівняння Максвелла. Граничні умови.

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}, \quad \operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} (\vec{H} + 4\pi \vec{M}); \quad \operatorname{div} \vec{D} = 0, \quad \operatorname{div} (\vec{H} + 4\pi \vec{M}) = 0$$

Матеріальні співвідношення:

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad \text{та} \quad \vec{B} = \hat{\mu} \vec{H}$$

Статична задача:

$$\operatorname{rot} \vec{H}_{p0} = 0, \quad \operatorname{div} (\vec{H}_{p0} + 4\pi \vec{M}_0) = 0$$

Динамічна задача

$$\operatorname{rot} \vec{h} = \frac{\epsilon}{c} \frac{\partial \vec{e}}{\partial t}, \quad \operatorname{rot} \vec{e} = -\frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} (\vec{h} + 4\pi \vec{m}),$$

$$\operatorname{div} \vec{e} = 0, \quad \operatorname{div} (\vec{h} + 4\pi \vec{m}) = 0$$

$$[\vec{E}_1 \times \vec{n}] = 0, \quad (\vec{B}_1 \cdot \vec{n}) = 0, \quad -$$

ідеальний провідник

Граничні умови на межі поділу двох середовищ -  
звичайні електродинамічні умови:

- неперервність нормальних до границі компонент магнітної та електричної індукції,
- неперервність дотичних компонент напруженості магнітного та електричного полів:

$$[\vec{E}_1 \times \vec{n}] = [\vec{E}_2 \times \vec{n}], \quad (\vec{D}_1 \cdot \vec{n}) = (\vec{D}_2 \cdot \vec{n}),$$

$$[\vec{H}_1 \times \vec{n}] - [\vec{H}_2 \times \vec{n}] = \frac{4\pi}{c} \vec{j}, \quad (\vec{B}_1 \cdot \vec{n}) = (\vec{B}_2 \cdot \vec{n}),$$

# Магнітостатичне наближення та межі його застосування

Область існування МСХ знаходиться між областю звичайних електромагнітних хвиль та обмінних спінових хвиль; тобто для хвильових чисел МСХ:

та для довжин хвиль МСХ:

$$\lambda_{EMX} > \lambda_{MCX} > \lambda_{OCX}$$

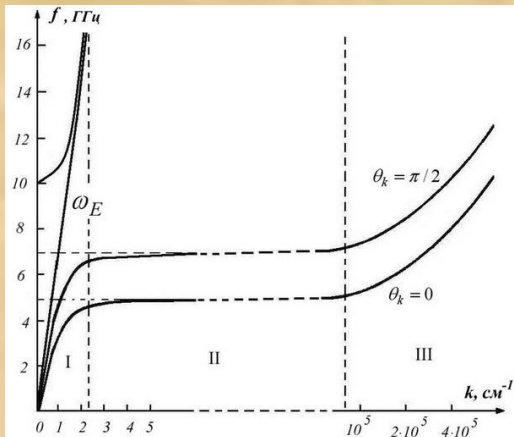
Якщо пропустити математичні подробиці:

- для хвильових чисел МСХ

$$\frac{\omega}{c} \sqrt{\varepsilon} \ll k_{MCX} \ll \frac{2\pi}{l_0}$$

- та для довжин хвиль МСХ

$$l_0 \ll \lambda_{MCX}, \quad s \ll \frac{\lambda_0}{\sqrt{\varepsilon}}$$



**Обмеження на хвильове число МСХ зверху (пов'язане з обмінними ефектами)**

$$\lambda_{МСХ, ЧВ} \gg l_0 \quad k_{МСХ} \ll \pi l_0$$

- МСХ не повинні відчувати впливу короткодіючих обмінних сил і обмінна взаємодія не має вносити змін до спектру хвиль.

**Обмеження на хвильове число МСХ знизу (пов'язане з врахуванням ефектів електромагнітного запізнення (поширення))**

$$\lambda_{МСХ, ЧВ} \ll \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon}} \quad k_{МСХ} \gg \frac{\omega}{c} \sqrt{\epsilon} \quad \vec{H}_{обм} = \alpha_0 \Delta \vec{M}(r, t)$$

- вимога малості характерного розміру зразка в порівнянні з довжиною електромагнітної хвилі (в протилежному випадку врахування впливу граничних умов може суттєво змінити спектр хвиль)

Для МСХ в плівках ЗІГ магнітостатичне наближення є справедливим на частотах НВЧ діапазону в межах:

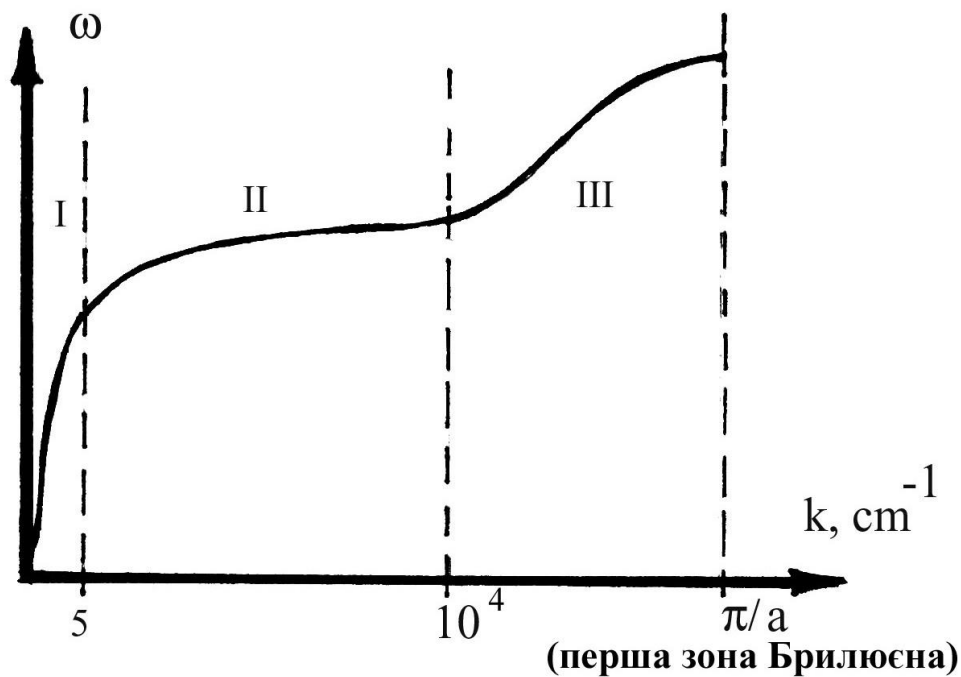
- хвильових чисел:  $10^{-1} \leq k_{МСХ} \leq 10^4 \text{ см}^{-1}$

- довжин хвиль:  $6 \text{ м} \cdot 10^{-4} \leq \lambda_{МСХ} \leq 0.01 \text{ см}$



Найбільш поширені **розчинники** - легкоплавкі окиси та їх суміші:  $PbO, B_2O_3, PbO - PbF_2 - B_2O_3, PbO - Bi_2O_3, BaO - B_2O_3$ .

При вирощуванні **кристалу ЗІГ** компонентами **розплаву є окиси ітрію та заліза**  $Y_2O_3$  та  $Fe_2O_3$ , **розчинниками** -  $PbO, B_2O_3$ . Вміст домішок у окисах ітрію та залізу не повинен перебільшувати  $10^{-5}\%$ .



Маємо **3 умовні ділянки**:

**I** – область **електромагнітного поширення**; використовують повні рівняння Максвела; магнітна та електрична складові поля мало відрізняються від величин в звичайному діелектрику.

**II** – область **магнітостатичного поширення**; для опису хвиль використовують рівняння Максвела в наближенні магнітостатики; електричною складовою поля нехтують.

**III** – область **обмінного поширення**; для опису хвиль також використовують рівняння Максвела в наближенні магнітостатики та роблять заміни, які відбивають вплив обмінної взаємодії.



# Рівняння Уокера

Найбільш поширені розчинники - легкоплавкі окиси та їх суміші:  $PbO, B_2O_3,$   
 $PbO - PbF_2 - B_2O_3, PbO - Bi_2O_3, BaO - B_2O_3.$

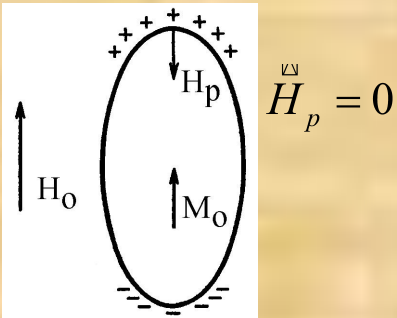
При вирощуванні кристалу ЗІГ компонентами розплаву є окиси ітрію та заліза  
 $Y_2O_3$  та  $Fe_2O_3$ , розчинниками -  $PbO, B_2O_3$ . Вміст домішок у окисах ітрію та залізу  
не повинен перебільшувати  $10^{-5}\%$ .

$$\mu \left( \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} = 0.$$

# Врахування форми зразка. Розмагнічуюче поле

Найбільш поширені розчинники - легкоплавкі окиси та їх суміші:  $PbO, B_2O_3, PbO - PbF_2 - B_2O_3, PbO - Bi_2O_3, BaO - B_2O_3$ .

При вирощуванні кристалу ЗІГ компонентами розплаву є окиси ітрію та заліза  $Y_2O_3$  та  $Fe_2O_3$ , розчинниками -  $PbO, B_2O_3$ . Вміст домішок у окисах ітрію та залізу не повинен перебільшувати  $10^{-5}\%$ .

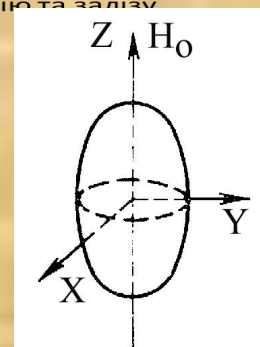


Найбільш поширені розчинники - легкоплавкі окиси та їх суміші:  $PbO, B_2O_3, PbO - PbF_2 - B_2O_3, PbO - Bi_2O_3, BaO - B_2O_3$ .  
 При вирощуванні кристалу ЗІГ компонентами розплаву є окиси ітрію та заліза  $Y_2O_3$  та  $Fe_2O_3$ , розчинниками -  $PbO, B_2O_3$ . Вміст домішок у окисах ітрію та залізу не повинен перебільшувати  $10^{-5}\%$ .

При вирощуванні кристалу ЗІГ компонентами розплаву є окиси ітрію та заліза  $Y_2O_3$  та  $Fe_2O_3$ , розчинниками -  $PbO, B_2O_3$ . Вміст домішок у окисах ітрію та залізу не повинен перебільшувати  $10^{-5}\%$ .

$$N_x + N_y + N_z = 4\pi$$

$$H_e = H_0 - 4\pi NM_0$$



Зразок	Напрямок намагнічування	Розмагнічуючий фактор			Власні частоти
		$N_x$	$N_y$	$N_z$	
Тонка пластина, диск	Дотичне	0	$4\pi$	0	$\frac{\omega}{\gamma} = \sqrt{H_0(H_0 + 4\pi M_0)}$
	Нормальне	0	0	$4\pi$	$\frac{\omega}{\gamma} = H_0 - 4\pi M_0$
Тонкий циліндр	Дотичне	$2\pi$	$2\pi$	0	$\frac{\omega}{\gamma} = H_0 + 4\pi M_0$
	нормальне	$2\pi$	0	$2\pi$	$\frac{\omega}{\gamma} = \sqrt{H_0(H_0 - 2\pi M_0)}$
Сфера		$4/3\pi$	$4/3\pi$	$4/3\pi$	$\frac{\omega}{\gamma} = H_0$

## Розмагнічуючі фактори:

Найбільш поширені розчинники - легкоплавкі окиси та їх суміші:  $PbO, B_2O_3, PbO - PbF_2 - B_2O_3, PbO - Bi_2O_3, BaO - B_2O_3$ .  
 При вирощуванні кристалу ЗІГ компонентами розплаву є окиси ітрію та заліза  $Y_2O_3$  та  $Fe_2O_3$ , розчинниками -  $PbO, B_2O_3$ . Вміст домішок у окисах ітрію та залізу не повинен перебільшувати  $10^{-5}\%$ .

$$\alpha = s/b$$

Найбільш поширені розчинники - легкоплавкі окиси та їх суміші:  $PbO, B_2O_3, PbO - PbF_2 - B_2O_3, PbO - Bi_2O_3, BaO - B_2O_3$ .

При вирощуванні кристалу ЗІГ компонентами розплаву є окиси ітрію та заліза  $Y_2O_3$  та  $Fe_2O_3$ , розчинниками -  $PbO, B_2O_3$ . Вміст домішок у окисах ітрію та залізу не повинен перебільшувати  $10^{-5}\%$ .

Дякую за увагу!

