

# Фізичні принципи електро- та магнітно-силової зондової мікроскопії. Застосування методу для визначення локальних електричних та магнітних характеристик нанооб'єктів

**Електро-силова мікроскопія (ЕСМ)** – метод дослідження поверхні, який базується на електричній взаємодії мікроскопічного зонда з поверхнею.

## 1.1. Фізичні принципи ЕСМ

ЕСМ є різновидом атомно-силової мікроскопії (АСМ). В цьому методі на вістря кантилевера наноситься електропровідне покриття; до вістря подається електрична напруга.

Між вістрям та підкладкою прикладається електрична напруга, яка має дві складові: сталу  $U_0$  та змінну  $U_1 \sin \omega t$  (рис. 1). Тоді у проміжку «вістря-підкладка» створюється напруга

$$U(t) = U_0 + U_1 \sin \omega t + \varphi(x, y) \quad (1)$$

де  $\varphi(x, y)$  визначає розподіл електричного потенціалу по поверхні зразка.

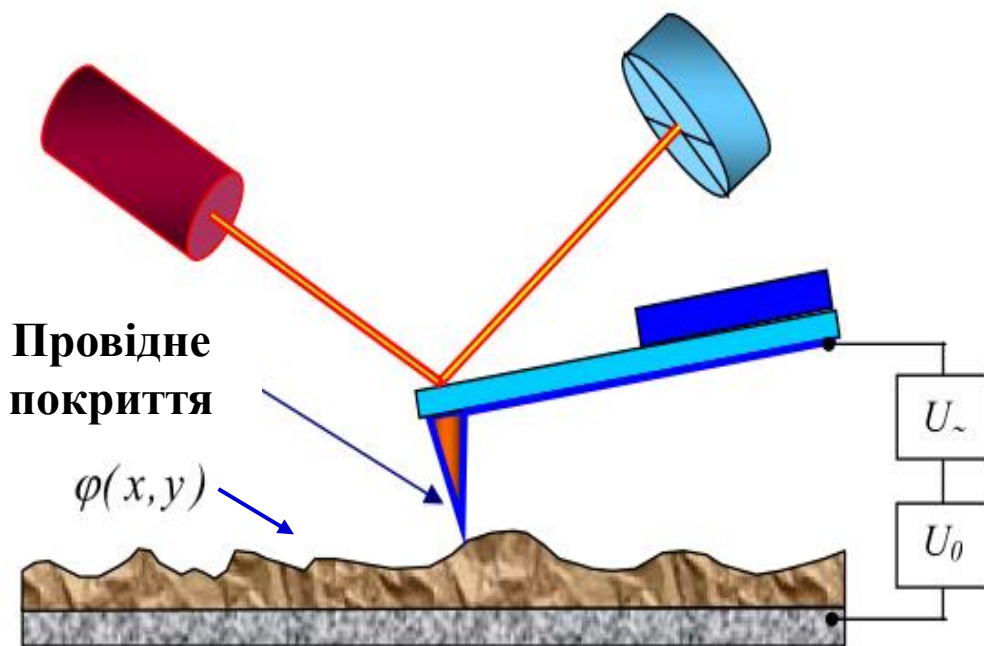


Рис. 1

Розглянемо більш детально область між напівсферичним вістрям та підкладкою. Між вістрям і поверхнею в точці  $(x,y)$  існує зазор висотою  $Z$  та прошарок зразка  $d(x,y)$  (рис. 2). Очевидно, систему «провідна напівсфера – плоска підкладка» можна розглядати як два послідовно з'єднані

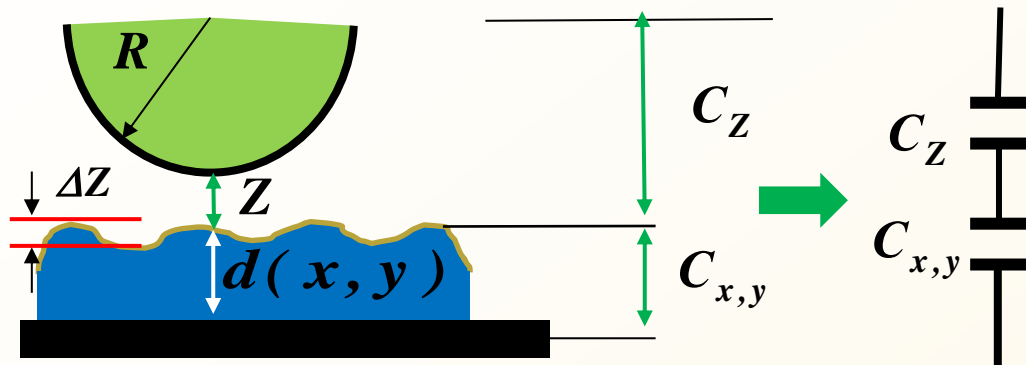


Рис. 2

конденсатори: **перший** – «напівсфера–поверхня» з зазором  $Z$  та ємністю  $C_Z$ , **другий** – прошарок зразка  $d$  між поверхнею в точці  $(x,y)$  та підкладкою з ємністю  $C_{x,y}$ .

Ємність першого конденсатора  $C_Z$  визначається величиною радіуса сфери  $R$  та зазором  $Z$  (2),  $a$  та  $b$  – деякі відомі сталі. Важливо, що при скануванні в режимі сталої висоти  $Z = \text{const}$  ця ємність підтримується сталою. Тоді ємність системи «провідна напівсфера – плоска підкладка» дорівнює (3) і в режимі сталої висоти залежить тільки від  $C_{x,y}$ , отже, тільки від діелектричних характеристик прошарку речовини (за умови, що товщина прошарку  $d$  набагато більша за зміни висоти рельєфу  $\Delta Z$ ).

За енергією  $W$  системи двох конденсаторів (4) можна визначити силу електричної взаємодії  $F_Z$  провідної напівсфери та підкладки (5) ( $U$  – напруга між сферою та підкладкою). Тут враховано, що напруга не залежить від  $Z$ .

$$C_Z = aR \left( 1 - b \frac{Z}{R} \right) \approx \text{const} \quad (2)$$

$$C_{\Sigma} = \frac{C_Z C_{x,y}}{C_Z + C_{x,y}} \quad (3)$$

$$W = \frac{CU^2(t)}{2} \quad (4)$$

$$F_Z = -\frac{\partial W}{\partial Z} = -\frac{1}{2} U^2 \frac{\partial C}{\partial Z} \quad (5)$$

Підставимо у рівняння (5) вираз для напруги (1):

$$F_Z = - \left\{ \frac{1}{2} \left[ (U_0 + \varphi) + U_1 \sin \omega t \right]^2 \right\} \frac{\partial C}{\partial Z} \Rightarrow$$

$$F_Z = - \left[ \frac{1}{2} (U_0 + \varphi)^2 + (U_0 + \varphi) U_1 \sin \omega t + \frac{U_1^2}{4} - \frac{U_1^2}{4} \cos 2\omega t \right] \frac{\partial C}{\partial Z} \Rightarrow$$

$$F_Z = - \left[ \frac{1}{2} (U_0 + \varphi)^2 + \frac{U_1^2}{4} + (U_0 + \varphi) U_1 \sin \omega t - \frac{U_1^2}{4} \cos 2\omega t \right] \frac{\partial C}{\partial Z} \quad (6)$$

Отже, з рівняння (6) випливає, що сила взаємодії  $F_Z$  має **три складових**:

а) сталу за часом силу:

$$F_0 = - \frac{1}{2} \left[ (U_0 + \varphi)^2 + \frac{U_1^2}{2} \right] \frac{\partial C}{\partial Z} \quad (7)$$

б) силу на частоті  $\omega$  :

$$F(\omega) = - \left[ (U_0 + \varphi) U_1 \sin \omega t \right] \frac{\partial C}{\partial Z} \quad (8)$$

в) силу на частоті  $2\omega$  :

$$F(2\omega) = \left[ \frac{U_1^2}{4} \cos 2\omega t \right] \frac{\partial C}{\partial Z} \quad (9)$$

## 1.2 Ємнісна мікроскопія

В ємнісній мікроскопії досліджується сила на частоті  $2\omega$  :

$$F(2\omega) = \left[ \frac{U_1^2}{4} \cos 2\omega t \right] \frac{\partial C}{\partial Z} = \left[ \frac{U_1^2}{4} \cos 2\omega t \right] \frac{\partial}{\partial Z} \left( \frac{C_Z C_{x,y}}{C_Z + C_{x,y}} \right) \Rightarrow$$

$$F(2\omega) = \underbrace{\left( \frac{U_1^2 C_Z C'_{x,y}}{4(C_Z + C_{x,y})} \cdot \left( 1 - \frac{C_{x,y}}{C_Z + C_{x,y}} \right) \right)}_{F_0(2\omega)} \cos 2\omega t = F_0(2\omega) \cos 2\omega t \quad (10)$$

де  $C'_{x,y} \equiv \frac{\partial C_{x,y}}{\partial Z}$  .

За допомогою **синхронного детектора** визначається **амплітуда сили**  $F_0(2\omega)$  на частоті  $2\omega$ . Отже, скануючи, можна визначити значення амплітуди сили в кожній точці поверхні. Як видно з (10), амплітуда  $F_0(2\omega)$  при сталі висоті  $Z = \text{const}$  в кожній точці поверхні залежить тільки від ємності  $C_{x,y}$  та її похідної  $C'_{x,y}$ . Тобто, зміни амплітуди при скануванні будуть відображувати зміни діелектричних характеристик при переході від однієї точки поверхні зразка до іншої (нагадаємо, що ємність плоского конденсатора «поверхня зразка-підкладка»  $C = \varepsilon(x, y) \varepsilon_0 S / d$ , величини  $S, d$  в експерименті вважаються сталими).

Важливою умовою ємнісної мікроскопії є підтримання сталої висоти  $Z = \text{const}$ . Для забезпечення цієї вимоги виконується **двопрохідне сканування** поверхні. **Перше сканування** виконується при **відключеній** електричній напрузі  $U(t)$  добре відомим **напівконтактним методом** (рис. 3), в результаті чого встановлюється форма рельєфу поверхні  $\{Z(x, y)\}$ .

У другому проході між зондом і поверхнею вмикається напруга  $U(t)$ , зонд встановлюється на новій відстані від поверхні  $Z_0$ , яка підтримується сталою завдяки вже відомому рельєфу  $\{Z(x, y)\}$ . У такий спосіб отримується поверхневий розподіл амплітуди  $\{F_0(2\omega)_{x,y}\}$ , який відображує поверхневий розподіл діелектричних параметрів зразка.

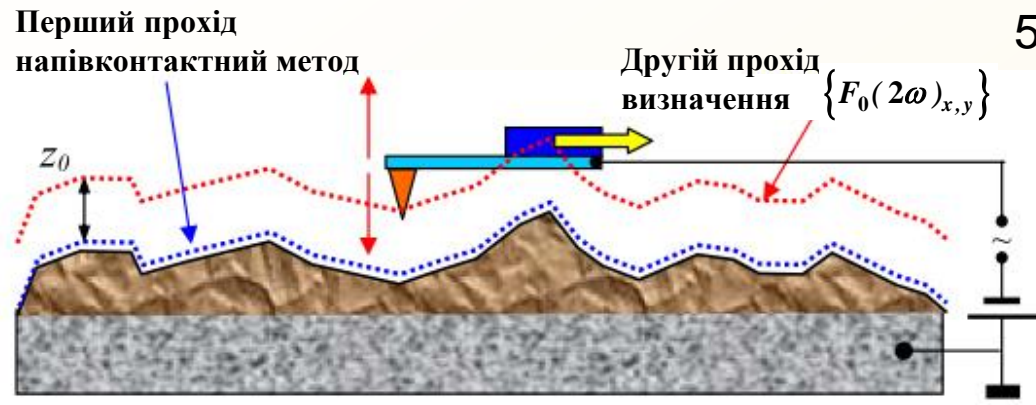


Рис. 3

### 1.3. Кельвін-мікроскопія

Розглянемо вираз (8), який визначає електричну силу на частоті  $\omega$ . У певній точці поверхні  $(x, y)$ , яка має електричний потенціал  $\varphi(x, y)$ , можна змінювати напругу  $U_0$ , добиваючись того, щоб  $U_0 \rightarrow -\varphi(x, y)$ . Коли вказана умова виконається, сила  $F(\omega) = 0$ . Таким чином вдається визначити локальний розподіл електричного потенціалу  $\{\varphi(x, y)\}$  по поверхні електрично зарядженого зразка.

Як приклад, на рис. 4 наведено топографічний рельєф поверхні плівки азобензола, отриманий напівконтактним методом (а), а також розподіл електричного потенціалу  $\varphi(x, y)$  по цій поверхні (б).

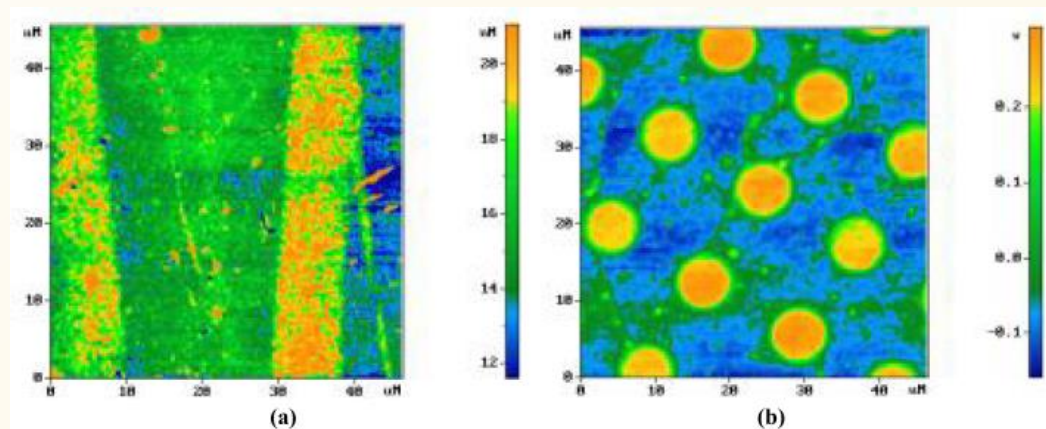


Рис. 4



**Магнітно-силова мікроскопія (МСМ)** – метод дослідження поверхні, який базується на магнітній взаємодії мікроскопічного зонда з поверхнею.

## 2.1. Фізичні принципи МСМ

МСМ також є різновидом атомно-силової мікроскопії. В цьому методі на вістря кантилевера наноситься **шар феромагнетика**, який характеризується певним розподілом вектора намагніченості  $\vec{J}(\vec{r})$ .

Нехай поверхня зразка вкрита магнітною речовиною, що створює магнітне поле з індукцією  $\vec{B}(\vec{R})$ . Тоді енергія взаємодії магнітного зонда з магнітним полем зразка в точці  $\vec{R}$  дорівнює (рис. 5):

$$W_m = - \int_{V_{\text{зонд}}} d\vec{p}(\vec{r}) \cdot \vec{B}(\vec{r} + \vec{R}) \Rightarrow$$

$$W_m = - \int_{V_{\text{зонд}}} \vec{J}(\vec{r}) \cdot \vec{B}(\vec{r} + \vec{R}) dV \quad (11)$$

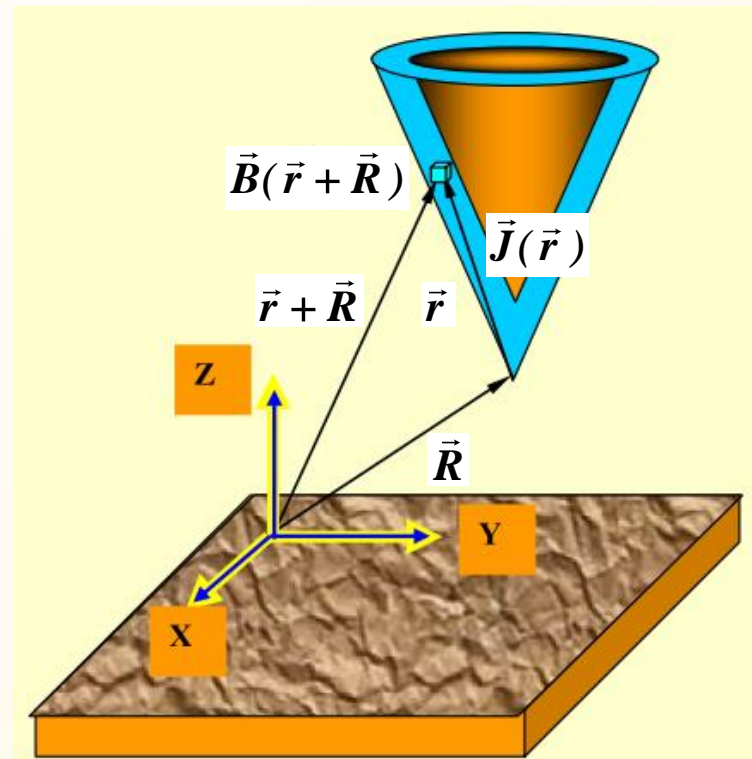


Рис. 5

В (11) інтегрування виконується по об'єму магнітного покриття зонду.

Магнітний рельєф поверхні буде визначати **Z-складова** сили магнітної взаємодії вістря з поверхнею в заданій точці  $\vec{R}$  :

$$F_Z = -\frac{\partial W_m}{\partial Z} = - \int_{V_{\text{зонд}}} \left( J_x \frac{\partial B_x}{\partial Z} + J_y \frac{\partial B_y}{\partial Z} + J_z \frac{\partial B_z}{\partial Z} \right) dV \quad (12)$$

## 2.2. Сканування поверхні в МСМ

Сканування поверхні в МСМ, як і в ЕСМ, здійснюється за **двопрохідною методикою**.

**1. Перший прохід.** Використовується звичайне вістря без шару намагніченого покриття. Як правило, виконується **напівконтактне сканування**, результатом якого є визначення **топографії** поверхні  $\{Z(x, y)\}$  .

**2. Другий прохід.** Оскільки метою експериментів є визначення **магнітного рельєфу** поверхні, а не її топографії, необхідно розміщувати магнітний зонд на такій відстані  $Z_0$  від поверхні, щоб магнітні сили були набагато більшими за сили Ван-дер-Ваальса

$$F_m(Z_0) \gg F_{VB}(Z_0) \quad (13)$$

(Як правило,  $Z_0 = (10 - 500)$  нм.) Для цього до кожного елемента  $\{Z(x, y)\}$  масиву додається деяка стала, така, щоб на новій висоті виконувалася умова (13). У подальшому здійснюється сканування з магнітним зондом у **коливальному безконтактному режимі**. Реєструються зсуви АЧХ та ФЧХ за частотою при зміні похідної  $\partial F_m / \partial Z$  , що дозволяє визначити магнітний рельєф в **амплітудному та фазовому контрасті** (див. рис. 6). Детальний опис коливального безконтактного режиму наведений у відповіді на питання «Фізичні принципи АСМ».

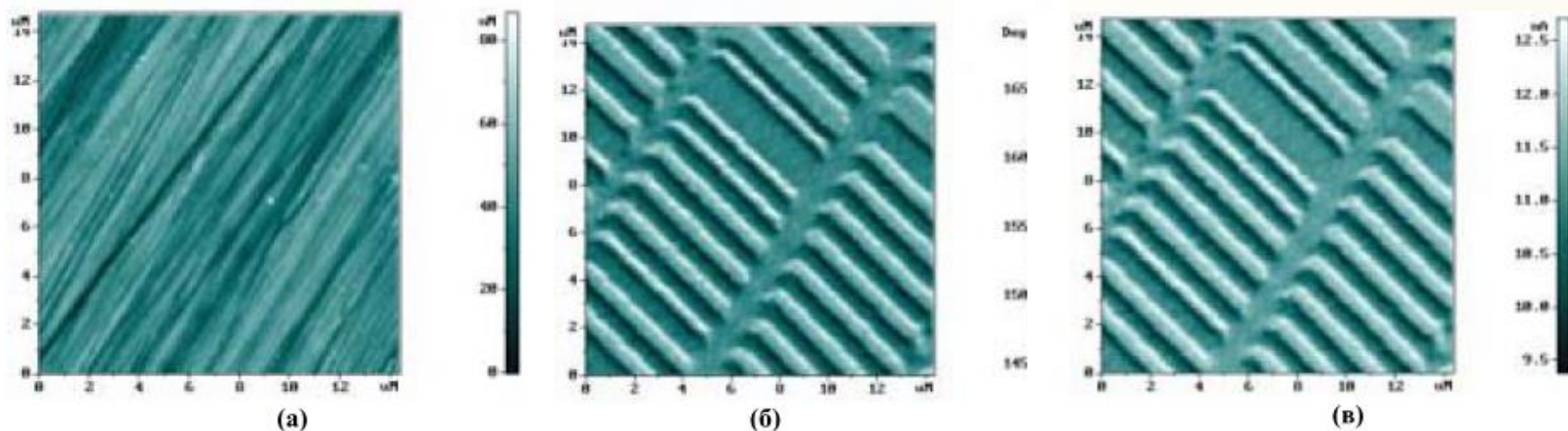


Рис. 6. Зображення поверхні магнітного диску:

- а) топограма поверхні, отримана методом АСМ у напівконтактному режимі;
- б) МСМ-зображення поверхні, отримане за зсувом ФЧХ (фазовий контраст);
- в) МСМ-зображення поверхні, отримане за зсувом АЧХ (амплітудний контраст)