

# Фізичні принципи мікроскопії ближнього оптичного поля та її застосування для дослідження морфології наносистем

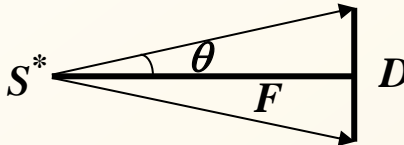
**Ближньопольова сканувальна оптична мікроскопія (БСОМ)** — метод дослідження наносистем, який базується на взаємодії світла, що проходить через субхвильову діафрагму, з поверхнею зразка в області ближнього оптичного поля.

## 1. Фізичні принципи БСОМ

При проходженні світла через об'єктив мікроскопа відбувається **дифракція на вхідній діафрагмі об'єктиву**, яка призводить до формування на екрані дифракційної картини (чергування темних та світлих кілець з світлим диском (диск Ейрі) у центрі) за умови спостереження навіть точкового об'єкту. З урахуванням дифракційних обмежень вводиться кількісна характеристика роздільної здатності оптичного мікроскопа - **границя розділення**, яка визначається як **найменша відстань** між двома точковими джерелами, при якій вони **ще спостерігаються окремо**:

$$R = \frac{\lambda}{2n \sin \theta} \quad (1)$$

де  $\lambda$  - довжина світла,  $n$  - показник заломлення середовища між об'єктивом та зразком,

$$\sin \theta = \frac{D}{2F} \quad \text{кутова апертура об'єктиву}$$


$D$  - діаметр об'єктиву;

$F$  - відстань від джерела до об'єктиву

Умові (1) відповідає **критерій Релея** – два точкових джерела спостерігаються окремо, якщо центральний дифракційний максимум першого джерела збігається з першим мінімумом другого. «Провал» інтенсивності між максимумами при цьому складає **26,3 %** (рис. 1).

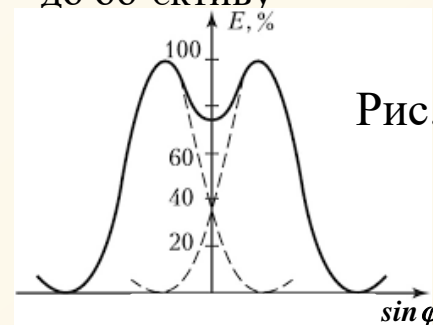


Рис. 1

З формули (1) можна оцінити максимальну роздільну здатність, яка відповідає мінімально можливому значенню  $R$ . Покладаючи  $\theta_{max} \approx 80^\circ$ , для «сухих» об'єктивів ( $n \approx 1$ ) при довжині хвилі  $\lambda \approx 400$  нм величина  $R \approx 200$  нм. При введенні рідини між об'єктивом та зразком (імерсія) можна зменшити границю розділення ще у 1,4 – 1,6 рази. Отже, дифракція світла принципово обмежує границю розділення мікроскопа до **140 – 200 нм**.

Однак, існує фізична можливість подолати дифракційне обмеження роздільної здатності. Вона пов'язана з **особливостями проходження електромагнітних хвиль через отвори розміром в одиниці-десятки нанометрів**. Такі отвори називають **субхвильовими діафрагмами**. Типовий розмір субхвильової діафрагми **5 – 10 нм**. Нехай на поверхню з субхвильовою діафрагмою падає плоска монохроматична хвиля довжиною  $\lambda$  (рис. 2а). Розв'язок рівнянь Максвелла для такої системи показує, що у вузькій області за діафрагмою формується хвильове поле протяжністю  $h \approx \lambda / 4$  зі **стоячих хвиль** (рис. 2б), в яких напруженість спадає з відстанню за експоненціальним законом по мірі віддалення від діафрагми

$$E_{zj}(k_{zj}, z) = E_{z0j} \exp(-k_{zj}z) \exp(-i\omega t) \quad (1)$$

Важливо, що в цій області хвилі не розповсюджуються і **перенос енергії відсутній**.

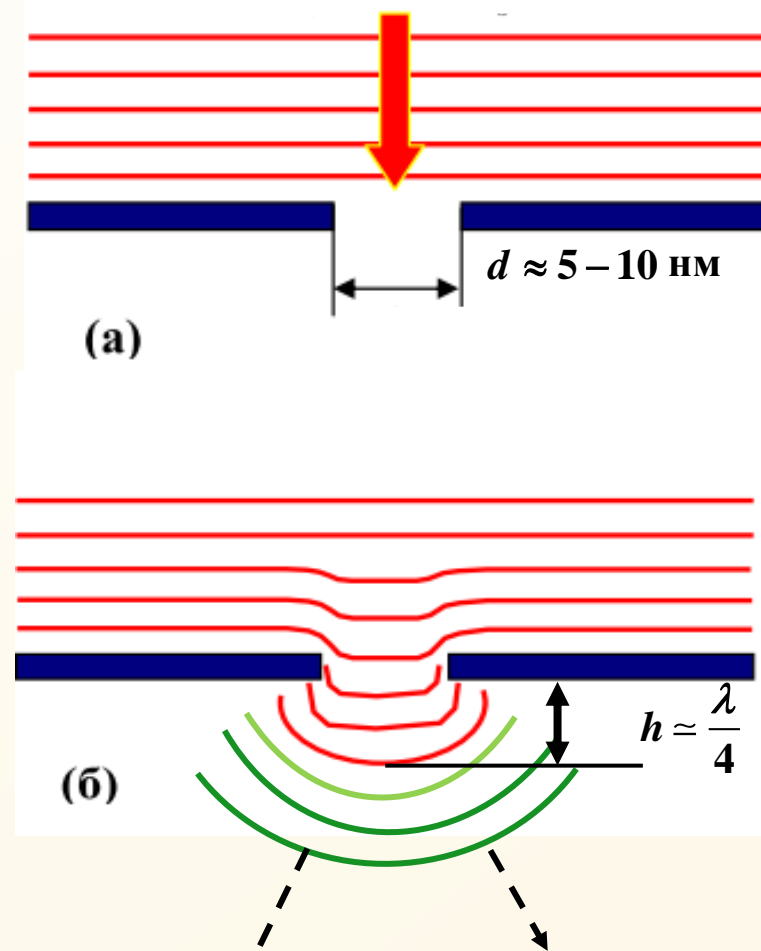


Рис. 2

(червоні лінії зображують хвильові поверхні - рис. 2б). Такі хвилі називають **еванесцентними** (зникаючими). Отже, еванесцентні хвилі локалізовані в **ближній зоні** від субхвильової діафрагми і є стоячими хвилями, які не переносять енергію у просторі.

По мірі віддалення від діафрагми характер хвильового поля змінюється і з'являються **біжучі хвилі** (зелені лінії на рис. 2.). Густина потоку енергії у цій **дальній зоні** визначається як

$$P = 4,7k^4d^4W \quad (2)$$

де  $W$  – густина потоку енергії, що падає на діафрагму,  $k$  – хвильовий вектор. Обчислення за формулою (2) за умови  $d = 5$  нм,  $\lambda = 500$  нм показують, що  $P \approx 10^{-10}W$ . Такий потік практично неможливо зареєструвати.

Однак, еванесцентні хвилі у ближній зоні мають дуже важливу особливість – **при внесенні у ближню зону деякої неоднорідності хвильове поле у ближній зоні частково руйнується і частина енергії стоячих хвиль передається біжучи хвилям у дальній зоні**. Цю зміну енергії світлового потоку вже можна зареєструвати фотодетектором.

Таким чином, при скануванні зразка світловим потоком через **субхвильову діафрагму** залежно від локальних оптичних властивостей зразка (коефіцієнтів відбивання, заломлення, поглинання чи розсіювання світла) буде формуватися **розподіл інтенсивності вторинного оптичного випромінення  $I(x,y)$** , який визначає **оптичний рельєф зразка**.

## 2. Близньопольовий сканувальний оптичний мікроскоп (БСОМп)

Реалізація висловленої вище фізичної ідеї щодо сканування наносистем світловим потоком через субхвильові діафрагми потребує технічного вирішення двох ключових проблем:

1. Створення зонду з субхвильовою діафрагмою і забезпечення достатньо потужного світлового потоку через неї.
2. Створення системи сканування зонду на таких відстанях від поверхні, що зразок потрапляє у ближню зону за діафрагмою.

### 2.1. Оптичний зонд з субхвильовою діафрагмою

Для найбільш поширеного типу зонду використовується **аксіально-симетричний оптичний хвилевід**, який складається з матеріалів з різними показниками заломлення і виготовляється з кварцового скла (рис. 3). Важливо, що внутрішнє циліндричне волокно виготовляється зі скла з більшим показником заломлення, ніж зовнішнє волокно. За рахунок цього забезпечується **повне внутрішнє відбивання світла** і світловий потік розповсюджується у внутрішньому волокні.

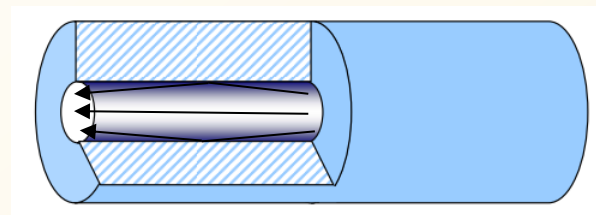


Рис. 3

Субхвильова діафрагма формується з хвилеводу методом **хімічного травлення**. На кінцівці зонду стравлюється скло, формуючи конусоподібне вістря з діаметром внутрішнього волокна у десятки нанометрів (рис. 4а). Далі на вістря наплюється шар металу, утворюючи оптичну діафрагму необхідного субхвильового діаметру (рис. 4б).

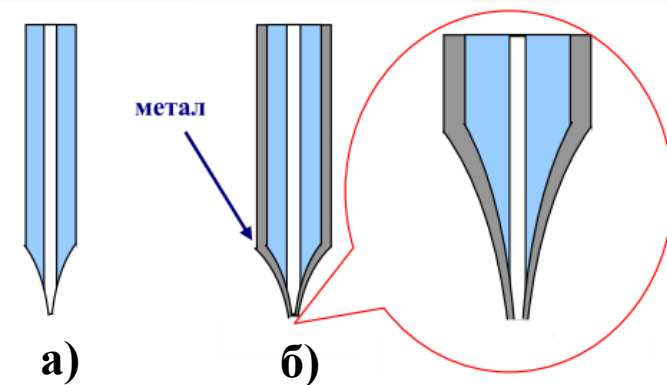


Рис. 4

## 2.2. Система сканування БОМ

Як відзначалося, для передачі енергії від еванесцентних хвиль до біжучих хвиль необхідно, щоб зразок потрапляв у ближню до субхвильової діафрагми зону. Хоча загальна протяжність ближньої зони досягає  $h \approx \lambda / 4$ , але, зважаючи на експоненційне згасання амплітуди еванесцентних хвиль ефективна робоча відстань від діафрагми до поверхні зразка має складати не більше 10 нм. Для підтримання такої відстані використовують **коливальну методику**.

Основним конструктивним елементом коливальної системи сканування є **кварцовий резонатор** П-подібної форми, до якого з допомогою клею кріпиться **зонд** (рис. 5). З використанням **п'єзовібратора** у резонаторі збуджуються гармонічні коливання з частотою, близькою до резонансної (десятки-сотні кГц). При цьому реєструється електричний сигнал коливань  $U(t)$ , за яким визначається амплітуда і фаза коливань. При наближенні до поверхні на відстань нанометрів зонд починає взаємодіяти з поверхнею, втрачаючи енергію в поверхневому шарі адсорбенту (вода) на поверхні (рис. 6а). Крім того, на малих відстанях від поверхні змінюється коливальна мода зонду (рис. 6б, 6в) також за рахунок взаємодії зонду з поверхнею.

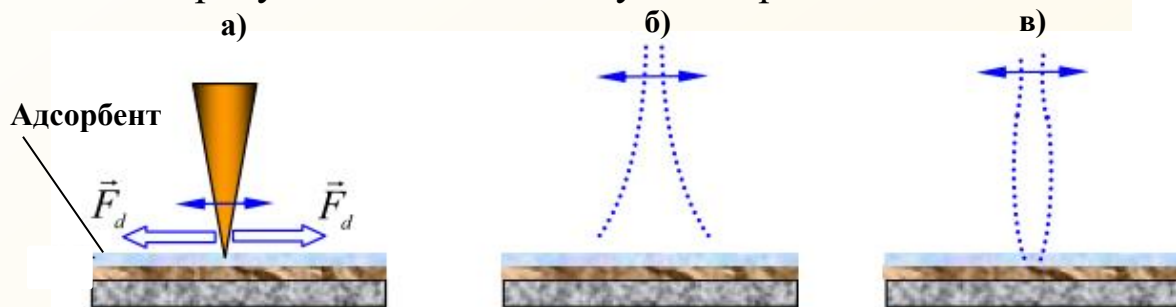


Рис. 6

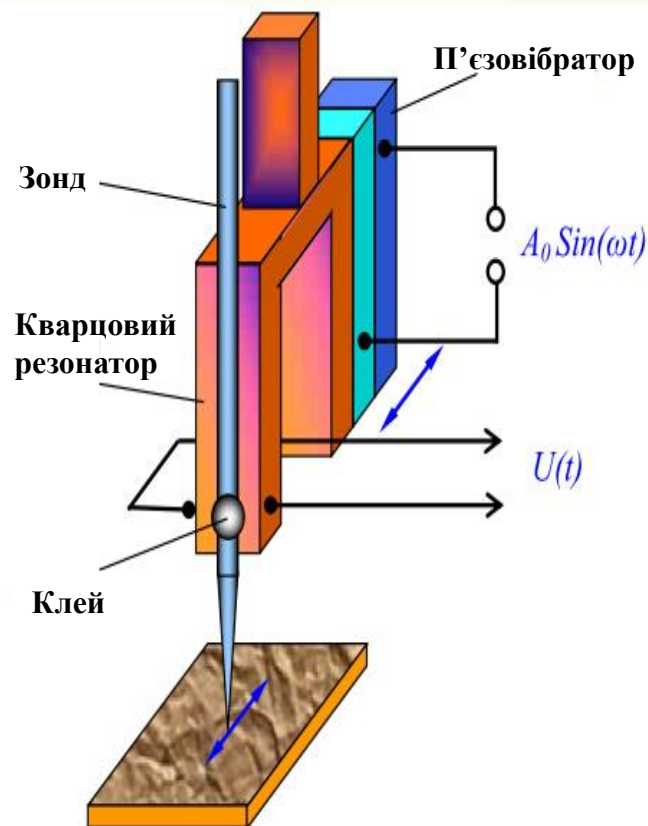


Рис. 5



Внаслідок цих процесів змінюється резонансна частота коливань резонатора, що призводить до зсуву його АЧХ та ФЧХ у бік більш високих частот (добротність системи зменшується). В результаті змінюються сигнали амплітуди та фази коливань на частоті збудження, які порівнюються з опорним значеннями сигналу амплітуди. Сформований сигнал різниці подається на трипод, який забезпечує вертикальне переміщення зразка, за рахунок чого реалізується сканування в режимі **сталої взаємодії**, тобто підтримується стала висота зонда над поверхнею (все, як у коливальній методиці АСМ).

### 2.3. Структурна схема БСОМп

Сучасні БСОМп компонуються у двох основних схемах: а) на **відбиття** світлового променя від поверхні; б) на **проходження** світлового променя через зразок.

У схемі на відбиття широко використовується варіант, за якого потужний лазерний промінь розповсюджуються у світловоді і освітлює поверхню через субхвильову діафрагму (рис. 7а). Зміна інтенсивності відбитих променів відображує зміну інтенсивності у дальній зоні.

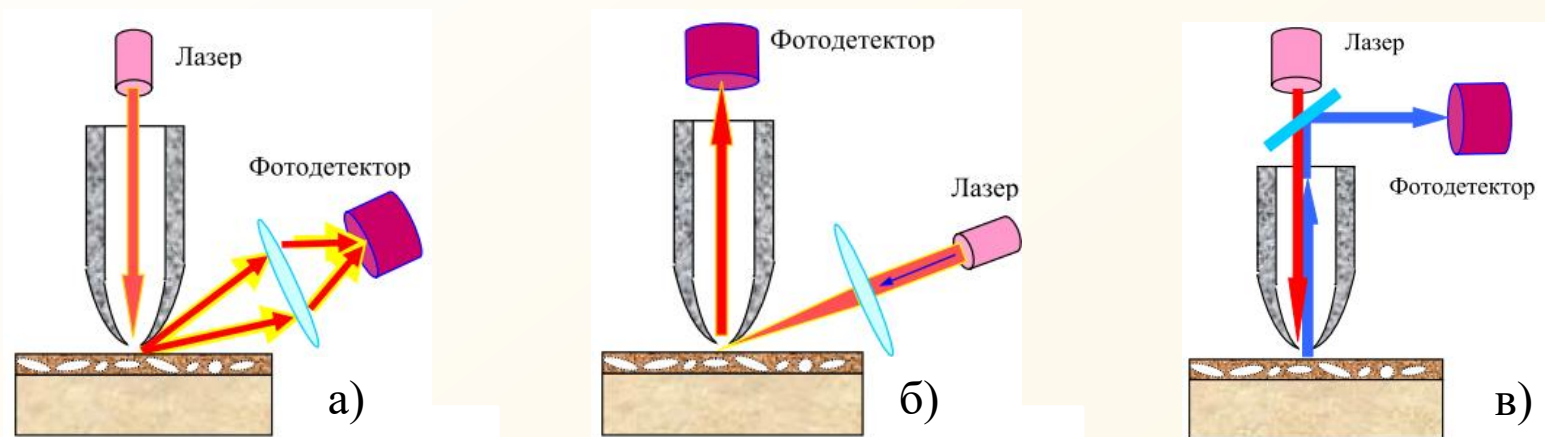


Рис. 7

А причиною такої зміни є поява неоднорідності у ближній зоні за діафрагмою. Відбите світло фокусується лінзою і спрямовується на фотодетектор. Завдяки потужному світловому пучку нанорозмірного діаметру схема широко застосовується в оптичній нанолітографії.

У тих випадках, коли потрібно реалізувати потужне освітлення поверхні, наприклад, при дослідженні нелінійних оптичних властивостей речовини, використовується пряме лазерне опромінення поверхні (рис.7б).

За останні роки досить широкого застосування здобула комбінована схема, в якій первинний та відбитий від поверхні світлові промені розповсюджуються в одному світловоді і проходять через одну і ту ж субхвильову діафрагму (рис. 7в). Відбите світло виводиться на фотодетектор через відбивання від напівпрозорого плоскопаралельного дзеркала. Очевидно, інтенсивність корисного сигналу буде досить низькою, тому для його реєстрації використовують високочутливі детектори випромінювання. Така схема дозволяє забезпечити значну локалізацію джерел відбитих хвиль і характеризується роздільною здатністю, яка необхідна для дослідження **оптичних характеристик наносистем**.

У схемі на проходження світла використовуються ті ж компоненти – лазер, зонд з субхвильовою діафрагмою та фотодетектор. Один варіант, коли випромінювання лазера фокусується на зразку, а випромінювання, що пройшло через зразок, розповсюджується в світловоді до детектора (рис. 8а). Інший варіант – навпаки, світло фокусується через субхвильову діафрагму на поверхні, а хвилі, які пройшли через зразок, потрапляють у фотодетектор (рис.8б). Методика на проходження дозволяє отримати координатний розподіл коефіцієнта ослаблення світла.

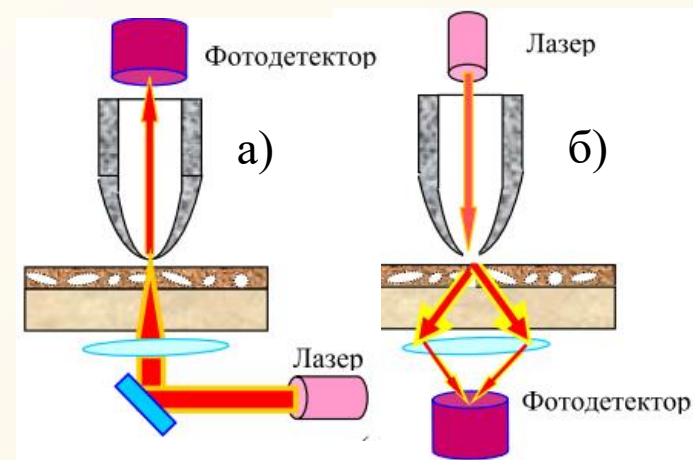


Рис. 8

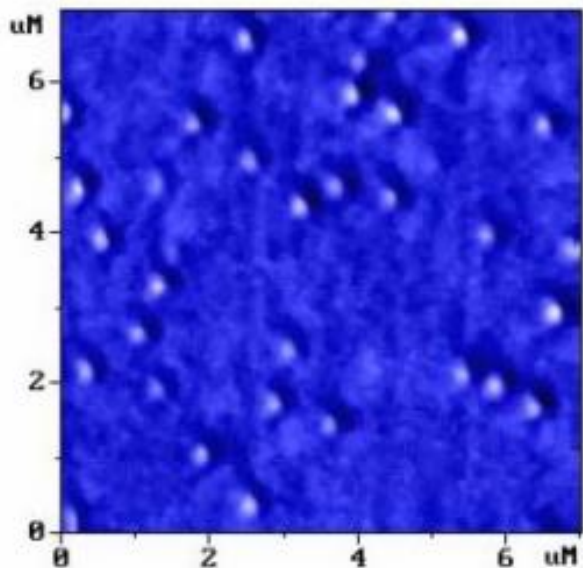


Рис. 9. Поверхня InAs з квантовими точками

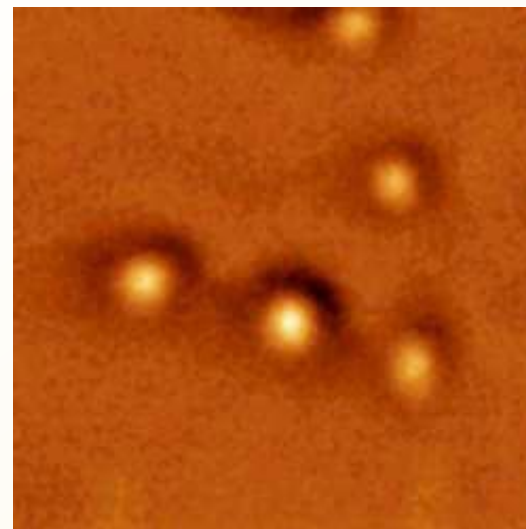


Рис. 10. Поверхня скла з кульками Au діаметром 250 нм

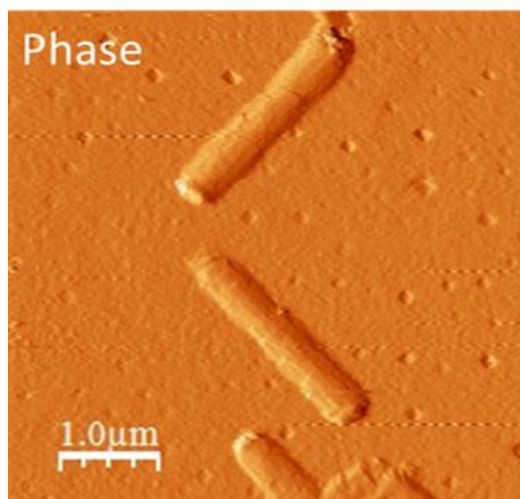


Рис. 11. Поверхня Si з вкрапленнями структур SiGe

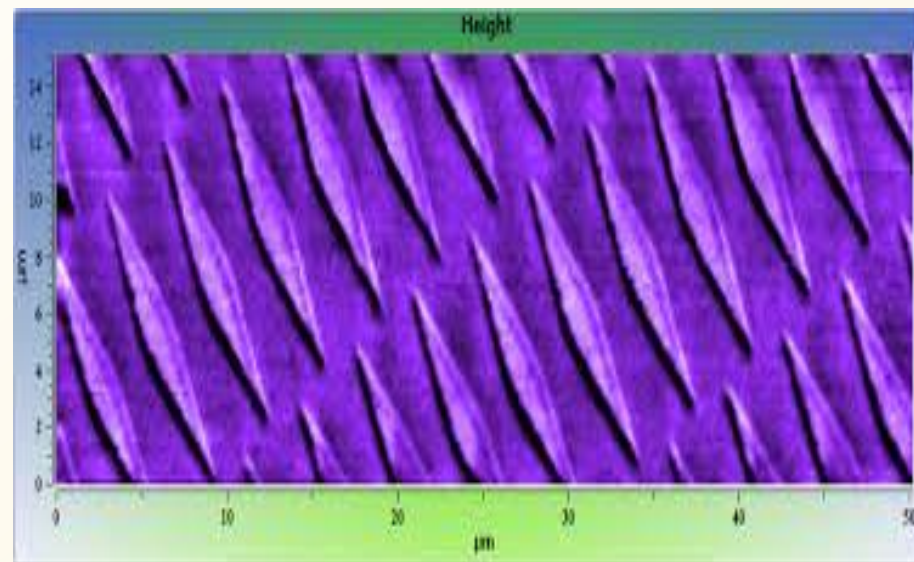


Рис. 12. Поверхня парамагнетика з кластерами з металу-ферромагнетика