
Ćwiczenie M1

Zastosowanie mikroskopii sił atomowych do badania nanostruktur

Prowadzący: Dr Jan Pawłowski, email: jpawlowski@fuw.edu.pl, sala: 311

Wymagania

Podstawy fizyczne mikroskopii sił atomowych: Student powinien znać istotę efektu piezoelektrycznego, rozróżniać efekt bezpośredni i odwrotny, wiedzieć jakie materiały wykazują właściwości piezoelektryczne oraz rozumieć, w jaki sposób piezoelementy są wykorzystywane w AFM do precyzyjnego pozycjonowania sondy względem próbki w trzech osiach. Powinien także rozumieć charakter drgań wymuszonych oscylatora harmonicznego, znać zależność amplitudy i fazy drgań od częstotliwości pobudzenia oraz znaczenie parametrów takich jak dobroć oscylatora (Q), szerokość rezonansu czy tłumienie, w kontekście działania mikroskopu AFM w trybach dynamicznych (bezkontaktowym i przerywanego kontaktu). Szczególną uwagę należy poświęcić opisowi sił działających pomiędzy końcówką sondy a powierzchnią próbki – student powinien znać naturę sił van der Waalsa jako przyciągających oddziaływań międzycząsteczkowych oraz sił odpychających wynikających z nakładania się orbitali elektronowych (zakaz Pauliego), a także rozumieć, że całkowity charakter oddziaływania w funkcji odległości sonda-próbka można przedstawić graficznie w postaci potencjału Lennarda-Jonesa, który ilustruje istnienie minimum energetycznego oraz obszary dominacji sił przyciągających i odpychających. Dodatkowo powinien być świadomy istnienia innych rodzajów oddziaływań występujących w warunkach rzeczywistych, takich jak siły kapilarne (wynikające z obecności warstwy wody na powierzchni próbki w warunkach atmosferycznych), siły elektrostatyczne (spowodowane różnicą potencjałów lub ładunkami powierzchniowymi), siły chemiczne (powiązane z oddziaływaniami specyficznymi pomiędzy końcówką a powierzchnią, np. wiązania wodorowe, kowalencyjne) oraz siły magnetyczne (występujące przy użyciu sond ferromagnetycznych w trybie MFM).

Budowa i zasada działania mikroskopu AFM: Student powinien rozumieć sposób detekcji oddziaływań pomiędzy sondą a próbką za pomocą układu optycznego składającego się z lasera i detektora czteropolowego (fotodiody), umieć wyjaśnić jak zarejestrowane odchylenia dźwigni są przetwarzane na sygnał elektryczny oraz jak interpretowane są zmiany siły oddziaływania w różnych trybach pracy mikroskopu. Powinien także znać zasadę działania skanera opartego na piezoelektrycznej rurce, odpowiedzialnego za przemieszczanie próbki (lub sondy) w osiach X, Y i Z, a także rozumieć problemy wynikające z nieliniowości charakterystyki piezoelementów, ich histerezy oraz dryfu, co może prowadzić do błędów odwzorowania topografii. Ważnym elementem wiedzy jest zrozumienie działania pętli sprzężenia zwrotnego, której rolą jest utrzymywanie wybranego parametru (np. siły kontaktu, amplitudy drgań) na stałym poziomie – student powinien wiedzieć, jak parametry pętli wpływają na stabilność i jakość odwzorowania, a także jak błędne ustawienia mogą prowadzić do zakłóceń obrazu. Dodatkowo należy znać właściwości sond używanych w AFM – zrozumieć wpływ promienia ostrza na rozdzielczość obrazowania, znaczenie sztywności dźwigni w zależności od wybranego trybu pracy oraz wiedzieć, jak niewłaściwy dobór sondy może prowadzić do zniekształceń obrazu lub uszkodzenia próbki.

Tryby pracy i techniki pomiarowe: Student powinien umieć wyjaśnić zasadę działania mikroskopu AFM pracującego w trybie kontaktowym, gdzie sonda pozostaje w stałym kontakcie z powierzchnią próbki, w trybie przerywanego kontaktu (ang. *tapping mode*), w którym sonda oscyluje w pobliżu powierzchni i styka się z nią okresowo, oraz w trybie bezkontaktowym, w którym końcówka sondy pozostaje w bliskim sąsiedztwie próbki, reagując na słabe siły przyciągające. Powinien rozumieć zalety i ograniczenia każdego z trybów, w szczególności w kontekście jakości obrazowania, oddziaływania sondy z powierzchnią oraz możliwych uszkodzeń próbki. Ponadto student powinien być przygotowany do pracy z zaawansowanymi technikami pomiarowymi wykorzystywanymi w ćwiczeniu, w tym z Conductive AFM (C-AFM), w którym jednocześnie rejestrowana jest topografia i przewodnictwo lokalne w punkcie styku sondy z próbką, oraz z Magnetic Force Microscopy (MFM), polegającym na pomiarze zakłóceń rezonansu sondy magnetycznej wywołanych oddziaływaniami z lokalnymi polami magnetycznymi próbki – student powinien wiedzieć, jakie informacje są uzyskiwane z tych pomiarów oraz jakie są wymagania dotyczące sond i ustawień mikroskopu w tych trybach.

Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest nabycie praktycznych umiejętności w zakresie obsługi mikroskopu sił atomowych (AFM), w tym przygotowania próbek, doboru parametrów pomiarowych i wykonania skanów. Studenci przeprowadzą podstawowe obrazowanie topografii powierzchni w trybie przerywanego kontaktu, a także zapoznają się z zaawansowanymi technikami pomiarowymi: przewodzącym trybem AFM (C-AFM) i mikroskopią sił magnetycznych (MFM) do badania wybranych właściwości nanostruktur. Ćwiczenie umożliwi ocenę jakości uzyskanych danych oraz zrozumienie zależności między topografią a właściwościami fizycznymi badanych obiektów.

Wprowadzenie teoretyczne

Mikroskopia sił atomowych (AFM, ang. *Atomic Force Microscopy*) jest jednym z podstawowych narzędzi mikroskopii skaningowej sondą (SPM, ang. *Scanning Probe Microscopy*), obok mikroskopii tunelowej (STM). W odróżnieniu od STM, który wymaga przewodzących powierzchni i wykorzystuje zjawisko tunelowania elektronów, AFM może być stosowany również do badań powierzchni nieprzewodzących.

Dzięki bardzo wysokiej rozdzielczości, AFM znajduje szerokie zastosowanie w wielu dziedzinach nauki i przemysłu. W materiałoznawstwie umożliwia badania topografii i właściwości mechanicznych (np. sztywność, adhezja) różnorodnych powierzchni, cienkich warstw i nanostruktur. W elektronice i nanotechnologii wykorzystywany jest do charakteryzacji materiałów funkcjonalnych, struktur mikro- i nanoskali, a także do lokalnego pomiaru przewodnictwa elektrycznego czy właściwości ferroelektrycznych i piezoelektrycznych. W biologii i medycynie AFM służy do obrazowania struktur biologicznych (np. komórek, błon, białek, kwasów nukleinowych) w warunkach zbliżonych do naturalnych, co pozwala na analizę ich morfologii, elastyczności oraz oddziaływań molekularnych.

Wszechstronność techniki AFM wynika nie tylko z jej uniwersalności materiałowej, ale również z możliwości prowadzenia pomiarów w różnych środowiskach (próżnia, powietrze, ciecz) oraz szerokiego wyboru trybów pracy sondy, dostosowanych do badanych właściwości fizycznych i chemicznych próbek.

1. Zasada działania mikroskopu AFM

Idea działania mikroskopu AFM opiera się na pomiarze sił oddziaływania pomiędzy bardzo ostrą sondą a powierzchnią badanej próbki. Sonda jest zamocowana na cienkiej, sprężystej dźwigni, która ugina się lub skręca pod wpływem sił międzyatomowych działających w miarę zbliżania sondy do próbki. Typowe promienie krzywizny ostrza sondy mieszczą się w zakresie kilku–kilkunastu nanometrów, co umożliwia uzyskanie wysokiej rozdzielczości przestrzennej.

Podczas obrazowania próbka jest skanowana w płaszczyźnie x-y względem sondy (lub odwrotnie), a siły oddziaływania powodujące odkształcenie dźwigni są nieustannie monitorowane. Detekcja wychylenia dźwigni odbywa się za pomocą wiązki laserowej odbijającej się od jej tylnej powierzchni i trafiającej na fotodiodę czteropolową. Nawet niewielkie zmiany kąta ugięcia powodują przesunięcia plamki lasera na detektorze, co umożliwia bardzo czuły pomiar siły działającej między sondą a próbką. Aby utrzymać stałą siłę oddziaływania (lub inną wielkość kontrolowaną, np. amplitudę drgań), mikroskop AFM wykorzystuje układ sprzężenia zwrotnego, który na bieżąco reguluje pozycję skanera w osi Z. Regulacja ta kompensuje zmiany wysokości powierzchni próbki, pozwalając na utrzymanie zadanej wartości wielkości kontrolowanej. Zmiany położenia skanera są rejestrowane i wykorzystywane do odtworzenia topografii powierzchni.

Za precyzyjne pozycjonowanie sondy (lub próbki) w trzech wymiarach odpowiada skaner piezoelektryczny. Dzięki zastosowaniu materiałów piezoelektrycznych możliwe jest uzyskanie bardzo małych kroków ruchu z dokładnością rzędu dziesiątych części nanometra. Taka precyzja pozwala na mapowanie powierzchni próbki z rozdzielczością atomową w zależności od trybu pracy, właściwości próbki i środowiska prowadzonego pomiaru.

2. Siły występujące między sondą AFM a próbką

Podczas pomiaru mikroskopem AFM między ostrzem sondy a powierzchnią próbki działają różne siły fizyczne, których charakter zależy od odległości, warunków otoczenia oraz właściwości materiałów. Poniżej przedstawiono główne typy oddziaływań:

- ❖ Siły van der Waalsa – są to przyciągające siły międzycząsteczkowe, które dominują przy odległościach odsetek nanometra do kilku–kilkunastu nanometrów, w zależności od geometrii układu (sonda–próbka) i rodzaju oddziałujących materiałów. W typowych układach AFM mają znaczenie w zakresie ok. 0,2–10 nm. Składają się z trzech komponentów: oddziaływań indukowanych dipoli, sił dyspersyjnych (Londona) i sił orientacyjnych. Występują między elektrycznie obojętnymi cząsteczkami i są zawsze obecne w mikroskopii sił atomowych.

- ❖ Siły odpychające (kwantowo-mechaniczne) – pojawiają się przy bardzo małych odległościach, gdy orbitale elektronowe atomów sondy i próbki zaczynają się nakładać. Zgodnie z zakazem Pauliego, dwa fermiony nie mogą zajmować tego samego stanu kwantowego, co skutkuje gwałtownie rosnącą siłą odpychającą.
- ❖ Siły kapilarne – występują podczas pomiarów w powietrzu, gdy na powierzchni próbki tworzy się cienka warstwa wody (film wodny). Pomiędzy sondą a próbką może powstać menisk wodny, generujący siłę przyciągającą. Siła ta może być dominująca w warunkach podwyższonej wilgotności.
- ❖ Siły chemiczne – pojawiają się, gdy dochodzi do tworzenia wiązań chemicznych między atomami sondy i próbki. Są to oddziaływania krótkozasięgowe, silniejsze niż siły van der Waalsa, występujące przy niemal bezpośrednim kontakcie sonda-próbka.
- ❖ Siły elektrostatyczne – wynikają z obecności ładunków na powierzchni próbki lub sondy. Mogą być skutkiem naturalnych różnic potencjału, obecności jonów, a także elektryzacji kontaktowej (np. przez tarcie lub kontakt materiałów o różnych właściwościach tryboelektrycznych).
- ❖ Siły magnetyczne – mają znaczenie tylko w przypadku, gdy sonda lub próbka wykazuje właściwości magnetyczne (np. jest ferromagnetyczna). W takim przypadku pojawiają się dodatkowe siły związane z oddziaływaniem dipoli magnetycznych lub pól magnetycznych.

Zależność siły od odległości można przedstawić za pomocą potencjału Lennarda-Jonesa. Ilustruje on, że dla większych odległości dominują siły przyciągające (van der Waalsa), a dla bardzo małych – odpychające (nakładanie się orbitali). W punkcie równowagi siły się znoszą, co odpowiada minimalnej energii układu.

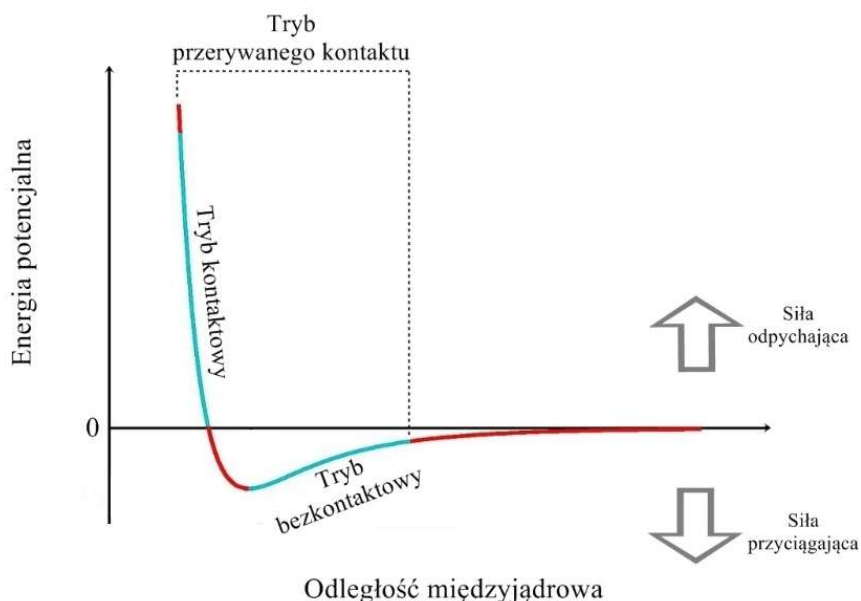
W praktyce całkowity potencjał oddziaływania sonda-próbka jest złożeniem wszystkich powyższych oddziaływań, a ich wkłady nakładają się w sposób nieliniowy. Z tego względu mikroskop AFM nie pozwala na ich jednoznaczne rozdzielenie doświadczalnie – możliwa jest tylko analiza całościowej siły działającej między sondą a próbką.

3. Tryby pracy mikroskopu AFM

Mikroskopia AFM pozwala na obrazowanie topografii powierzchni próbki za pomocą trzech podstawowych trybów pracy:

- trybu kontaktowego,
- trybu przerywanego kontaktu (tapping),
- trybu bezkontaktowego.

U podstaw ich działania leżą oddziaływania międzyatomowe występujące pomiędzy powierzchnią próbki a sondą. Gdy sonda znajduje się w dużej odległości od próbki, nie oddziałuje z nią. Wraz ze zbliżaniem się sondy pojawiają się siły przyciągające (głównie van der Waalsa), które następnie przechodzą w siły odpychające (związane z nakładaniem się orbitali elektronowych). Na podstawie przebiegu krzywej energii potencjalnej w funkcji odległości sonda-próbka (odległość międzyjądrowa) można zaobserwować, w jakich obszarach energii potencjalnej takiego układu konkretne tryby pracy mikroskopu AFM znajdują swoje zastosowanie (Rysunek 1).



Rysunek 1. Zależność energii potencjalnej od odległości międzyjądrowej z uwzględnieniem reżimów pracy mikroskopu AFM.

Tryb kontaktowy (Contact mode)

W trybie kontaktowym sonda znajduje się w stałym, bezpośrednim kontakcie z powierzchnią próbki. Działa tu przede wszystkim siła odpychająca, wynikająca z oddziaływań kwantowo-mechanicznych. Odształcenie dźwigni mierzone jest na podstawie odbicia wiązki laserowej, a wartość siły przyłożonej do próbki opisana jest prawem Hooke'a:

$$F = -k \cdot D \quad (1)$$

, gdzie: F – siła oddziaływania sonda–próbka [N], k – stała sprężystości dźwigni [N/m], D – ugięcie dźwigni [m].

Tryb kontaktowy oferuje wysoką rozdzielczość i znajduje zastosowanie głównie w obrazowaniu twardych materiałów, takich jak metale, minerały i kompozyty. Pozwala też na analizę właściwości mechanicznych powierzchni. Jednak może prowadzić do uszkodzeń delikatnych próbek, szczególnie przy większej sztywności dźwigni.

Tryb przerywanego kontaktu (Tapping mode / Intermittent contact / Semicontact)

W trybie tapping dźwignia sondy wprowadzana jest w oscylacje o częstotliwości rezonansowej (od kilkudziesięciu do kilkuset kHz), a sonda w każdym cyklu styka się z powierzchnią tylko chwilowo. Kontakt następuje w reżimie sił odpychających, natomiast siły przyciągające działają w fazie zbliżania się sondy do powierzchni, zanim nastąpi kontakt mechaniczny. Zmiany amplitudy drgań wynikające z oddziaływania sondy z powierzchnią próbki są wykrywane i kompensowane przez układ sprzężenia zwrotnego, który reguluje wysokość skanera piezoelektrycznego.

Tryb ten jest mniej inwazyjny niż tryb kontaktowy i pozwala na badanie materiałów wrażliwych mechanicznie. Jednocześnie zachowuje wysoką jakość obrazu. Dzięki redukcji sił tarcia podczas skanowania, jest to obecnie najczęściej stosowany tryb pracy w AFM.

Tryb bezkontaktowy (Non-contact mode)

W trybie bezkontaktowym sonda oscyluje w odległości kilku nanometrów nad powierzchnią próbki, nie wchodząc z nią w bezpośredni kontakt. Detekcja odbywa się poprzez pomiar zmian amplitudy lub częstotliwości rezonansowej, które powstają wskutek oddziaływań przyciągających (głównie van der Waalsa). Układ sprzężenia zwrotnego dostosowuje położenie sondy, utrzymując ją na stałej wysokości, co umożliwia mapowanie topografii.

Tryb ten znajduje zastosowanie w badaniach delikatnych, łatwo uszkodzających się struktur – np. biologicznych, polimerowych czy cienkich warstw – oferując bardzo niską ingerencję mechaniczną w strukturę próbki.

Każdy z trybów pracy mikroskopu AFM wykorzystuje inne zakresy oddziaływań sonda–próbka, co pozwala na ich dostosowanie do rodzaju badanej powierzchni i celu pomiaru. Tryb kontaktowy działa w reżimie sił odpychających, bezkontaktowy w przyciągających, natomiast tryb tapping obejmuje oba zakresy i jest kompromisem pomiędzy jakością obrazu a delikatnością pomiaru. Całkowity potencjał oddziaływania sonda–próbka, przedstawiany za pomocą krzywej Lennarda-Jonesa, stanowi podstawę doboru trybu pracy mikroskopu.

4. Znaczenie praktyczne i przygotowanie do pomiaru

W czasie ćwiczenia student zapozna się z działaniem mikroskopu AFM w praktyce: przygotowaniem sondy do pomiaru, ustawianiem parametrów pomiaru, przeprowadzaniem skanowania oraz interpretacją uzyskanych obrazów topografii. Zrozumienie działania pętli sprzężenia zwrotnego oraz wyboru odpowiedniego trybu pracy jest kluczowe dla poprawnej akwizycji danych.

Celem ćwiczenia jest przede wszystkim nabycie praktycznych umiejętności w zakresie obsługi mikroskopu AFM, a także zrozumienie czynników wpływających na jakość uzyskiwanych obrazów.

Wykonanie i przebieg ćwiczenia

Ćwiczenie z zakresu mikroskopii sił atomowych (AFM) jest realizowane w ramach czterodniowego cyklu pomiarowego, który łączy zagadnienia teoretyczne z pracą laboratoryjną. Celem jest zapoznanie studentów z zasadą działania mikroskopu AFM, jego obsługą oraz wykonanie pomiarów przy użyciu mikroskopu **NT-MDT Nano Solver**.

Pierwszy dzień ćwiczenia rozpoczyna się od omówienia podstaw teoretycznych związanych z mikroskopią sił atomowych, zgodnie z przedstawionymi Wymaganiami. W trakcie wykładu poruszane są m.in. następujące zagadnienia:

- ❖ zasada działania mikroskopu AFM,
- ❖ charakterystyka oddziaływań sonda-próbka,
- ❖ tryby pracy AFM (kontaktowy, przerywanego kontaktu, bezkontaktowy),
- ❖ wpływ parametrów skanowania na jakość obrazu,
- ❖ interpretacja krzywej potencjału Lennarda-Jonesa.

Następnie ćwiczenie przechodzi do części praktycznej. Studenci zapoznają się z budową oraz obsługą mikroskopu NT-MDT Nano Solver. Omawiane są:

- ❖ sposób montażu dźwigni z sondą,
- ❖ procedura kalibracji mikroskopu przed rozpoczęciem pomiarów,
- ❖ konfiguracja parametrów niezbędnych do prawidłowego obrazowania (częstotliwość rezonansowa, amplituda drgań),
- ❖ sposób wyboru odpowiedniego obszaru do skanowania (z uwzględnieniem jednorodności powierzchni, unikania zanieczyszczeń i stabilności mechanicznej).

W trakcie obrazowania topografii przykładowej próbki asystent objaśnia sposób sterowania pracą mikroskopu oraz omawia czynniki wpływające na jakość uzyskiwanego obrazu. Szczególny nacisk kładzie się na:

- ❖ ustawienia układu sprzężenia zwrotnego (feedback loop),
- ❖ prędkość skanowania, rozdzielczość obrazu (liczbę linii i punktów),
- ❖ dobór parametrów odpowiednio do charakterystyki badanej próbki.

Studenci mają możliwość obserwacji obrazowania w czasie rzeczywistym oraz weryfikacji wpływu ustawień na jakość danych. Po przeprowadzeniu demonstracji i zapoznaniu się z obsługą aparatury, każdy student samodzielnie wykonuje pomiar topografii powierzchni próbki epitaksjalnego grafenu w trybie przerywanego kontaktu, ucząc się praktycznej kontroli nad parametrami obrazowania oraz interpretacji uzyskanych danych. Pierwszy dzień pomiarowy kończy się zapoznaniem studentów z oprogramowaniem do analizy i obróbki obrazów AFM.

W ciągu kolejnych trzech dni studenci wykonują pomiary z wykorzystaniem zaawansowanych trybów pracy mikroskopu AFM, dobranych w zależności od charakteru badanej próbki oraz celów pomiarowych. Do wyboru są dwa ćwiczenia specjalistyczne:

Ćwiczenie 1: Badanie materiałów elektrodowych z wykorzystaniem przewodzącego mikroskopu AFM (Conductive AFM, C-AFM)

Ćwiczenie to rozpoczyna się od obrazowania topografii powierzchni badanych materiałów w trybie przerywanego kontaktu (tapping), który pozwala na nieinwazyjne odwzorowanie ukształtowania próbki oraz identyfikację miejsc pomiarowych. Dzięki zastosowaniu tego trybu możliwe jest zlokalizowanie interesujących obszarów o różnej morfologii, które mogą wpływać na lokalne właściwości elektryczne materiału.

W drugiej części pomiaru studenci przechodzą do pracy w trybie kontaktowym z wykorzystaniem przewodzącej sondy AFM (C-AFM), który umożliwia:

- ❖ rejestrację sygnału prądowego w funkcji położenia sondy,
- ❖ tworzenie map przewodnictwa powierzchniowego,
- ❖ pomiar charakterystyk prądowo-napięciowych (I-V) w wybranych punktach powierzchni próbki.

W trakcie tego ćwiczenia omawiane są także kwestie związane z zapewnieniem stabilnego kontaktu elektrycznego między próbką a układem pomiarowym, doбором odpowiedniej sondy oraz interpretacją rejestrowanych danych.

Ćwiczenie 2: Badanie nośników danych z wykorzystaniem mikroskopii sił magnetycznych (Magnetic Force Microscopy, MFM)

Celem ćwiczenia jest charakterystyka właściwości magnetycznych nośników danych przy użyciu specjalistycznego trybu pracy mikroskopu AFM – mikroskopii sił magnetycznych (MFM). Technika ta umożliwia obrazowanie domen magnetycznych i analizę gęstości zapisu informacji, bazując na pomiarze sił magnetycznych oddziałujących pomiędzy sondą a próbką.

W ramach ćwiczenia badane są:

- ❖ taśma magnetyczna VHS – przykład nośnika o relatywnie niskiej gęstości zapisu,
- ❖ dyski twarde (HDD) o różnych pojemnościach – obrazujące postęp technologiczny i miniaturyzację struktur magnetycznych.

Pomiar realizowany jest bezpośrednio w trybie MFM, z wykorzystaniem sondy o powłoce ferromagnetycznej (np. Co/Cr). Mikroskopia MFM prowadzona jest w tzw. trybie podwójnego skanowania (Lift Mode). W pierwszym przebiegu rejestrowana jest topografia próbki, natomiast w drugim – sonda porusza się równolegle do powierzchni w ustalonej odległości (tzw. lift height), mierząc zmiany sygnału fazowego, które są efektem oddziaływań magnetycznych.

W ramach ćwiczenia studenci:

- ❖ uczą się przygotowania układu do pracy w trybie MFM,
- ❖ wykonują pomiary rozkładu pól magnetycznych nad próbką,
- ❖ analizują zarejestrowane obrazy pod kątem układu domen magnetycznych oraz zmian w ich rozmieszczeniu i gęstości w zależności od typu nośnika.

Ćwiczenie pozwala zrozumieć zasady działania MFM, a także zobaczyć praktyczne zastosowanie tej techniki w badaniach nad mikrostrukturą magnetyczną i ewolucją technologii zapisu informacji.

Sprawozdanie z wykonanego ćwiczenia

Sprawozdanie powinno zawierać następujące elementy:

1. Cel ćwiczenia oraz streszczenie

Zwięźle przedstawienie celu wykonanego zadania oraz ogólny opis przeprowadzonych pomiarów i uzyskanych wyników. Streszczenie powinno odzwierciedlać, jaki tryb pracy mikroskopu AFM został wykorzystany oraz czego dotyczyły analizy.

2. Wstęp teoretyczny

Krótkie wprowadzenie zawierające opis zrealizowanego zadania. Należy skupić się przede wszystkim na technikach pomiarowych zastosowanych w wybranym wariantcie ćwiczenia (ćwiczenie 1 lub 2), ze szczególnym uwzględnieniem trybu pracy AFM, rodzaju badanych próbek oraz mierzonej wielkości fizycznej (np. przewodnictwo, siły magnetyczne).

3. Opis metody pomiarowej, układu pomiarowego i próbek

Szczegółowy opis sposobu przeprowadzenia pomiarów:

- ❖ jaki tryb pracy AFM został zastosowany (np. tryb przerywanego kontaktu, kontaktowy, MFM),
- ❖ jakie sondy zostały wykorzystane (typ, pokrycie, parametry techniczne),
- ❖ jak przygotowano próbkę oraz w jakich warunkach prowadzono pomiary,
- ❖ jaki był przebieg procedury pomiarowej oraz jakie parametry skanowania zastosowano.

4. Wyniki pomiarów oraz ich analiza

Przedstawienie i omówienie wybranych obrazów AFM uzyskanych w trakcie ćwiczenia:

- ❖ należy przedstawić reprezentatywne obrazy i wskazać ich cechy charakterystyczne,
- ❖ dokonać analizy otrzymanych danych (np. rozkład przewodnictwa, struktura domen magnetycznych, charakterystyki I-V),
- ❖ wskazać zauważone błędy odwzorowania (artefakty obrazu), ich możliwe przyczyny oraz wpływ na jakość danych.

Nie jest wymagane zamieszczanie wszystkich uzyskanych obrazów – należy wybrać tylko te, które najlepiej ilustrują uzyskane wyniki i wspierają analizę. Sprawozdanie powinno stanowić spójną dokumentację przeprowadzonych badań.

5. Podsumowanie i wnioski

Podsumowanie kluczowych obserwacji, ocena skuteczności wybranych trybów pracy AFM, odniesienie uzyskanych wyników do teorii.

Kryteria oceny

Podstawowym kryterium oceny jest jakość i staranność przeprowadzonych pomiarów oraz sposób ich przedstawienia i interpretacji. W szczególności oceniane będą:

- ❖ umiejętność wybrania i przedstawienia najbardziej reprezentatywnych obrazów,
- ❖ umiejętność analizy i interpretacji wyników pomiarów,
- ❖ poprawność i kompletność opisu metody pomiarowej oraz warunków eksperymentalnych,
- ❖ identyfikacja i omówienie artefaktów obrazowania,
- ❖ przejrzystość, zwięźłość i logiczna struktura sprawozdania.

Literatura i materiały pomocnicze

1. P. Eaton, P. West, *Atomic Force Microscopy*, Oxford University Press, 2010.
Kompendium wiedzy dotyczące mikroskopii sił atomowych – od podstaw teoretycznych po praktyczne aspekty prowadzenia pomiarów.
Dostęp online: <https://academic.oup.com/book/7224>
2. M.L. Mironov, *Fundamentals of Scanning Probe Microscopy*, NT-MDT, 2004.
Podstawowy podręcznik omawiający zasady działania mikroskopów SPM, w tym AFM, autorstwa specjalisty związanej z producentem wykorzystywanej aparatury.
3. E. Meyer, H.J. Hug, R. Bennewitz, *Scanning Probe Microscopy: The Lab on a Tip*, Springer, 2004.
Publikacja o charakterze akademickim, szczegółowo opisująca techniki SPM, w tym mikroskopię AFM i MFM oraz ich zastosowania.
Dostęp online: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-662-09801-1>
4. C. Kittel, *Wstęp do fizyki ciała stałego*, Wydawnictwo Naukowe PWN, różne wydania.
Klasyczny podręcznik przedstawiający podstawy fizyki materii skondensowanej – niezbędny do zrozumienia właściwości badanych materiałów i interakcji na poziomie atomowym.