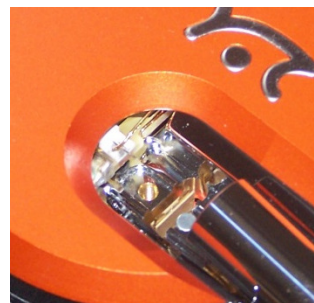


Skaningowy mikroskop tunelowy

Mariusz Krawiec

Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zapoznanie studenta ze skaningową mikroskopią tunelową, techniką pozwalającą na określenie topografii i struktury powierzchni materiału z atomową dokładnością.



Zakres ćwiczenia

1. Pomiar topograficzny powierzchni kryształu grafitu.
2. Wyznaczenie stałej sieci grafitu.

Zagadnienia do przygotowania

Aby zaliczyć kolokwium dopuszczające do wykonywania doświadczenia, student musi wykazać się dostateczną znajomością poniższych zagadnień:

Podstawy mechaniki kwantowej:

- równanie Schrödingera,
- zagadnienie cząstki w studni potencjału,
- tunelowanie przez barierę potencjału.

Struktura pasmowa metali i półprzewodników:

- tworzenie się pasm energetycznych,
- poziom Fermiego, praca wyjścia,
- przerwa energetyczna, etc.

Podstawowe wiadomości na temat grafitu:

- struktura atomowa,
- stała sieci,
- odległości pomiędzy atomami i pomiędzy płaszczyznami, etc.

Skaningowa mikroskopia tunelowa:

- zasada działania i budowa STM,
- tryby pracy,
- ostrze STM,
- skaner piezoelektryczny.

Metoda pomiaru stałej sieci grafitu z obrazu topograficznego STM.

Informacje wprowadzające

1. Równanie Schrödingera.
2. Cząstka w nieskończonej i skończonej studni potencjału.
3. Tunelowanie przez barierę potencjału.
4. Struktura pasmowa metali i półprzewodników.
5. Grafit – podstawowe wiadomości o strukturze atomowej.
6. Zjawisko piezoelektryczne
7. Skaningowa mikroskopia tunelowa

Równanie Schrödingera.

Równanie Schrödingera jest jednym z podstawowych równań nierelatywistycznej mechaniki kwantowej. Zostało ono sformułowane w 1926 roku przez Erwina Schrödingera, a określa ewolucję stanu układu kwantowego w czasie, opisanego funkcją falową lub wektorem stanu. Najbardziej ogólna postać równania, to:

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi(r, t) = \hat{H} \psi(r, t), \quad 1$$

gdzie $\psi(r, t)$ jest funkcją falową, której kwadrat określa prawdopodobieństwo znalezienia cząstki w punkcie r w chwili czasu t , \hat{H} jest operatorem energii całkowitej układu (hamiltonianem), $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ stałą Diraca, czyli stałą Plancka podzieloną przez 2π , a i - jednostką urojoną. Hamiltonian, opisujący pojedynczą cząstkę poruszającą się w potencjale $V(r)$, dany jest w postaci:

$$\frac{-\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(r), \quad 2$$

gdzie $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ jest operatorem Laplace'a, a m - masą cząstki. Niezależne od czasu równanie Schrödingera, opisujące cząstkę w potencjale $V(r)$, przedstawia się jako:

$$\frac{-\hbar^2}{2m} \nabla^2 \psi(r) + V(r) \psi(r) = E \psi(r), \quad 3$$

gdzie E jest energią cząstki – wartością własną hamiltonianu (2).

Cząstka w nieskończonej i skończonej studni potencjału.

Model cząstki w studni potencjału jest klasycznym przykładem ilustrującym różnice pomiędzy mechaniką klasyczną i kwantową. Główna różnica polega na tym, że cząstka kwantowa nie może mieć dowolnej energii. Innymi słowy, dozwolone energie cząstki są skwantowane, a ich wartości zależą od wielkości charakteryzujących studnię potencjału. Poniżej ograniczymy się tylko do przypadku jednowymiarowego. Rozważania dotyczące przypadków dwu- i trójwymiarowych są analogiczne.

Nieskończona studnia potencjału.

Potencjał, modelujący nieskończoną studnię o szerokości L , w której uwięziona jest cząstka, dany jest jako

$$V(x) = f(x) = \begin{cases} 0, & 0 < x < L \\ \infty, & x \leq 0, x \geq L \end{cases} \quad 4$$

Rozwiązując równanie (3) z potencjałem (4), otrzymujemy wyrażenie na funkcje falowe:

$$\psi_n(x) = A \sin(k_n x), \quad 5$$

gdzie liczba falowa $k_n = n \frac{\pi}{L}$ przybiera tylko skwantowane wartości określone przez $n = 1, 2, 3, \dots$

Oczywiście, funkcje falowe określone są tylko dla $0 < x < L$, czyli wewnątrz studni potencjału. Poza nią, funkcja falowa tożsamościowo równa jest 0. Oznacza to, że cząstka może przebywać tylko w obszarze studni potencjału. Liczba falowa k_n określa również dozwolone energie cząstki:

$$E_n = \frac{\hbar^2 k_n^2}{2m}. \quad 6$$

Skończona studnia potencjału

W tym przypadku, studnia potencjału określona jest jako:

$$V(x) = \begin{cases} V_0, & x \leq (\text{obszar I}) \\ 0, & 0 < x < (\text{obszar II}) \\ V_0, & x \geq (\text{obszar III}) \end{cases} \quad 7$$

Rozwiązując równanie Schrödingera (3) z potencjałem (7) w obszarach I, II i III, otrzymujemy wyrażenia na funkcje falowe, odpowiednio w obszarze I $\psi(x) = A e^{kx}$, II $\psi(x) = B \sin(kx) + C \cos(kx)$ oraz III $\psi(x) = D e^{-kx}$. Stałe A, B, C i D otrzymujemy z warunku ciągłości funkcji falowej i jej pochodnej w punktach określających granice studni potencjału. Wewnątrz studni, rozwiązania są podobne jak dla przypadku nieskończonej studni potencjału, natomiast różnica pojawia się w rozwiązaniach w obszarach I i III. Jak łatwo zauważyć, funkcja falowa nie znika poza obszarem studni kwantowej, co prowadzi do sytuacji, w której istnieje niezerowe prawdopodobieństwo znalezienia cząstki poza studnią potencjału, nawet w przypadku, gdy energii cząstki jest mniejsza niż wysokość studni V_0 .

Tunelowanie przez barierę potencjału.

Fakt, iż w przypadku skończonej studni potencjału można znaleźć cząstkę poza obszarem studni, prowadzi do efektu tunelowego. Jeżeli ruch cząstki ograniczony jest barierą potencjału o wysokości V_0 , a energia cząstki $E < V_0$, to przy dostatecznie wąskiej barierze potencjału, może istnieć niezerowe prawdopodobieństwo znalezienia cząstki po drugiej stronie bariery. Mamy wówczas do czynienia z efektem tunelowym.

Rozważmy przypadek jednowymiarowy, w którym cząstka porusza się w kierunku bariery potencjału od strony lewej. Podobnie jak poprzednio, rozwiązując równanie Schrödingera (3) z potencjałem (7) w obszarach I, II i III, otrzymujemy wyrażenia na funkcje falowe, odpowiednio w obszarze I $\psi(x) = Ae^{ikx} + Be^{-ikx}$, II - $\psi(x) = Ce^{kx} + De^{-kx}$ oraz III - $\psi(x) = Fe^{-ikx}$. Współczynniki A, B, C, D i F wyznacza się z warunku ciągłości funkcji falowej i jej pochodnej na granicach obszarów I, II i III. Wielkością mówiącą o tym, jakie jest prawdopodobieństwo przetunelowania cząstki przez barierę potencjału, jest współczynnik transmisji T , dany wyrażeniem:

$$T = \frac{|F|^2}{|A|^2}. \quad 8$$

Można również zdefiniować współczynnik odbicia

$$R = \frac{|B|^2}{|A|^2}. \quad 9$$

Podstawiając do wzoru (8) wyrażenia na F i A , można pokazać, że współczynnik transmisji, a przez to prawdopodobieństwo tunelowania zależy wykładniczo od wysokości i szerokości bariery.

Struktura pasmowa metali i półprzewodników.

Struktura elektronowa pojedynczego odizolowanego atomu ma widmo dyskretne i składa się z poziomów energetycznych, które zapełniane są przez elektrony. Jeśli zbliżymy do siebie kilka atomów, to poziomy te rozszczepią się. Prowadzi to do powstania poziomów energetycznych, których liczba proporcjonalna jest do liczby atomów. Jeśli tych atomów jest rzędu 10^{23} , jak w przypadku ciała stałego, to otrzymujemy tego samego rzędu liczbę poziomów energetycznych. W konsekwencji różnica energii pomiędzy tymi poziomami jest bardzo niewielka, dlatego zbiór tych poziomów tworzy kontinuum stanów, które można traktować jako pasmo energetyczne. W związku z tym, że w pojedynczym atomie mamy wiele poziomów energetycznych, w ciele stałym pojawi się wiele pasm, oddzielonych od siebie przerwami energetycznymi, czyli obszarami energii, których nie mogą przyjmować elektrony.

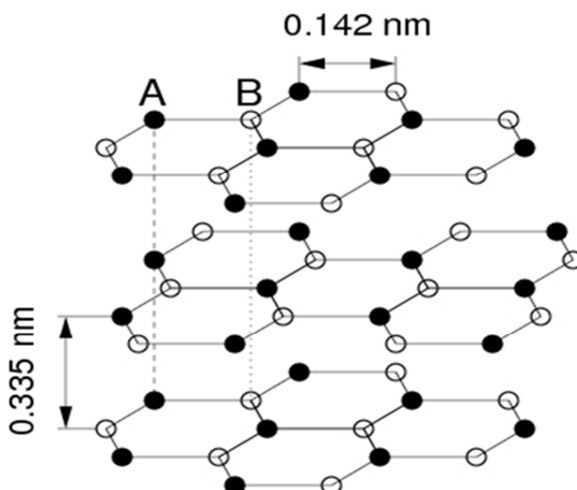
Jedną z podstawowych wielkości charakteryzujących strukturę pasmową jest energia (poziom) Fermiego (E_F). Jest ona określona w temperaturze 0 K jako energia stanu dla którego prawdopodobieństwo obsadzenia przez elektrony jest równe $\frac{1}{2}$. W zależności od tego, gdzie znajduje się poziom Fermiego, ciała stałe można podzielić na metale, półprzewodniki i

izolatory. W metalach E_F znajduje się w obrębie pasma częściowo zapełnionego przez elektrony i oddziela stany obsadzone od nieobsadzonych. W przypadku półprzewodników i izolatorów E_F znajduje się w obszarze przerwy energetycznej oddzielając całkowicie zapełnione pasmo walencyjne od pustego pasma przewodnictwa.

Drugą ważną wielkością używaną w opisie właściwości elektronowych ciał stałych jest praca wyjścia. Jest to energia, jaką należy dostarczyć elektronowi, aby opuścił ciało stałe lub inaczej różnica energii pomiędzy poziomem próżni a energią Fermiego.

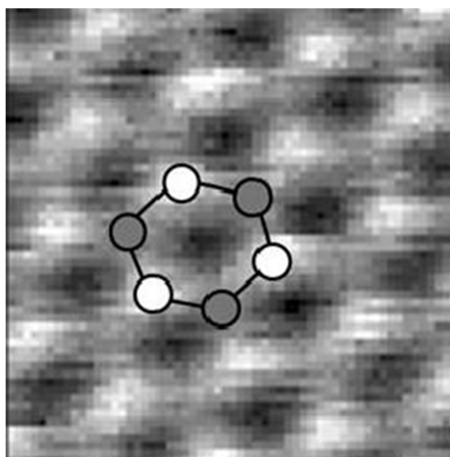
Grafit – podstawowe wiadomości o strukturze atomowej.

Grafit jest jedną z odmian alotropowych węgla. Struktura grafitu składa się z warstw, w których atomy węgla ułożone są w sieć heksagonalną ze stałą sieci 0.246 nm. Odległość pomiędzy sąsiednimi atomami wynosi 0.142 nm, a pomiędzy warstwami 0.335 nm (Rys. 1).



Rys.1. Struktura atomowa grafitu.

Struktura warstwowa grafitu powoduje anizotropię wielkości transportowych i cieplnych. Na przykład przewodnictwo elektryczne i cieplne są znacznie większe w kierunku równoległym do warstw C, niż prostopadłym. W warstwach można wyróżnić dwa rodzaje atomów (atomy A, które mają sąsiadów w warstwach bezpośrednio pod i nad oraz atomy B, których położenia powtarzają się, co druga warstwa. Ten fakt jest znakomicie widoczny w obrazach topograficznych powierzchni otrzymanych przy pomocy skaningowego mikroskopu tunelowego (Rys.2).



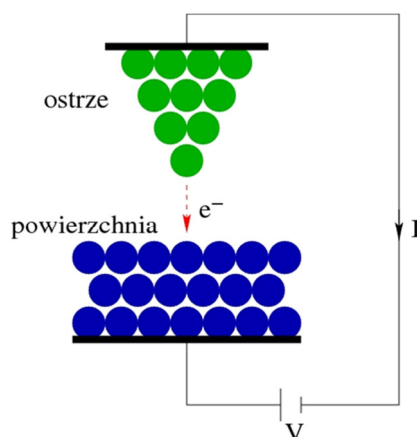
Rys.2. Topografia STM powierzchni grafitu.

Zjawisko piezoelektryczne.

Zjawisko piezoelektryczne polega na powstawaniu napięcia na przeciwległych ściankach kryształu w wyniku jego deformacji (ściskania lub rozciągania). Istnieje również zjawisko odwrotne, polegające na deformacji kryształu pod wpływem przyłożonego pola elektrycznego. Obydwa zjawiska obserwuje się w kryształach, w których komórki elementarne nie mają środka symetrii i ściśle są związane z występowaniem elektrycznych momentów dipolowych. Typowym materiałem piezoelektrycznym jest kwarc. Każda jej komórka elementarna ma trzy osie wykazujące trwałe momenty dipolowe. Ze względu na symetrię, wypadkowy moment jest równy zero. Ściskając lub rozciągając kryształ, symetria zostaje naruszona i pojawia się niezerowy moment elektryczny w kierunku przyłożenia siły deformującej.

Skaningowa mikroskopia tunelowa.

Podstawą skaningowej mikroskopii tunelowej jest zjawisko tunelowania. W STM elektrony tunelują pomiędzy próbką a ostrzem STM. Schematycznie sytuacja przedstawiona jest na Rys. 3.

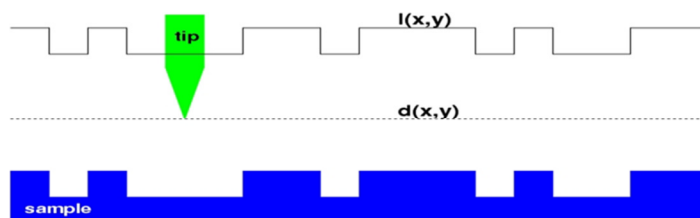


Rys. 3. Schemat działania STM. Z ostrza STM elektrony tunelują do powierzchni.

Ostrze porusza się na powierzchni próbki w odległości mniejszej niż 1 nm, rejestrując prąd tunelowy punkt po punkcie badanej powierzchni. W zależności od przyłożonego napięcia pomiędzy ostrzem a próbką można badać obsadzone lub nieobsadzone stany elektronowe powierzchni z atomową rozdzielczością. Rozdzielczość taką zapewnia ostrze STM zakończone pojedynczym atomem oraz sama natura zjawiska tunelowego, w którym prąd tunelowy zależy eksponencjalnie od szerokości bariery, czyli od odległości ostrze – próbka. Rozdzielczość w kierunku prostopadłym do powierzchni jest rzędu 10^{-3} nm.

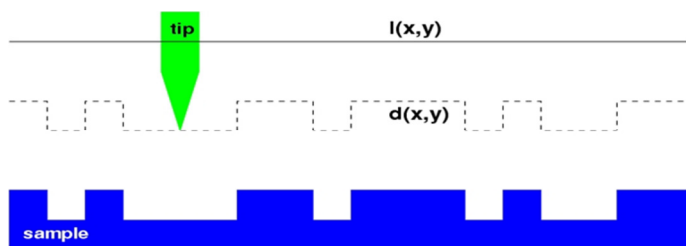
Tryby pracy STM.

STM może pracować w dwóch trybach: stałej wysokości i stałego prądu. Tryb stałej wysokości polega na tym, że ostrze porusza się na ustalonej wysokości nad powierzchnią badanej próbki, a mierzone są zmiany prądu. Tryb ten pozwala na dość szybkie skanowanie gładkich powierzchni. Schematycznie sytuacja pokazana jest na Rys.



Rys.4. Schemat pracy STM w trybie stałej wysokości.

Natomiast w trybie stałego prądu, ostrze porusza się również w kierunku prostopadłym do powierzchni tak, aby utrzymać zadany prąd tunelowy. Tryb ten jest bardziej czasochłonny, ale można w nim pracować nawet na nieregularnych powierzchniach. W tym trybie mierzone są obrazy topograficzne powierzchni. Schematycznie wygląda to tak, jak na Rys. 5.



Rys. 5. Schemat pracy STM w trybie stałego prądu.

Wykonanie ćwiczenia

Aparatura pomiarowa.

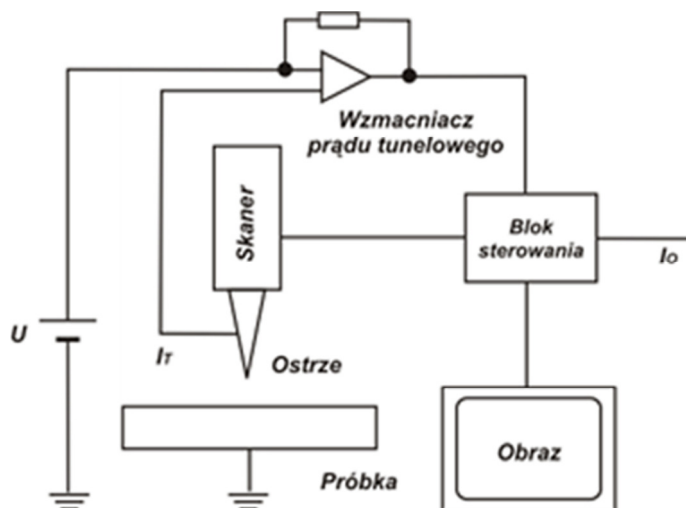
W skład aparatury pomiarowej wchodzi skaningowy mikroskop tunelowy *Nanosurf easyScan 2* oraz komputer PC z systemem operacyjnym Windows XP, sterujący pracą mikroskopu. Rys. 6 przedstawia głowicę i układ sterujący skaningowego mikroskopu tunelowego.



Rys. 6. Głowica i układ sterujący skaningowego mikroskopu tunelowego

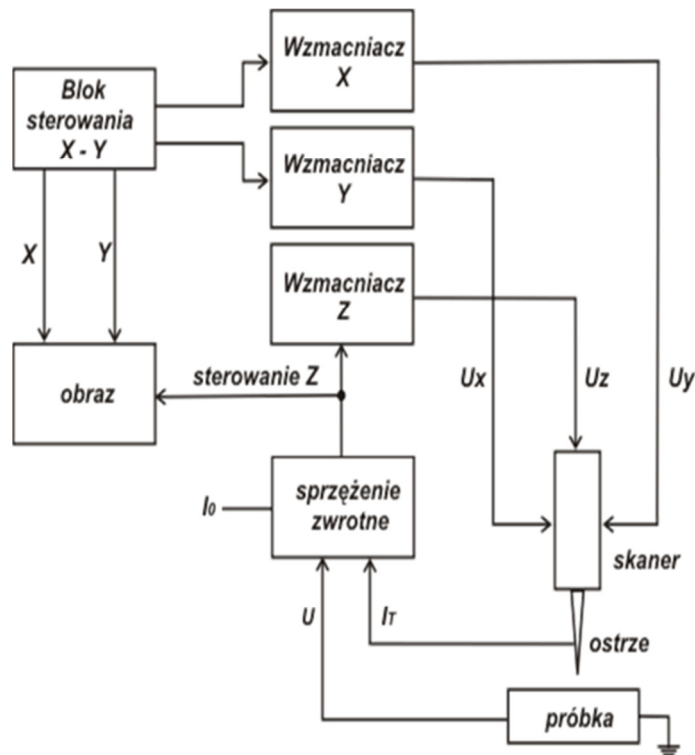
Schemat blokowy aparatury pomiarowej.

Schemat blokowy aparatury przedstawiony jest na Rys.7.



Rys.7. Uproszczony schemat skaningowego mikroskopu tunelowego. U oznacza napięcie polaryzacji pomiędzy badaną próbką a ostrzem STM, I_T - prąd tunelowy, a I_0 - prąd odniesienia.

Na schemacie zaznaczone są: skaner, na którym zamocowane jest ostrze STM w niewielkiej odległości od powierzchni próbki, wzmacniacz prądu tunelowego płynącego pomiędzy ostrzem STM a próbką, blok sterowania mający za zadanie kontrolowanie parametrów tunelowania i poruszania się skanera, oraz komputer PC, na którym rejestrowany jest obraz powierzchni badanej próbki. U oznacza napięcie polaryzacji pomiędzy próbką a ostrzem STM, I_T - prąd tunelowy, a I_0 - prąd odniesienia.



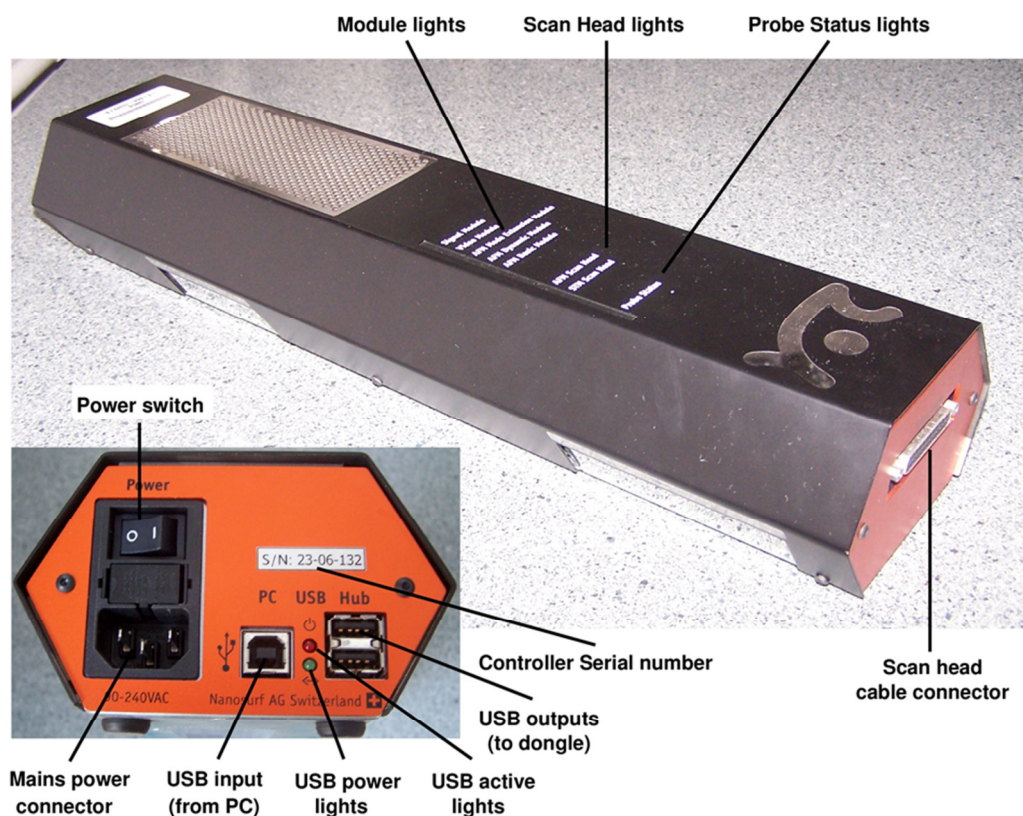
Rys.8. Szczegółowy schemat blokowy mikroskopu. U oznacza napięcie pomiędzy ostrzem STM a próbką, U_x , U_y , U_z - napięcia polaryzacji skanera, I_T - mierzony prąd tunelowy, a I_0 - napięcie odniesienia.

Skaningowy mikroskop tunelowy (STM).

Skaningowy mikroskop tunelowy *Nanosurf easyScan 2* składa się z kontrolera i głowicy skanującej (Rys. 6).

kontroler STM

Kontroler STM przedstawiony jest na Rys. 9.



Rys. 9. Kontroler STM.

Lampki kontrolne stanu układu pomiarowego:

Lampka kontrolna wysokości ostrza (**Probe Status light**).

Kolor czerwony – ostrze jest bardzo blisko próbki. Grozi uszkodzeniem ostrza.

Kolor pomarańczowy – ostrze jest zbyt daleko od próbki. Prawdopodobnie nie ma jeszcze kontaktu z próbką.

Kolor zielony – optymalna odległość ostrza od próbki. Można wykonywać pomiary.

Kolor zielony mrugający – sprzężenie ostrze – próbka zostało wyłączone przez oprogramowanie sterujące. Używa się w pomiarach w trybie stałej wysokości.

Lampki kontrolne stanu głowicy skanującej (**Scan Head lights**).

Wskazują czy głowica skanująca podłączona jest do kontrolera. Mruganie oznacza, że głowica nie jest podłączona lub program sterujący układem nie został uruchomiony.

Lampki kontrolne modułów (**Module lights**).

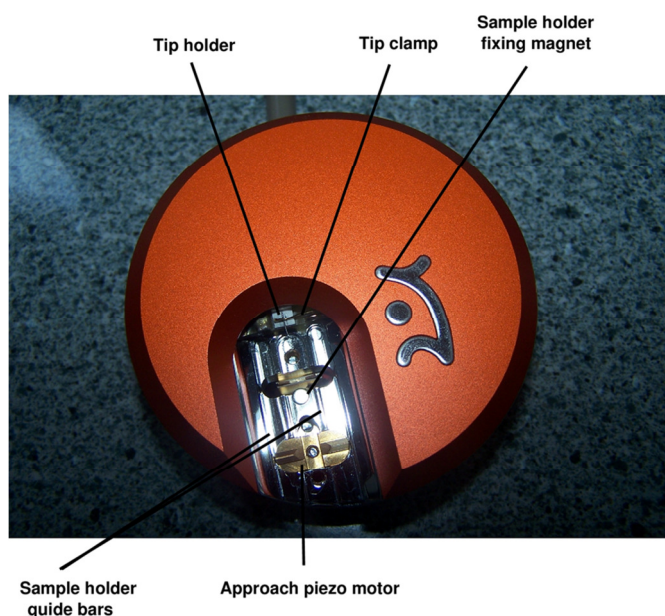
Wskazują, jakie moduły zostały połączone z kontrolerem. W naszym przypadku moduł STM. Lampki mogą mrugać, gdy program sterujący układem nie został jeszcze uruchomiony.

Gniazda kontrolera STM.

- Gniazdo podłączenia głowicy skanującej (Scan head cable connector).
- Przycisk włączania/wyłączania kontrolera (Power switch).
- Gniazdo zasilające (Mains power connector).
- Gniazdo USB (USB input) służące do podłączenia komputera PC.
- Gniazdo USB (USB outputs) – wyjściowe.

Głowica skanująca

Głowica skanująca przedstawiona jest na Rys. 10.



Rys. 10. Głowica skanująca.

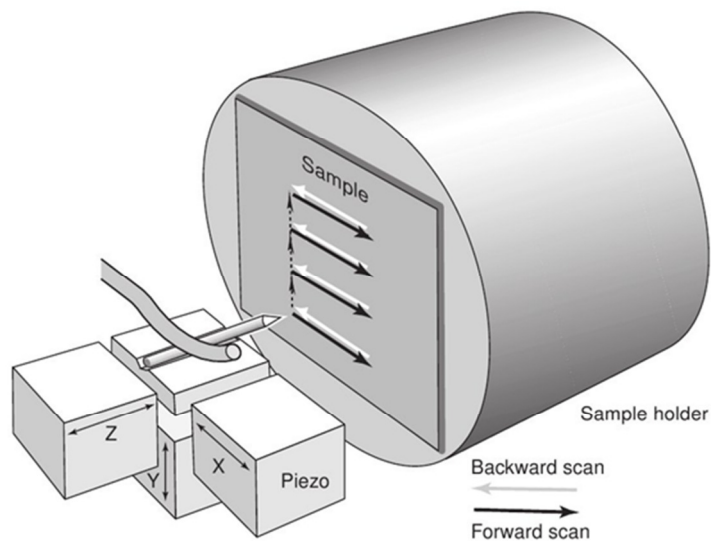
Głowica składa się z:

- Uchwyt ostrza (Tip holder), w którym montuje się ostrze STM.
- Zatrzask mocujący ostrze STM (Tip clamp).
- Uchwyt próbki z przewodnikami (Sample holder guide bars), w którym montuje się próbkę.
- Magnes przytrzymujący próbkę (Sample holder fixing magnet).
- Piezoelektryczny silnik krokowy (Approach piezo motor) – do zmiany odległości pomiędzy próbką a ostrzem STM.

UWAGA ! Z uwagi na delikatną budowę STM zabrania się zdejmowania przezroczystej pokrywy głowicy.

Skanner piezoelektryczny

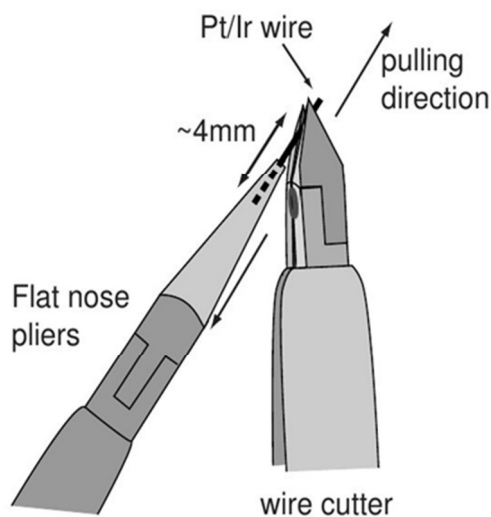
Skaner piezoelektryczny służy do zmiany pozycji ostrza STM względem powierzchni próbki we wszystkich trzech kierunkach. Schematycznie sytuacja przedstawiona jest na Rys. 11.



Rys. 11. Skaner STM wraz z zamocowaną próbką.

Ostrze STM.

Ostrze STM wykonane jest ze stopu platyny z irydem i przeznaczone jest do pracy w powietrzu atmosferycznym w warunkach normalnych. Długość ostrza powinna wynosić ok. 4-5 mm. Otrzymuje się je poprzez ucięcie drutu Pt/Ir w sposób pokazany na Rys. 12.



Rys. 12. Ucinanie ostrza STM.

Komputer PC.

Komputer PC z systemem operacyjnym Windows XP i oprogramowaniem *easyScan 2* służy do sterowania skaningowym mikroskopem tunelowym, zbierania i obróbki danych. Połączony jest z kontrolerem STM za pomocą przewodu USB.

Badana próbka.

Badaną próbką jest powierzchnia (0001) grafitu.

Opis działania układu pomiarowego.

Skaningowy mikroskop tunelowy *Nanosurf easyScan 2* służy do badania topografii powierzchni z atomową rozdzielczością. Zakres parametrów pracy STM umieszczony jest w Tabeli 1.

Tabela 1. Parametry pracy STM

Tryby pracy	tryb stałego prądu, tryb stałej wysokości
Maksymalny obszar skanowania	do 1000 nm
Maksymalna wielkość próbki	10 mm
Maksymalny zakres zmian położenia ostrza w kierunku prostopadłym do powierzchni	200 nm
Rozdzielczość pionowa	3.0 pm
Rozdzielczość pozioma	7.6 pm
Prąd tunelowy	0.1 – 100 nA
Napięcie tunelowania	-10 - +10 V

Po zbliżeniu ostrza STM do powierzchni próbki na odległość ok. 1 nm, skaner piezoelektryczny przemieszcza ostrze nad próbką mierząc prąd tunelowy przy zadanym napięciu tunelowania. Dodatkowo zmienia także odległość ostrza od próbki tak, aby prąd tunelowy był równy zadanej wartości. Zmiany wysokości ostrza wraz z jego położeniem w kierunku równoległym zapisywane są do pliku. Z wartości tych otrzymuje się obraz topografii powierzchni badanej próbki.

Zestawienie i włączenie aparatury.

Przed włączeniem układu pomiarowego należy sprawdzić czy kontroler (Rys. 9) jest połączony z głowicą skanującą (Rys. 10) i z komputerem za pomocą kabla USB oraz czy jest włączony do sieci. Następnie włączamy układ przełącznikiem **Power switch** z tyłu kontrolera (Rys. 9) oraz uruchamiamy komputer. W momencie włączenia kontrolera wszystkie lampki kontrolne na

jego obudowie zapalą się na chwilę. Następnie lampki stanu głowicy (**Scan Head lights**) oraz lampki wykrytych modułów (**Module lights**) zaczną migać, a pozostałe lampki zgasną.

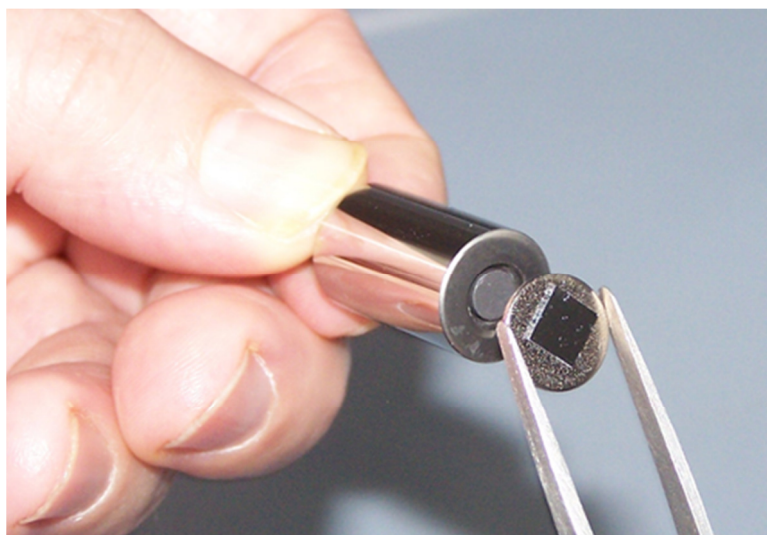
Uruchamiamy program *easyScan 2*. Gdy układ jest gotowy do pomiarów, pojawia się na krótko w oknie programu komunikat 'Starting System', a na kontrolerze zapalą się lampki wysokości ostrza (**Probe Status light**) i stanu głowicy (**Scan Head light**).

Zakładanie próbki.

UWAGA! Nie wolno dotykać metalowej części uchwytu próbki palcami!

UWAGA! Uchwyt próbki powinien być przechowywany w specjalnym pojemniku (w zestawie)!

Aby zamontować próbkę, należy wyjąć uchwyt próbki z pojemnika dotykając tylko jej czarnej plastikowej części. Za pomocą pęsety zakładamy próbkę na metalową magnetyczną część uchwytu (Rys. 13).



Rys. 13. Zakładanie próbki.

Następnie ostrożnie umieszczamy próbkę wraz z uchwytem w głowicy skanującej (Rys. 14) tak, aby nie dotykała ostrza STM. Należy uważać, aby próbka nie została ściągnięta z uchwytu przez magnes przytrzymujący uchwyt.



Rys. 14. Montowanie uchwyty z próbką w głowicy skanującej.

Zbliżanie próbki do ostrza.

Aby pomiary mogły być wykonywane, próbka musi być dostatecznie blisko ostrza. Musi popłynąć prąd tunelowy. Zbliżanie próbki bez dotknięcia ostrza jest operacją bardzo delikatną i przeprowadzana jest w trzech krokach: (1) zbliżaniu ręcznym, (2) zbliżaniu ręcznym z użyciem piezoelektryka i (3) zbliżaniu automatycznym. Lampki na kontrolerze (**Probe Status lights**) sygnalizują stan zbliżania.

Kolor pomarańczowy – normalna sytuacja podczas zbliżania.

Kolor czerwony – zbyt bliska odległość ostrza od próbki. Bardzo prawdopodobne, że ostrze uderzyło w próbkę. Prawdopodobnie trzeba będzie wymienić ostrze.

Kolor zielony – operacja zbliżania została zakończona. Odległość ostrze – próbka jest optymalna do pomiarów.

Zbliżanie ręczne

Umieszczamy uchwyt z próbką w odległości ok. 1 mm od ostrza. Jeśli ostrze skierowane jest w stronę nierównej powierzchni próbki należy obrócić uchwyt tak, aby ostrze było skierowane w gładki obszar próbki. Następnie na głowicę nakładamy przezroczystą pokrywę ze szkłem powiększającym tak, aby zobaczyć lustrzane odbicie ostrza na powierzchni próbki.

Zbliżanie ręczne z użyciem elementu piezoelektrycznego

Element piezoelektryczny jest sterowany za pomocą programu *easyScan 2*. Otwieramy okno

dialogowe '*Positioning*' za pomocą ikony:



Następnie, śledząc wzajemne położenie próbki i ostrza przy pomocy szkła powiększającego, klikamy przycisk '*Advance*', aby zbliżyć próbkę do ostrza na odległość ułamka milimetra.

Zbliżanie automatyczne

Próbka zbliża się do ostrza aż pojawi się prąd tunelowy. Należy ustawić zadaną wartość prądu

tunelowego. W tym celu klikamy ikonę:



Otwiera się okno 'Z-Controller Panel' i ustawiamy w nim wartości:

- prądu tunelowego (Set point): 1 nA.
- sprzężenia zwrotnego (Loop gain): 1000.
- napięcia polaryzacji (Tip voltage): 50 mV.

Teraz można rozpocząć zbliżanie automatyczne. Klikamy przycisk 'Approach'. Próbka teraz automatycznie zbliża się do ostrza. Podczas tego procesu lampki kontrolne stanu głowicy skanującej (**Probe Status lights**) mrugają na przemian: czerwona-zielona-pomarańczowa-czerwona-zielona-itd. Po pomyślnym zakończeniu procesu zbliżania, lampka kontrolna stanu głowicy świeci na zielono, a w oknie programu pojawia się komunikat 'Approach done'. Klikamy przycisk 'OK'. Teraz płynie już prąd tunelowy pomiędzy ostrzem i próbką i można zacząć pomiary.

Wykonanie pomiarów.

Klikamy ikonę:



W oknie dialogowym 'Imaging Panel' pojawią się dwa okienka. Na jednym jest obraz topograficzny powierzchni, a na drugiej przekrój tej powierzchni wzdłuż linii obecnie skanowanej. Jeśli obraz topograficzny wygląda jak gładka powierzchnia, a linie topograficzne są gładkie, to wszystko jest w porządku. Jeśli natomiast linie topograficzne są poszarpane, zaszumione, to oznacza, że nasze ostrze jest niestabilne lub zbyt tępe. Należy przerwać pomiary, wciskając przycisk 'Stop'. Następnie odsuwamy próbkę od ostrza, klikając przycisk 'Withdraw' a następnie przycisk 'Retract'. Zdejmujemy osłonę ze szkłem powiększającym, wyjmujemy uchwyt z próbką i wymieniamy ostrze.

Atomowa rozdzielczość.

UWAGA! Pomiary w skali nanometrowej są bardzo wrażliwe na wszelkiego rodzaju zakłócenia, jak: bezpośrednie oświetlenie próbki, szybki ruch powodujący nagły ruch powietrza i zmianę temperatury.

Aby zmniejszyć obszar skanowanie, a tym samym otrzymać rozdzielczość atomową, klikamy myszką na mapę topografii (aby ją uaktywnić) i klikamy przycisk 'Zoom'. Przesuwamy wskaźnik myszki w miejsce, gdzie powierzchnia jest płaska i klikamy w tym miejscu myszką. Pojawi się okno 'Tool Results Panel' z rozmiarem obszaru. Zmieniamy obszar skanowania na 30nm x30 nm klikając i przesuwając myszką róg zaznaczonego obszaru. Zatwierdzamy zmiany klikając dwa razy myszką. Po ustabilizowaniu się obrazu topograficznego, możemy dalej zmniejszać obszar skanowania. Postępujemy podobnie i ustawiamy obszar na ok. 4nm x4 nm. Zmieniamy też

wartość czasu skanowania jednej linii 'Time/Line' w panelu 'Imaging Panel' na 0.06 s. Można też zmniejszyć wartość sprzężenia kontrolera odległości 'Loop gain of Z-Controller'. Należy poeksperymentować z tymi parametrami, aby uzyskać wyraźny obraz powierzchni.

Zapisywanie danych.

W celu zapisania obrazu topograficznego klikamy przycisk 'Photo'. Jeśli pomiar jest zakończony kopia obrazu jest tworzona natychmiast. Natomiast, jeśli pomiar trwa nadal, kopia obrazu jest tworzona po przejściu skanera przez cały obszar skanowania. Następnie klikamy na okno z kopią obrazu topograficznego, wybieramy z menu 'File>Save as...' i zapisujemy na dysku komputera.

Wyłączenie i demontaż aparatury.

Klikamy przycisk 'Stop', aby zakończyć pomiary. Odsuwamy próbkę od ostrza, klikając przycisk 'Withdraw' a następnie przycisk 'Retract'. Zdejmujemy osłonę ze szkłem powiększającym, wyjmujemy uchwyt z próbką i zdejmujemy próbkę pęsetą. Uchwyt i próbkę umieszczamy w specjalnych pojemnikach do ich przechowywania. Sprawdzamy, czy mamy zapisane wszystkie potrzebne dane i zamykamy program *easyScan 2*, po czym wyłączamy kontroler STM.

UWAGA! Dodatkowe szczegóły można znaleźć w dwóch oryginalnych instrukcjach użytkownika dostarczonych wraz z mikroskopem.

Opracowanie wyników

Zapisane dane pomiarowe należy opracować korzystając z programu *easyScan 2*, zainstalowanego na komputerze PC wchodzącym w skład zestawu pomiarowego.

Powierzchnia grafitu widoczna w obrazie topograficznym STM różni się od rzeczywistej powierzchni, która ma strukturę heksagonalną. Typowy obraz topograficzny wraz z rzeczywistym położeniem atomów przedstawiony jest na Rys. 2. Znając zmierzoną odległość pomiędzy jasnymi miejscami, możemy wyznaczyć stałą sieci grafitu (odległość pomiędzy sąsiadującymi białymi i szarymi kółkami w modelu grafitu na Rys. 2). W tym celu należy otworzyć zapisany plik ze zmierzonymi danymi topografii, a następnie w oknie 'Tools' wybrać polecenie 'Measure Length', które dokonuje pomiaru odległości pomiędzy zaznaczonymi punktami powierzchni. Położenie tych punktów można zmieniać przy pomocy myszki komputerowej. Wyniki pomiaru widoczne są w nowym panelu obok obrazu topograficznego. W celu zminimalizowania błędów zaleca się dokonanie pomiaru wzdłuż linii zawierającej kilka jasnych miejsc i podzielenie otrzymanej wartości przez odpowiednią liczbę odcinków łączących jasne punkty. Pomiarów należy dokonać w kilku różnych miejscach na różnych obszarach powierzchni.

Wykonanie sprawozdania

1. Nagłówek

Nagłówek powinien zawierać nazwisko i imię osoby wykonującej doświadczenie, kierunek i rok studiów, datę oraz numer i nazwę ćwiczenia

2. Wstęp

We wstępie powinno znaleźć się ogólne wprowadzenie dotyczące skaningowej mikroskopii tunelowej, a także zakres i cel ćwiczenia.

3. Podstawy teoretyczne.

Ta część sprawozdania powinna być poświęcona opisowi zjawiska tunelowania, struktury pasmowej metali i półprzewodników oraz tworzeniu się pasm energetycznych. Ponadto powinny znaleźć się informacje na temat właściwości badanej próbki oraz podstaw skaningowej mikroskopii tunelowej łącznie z opisem trybów pracy STM i zjawiska piezoelektrycznego.

4. Część doświadczalna.

Ta część sprawozdania powinna zawierać opis metody pomiaru topografii powierzchni oraz wyznaczenia stałej sieci grafitu, opis aparatury pomiarowej, sposób wykonania eksperymentu oraz wyniki pomiarów.

Opis metody pomiarowej. W tym miejscu należy opisać główne założenia metody pomiaru topografii STM powierzchni, przedstawić schemat blokowy układu pomiarowego i opisać funkcje poszczególnych jego elementów.

Opis aparatury. Należy zamieścić skrótowy opis elementów zestawu pomiarowego z pełnymi ich nazwami fabrycznymi oraz podstawowymi parametrami charakteryzującymi dane urządzenie. Opisać, do czego są wykorzystywane i na co trzeba zwrócić szczególną uwagę przy włączaniu, wyłączaniu oraz pracy danego urządzenia.

Opis przeprowadzonych pomiarów. W tym punkcie należy umieścić informacje dotyczące przebiegu doświadczenia. W szczególności powinny znaleźć się informacje na temat przygotowania do eksperymentu, tzn. włączanie aparatury, zamontowania próbki i ostrza STM. W dalszej kolejności należy opisać przebieg eksperymentu, tzn. sposób pomiaru topografii STM. Na końcu należy opisać sposób wyłączania aparatury i pozostałych czynności związanych z zakończeniem pomiarów.

Przedstawienie wyników. Na tym etapie, wyniki powinny być przedstawione w formie tabeli (z pięcioma kolumnami), zawierających numer pomiaru, nazwę pliku z danymi, napięcie tunelowania, prąd tunelowania oraz obszar skanowania.

5. Opracowanie wyników.

Ta część sprawozdania poświęcona jest opracowaniu i prezentacji uzyskanych wyników pomiarowych.

Opis wykorzystanego programu. W tym punkcie należy krótko opisać program wykorzystany do zbierania i obróbki danych oraz podstawowe polecenia pozwalające na uzyskanie obrazu STM oraz służące do wyznaczenia stałej sieci grafitu.

Prezentacja i opis wyników pomiarowych. Obraz topograficzny powierzchni STM powinien zawierać opis osi jak również skalę zmian wysokości struktur powierzchniowych.

6. Analiza wyników i porównanie z danymi literaturowymi.

Otrzymane wyniki powinny być omówione pod kątem ich poprawności i wiarygodności oraz porównane z dostępnymi danymi literaturowymi.

7. Podsumowanie i wnioski.

Ta część sprawozdania powinna zawierać podsumowanie sprawozdania, spostrzeżenia oraz wnioski wynikające z przeprowadzonego eksperymentu.

8. Literatura.

Każda pozycja spisu literatury, z której korzystano podczas przygotowywania sprawozdania powinna zawierać nazwisko autora, tytuł książki, stronę, miejsce i rok wydania. W przypadku czasopism: nazwisko autora, nazwę czasopisma, numer (wolumin), stronę i rok. Pozycje literatury powinny być ponumerowane.

Literatura

1. H. Hacken, H. Ch. Wolf *Atomy i kwanty. Wprowadzanie do współczesnej spektroskopii atomowej*, PWN Warszawa 1997.
2. C. Kittel, *Wstęp do fizyki ciała stałego*, PWN Warszawa 1992.
3. G. Binnig, H. Rohrer, *STM*, Physical Reviews of Modern Physic, **50**, 120 (1983).
4. J. Tersoff, D. R. Hamann, *Theory and Application for the Scanning Tunneling Microscopy*, Physical Review Letters, **50** (1983).
5. R. Howland, L. Benatar, *STM/AFM mikroskopy ze skanującą sondą, elementy teorii i praktyki*, przekład: Michał Woźniak, Jan Kozubowski WIM PW, Warszawa 2002.
6. D. Więckowski, *Prosty i tani mikroskop tunelowy*, praca magisterska, IF UMCS (2006).
7. <http://www.nano.umcs.lublin.pl>
8. <http://www.ostm.umcs.lublin.pl>