



Oglądanie świata w nanoskali – mikroskop STM

Szymon Godlewski

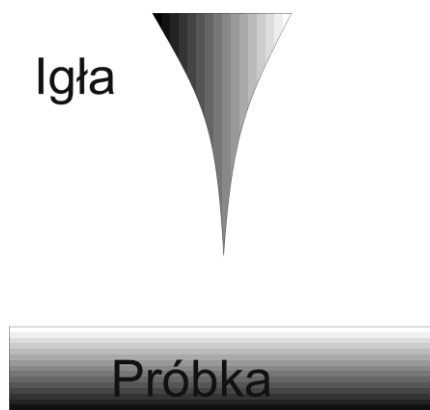
Instytut Fizyki UJ

Od zarania dziejów człowiek przejawiał wielką ciekawość otaczającego go świata. Prowadził obserwacje najpierw za pomocą zmysłów, którymi dysponował, a później w miarę rozwoju dostępnej techniki konstruował coraz to nowe przyrządy, które pomagały mu „podglądać” coraz dokładniej otaczającą go materię. W obserwacji i badaniach świata ogromną – jeśli nie największą – rolę odegrał wzrok. Z tego powodu, gdy wyczerpały się możliwości obserwacji gołym okiem, skonstruowano lupę, a później, zestawiając kilka soczewek w jeden układ, mikroskopy optyczne, które dały możliwość zagłębienia w mikroświat. Jednak metody optyczne nie dają nieograniczonych możliwości uzyskiwania powiększenia obserwowanej materii, co jak dobrze wiemy, ma źródło w ograniczeniach natury dyfrakcyjnej. W miarę rozwoju nowoczesnej fizyki, w tym przede wszystkim mechaniki kwantowej, zauważono, że można do obserwacji bardzo małych struktur zastosować nie tylko fale elektromagnetyczne, ale również fale materii. Tak powstały między innymi mikroskopy elektronowe, w których za powstający „obraz” badanego obiektu odpowiadają szybko poruszające się elektrony. Dzięki temu możliwe stało się uzyskiwanie zdolności rozdzielczych na poziomie nanometrów. Ciągły rozwój wielu dziedzin nauki i techniki, jak np. inżynieria materiałowa, elektronika, czy też inżynieria biomedyczna, stwarzały niezaspokojone zapotrzebowanie na uzyskiwanie obrazów struktury powierzchni badanych obiektów o coraz wyższej rozdzielczości, aż do atomowej włącznie.

Przełom w badaniach nastąpił na początku lat 80. XX wieku, gdy dwóch pracowników działu rozwoju firmy IBM w Zurychu, Gerd Binnig i Heinrich Rohrer, skonstruowało pierwszy skaningowy mikroskop tunelowy. Co ciekawe, idea działania takiego urządzenia opierająca się na dobrze znanym już od dziesięcioleci zjawisku tunelowym nie jest wcale nowa. Zdziwiające, że pierwszy mikroskop tunelowy został skonstruowany tak późno. Wiązało się to jednak nie tyle z niezajomością zjawiska, na którym opiera się zasada jego działania, co z ograniczeniami natury technicznej. O doniosłości znaczenia wynalazku świadczą może fakt, że wynalazcy uhonorowani zostali nagrodą Nobla w dziedzinie fizyki w roku 1986. Jako że mikroskop tunelowy stał się w ostatnich latach niezwykle popularnym narzędziem do badania struktury powierzchni, warto pokrótce omówić jego działanie. Zanim przejdziemy do omawiania podstaw fizycznych działania tego urządzenia warto jeszcze zaznaczyć, że nazwa mikroskop może być nieco myląca. Zazwyczaj kojarzy się ona z obrazami uzyskiwa-

nymi metodami optycznymi, tymczasem w mikroskopie STM „obraz” badanej struktury otrzymuje się analizując oddziaływanie mikroskopu z badaną powierzchnią, a dokładniej – przepływający prąd tunelowy, co nie ma żadnego związku z optyką. Nazwę mikroskop należy zatem w tym przypadku utożsamiać z możliwością uzyskania bardzo dokładnej informacji (mapy przestrzennej) o strukturze atomowej czy też elektronowej badanej powierzchni i nie należy utożsamiać jej z zasadami działania mikroskopów optycznych.

Zasadniczy element mikroskopu tunelowego stanowi atomowo ostra igła wykonana z metalu, którą utrzymuje się w bardzo małej odległości, rzędu kilku angstrémów ($1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$) od powierzchni badanego podłoża (rys. 1).



Rys. 1. Schematyczne przedstawienie mikroskopu tunelowego (STM)

By umożliwić tak precyzyjne usytuowanie igły i próbki względem siebie, jeden z elementów przytwierdza się sztywno do stelaża mikroskopu, a drugi montuje na bardzo czułych elementach piezoelektrycznych. Dzięki temu, przykładając odpowiednie różnice potencjałów do piezoelementów, można kontrolować ich długość, a zatem i wzajemną odległość igły od próbki. Całość montuje się następnie na wspornikach, które izolowane są od zewnętrznych drgań mechanicznych przy użyciu specjalnych sprężyn tłumiących.

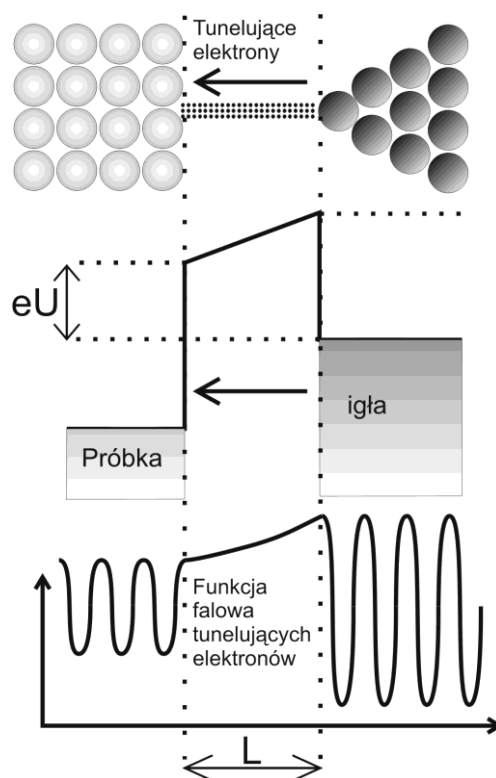
Zasada działania mikroskopu tunelowego opiera się na zjawisku tunelowym. Pomiedzy igłą mikroskopu, a próbkę przykładana się różnicę potencjałów rzędu 1V. Ponieważ próbka i igła nie pozostają w kontakcie, to elektrony napotykają na barierę potencjału i nie mogą w klasyczny sposób przemieszczać się między igłą i próbką. Jednakże w myśl mechaniki kwantowej możliwe jest „przenikanie” cząstek przez taką barierę, tj. w naszym przypadku między igłą i próbką, jeżeli tylko znajdą się one dostatecznie blisko siebie. Zjawisko takie nazywamy zjawiskiem tunelowym. Jeżeli zatem między igłą i próbką znajdujące się w odległości rzędu kilku \AA przyłożymy różnicę potencjałów, to od igły do próbki tunelować będą elektrony tworząc prąd tunelowy. Przyjrzyjmy się nieco

blżej zjawisku tunelowania elektronów w mikroskopie (rys. 2). W najprostszym ujęciu barierę potencjału między próbką i igłą można zastąpić barierą prostokątną, co pozwala rozwiązać zagadnienie w sposób analityczny. Nie będziemy się w tym miejscu wdawać w szczegóły rozwiązania, które nie będą nam zresztą potrzebne. Zwrócimy jedynie uwagę na istotne wnioski, jakie z niego wynikają. Przede wszystkim okazuje się, że zależność natężenia I prądu tunelowego od szerokości L bariery, a więc odległości igła-próbka jest niezwykle silna. Mówiąc dokładniej spełnia zależność:

$$I \approx \exp(-2\kappa L)$$

gdzie κ jest stałą zaniku prądu tunelowego, mówiącą jak szybko maleje prąd tunelowy przy oddalaniu ostrza od próbki.

Oznacza to, że wartość prądu tunelowego bardzo szybko, bo wykładniczo maleje wraz ze wzrostem odległości próbki od igły. Przy zmianie tej odległości o wartość odpowiadającą 1 Å natężenie prądu może zmienić się o rząd wielkości. To właśnie jest źródłem możliwości osiągnięcia niewiarygodnie wysokiej pionowej zdolności rozdzielczej przez mikroskop STM.

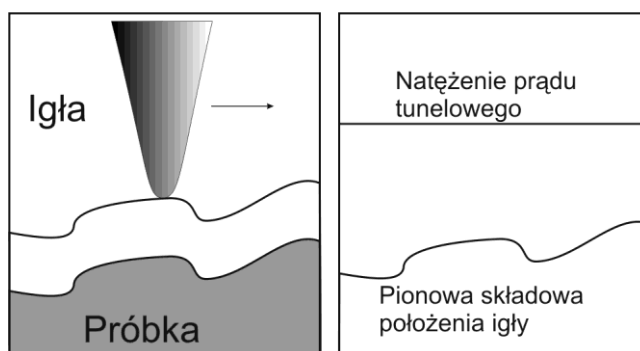


Rys. 2. Schemat procesu tunelowania elektronów pomiędzy igłą i próbką

Zasadniczo wyróżnia się dwa podstawowe tryby pracy mikroskopu:

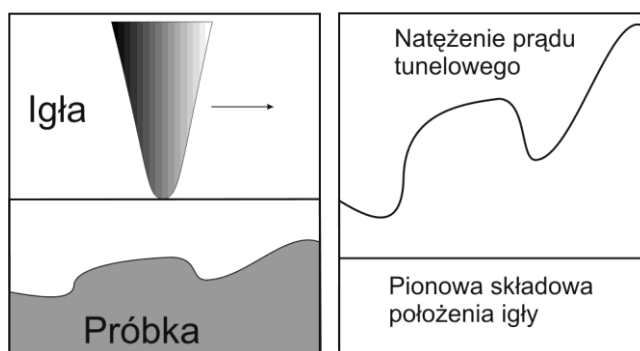
- tryb stałego oddziaływania,
- tryb stałej wysokości.

W trybie stałego oddziaływania dzięki wykorzystaniu układu sprzężenia zwrotnego utrzymywane jest stałe natężenie prądu tunelowego między igłą a próbką. Dzieje się tak dzięki odpowiedniemu doborowi wysokości ostrza nad powierzchnią, tak by natężenie prądu nie zmieniało się. Obraz powierzchni uzyskuje się przesuwając igłę ponad powierzchnią i rejestrując odległość igły od powierzchni w każdym punkcie. Pracę w tym trybie przedstawia rysunek 3.



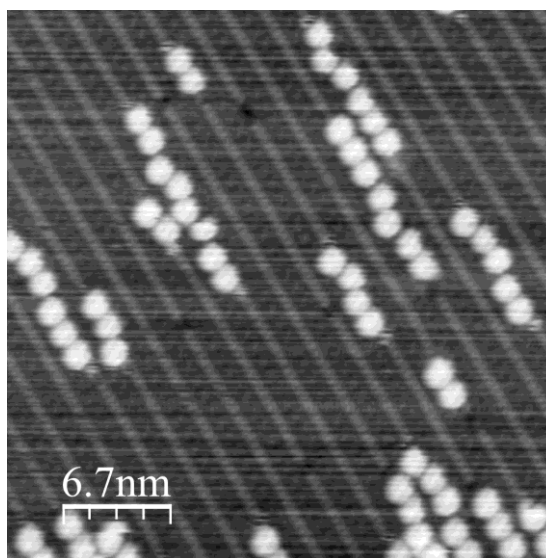
Rys. 3. Mikroskop STM pracujący w trybie stałego prądu

W trybie stałej wysokości niezmienna pozostaje odległość igły od powierzchni, zmienia się natomiast natężenie prądu tunelowego. Tym razem wielkością niosącą informację o podłożu jest wartość natężenia prądu tunelowego rejestrowana dla poszczególnych punktów położenia igły. Pracę mikroskopu w tym trybie przedstawia rys. 4.



Rys. 4. Mikroskop STM pracujący w trybie stałej wysokości

Na rys. 5 przedstawiony jest obraz łańcuchów zbudowanych z molekuł PTCDA (di-bezwodnik-perylenu-3,4,9,10-tetra-karboksyłowy) na półprzewodnikowej powierzchni antymonku indu uzyskany w Zakładzie Fizyki Nanostruktur i Nanotechnologii Instytutu Fizyki Uniwersytetu Jagiellońskiego.



Rys. 5. Obraz STM łańcuchów zbudowanych z molekuł PTCDA na powierzchni antymonku indu

W okresie ostatnich dwudziestu lat mikroskop tunelowy stał się jednym z najczęściej używanych narzędzi w fizyce powierzchni pozwalając nie tylko obrazować niezwykle małe struktury, ale również dając wgląd w ich własności elektronowe na poziomie pojedynczych orbitali atomowych, bądź molekularnych. Ponadto rozwój technik mikroskopowych pozwolił na wykonywanie kontrolowanego przemieszczania (manipulacji) atomów i molekuł na badanych powierzchniach przy użyciu mikroskopu STM, jest to jednak już temat na osobne opracowanie.