

Nanotechnologia wkracza do szkół: model Mikroskopu Sił Atomowych

Gorazd Planinšič

Wydział Matematyki i Fizyki, Uniwersytet w Lublanie

Janez Kovač

Instytut Josefa Stefana, Lublana

Tłumaczenie artykułu z internetowego czasopisma IOP Science, Physics Education **43**(1), January 2008, s. 37; za zgodą redakcji.

Wstęp

Wiadomo obecnie, że nanotechnologia wpłynie znacząco na naszą przyszłość. Niektóre prognozy przewidują, że zmieni ona ludzką cywilizację bardziej niż wynalezienie maszyny parowej, elektryczności, tranzystora, czy nawet Internetu. W nanoskali (tj. na poziomie odległości równych wymiarom atomów i cząsteczek) uwydatniają się w materiałach ich nadzwyczajne własności. Dzięki nim już teraz nanomateriały coraz powszechniej wchodzą do naszych domów. Produktami nanotechnologii są na przykład niektóre zapobiegające starzeniu się kosmetyki, a także antybakteryjne powłoki powierzchni w nowoczesnych lodówkach, czy też warstwy przeciwdziałające stałemu przebarwieniu i chroniące przed wodą tkaniny i meble. Z drugiej strony zaczynamy nabierać przekonania, że nanomateriały mogą nieść potencjalne ryzyko dla naszego zdrowia, chociaż obecny stan wiedzy na temat ich wpływu na organizmy żywe jest jeszcze niewielki. Wszystko to wskazuje na potrzebę wprowadzania elementów nanotechnologii do szkolnych programów nauczania. W ostatnich latach obserwujemy adoptowanie tej dziedziny wiedzy do programów edukacyjnych na niektórych uniwersytetach oraz w szkołach średnich w Europie [1]. Wysiłki skoncentrowane są głównie na reedukacji nauczycieli. Podobna aktywność obserwowana jest także w Stanach Zjednoczonych, na przykład na prestiżowym Uniwersytecie Cornell [2], gdzie w Centrum Nanosystemów podnosi się kwalifikacje nauczycieli i dostarcza im nowoczesnej wiedzy.

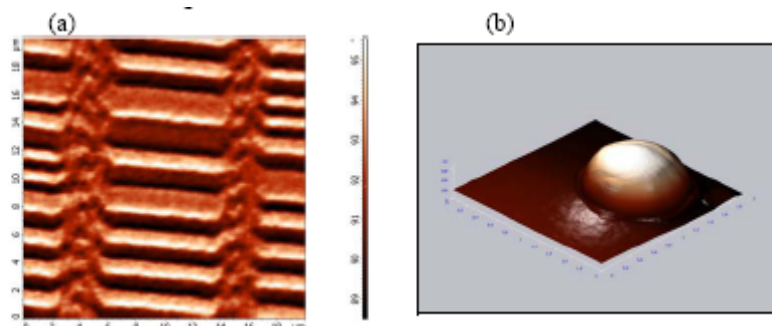
Wprowadzenie nanotechnologii do szkół wymaga powstania nowoczesnych wzorców nauczania. Ponieważ przedmioty nauk przyrodniczych mają tak zwaną strukturę piramidy, nie możemy tak po prostu wyrzucić z podstawy programowej starszych tematów i zastąpić ich tematami z podstaw nanotechnologii. Jednym ze sposobów może być natomiast wyodrębnienie pewnych charakterystycznych dla nanofizyki tematów (np. opisu urządzeń i metod badawczych lub specyficznych właściwości konkretnych nanomateriałów), które mogłyby być przystępnie przedstawione uczniom, stając się tym samym możliwym do zaakceptowania i nieprzeładowanym pojęciowo uzupełnieniem programu nauczania

fizyki. Takie podejście wymaga od uczniów wykorzystania ich wiedzy w nowej sytuacji i może służyć jako przykład jednoczesnego praktycznego zastosowania wiedzy pochodzącej z różnych działów fizyki lub nawet z różnych nauk przyrodniczych. Nanotechnologia mogłaby być przedyskutowana z kilku różnych perspektyw (zdrowotnej, socjologicznej, ekonomicznej). Alternatywą jest połączenie lekcji nanofizyki z lekcjami biologii, chemii czy nawet filozofii [3].

W niniejszym artykule prezentujemy model Mikroskopu Sił Atomowych, który odniósł już sukcesy jako temat wprowadzający do zagadnień z nanofizyki dla uczniów szkół średnich oraz nauczycieli będących słuchaczami studiów podyplomowych.

Mikroskop Sił Atomowych

Nanocząsteczki istniały w naszym otoczeniu przez tysiące lat – np. jako kryształki soli w oparach oceanicznych czy węgla w sadzy. Ale celowa produkcja nanocząsteczek i wyznaczanie ich specyficznych własności stało się możliwe dopiero po wynalezieniu pewnych urządzeń i rozwinięciu metod badawczych umożliwiających „zobaczenie” i manipulacje tymi cząsteczkami. Jedną z takich metod, metoda mikroskopii skaningowej (STM) rozwinięta została we wczesnych latach 80. przez Gerda Binniga i Heinricha Rohrera, za co otrzymali oni Nagrodę Nobla w 1986 r. W metodzie tej wykorzystuje się prąd tunelowania odzwierciedlający silnie zależne od odległości prawdopodobieństwo transportu elektronu pomiędzy dwoma niestykającymi się przewodnikami. Kilka lat później w grupie Binniga skonstruowano inne urządzenie skaningowe – Mikroskop Sił Atomowych (*Atomie Force Microscope*, AFM), którego zasada działania oparta jest na krótkozasięgowych oddziaływaniach van der Waalsa. Ponieważ w urządzeniu tym nie wykorzystuje się zjawiska tunelowania elektronów, może ono służyć do badań zarówno izolatorów jak i próbek biologicznych z rozdzielczością rzędu odległości wewnątrzatomowych. Za pomocą AFM można otrzymać informacje na temat topografii powierzchni badanej próbki, jej nierówności, tarcia, adhezji, własności elastycznych, odległości pomiędzy ostrzem próbkującym a powierzchnią badanego materiału, rozkładu pola elektrycznego lub magnetycznego w próbce, oporności, potencjału powierzchniowego i wiele innych (rys. 1). Dodatkowo za pomocą ostrza AFM można formować powierzchnię próbki poprzez prądową lub napięciową nanolitografię.



Rys.1. Obrazy AFM: a) Obraz AFM topografii powierzchni dysku magnetycznego, czulego na siły magnetyczne. Obraz został otrzymany z powierzchni $20\ \mu\text{m} \times 20\ \mu\text{m}$ za pomocą ostrza pokrytego warstwą magnetyczną; b) Obraz AFM bakterii *Staphylococcus aureus* czulej na oddziaływanie van der Waalsa; obraz trójwymiarowy powstał po zbadaniu powierzchni o wymiarach $20\ \mu\text{m} \times 20\ \mu\text{m}$

AFM umożliwia prowadzenie pomiarów w obecności warstwy powietrza ponad próbką (czyli w warunkach naturalnych), co w połączeniu z prostą konstrukcją tego urządzenia i wiarygodnymi, powtarzalnymi wynikami sprawia, że instrument ten stał się standardowym wyposażeniem wielu laboratoriów na świecie.

Zasada działania AFM jest oparta na oddziaływaniu przymocowanego do ruchomego ramienia ostrza z atomami powierzchni próbki. Siły działające na ostrze mogą być zarówno przyciągające, jak i odpychające. Niewielkie przemieszczenia ostrza powodowane zmianami wartości i zwrotu tych sił rejestrowane są poprzez odbicie światła laserowego od zewnętrznej strony ramienia, z którym jest połączone ostrze.

Praca AFM możliwa jest w dwóch trybach. W trybie kontaktowym ostrze znajduje się cały czas blisko powierzchni próbki, skanując ją w płaszczyźnie horyzontalnej. Ten tryb pracy jest użyteczny przy badaniu twardych powierzchni. W drugim trybie pracy – oscylacyjnym (lub niekontaktowym), podczas skanowania powierzchni próbki ostrze drga w płaszczyźnie pionowej. Zaletą trybu oscylacyjnego jest słabsze oddziaływanie ostrza z powierzchnią, a tym samym powodowanie mniejszej ilości zniszczeń próbki, dlatego mod ten szczególnie nadaje się do badań np. próbek biologicznych [4].

Należy tutaj podkreślić, że w praktyce AFM pracuje nieco inaczej niż opisano to powyżej. Obejma, do której przymocowane jest ramię z ostrzem jest przesuwana w górę i w dół, a jej pozycja jest dostosowywana do warunku utrzymania stałej wartości siły pomiędzy ostrzem a próbką (promień światła lasera odbitego od ramienia AFM musi trafiać stale w to samo miejsce). Następnie kształt badanej powierzchni odtwarzany jest komputerowo na podstawie przemieszczeń obejmują. Pomimo tego, że taki sposób kontroli jest niezmiernie ważny

z technicznego punktu widzenia, nie wnosi on niczego istotnego do zrozumienia podstaw działania AFM na poziomie szkoły średniej, dlatego niuans ten zostanie przez nas pominięty w dalszej części tego artykułu.

Prosty model AFM

Zasada działania AFM oparta jest na kilku prostych prawach fizyki, dlatego też AFM nadaje się do wprowadzenia podczas lekcji fizyki w szkole średniej lub na pierwszym roku studiów. Prostota podstawowych zasad działania tego skomplikowanego skądinąd urządzenia daje również możliwość wykonania samodzielnie przez uczniów modelu AFM i przeprowadzenia kilku prostych, poglądowych eksperymentów z jego pomocą.

Chociaż za pomocą modelu AFM proponowanego w tym artykule można wykonywać doświadczenia wykorzystując analogię do obu podstawowych trybów pracy rzeczywistego AFM, w polskim tłumaczeniu ograniczymy się jedynie do trybu kontaktowego [przyp. tłum.]. Przedstawiany model AFM łączy następujące tematy niezbędne do zrozumienia zasady działania prawdziwego AFM (zazwyczaj zawarte w programach nauczania): prawo Hooke'a, prawo odbicia.

Niezwykle ważne jest podkreślenie różnic pomiędzy naszym modelem AFM, a rzeczywistym mikroskopem AFM. W naszym przypadku jedyną siłą możliwą do zastosowania przy budowie makroskopowego modelu jest siła magnetycznego oddziaływania pomiędzy ramieniem, a próbką, podczas gdy w rzeczywistym Mikroskopie Sił Atomowych badanie próbki odbywa się znacznie częściej za pomocą sił van der Waalsa niż sił magnetycznych.

Naszym podstawowym zadaniem będzie skonstruowanie modelu, łatwego do zastosowania przez nauczycieli i uczniów w celu demonstracji podstawowej zasady działania AFM; modelu, którego pełna rekonstrukcja będzie możliwa w krótkim czasie (około dwóch godzin lekcyjnych – przyp. tłumacza).

W trybie kontaktowym próbka jest systematycznie przesuwana linia po linii poniżej ramienia, które (zgodnie z prawem Hooke'a) ugina się pod wpływem sił oddziaływania między ostrzem a próbką. Ugięcie ramienia odtwarza pofałdowanie powierzchni próbki, a także dostarcza informacji na temat sił oddziaływania.

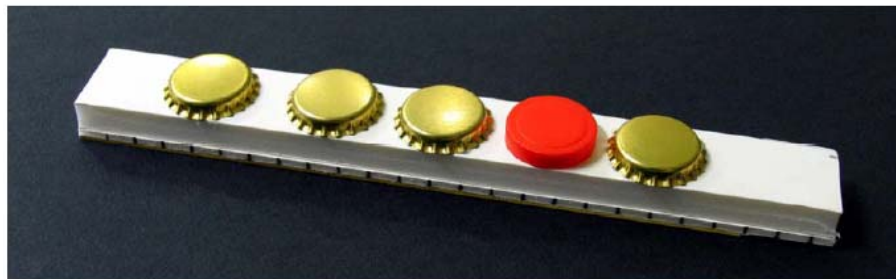
Do konstrukcji modelu AFM w trybie kontaktowym potrzebne są materiały przedstawione na rys. 2a.



Rys. 2a. Podstawowe materiały do budowy modelu AFM (od lewego górnego rogu do prawego dolnego): taśma samoprzylepna (najlepiej izolacyjna – przyp. tłum.), klocki Lego, pasek wycięty ze środkowej części płyty CD, kawałek plasteliny, silny magnes, wskaźnik laserowy, spinacz do bielizny



Rys. 2b. Gotowy model AFM z klocków Lego podczas pomiarów



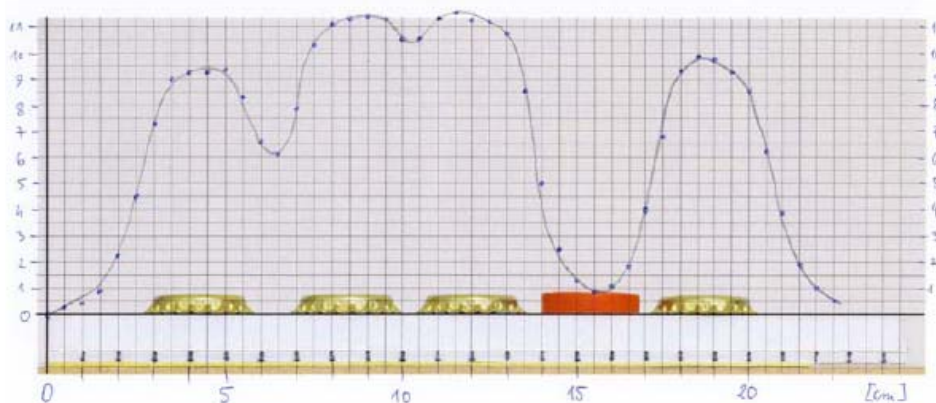
Rys. 2c. Modelowa próbka „krajobrazu atomowego na powierzchni” wykonana z metalowych kapsli i plastikowej nakrętki. Zwróć uwagę na różnice w odległościach pomiędzy poszczególnymi kapslami.

Szkielet konstrukcji modelowego AFM zbudowany jest z klocków Lego (rys. 2b). Ramię zostało wycięte z płyty CD, która jest odpowiednio giętka, a jej powierzchnia praktycznie bez rozprożeń odbija światło lasera. Należy użyć czystą płytę CD bez nalepek i tak ją umocować, aby strona, na której zapisywane są dane, była skierowana ku dołowi (odbicie od górnej płaszczyzny CD jest mniej rozproszone niż od powierzchni zapisu danych, która to powierzchnia chroniona jest dodatkowo przezroczystą warstwą plastiku). Należy użyć silnego magnesu jako ostrza. W naszym przykładzie zastosowany został płaski magnes o średnicy 14 mm i wysokości 5 mm tak, aby rozmiar „ostrza” był porównywalny z rozmiarem „atomów” (patrz rys. 2c oraz ramka: Rozdzielczość). Magnes należy przykleić do spodniej powierzchni ramienia, jak to pokazano na rys. 2b. Jako źródło światła o wąskim przekroju wiązki został użyty wskaźnik laserowy. Laser przymocowano do konstrukcji z klocków za pomocą plasteliny. Laser należy ustawić w pozycji, w której wiązka światła pada na powierzchnię odbijającą swobodnego końca ramienia z płyty CD. Plastelina umożliwia precyzyjne zamontowanie wskaźnika laserowego.

Po wykonaniu konstrukcji modelowego AFM należy przygotować odpowiednią próbkę do badań – „krajobraz atomowy”. W naszym modelu możemy przeskanować jedynie pojedynczy rząd „atomów” ze względu na ograniczenia czasowe eksperymentu. Wierzymy, że na poziomie szkolnym wszystkie najważniejsze cechy metody skaningowej mogą zostać zademonstrowane podczas obserwacji i badań próbki liniowej („jednowymiarowej”), a kiedy uczniowie zrozumieją zasadę działania tej metody, koncepcyjne rozszerzenie modelu badawczego na próbkę płaszczyznową („dwuwymiarową”) stanie się stosunkowo łatwe. Kapsle metalowe nadają się na modelowe „atomy”, które oddziałują magnetycznie z ostrzem w postaci magnesu (nie mogą to być jednak kapsle aluminiowe – przyp. tłum.), natomiast nakrętki plastikowe są modelami atomów nie oddziałujących magnetycznie. Próbka struktury atomowej została przedstawiona na rys. 2c. Przed wykonaniem próbki należy zwrócić uwagę na wymiary zastosowanego w modelu AFM magnesu (patrz ramka: Rozdzielczość).

Tak wykonany modelowy AFM jest już gotowy do przetestowania. Należy go umieścić w pobliżu ściany lub białej tablicy (w odległości około 2 m) i włączyć przycisk wskaźnika laserowego. Aby wskaźnik świecił w sposób ciągły, należy zaciśnąć wyłącznik spinaczem do bielizny. UWAGA: Przed włączeniem wskaźnika trzeba się upewnić, że uczniowie znajdują się w bezpiecznej odległości zarówno od wiązki światła laserowego, jak i od wiązki odbitej. Kolejno należy przymocować na ścianie kartkę papieru z zaznaczonymi na niej liniami, która będzie spełniać rolę detektora pozycji wiązki światła odbitego (wzór takiej kartki znajduje się na stronie internetowej *Fotonu*, w internetowej wersji obecnego artykułu – przyp. tłum.). Kartkę mocujemy tak, aby promień lasera odbity od ramienia padał na górną część zaznaczonej na kartce skali.

Następnie należy umieścić próbkę bezpośrednio pod magnesem. Gdy powoli będziemy przesuwając próbkę w kierunku prostopadłym do ramienia AFM, plamka światła padająca na skalę na ścianie będzie się przesuwać w kierunku pionowym. Gdy upewnimy się, że nasz modelowy mikroskop działa, możemy przystąpić do systematycznych pomiarów próbki za pomocą naszego urządzenia. Najlepiej wykonywać doświadczenie w 3–4-osobowych grupach przy jednym zestawie modelowym. Jeden uczeń może przesuwając próbkę w odstępach 5 mm, drugi – odczytywać położenie plamki światła laserowego na detektorze ściennym, trzeci uczeń może na osobnej kartce papieru zapisywać położenie plamki na karcie laboratoryjnej w dwuwymiarowym układzie współrzędnych (wzór zamieszczamy na stronie internetowej *Fotonu*, internetowej wersji obecnego artykułu – przyp. tłum.). Kiedy wszystkie dane zostaną odczytane i naniesione na kartę laboratoryjną spełniającą rolę analizatora, wyznaczony profil należy porównać z kształtem próbki (rys. 3).

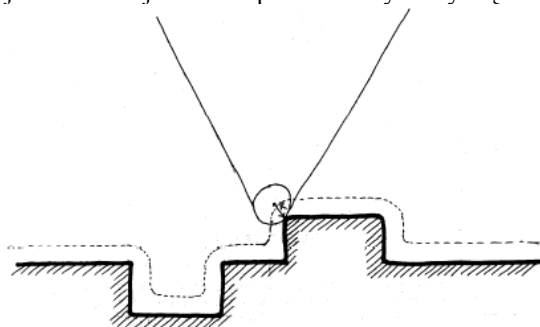


Rys. 3. Karta laboratoryjna. Graficzna prezentacja pomiarów otrzymanych w kontaktowym trybie pracy modelowego AFM w porównaniu z badaną próbką. Położenia jasnej plamki na ścianie (oś pionowa) są wyznaczane w jednostkach umownych. Przedstawione dane zostały otrzymane w czasie około 5 minut

Nawet taka uproszczona wizualizacja wyników wskazuje na pewne podstawowe ograniczenia metody badawczej (zarówno z użyciem modelowego, jak i rzeczywistego AFM, patrz ramka „Rozdzielczość”). Na przykład, na rys. 3 widać wyraźnie, że przerwa pomiędzy drugim i trzecim kapslem jest płytsza niż ta pomiędzy kapslem pierwszym a drugim. Można także zauważyć, że maksima profilu dla drugiego i trzeciego kapsla są wyższe od maksimów odpowiadających pozostałym kapslom. Dzieje się tak prawdopodobnie dlatego, że oba kapsle znajdują się w tak bliskim sąsiedztwie, iż magnetyzują się jednocześnie.

Rozdzielczość

Jednym z najważniejszych czynników wpływających na zdolność rozdzielczą Mikroskopu Sił Atomowych jest wielkość ostrza. W najprostszym przybliżeniu możemy sobie wyobrazić ostrze jako koło o promieniu R toczące się po powierzchni próbki (rys) (w rzeczywistości efektywny promień jest nieco większy niż promień geometryczny ostrza). Kiedy ostrze porusza się po wypukłościach, punkt centralny ostrza zakreśla kształt, który jest szerszy niż wypukłość, natomiast gdy ostrze porusza się w zagłębieniach, kształt kreślony przez jego punkt centralny jest węższy niż zagłębienie. Należy także zauważyć, że kreślone zagłębienie jest płytsze od rzeczywistego. Najbardziej precyzyjne ostrza mają obecnie promień krzywizny rzędu zaledwie 5 nm.



Kształt odtwarzany przez ostrze Mikroskopu Sił atomowych jest szerszy przy wypukłościach, a węższy przy zagłębieniach niż rzeczywisty kształt próbki.

Tłumaczyła Dagmara Sokołowska

- [1] Gyalog T 2007 Nanoscience education in Europe, *Europhysics News* **38**, p13 also available on-line at <http://www.europhysicsnews.org>
- [2] Home page of Institute for Physics Teachers, Centre for Nanoscale Systems, Cornell University <http://www.cns.cornell.edu/cipt/index.html> (see “Resources” for useful material for teachers!)
- [3] Drexler K E 2005 Productive nanosystems: the physics of molecular fabrication, *Phys. Educ.* **40** (4) p339
- [4] V L Mironov: Fundamentals of the scanning probe microscopy, the Russian Academy of Sciences, Institute of physics of microstructures (Nizhniy Novgorod 2004), also available on-line at http://www.nanotech-america.com/dmdocuments/mironov_book_en.pdf