

Marcin MARCZAK*, **Djamila HOURLIER****

OSOBLIWOŚCI STYKU NANOObIEKTÓW Z POWIERZCHNIĄ CIAŁA STAŁEGO

THE INTERACTION PARTICULARITIES OF NANOOBJECTS ON A SOLID STATE SURFACE

Słowa kluczowe:

nanotribologia, adsorpcja, adhezja, warstwa graniczna, napięcie powierzchniowe

Key-words:

nanotribology, adsorption, adhesion, boundary layer, surface tension

Streszczenie

W artykule przedstawiono fizyczne efekty występujące podczas „manipulowania” nanoobiettami na powierzchni ciała stałego. Wyjaśniono istotę pozostawiania śladu przez nanodrut krzemowy, który występuje w miejscu jego pobytu przed przesunięciem na powierzchnię krzemu oraz

* Wydział Fizyki, Politechnika Warszawska, ul. Koszykowa 75, 00-662, Warszawa;
email: marcin.marczak@isen.iemn.univ-lille1.fr

** Institut d'Electronique, de Microélectronique et de Nanotechnologie, CNRS UMR 8520, Dpt. ISEN, Avenue Poincaré, F-59652 Villeneuve d'Ascq, France.

niektóre inne osobliwości występujące w obszarze styku: nanodrut–powierzchnia ciała stałego–ciecz w kapilarze.

WPROWADZENIE

W czerwcu 2006 r. autor* wziął udział w IV Kolokwium Tribologicznym w Poznaniu, organizowanym przez Zespół Tribologii SPE Komitetu Budowy Maszyn PAN i Politechnikę Poznańską jako współautor plenarnego referatu [L. 1], którego tytuł – „**Problemy nanotribologii – wizja a rzeczywistość**” został przyjęty na nazwę tej imprezy naukowej.

Plan referatu obejmował dwie części:

- 1) część pierwsza, autorstwa Ryszarda Marczaka, zawierała wizję Drexlera, rolę Smalley’a i pogląd na priorytetowość badań w skali nano,
- 2) część druga, autorstwa Marcina Marczaka, omawiała techniki badawcze, nanorurki, nanodrut (nd) i nanocząstki oraz zastosowania.

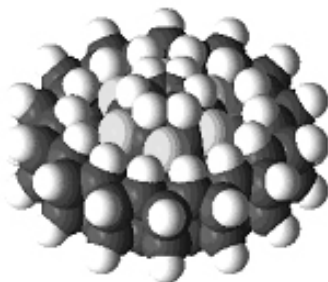
W tej drugiej części przedstawiono m.in. stan powierzchni po przesunięciu nanorurki węglowej, który wzbudził duże zainteresowanie i pytania o naturę pozostawiania śladu przez przesuniętą nanorurkę. Nie umiano tego faktu jednoznacznie wyjaśnić, co spowodowało, że nie skierowano tej pracy do druku. Eksperymentalny dowód natury występowania śladu został przeprowadzony dopiero w 2008 r. Przedstawiono go w komunikacie [L. 2], wygłoszonym na konferencji pt. „**Warsztaty Tribologiczne – Nanotribologia**”, która odbyła się 17 czerwca 2008 r. na Wydziale Chemii Uniwersytetu Łódzkiego. Wyjaśniając istotę zjawisk, obserwowanych w mikroskopie AFM podczas przesuwania nanodrutów, postawiono pytanie, czy odrywanie nanodrutów od podłoża (w obecności cieczy w kapilarze) można traktować jako pomiar napięcia powierzchniowego tej cieczy w skali „nano”. Do zbadania tej osobliwości przystąpiono dopiero w 2009 r. Całość wyników badań, analiz i pomiarów stanowi treść niniejszej pracy.

NANOTECHNOLOGIA I NANOTRIBOLOGIA

Istota nanotechnologii wg K.E. Drexlera polega na manipulowaniu pojedynczymi atomami w celu uzyskania większych struktur. Ten mechaniczny model traktował atomy jak kulki.

* Marcin Marczak.

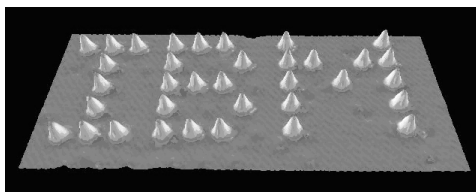
Na **Rys. 1** pokazano wygląd wirtualnego łożyska zbudowanego z atomów bez wyjaśnienia, w jaki sposób można by zbudować go w rzeczywistości.



Rys. 1. Łożysko wg K.E. Drexlera [L. 7]

Fig. 1. K.E. Drexler bearing [L. 7]

W specyficznym przypadku okazało się możliwe fizyczne manipulowanie pojedynczymi atomami. Takim przykładem było logo IBM przedstawione za pomocą odpowiednio ustawionych 35 atomów ksenonu na powierzchni niklu. Dokonali tego Donald Eigler i Erhard Schweizer w Centrum Badawczym IBM w San Jose, w Kalifornii w 1989 r., dokładnie po 30 latach od wykładu R.P. Feynmana (1959 r.) i sposobem zgodnym z ideą Drexlera. Eksperyment przeprowadzono w następujących warunkach: wysoka próżnia, temperatura 4 K i mała liczba atomów ksenonu na powierzchni (**Rys. 2**).



Rys. 2. Logo IBM ustawione z 35 atomów ksenonu [L. 8]

Fig. 2. IBM logo made of 35 xenon atoms [L. 8]

Wtórny efektem wykrytym przy przesuwaniu atomów ksenonu po powierzchni niklu było stwierdzenie, że występują przy tym opory tarcia.

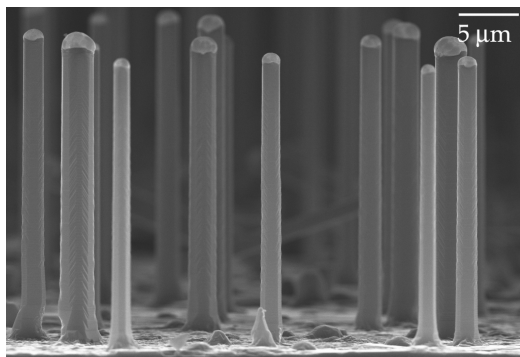
Tak została zapoczątkowana nanotribologia.

Do **nanotribologii** zalicza się obecnie:

- pomiary siły tarcia w nanometrycznej skali;
- bezpośrednią, trójwymiarową wizualizację śladów zużycia lub rys na powierzchni;

- pomiary grubości stałych lub ciekłych warstw granicznych, mających grubość nanometryczną lub utworzonych z jednej monowarstwy cząsteczek;
- charakteryzację morfologii powierzchni, jej tekstury i chropowatości;
- pomiary mechanicznych właściwości, takich jak: twardość, sprężystość, odkształcalność plastyczną itp. w nanometrycznej skali.

Do **nanotechnologii** zalicza się wszystkie czynności związane z wytwarzaniem nanorurek, nanodrutów i fulerenów, a także: czynności związane z odseparowaniem nanodrutów od rodni (**Rys. 3**), na której powstały; nanoszeniem ich na powierzchnię ciała stałego, znakowaniem identyfikującym dany nanodrut oraz badania ich właściwości.



Rys. 3. Fragment rodni z nanodrutami wyhodowanymi metodą CVD przez D. Hourlier [L. 4].

Fig. 3. Part of surface with „as grown” nanowires (grown by D. Hourlier [L. 4])

ANALIZA ODDZIAŁYWAŃ SIŁ GRAWITACYJNYCH I SIŁ VAN DER WAALSA W SKALI NANO

Zgodnie z poglądem autorów [L. 3], że dwie płaszczyzny będące od siebie w odległości $d = 1 \mu\text{m}$ działają na siebie siłami – grawitacyjną Q i równą jej co do wartości siłą van der Waalsa F_{vW} przyjęto, iż ta odległość – $1 \mu\text{m}$ jest umowną granicą przejścia z mikroskali do nanoskali. Idąc dalej w głąb nanoskali siła F_{vW} rośnie dla $d = 0,1 \mu\text{m}$ o czynnik 10^3 . Idąc jeszcze dalej powinno się stosować siły Lenarda–Jonesa, a więc uwzględniać jeszcze silniej rosnącą składową przyciągania van der Waalsa. Z tego względu oddziaływanie sił grawitacyjnych w skali nano uważa się za pomijalnie małe.

Rozpatrując układy ciał występujących w nanotechnologii, rozpatrzono następujące fazy:

- a) powierzchnia ciała stałego – ciecz – nanodrut;
- b) powierzchnia ciała stałego – ciecz w kapilarze – nanodrut;
- c) powierzchnia ciała stałego – nanodrut.

Faza „a” występuje po naniesieniu nanodrutów krzemowych zawieszonych w etanolu na powierzchnię krzemu. Następuje zwilżenie tej powierzchni w miejscach pokrytych przez rozlewającą się kroplę na obszarze tym większym, im zwilżalność danej powierzchni przez ciecz jest większa. Następuje rozprowadzenie zawieszonych nanodrutów na całym, pokrytym przez ciecz, obszarze. Na granicy faz ciecz–ciało stałe zachodzi proces adsorpcji (polegający na wiązaniu się cząsteczek cieczy z powierzchnią ciała stałego i powierzchnią nanodrutów siłami van der Waalsa). Etanol pobierając ciepło z otoczenia i ciała stałego odparowuje, ale proces odparowywania jest zakłócony w tych miejscach, w których osadziły się poszczególne nanodrut. W obszarach pomiędzy linią styku nanodrutu z powierzchnią krzemu wystąpi tzw. efekt kapilarny, przejawiający się większą zawartością cieczy w szczelinie pomiędzy nanodrutem a powierzchnią podłoża niż w warstewkach zalegających pomiędzy nanodrutami.

Z powyższych rozważań wynika, że zawsze będzie występować sytuacja reprezentowana przez fazę „b”, w której pod nanodrutami będą jeszcze obecne cząsteczki cieczy, a pozostała część powierzchni podłoża będzie sucha. Odrywanie nanodrutu w fazie „b” za pomocą tipa mikroskopu AFM będzie wymagać użycia takiej siły, ażeby pokonać głównie siłę spójności cieczy obecnej w kapilarze (w tym przypadku – etanolu).

Faza „c” występuje dopiero po całkowitym odparowaniu cieczy. Poszczególne nanodrut utrzymywane są na powierzchni ciała stałego, w pierwotnym położeniu, tylko siłami van der Waalsa. Ich odrywanie od powierzchni będzie w swej istocie pomiarem wartości siły adhezji nanodrutu krzemowego do powierzchni krzemu.

CEL, METODY I PRZEDMIOT BADAŃ

Cel – badanie procesu przesuwania nanodrutu

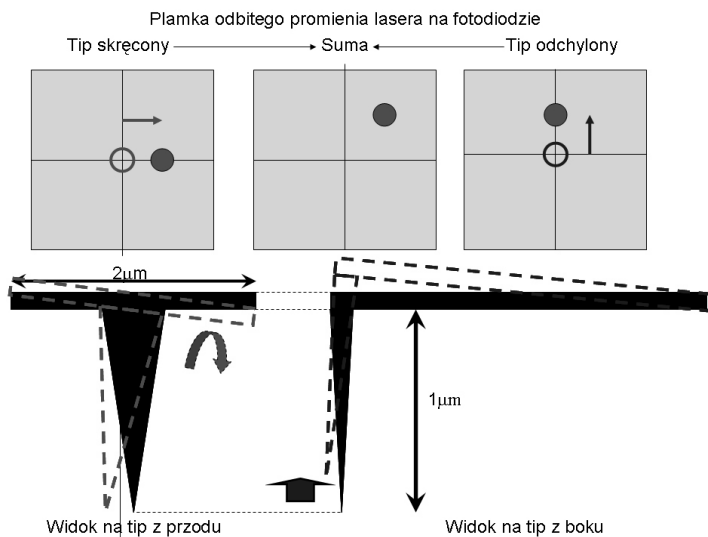
Przesuwanie nanodrutu krzemowego na powierzchni krzemu i pytanie o naturę pozostawiania śladu przez przesunięty nanodrut. Pomiar sił potrzebnych do wykonania tej operacji (nanotribologia) oraz obliczenie i porównanie ze skalą makronapięcia powierzchniowego etanolu.

Metody

Do badań wykorzystano mikroskop sił atomowych AFM Dimensional Nanoscope. Tip stosowany podczas pomiarów: NANOSENSORS PPP-EFM-56 n⁺ silicon; częstotliwość rezonansowa: 66 kHz; stała sprężystości $k = 0,3 \text{ N/m}$.

Pomiary zostały wykonane w dwóch trybach pracy mikroskopu AFM: (1) *semi-contact mode* (dalej nazywany *tapping mode*¹) oraz (2) *contact mode* (z jednoczesnym pomiarem siły bocznej – *lateral mode*). Pierwszy tryb używany był do obrazowania nanodrutu na powierzchni ciała stałego przed i po przesunięciu. Tryb drugi zastosowany był do przesuwania nanodrutu i równocześnie do obserwacji powstałego śladu.

Na **Rys. 4** przedstawiono model wygięcia tipa w dwóch płaszczyznach XY i Z. W trybie *contact mode* tip wygina się reagując na zmieniającą się siłę pomiędzy tipem a skanowaną powierzchnią ciała stałego. Jest to odwzorowane na fotodiodzie w kierunku Y (**Rys. 4** prawy). Natomiast



Rys. 4. Model wygięcia tipa w dwóch płaszczyznach XY i Z

Fig. 4. AFM tip deflection in XY and Z planes

¹ W trybie *tapping mode* możliwy jest sporadyczny kontakt tipa z powierzchnią, jednakże jest on na tyle krótkotrwały i delikatny, że nie jest w stanie przesunąć nanodrutu ani zmodyfikować znacząco powierzchni (dzięki temu uzyskuje się wierny obraz powierzchni).

w trybie *lateral mode tip* dotyka powierzchni i ulega skróceniu (jako że skan jest wykonywany poprzecznie), co ma swoje odwzorowanie na fotodiodzie w kierunku X (**Rys. 4** lewy). Tryb ten umożliwia dokładne rejestrowanie sił występujących podczas przesuwania nanodrutu. Sygnał końcowy jest sumą obu sygnałów (**Rys. 4** środek). Układ umożliwia oddzielne rejestrowanie odczytu sygnału z fotodiody w kierunku X.

METODA POMIARU

1. Mikroskop pracuje w trybie *tapping mode*. Wykonanie skanu powierzchni w celu uzyskania obrazu nanodrutu przed pomiarem. Obszar skanu $15\ \mu\text{m} \times 15\ \mu\text{m}$ (256 linii, gęstość próbkowania: 512) (**Rys. 4** prawy).
2. Przejście do trybu *contact mode* i wykonanie pomiaru w trybie *lateral mode*. Obserwacja skrócenia tipa podczas przesuwania w skali napięcia na fotodiodzie oraz skan powierzchni i obserwacja pozostałego śladu po przesunięciu nanodrutu. Obszar skanu: $7,6\ \mu\text{m} \times 7,6\ \mu\text{m}$ (128 linii, gęstość próbkowania: 512) (**Rys. 4** lewy).
3. Wykonanie skanu w trybie *tapping mode* w celu uzyskania informacji o nowej pozycji nanodrutu, ewentualnych jego odkształceniach oraz pozostawionym śladzie. Obszar skanu $20\ \mu\text{m} \times 20\ \mu\text{m}$ (256 linii, gęstość próbkowania: 512).
4. Wykonanie skanów kalibrujących:
 - dociskanie tipa w trybie *contact mode* z różną siłą (w skali napięcia) i zarejestrowanie wyników na fotodiodzie dla wartości V: 0,2, 0, 0,2, 0,5, 1,
 - wykonanie krzywej sił w normalnym trybie w celu wyznaczenia siły, z jaką dociskany jest tip do powierzchni.
5. Analiza uzyskanych wyników.

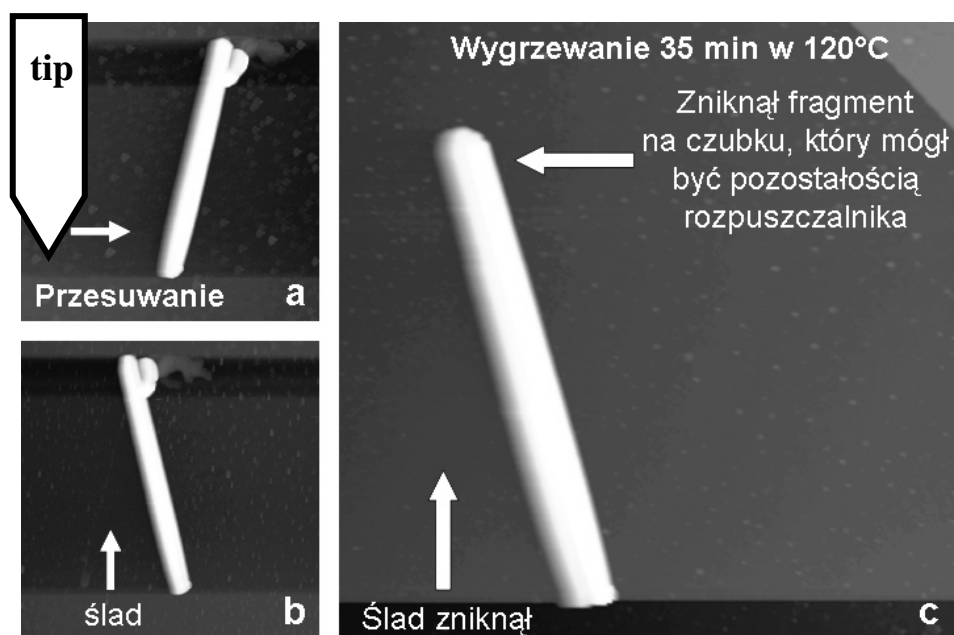
PRZEDMIOT BADAŃ – NANODRUTY KRZEMOWE

Przedmiotem badań były nanodrutu krzemowe (SiNW) otrzymane metodą CVD (Chemical Vapour Deposition) [**L. 4**]. Badane nanodrutu mają średnicę $\sim 100\text{--}300\ \text{nm}$ oraz długość do $8\ \mu\text{m}$. Nanodrutu po wzroście wyglądają tak, jak na **Rys. 3**. W celu ich odseparowania od rodni, na której powstały, umieszcza się jej fragment z nanodrutami w etanolu i wstawia na 30 sekund do wanny ultradźwiękowej; następnie nanosi kroplę

zawiesiny o objętości od 0,5 μl do 2,5 μl na powierzchnię krzemu <100> typu „p” i czeka się aż ciecz odparuje. Gęstość „upakowania” (inaczej – liczbę) nanodrutów na powierzchni reguluje się krotnością powtarzania operacji nanoszenia.

WYNIKI BADAŃ

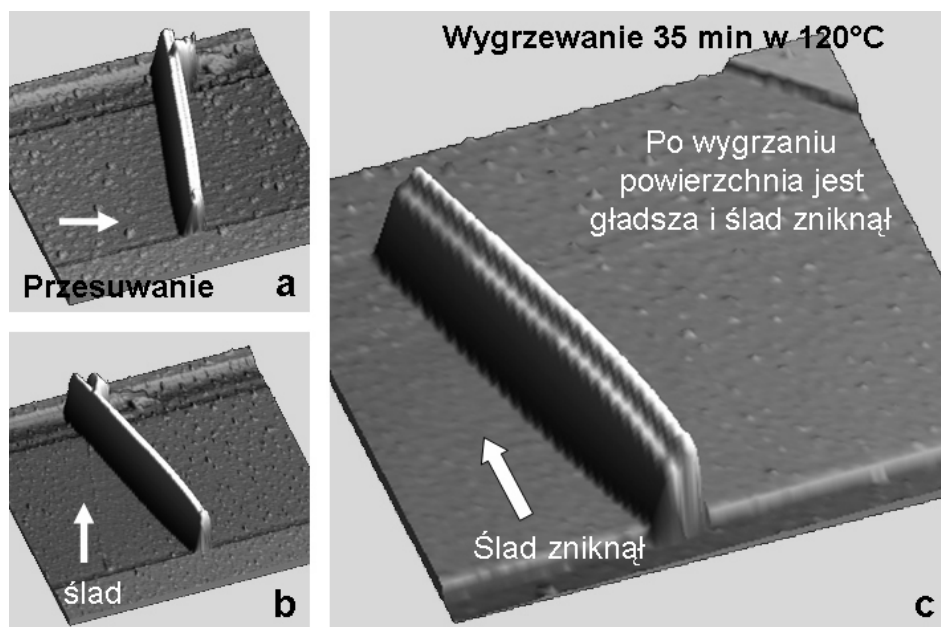
Do badań natury śladu, pozostawianego przez nanodrut (znajdujący się w układzie materiałowym odpowiadającym fazie „b”), przystąpiono w 2008 r. (autor był obligowany terminem konferencji w Łodzi). W wygłoszonym tam komunikacie przedstawiono wyniki obserwacji zmian na powierzchni krzemu, jakie spowodowało przesunięcie po niej nanodrutu. Obrazują to **Rys. 5 i 6**, na których naniesiono objaśniające napisy. Pierwszy skan powierzchni wykonano w trybie *tapping mode*, co zostało pokazane na **Rys. 5** (lewy, górny róg). Mając obraz stanu „przed”, zmieniono tryb



Rys. 5. Obraz nanodrutu 01 przed (a) i po (b) przesunięciu oraz po wygrzaniu (c). Widoczny jest śląd, który po wygrzaniu zniknął

Fig. 5. Silicon nanowire picture before (a) and after (b) movement; after heat treatment (c). Nanowire trace is visible and its disappearance after heating

pracy mikroskopu AFM na *contact mode*, tak aby tip dotknął podłoża i wykonał jedną linię skanu, przesuając przy tym nanodrut. Efekt jest widoczny na **Rys. 5** (lewy, dolny róg). Obraz „po” został uzyskany w trybie *tapping mode*. Na tym skanie jest dobrze widoczny „śląd” w miejscu, w którym poprzednio znajdował się nanodrut. Przyjęto, że rozłożone wzdłuż linii pierwotnego pobytu nanodrutu kropelki stanowią resztki etanolu (cieczy w kapilarze utworzonej przez podłożo i nanodrut), od którego został nanodrut oderwany. Po wygrzaniu powierzchni śląd zniknął. Ciecz odparowała. W celu lepszego uwidocznienia śładu przedstawiono obraz nanodrutu 01 w rzucie trójwymiarowym („3D”) (**Rys. 6**).

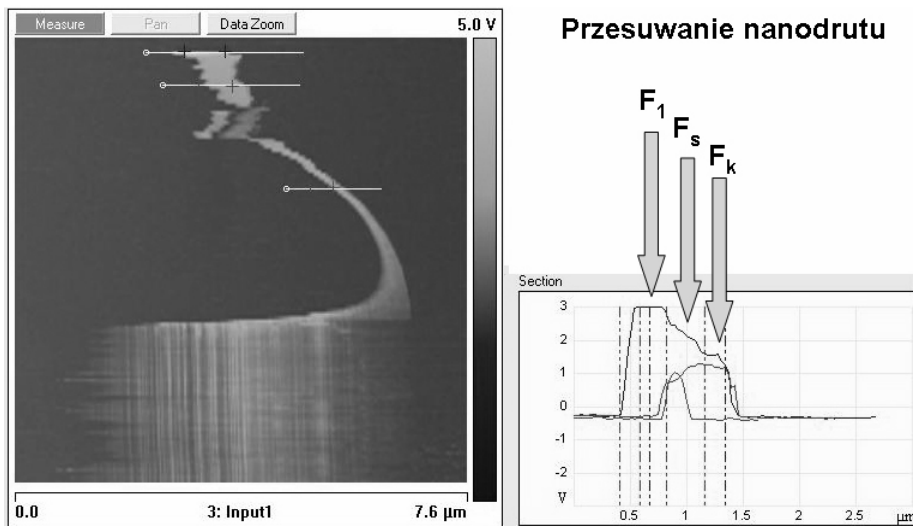


Rys. 6. Trójwymiarowy obraz nanodrutu 01 przed (a) i po (b) przesunięciu oraz po wygrzaniu (c). Widoczny jest śląd, który po wygrzaniu zniknął

Fig. 6. Silicon nanowire 3D picture before (a) and after (b) movement; after baking (c). Nanowire trace is visible and its disappearance after heating is shown

Następnie wybrano inny nanodrut i po zobrazowaniu powierzchni w *tapping mode* cały obszar został przeskanowany w trybie *contact mode+lateral mode* (**Rys. 7**). W ten sposób możliwa była dokładna obserwacja sił (w jednostkach napięcia V~F), pojawiających się podczas przesuwania nanodrutu. Podczas przesuwania nanodrutu występuje skręcanie

tipa, proporcjonalne do siły potrzebnej: w pierwszym momencie – F_1 – do oderwania nanodrutu od powierzchni krzemu, w drugim – F_s – do pokonania tarcia statycznego, a w kolejnym – F_k – tarcia kinetycznego. Przebieg procesu przesuwania i pomiaru wartości sił potrzebnych w tym procesie pokazano na **Rys. 7**.

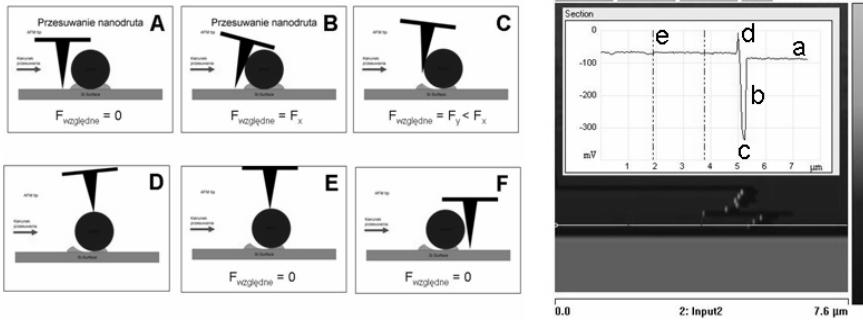


Rys. 7. Przesuwanie nanodrutu i wyniki pomiarów wartości sił (F_1 – siła oderwania nd, F_s – siła tarcia statycznego, F_k – siła tarcia kinetycznego)

Fig. 7. Nanowire pushing and its results (F_1 – sticking force, F_s – static friction force, F_k – kinetic friction force)

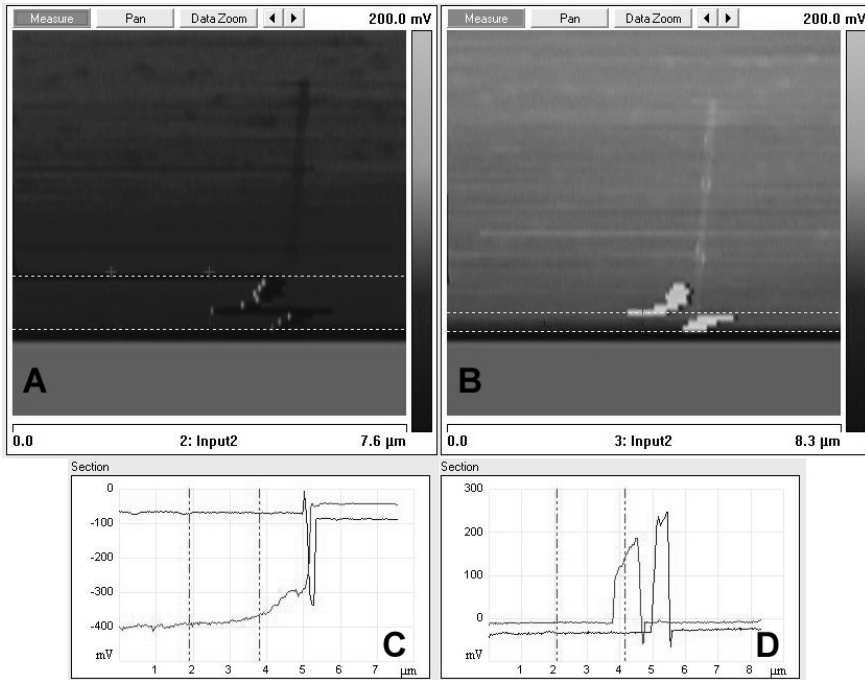
W badaniach powtórzonych w 2009 r. wzięła udział Djamilia Hourlier; chodziło w nich o potwierdzenie przebiegu procesu opisanego wyżej, dokonanie pomiaru wielkości sił potrzebnych w procesie przesuwania nd i udzielenia odpowiedzi na pytanie czy oderwanie nanodrutu od powierzchni ciała stałego (w obecności cieczy w kapilarze) jest pomiarem napięcia powierzchniowego tej cieczy w skali nano. Pokazany na **Rys. 8**. model ilustruje skręcanie tipa podczas przesuwania nanodrutu i kolejne fazy odrywania go. Eksperyment został wykonany w trybie *contact mode* tipa z powierzchnią krzemu. Skan został wykonany, jak wcześniej na całym obszarze. Na **Rys. 9** pokazano przesuwanie nanodrutu- ruch tipa w lewo (9A) – sygnał negatywny oraz ruch tipa w prawo (9B) – sygnał pozytywny oraz odpowiadające im przekroje (9C) oraz (9D). Na obu skanach (9A) i (9B) widoczny jest ślad w miejscu, gdzie znajdował się nanodrut (wysokość 5 nm).

Wygięcie tipa podczas przesuwania



Rys. 8. Model skręcania tipa podczas przesuwania nanodrutu (na lewo) i odpowiadające mu fazy podczas pomiaru (na prawo)

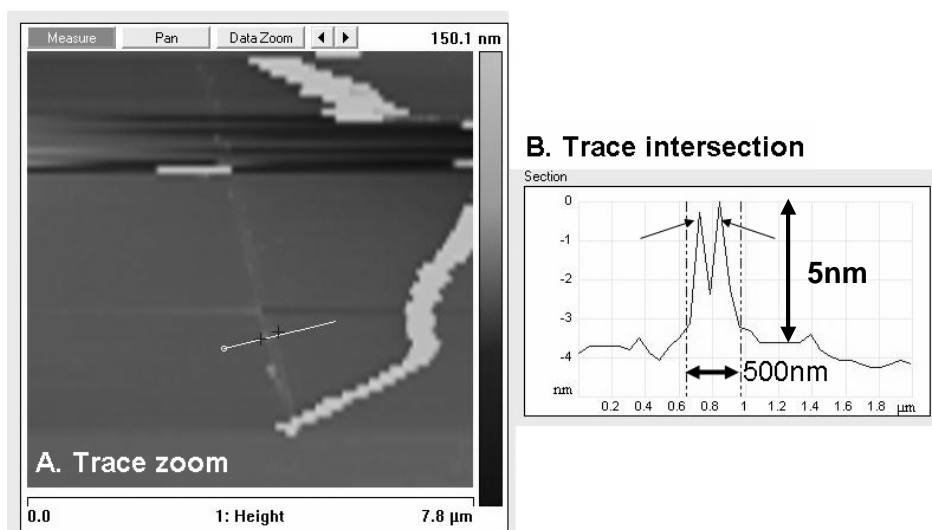
Fig. 8. Tip lateral deflection model during nanowire manipulation (left) and respectively phases during measurement (right)



Rys. 9. Przesuwanie nanodrutu – ruch tipa w lewo (a) – sygnał negatywny oraz ruch tipa w prawo (b) – sygnał pozytywny, oraz odpowiadające im przekroje (c) oraz (d). Na obu skanach (a) i (b) widoczny jest ślad w miejscu, gdzie znajdował się nanodrut (wysokość 5 nm)

Fig. 9. Nanowire manipulation – tip movement to the left (a) – negative signal and tip movement to the right (b) – positive signal, and respectively their cross-sections (c) and (d). In the both scans (a) and (b) a trace is visible where a nanowire was (height 5 nm)

Analizując wyniki pomiarów, pokazane na **Rys. 9**, stwierdza się ich duże podobieństwo do opisanych wcześniej. Najciekawszym jest tutaj przekrój D; po przesunięciu nanodrutu pozostał po nim „śląd” o wysokości ok. ~ 5 nm i podstawie ok. ~ 1800 nm. Zbliżenie tego śladu pokazano na **Rys. 10**. Warto podkreślić, że obraz ten został uzyskany w trybie *contact mode*. Oznacza to, że „kropelki”² etanolu na powierzchni są na tyle mocno związane z powierzchnią, że tip mikroskopu nie jest w stanie ich zmodyfikować, a wręcz przeciwnie, oddaje ich dokładny kształt.



Rys. 10. Obraz zbliżenia „śladu” pozostałego po przesunięciu nanodrutu

Fig. 10. Trace magnification left after nanowires manipulation

„Ślad” ma kształt doliny fali pozostawionej przez nd. Ma on szerokość ok. ~ 500 nm, która jest znacznie większa niż średnica nanodrutu. Widoczne na przekroju dwa maksima – odpowiadają pozostałemu na powierzchni krzemu – adsorbatowi.

Napięcie powierzchniowe etanolu, zmierzone przez Yong’a S. Won’a i innych w skali makro za pomocą pierścienia Du Noüy’a, wynosi w temperaturze 25°C – $22,7$ mN/m [L. 5]. Pomiary wykonane przez Vazquezę i innych [L. 6] za pomocą tensjometru Prolabo (z bardzo ciekłą płytką Wilhelmy) wykazały zbliżoną wartość, tj. $21,82$ mN/m, mimo że

² Ze względu na rozmiar niepodchodzące już pod definicję kropli, która z założenia jest ciekle.

były w skali mikro. W obydwu tych przypadkach kontakt pierścienia i płytki zachodził bezpośrednio z cieczą jako taką! W przypadku naszych badań kontakt nanodrutu z „cieczą kapilarną” odbywał się w tak małej odległości od powierzchni podłoża – krzemu, zaledwie kilku nm, że etanol w tej przestrzeni nie miał charakteru cieczy; cząsteczki etanolu adsorbując „zagaściły się” tworząc tzw. *adsorptyw* na powierzchni nanodrutu i na powierzchni podłoża. Oderwanie nanodrutu pokazane w tym eksperymencie, manualnie podobne do pomiarów przeprowadzanych w skali makro i mikro [L. 5, 6], nie dotyczyło jednak cieczy jako takiej, gdyż ciecz w warstwie przyściennej o grubości kilku nanometrów przestaje nią być. Potwierdzeniem tego poglądu jest fakt, że było możliwe eksperymentalnie dotknięcie tipem domniemanej „kropki” i wykonanie pomiaru, co nie byłoby jednak możliwe, gdyby kropła występowała w skali mikro lub większej.

PODSUMOWANIE

Występowanie „śladu” w miejscu pobytu nanodrutu krzemowego na powierzchni ciała stałego jest związane z procedurą nanoszenia i manipulowania nanoobjektami w obecności cieczy. Ciecze są stosowane w wielu operacjach nanotechnologicznych, nawet do chemicznego trawienia nanodrutów w celu zmniejszania ich średnicy. W tribologii znane są zawiesiny nanoziarnistych dyspersji metali i innych ciał stałych jako środków smarowych.

W artykule wyjaśniono, jaki jest mechanizm występowania „śladu”. Wydaje się, że to wyjaśnienie może być przydatne do lepszego zrozumienia procesów zachodzących w skali nano na powierzchni ciała stałego, a których skutki przejawiają się w skali makro. Dotyczy to np. w tribologii istoty tarcia granicznego. Przedstawiony model układu materiałów: *ciało stałe – ciecz – nanodrut* może posłużyć do analizy procesów zachodzących w układzie: *powierzchnia ciała stałego – ciecz smarna – pojedynczy występ mikronierówności na powierzchni drugiego ciała stałego*. Warstwa graniczna utworzona na powierzchni ciała stałego z aktywnych cząsteczek środka smarowego jest w sensie fizycznym – adsorptywem.

Pomiar wartości siły dokonany w jednostkach elektrycznych (V) pozostawiono, ze względów od autorów niezależnych, bez zmian. Jednakże przeprowadzenie dodatkowego eksperymentu w celu wyznaczenia wartości tych sił byłoby interesujące.

PODZIĘKOWANIE

M. Marczak dziękuje za wsparcie finansowe z grantu ANR No. JC05_46152, NANOFILOUS pod Contract No. ENK5-CT-2002-8066, oraz CEPHOMA; praca była także wspierana z projektu PHC Project No. 17806NL.

LITERATURA

1. Marczak R., Marczak M.: referat wygłoszony na IV Kolokwium Tribologicznym w Politechnice Poznańskiej. Praca niepublikowana, 2006.
2. Marczak M.: komunikat wygłoszony na konferencji Warsztaty Tribologiczne – Nanotribologia. Wydział Chemii Uniwersytetu Łódzkiego. Łódź 2008.06.17. Praca niepublikowana.
3. Landau L.D., Lifszic E.M.: Elektrodyynamika ośrodków ciągłych; [tłum. z j. ros.], PWN Warszawa 1960.
4. The Answer to the Challenging Question: Is there a Size Limit of Nanowires? Djamila Hourlier, Pierre Perrot Journal of Nano Research Vol. 4, 2008, 135.
5. Yong S. Won, Dong K. Chung, and Anthony F. Mills: Density, viscosity, surface tension, and carbon dioxide solubility and ..., Journal of Chemical and Engineering Data, 2002.05.01.
6. Vazquez G., Alvarez E., Navaza Jose M.: Surface Tension of Alcohol Water + Water from 20 to 50 degree. C” J. Chem. Eng. Data. 1995,40 (3), 611–614.
7. <http://e-drexler.com/p/04/03/0323bearingDesigns.html>
8. <http://www-03.ibm.com/press/us/en/pressrelease/20360.wss>

Recenzent:
Tadeusz BURAKOWSKI

Summary

In this article, physical aspects present during manipulation of nanoparticles deposited on a solid state surface are presented. Origins of traces left on the surface of the contact (nanowire – solid state surface – capillary liquid.) after nanowire manipulation are explained and additional particularities are discussed.