

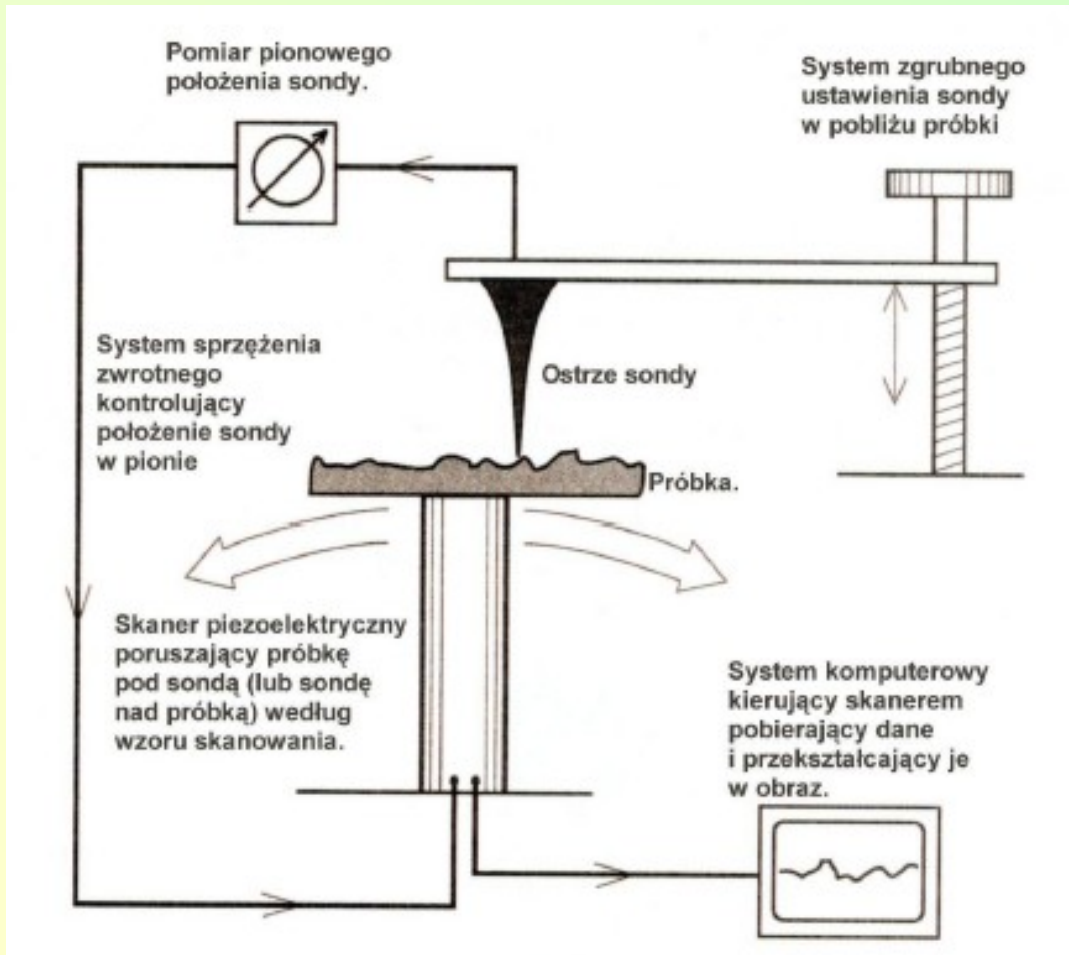
Mikroskop tunelowy skaningowy

Scanning tunneling microscopy (STM)

- Zasada działania
- Historia 'odkryć'
- Zastosowane rozwiązania
- Przykłady zastosowania

Bolesław AUGUSTYNIAK

Zasada działania mikroskopu skanującego SPM



Mikroskop ze
skanującą sondą
– schemat
ogólny

scanning probe
microscope

SPM

Co należy zrobić aby zbudować mikroskop skaningowy ?

Mikroskop skaningowy musi posiadać:

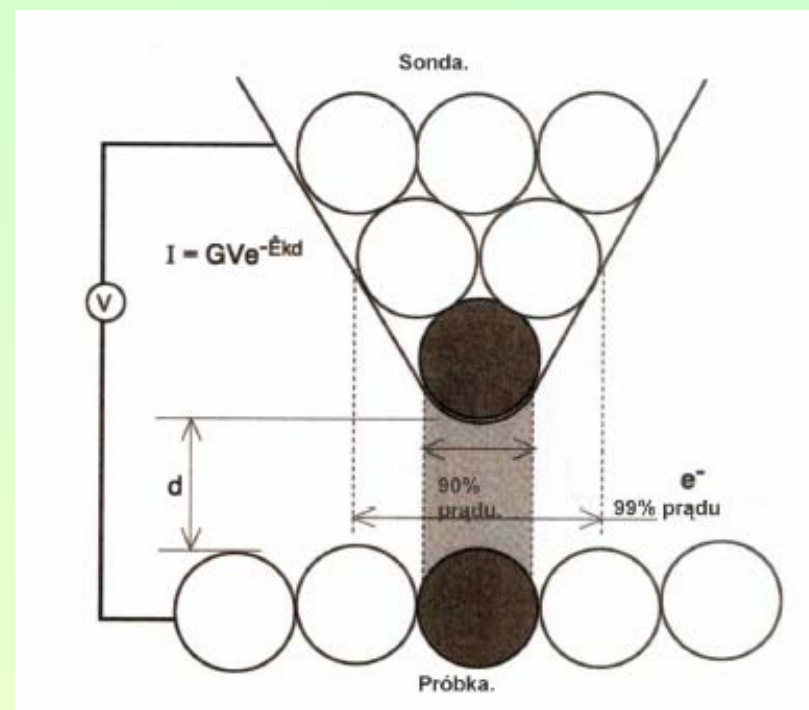
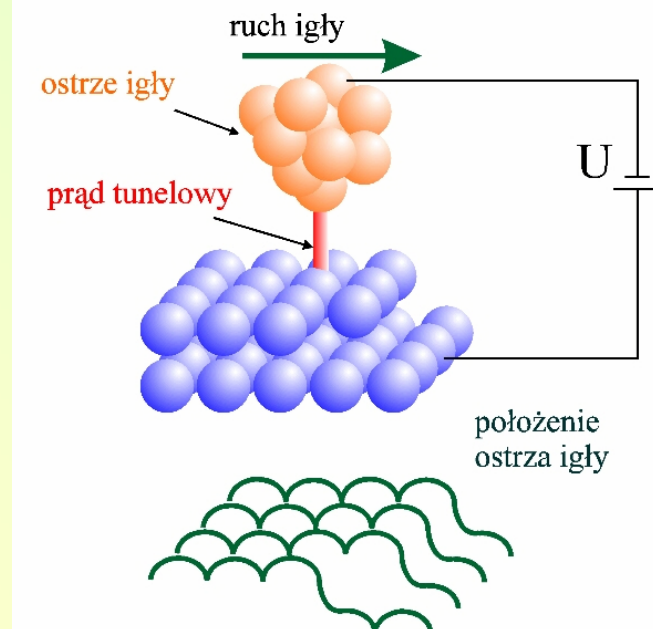
- Ostrze
- Układ umożliwiający precyzyjne przesuwanie ostrza
- Układ umożliwiający tłumienie drgań.

Trzy główne wersje :

- 1) ostrze mechanicznie stykające się z powierzchnią **!!!**
- 2) Ostrze bez kontaktu (płynie prąd tunelowania – **STM**)
- 3) Ostrze bez kontaktu – mierzona siła oddziaływania (mikroskop sił atomowych - **AFM**)

Mikroskop STM

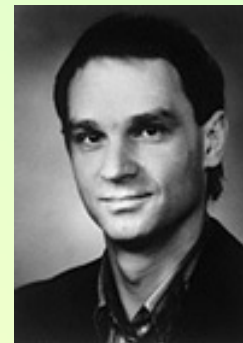
Zasada działania STM



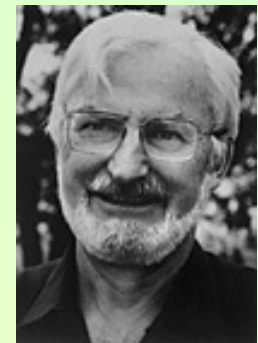
W STM stosuje się ostrą, przewodzącą sondę. Między sondę a próbkę przykłada się różnicę potencjałów (napięcie polaryzujące). Kiedy sondę zbliży się na odległość około 1 nm do powierzchni próbki, to wtedy zarówno elektrony z badanej próbki, jak i elektrony sondy zaczynają tunelować (przeskakiwać z wykorzystaniem efektu tunelowego) poprzez 1 nm szczelinę oddzielającą oba te obiekty. Przeskok elektronu dokonuje się z próbki na sondę lub z sondy na próbkę - zależy to od znaku różnicy potencjału (napięcia polaryzującego).

Jak to było?

- 1928 r. - zostało przewidziane teoretycznie zjawisko tunelowania (R.H. Fowler, L. Nordheim)
- 1960 r. - pierwsze eksperymentalne potwierdzenie zjawiska tunelowania na planarnych złączach M-I-M (I. Giaever)
- 1978 r. - początek badań nad konstrukcją przyrządu do obserwacji powierzchni z rozdzielczością atomową
- 1982 r. - budowa pierwszego mikroskopu STM (G. Binnig, H. Rohrer - IBM Zurich)
- **1986 r. - nagroda Nobla z fizyki za budowę mikroskopu STM,**



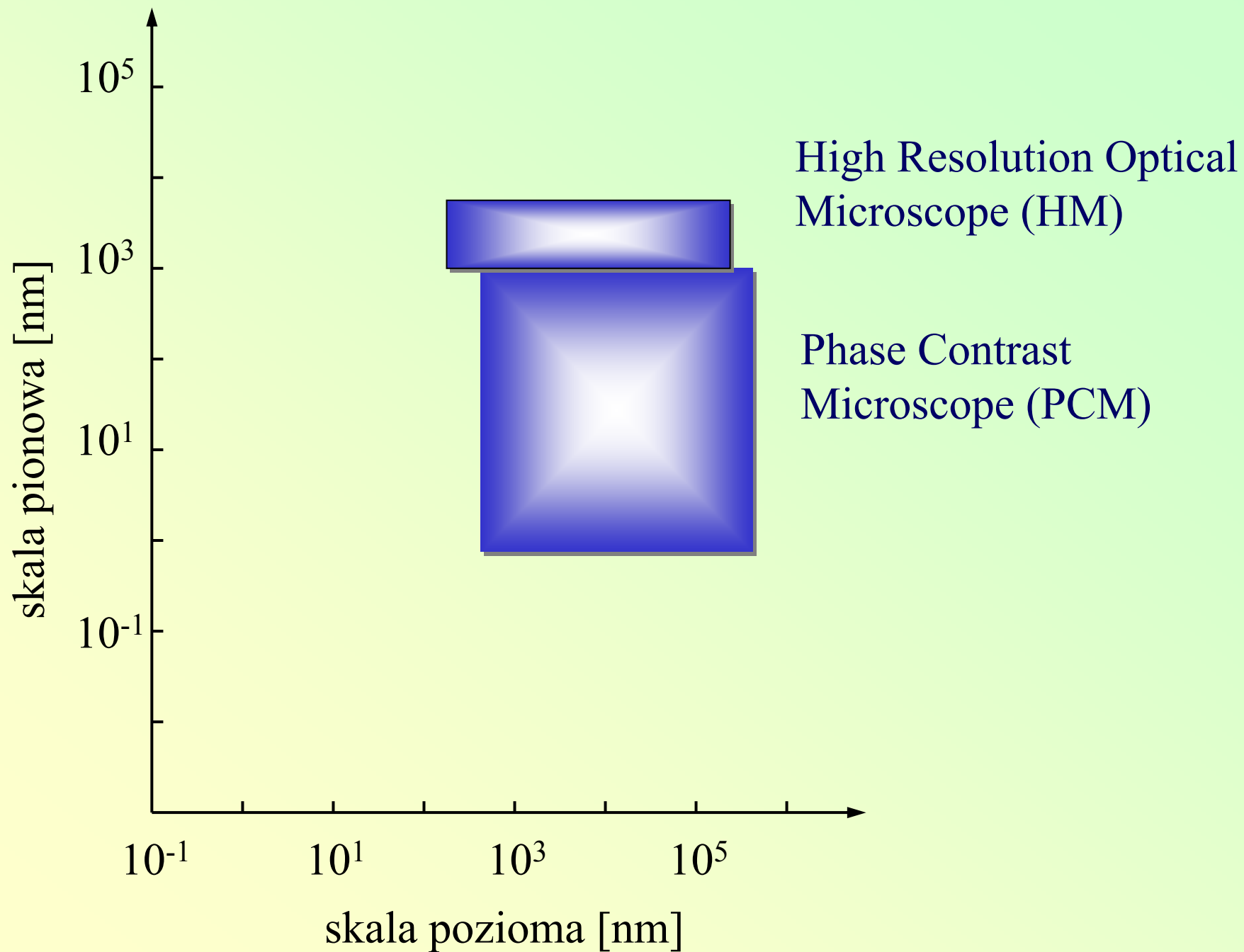
**Gerd
Binnig**

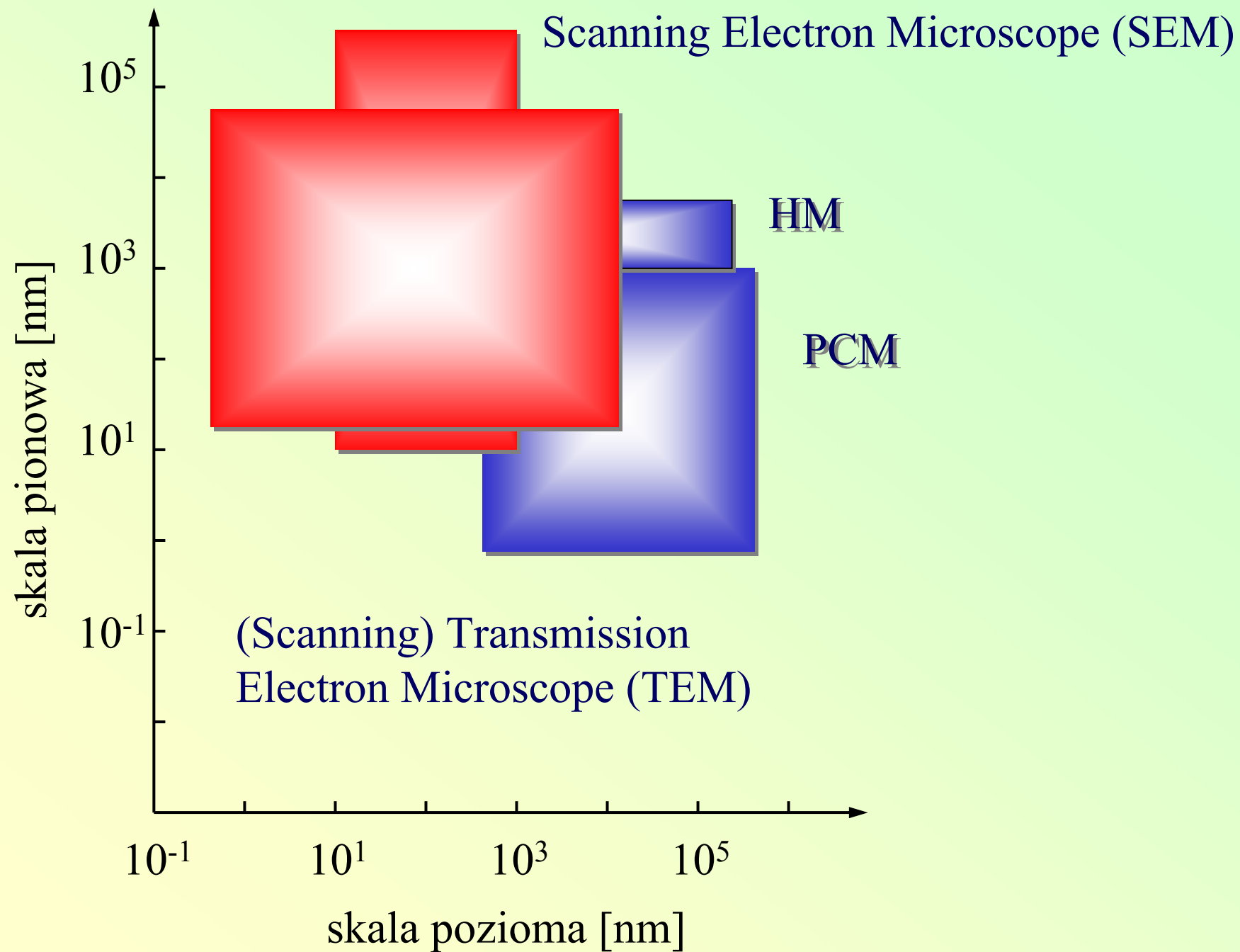


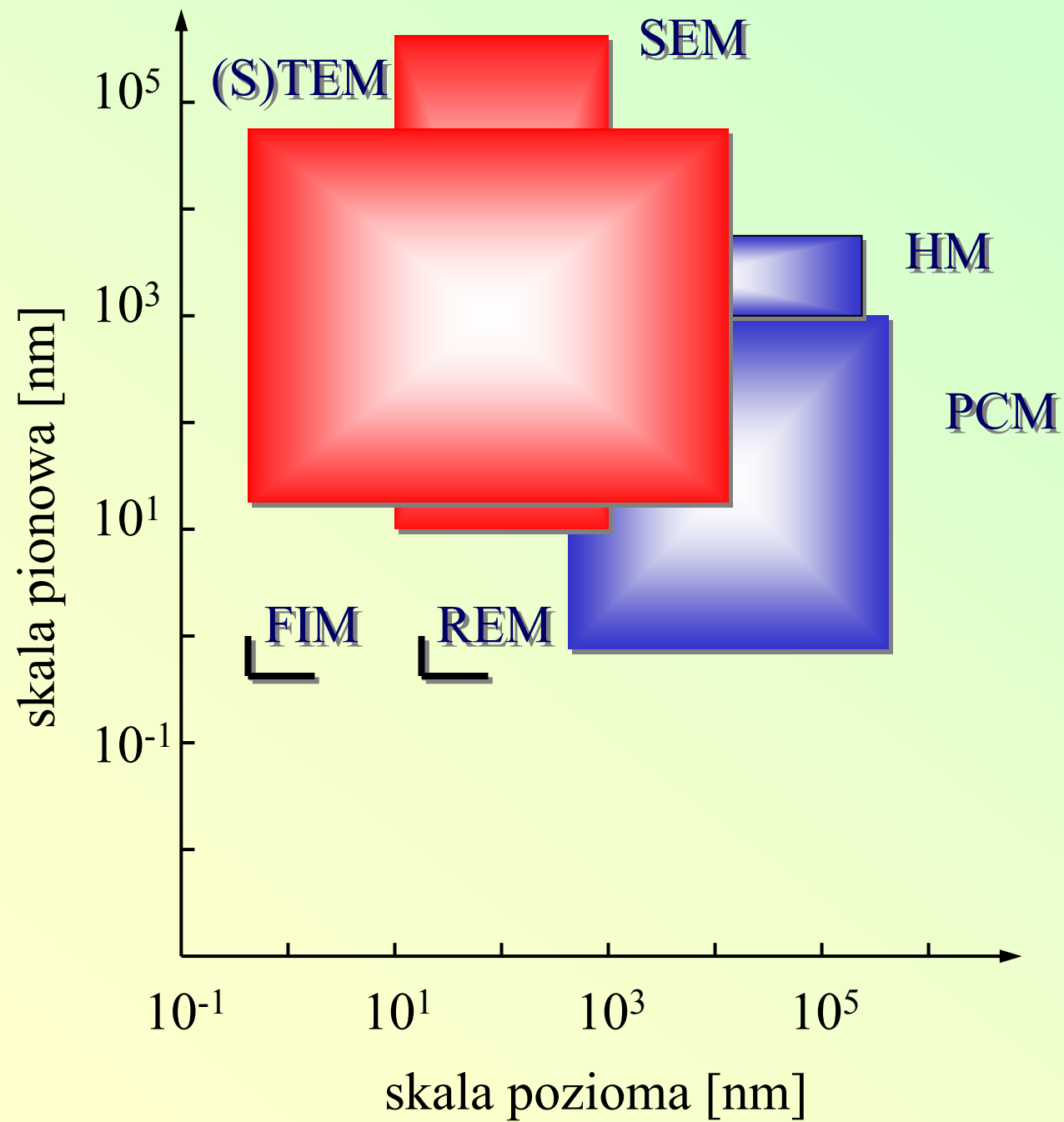
**Heinrich
Rohrer**

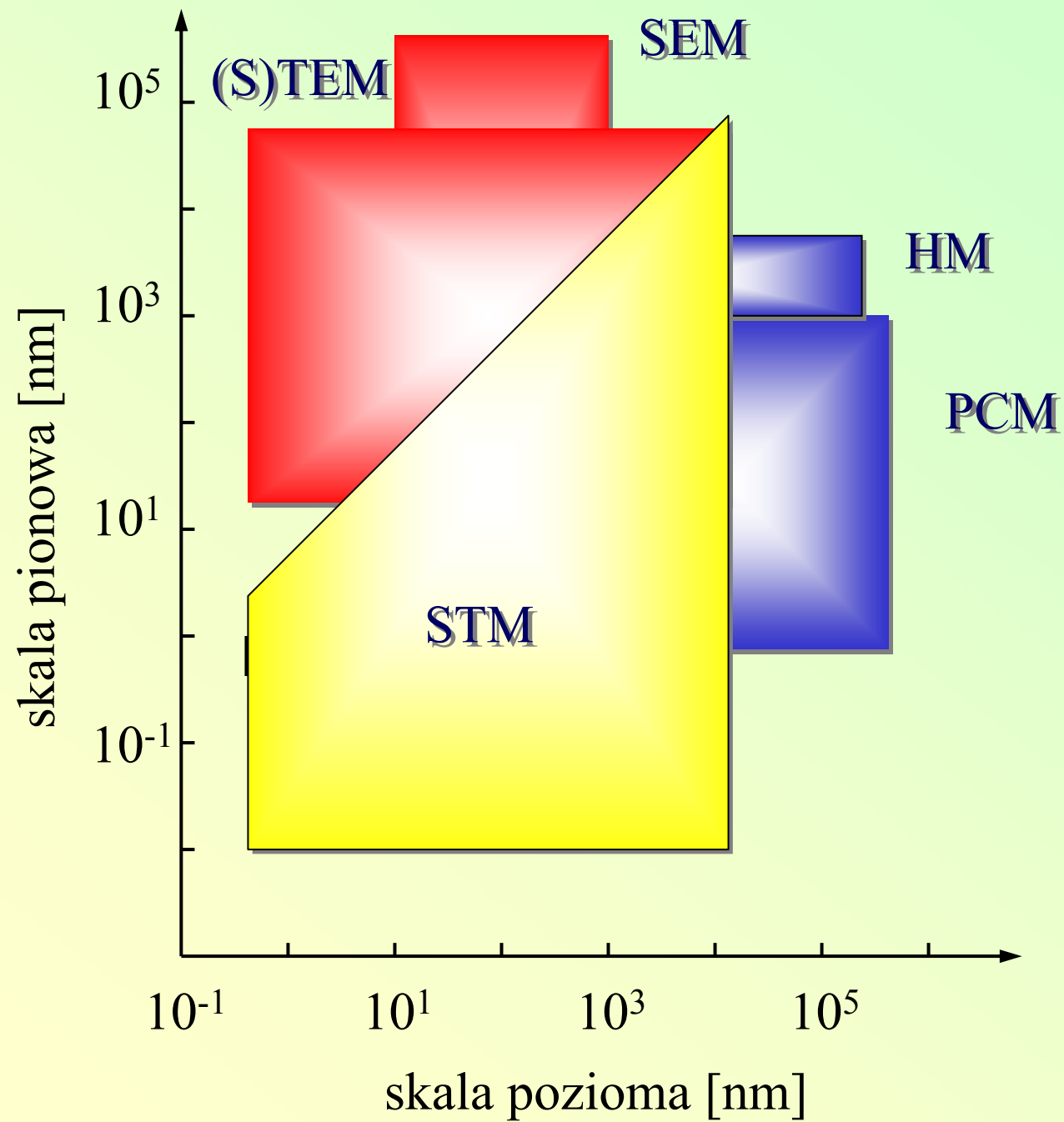
STM a inne 'mikroskopy'

- mikroskopy optyczne
- mikroskopy elektronowe
- mikroskopy polowe







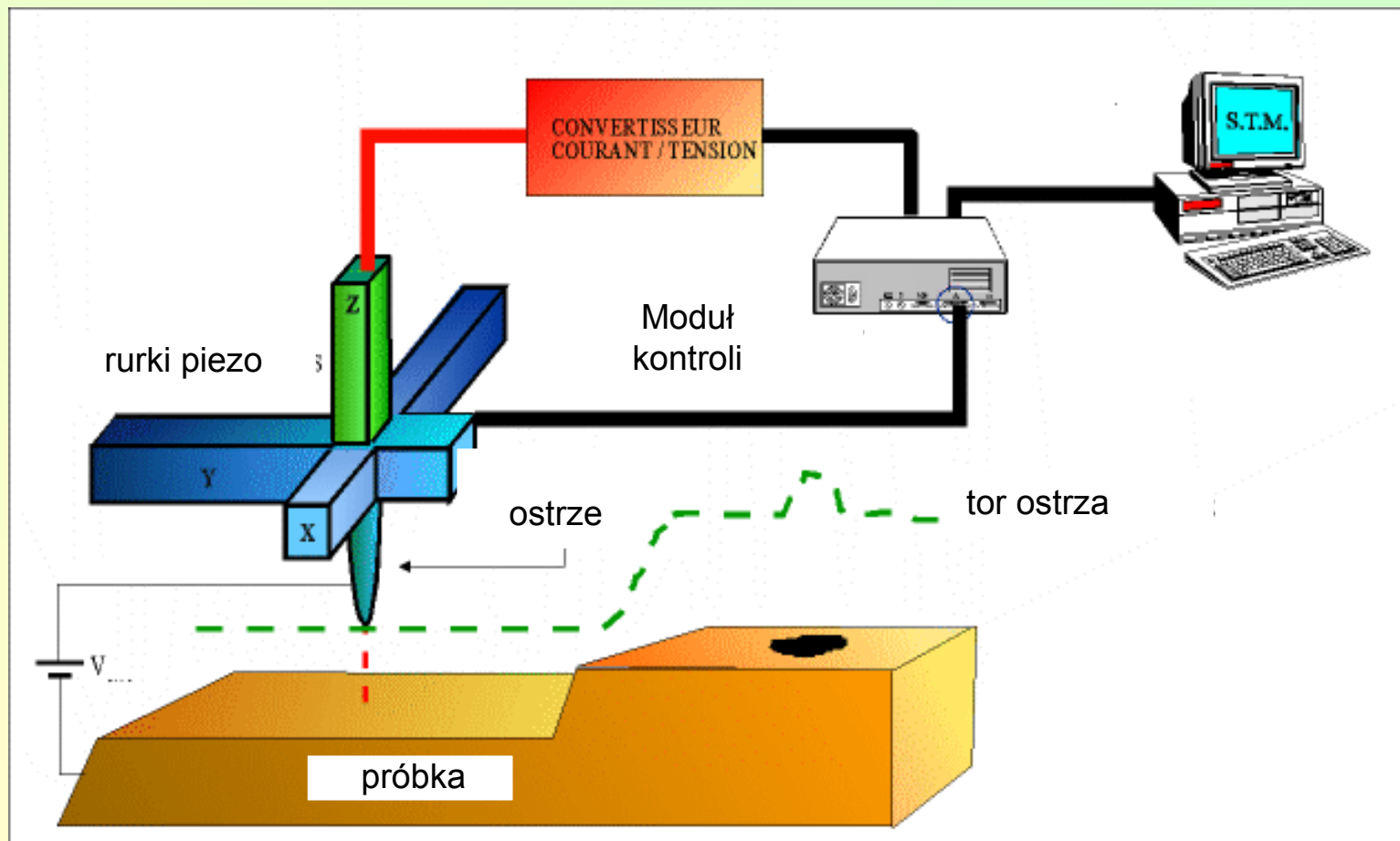


Wniosek

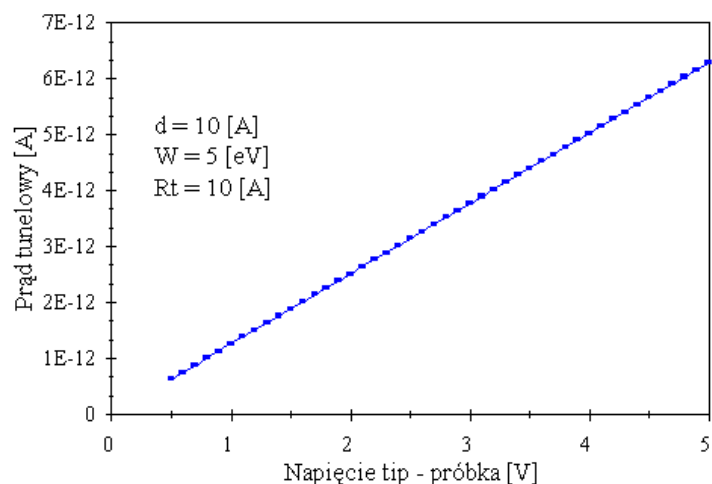
STM to pierwszy mikroskop,
który umożliwia 'obserwację'
powierzchni z rozdzielczością
atomową w przestrzeni
rzeczywistej BEZ posługiwania
się efektem dyfrakcji

STM

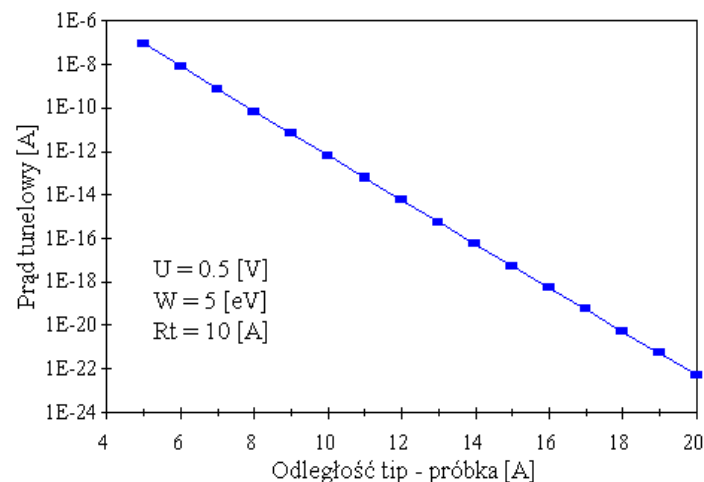
schemat budowy i działania



Efekt tunelowy



— zależność prądu tunelowego od napięcia igła - próbka



— zależność prądu tunelowego od odległości igła - próbka

Prąd tunelowy zależy w wykładniczy sposób od odległości między sondą a powierzchnią próbki. Kiedy odległość ta zmienia się o 10% (około 0.1 nm) to prąd tunelowy zmienia się o rząd wielkości. Ta wykładnicza zależność czyni z STM niezwykle czułe urządzenie. STM potrafi tworzyć obrazy z rozdzielczością lepszą od 0.1 nm w pionie, oraz z rozdzielczością atomową w płaszczyźnie poziomej.



Prąd tunelowy – przypadek ogólny

$$I = 32\pi^3 \hbar^{-1} e^2 V \phi_0^2 \rho_{sa}(E_F) R_t^2 \kappa^{-4} e^{-2\kappa R_t} \sum |\psi_v(r_0)|^2 \delta(E_v - E_F)$$

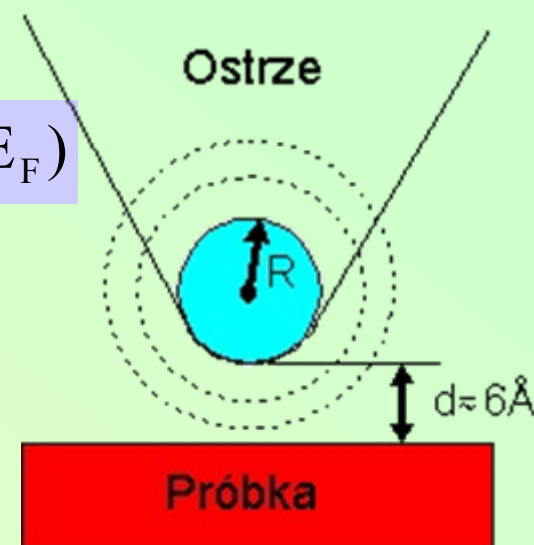
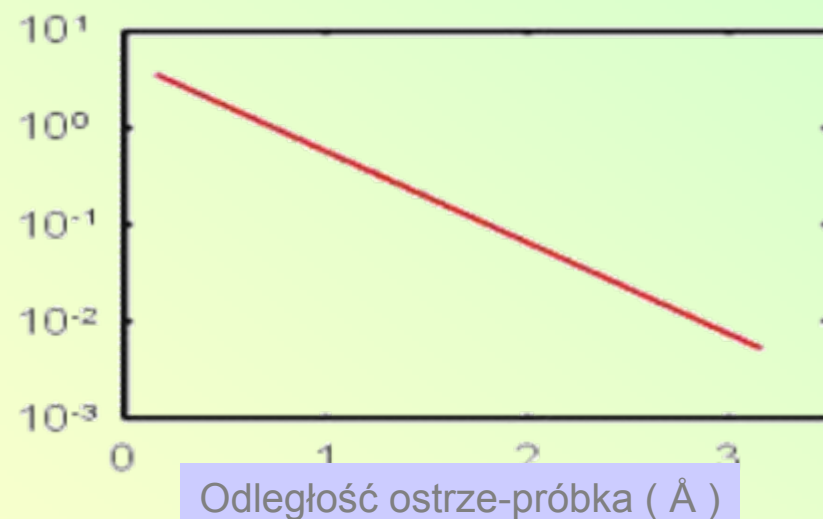
Cała informacja o strukturze elektronowej „siedzi” w gęstości stanów elektronowych próbki ρ_{sa}

$$I(d) = V \rho_{sa}(E_F) e^{-1.025 \sqrt{\phi} d}$$

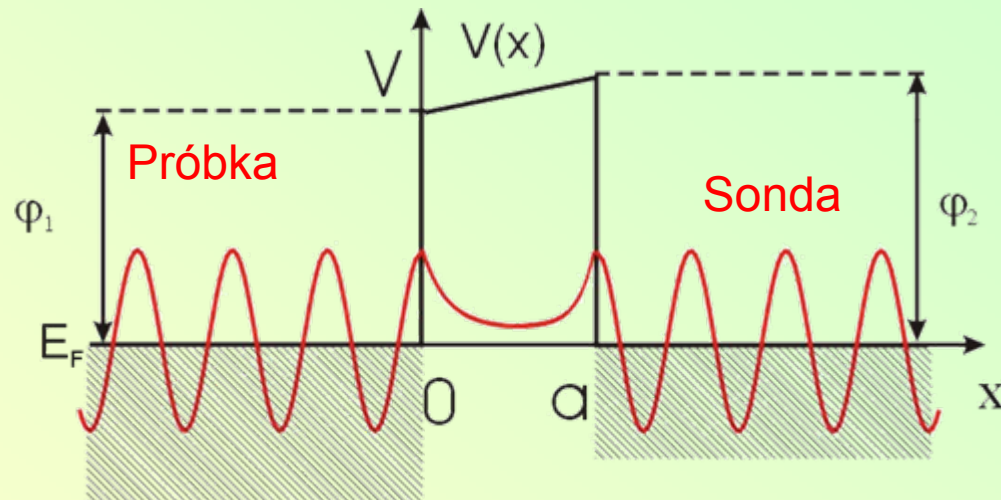
gdzie odległość $[d]$ w Å, a średnia praca wyjścia $[\phi]$ w eV

Prąd tunelowy (jednostki umowne)

Prąd tunelowy (jednostki umowne)



Co się stanie, gdy w pobliżu powierzchni próbki umieścimy sondę ?



Prawdopodobieństwo tunelowania P dla $|\chi|a \gg 1$

$$P = \frac{16 E (\phi - E)}{\phi^2} e^{-2|\chi|a}$$

, gdzie

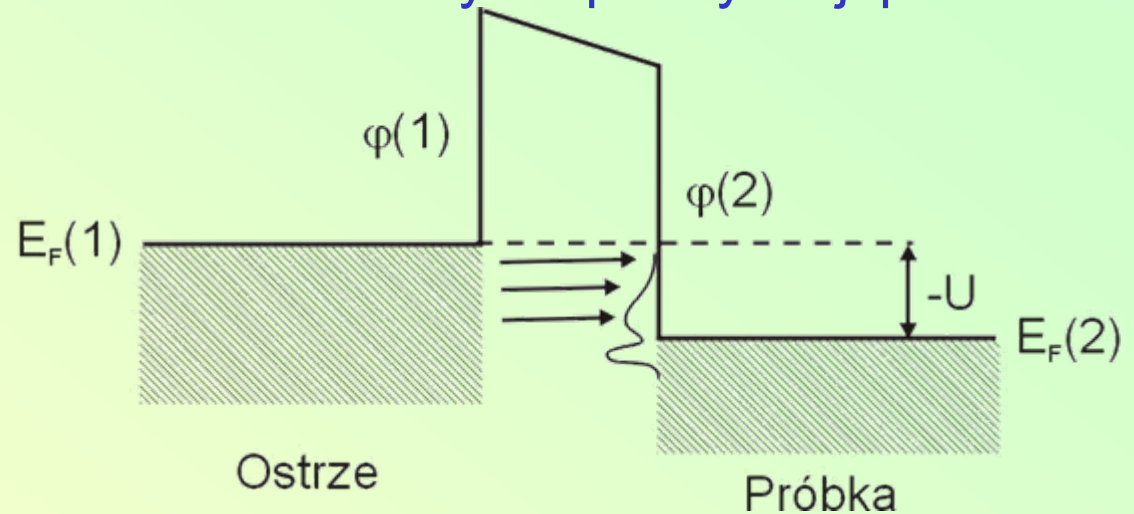
$$\chi = \sqrt{2m(\phi - E)/\hbar^2}$$

$$\phi = \frac{\phi_1 + \phi_2}{2}$$

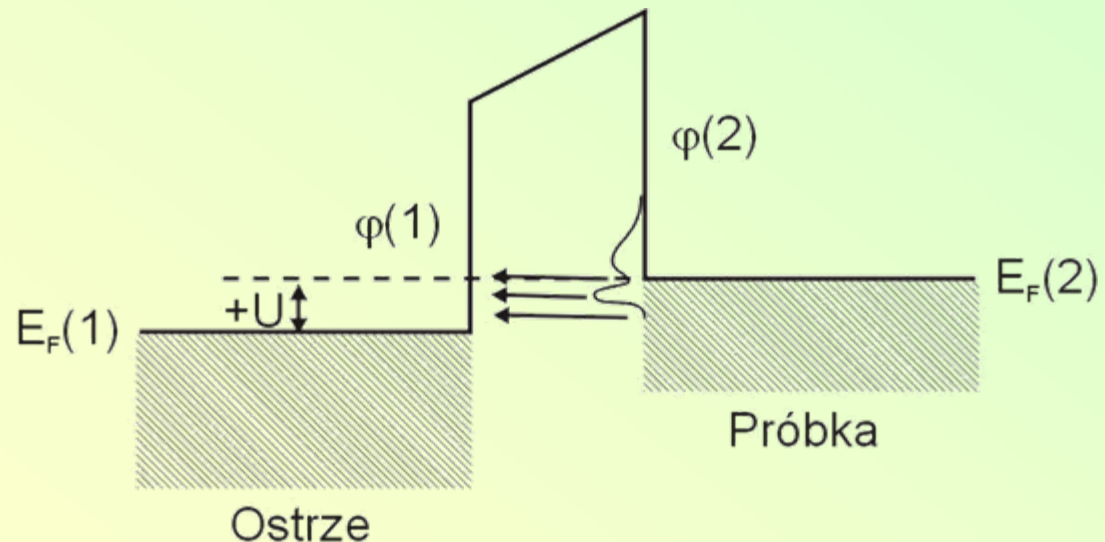
Przepływ elektronów

Kierunek przepływu elektronów zależy od polaryzacji próbki

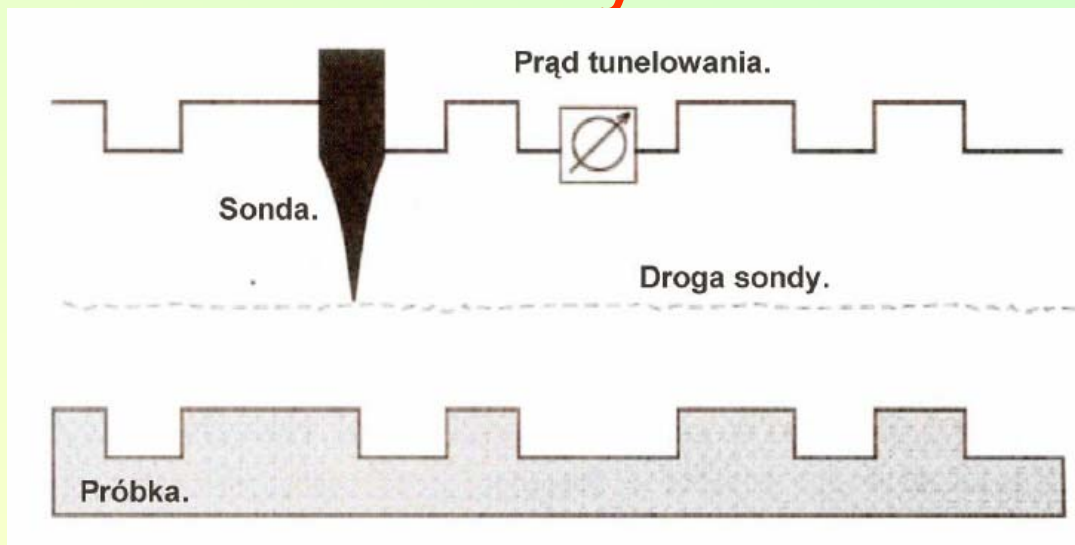
Próbka spolaryzowana
ujemnie



Próbka spolaryzowana
dodatnio



Dwa tryby działania STM

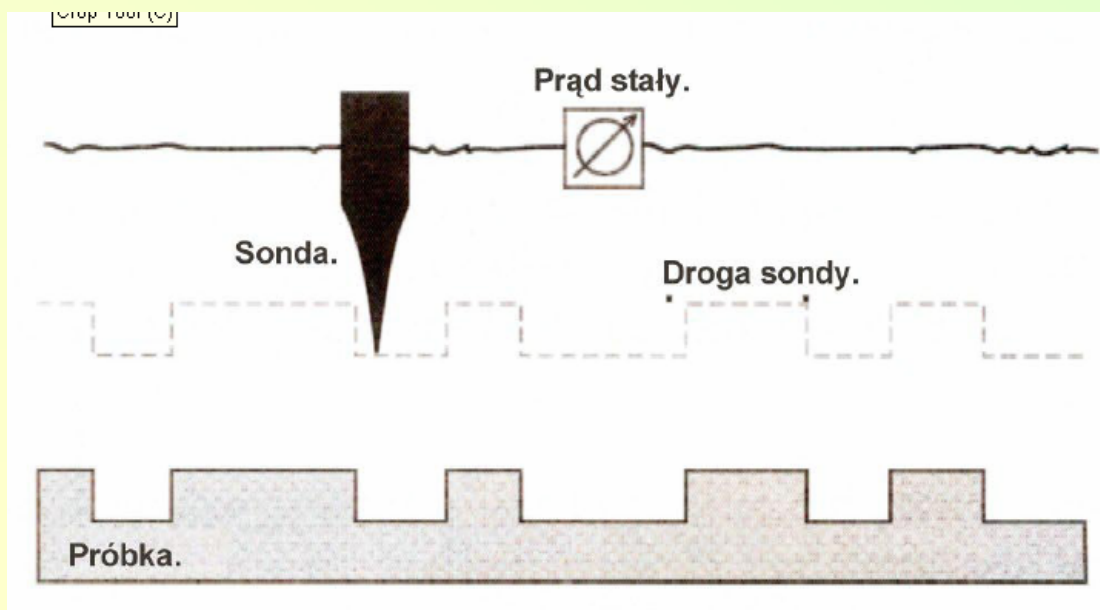


1. Stała wysokość

Płaska powierzchnia

Wysoka rozdzielczość

Duża szybkość skanowania



2. Stały prąd

Dobre odwzorowanie
topografii

Mała rozdzielczość pozioma

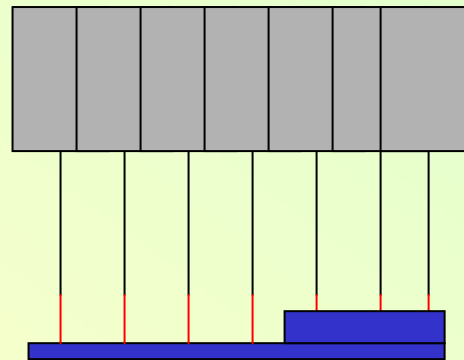
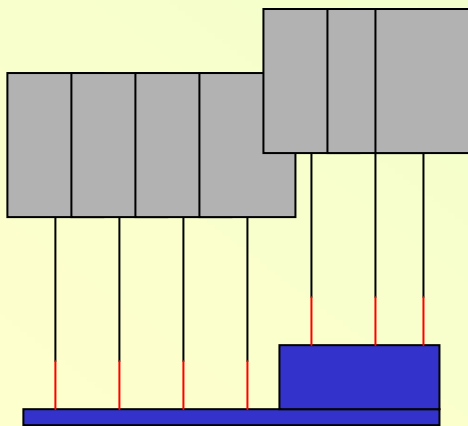
Technika STM

2. Zbliżanie igły do powierzchni próbki

3. Skanowanie

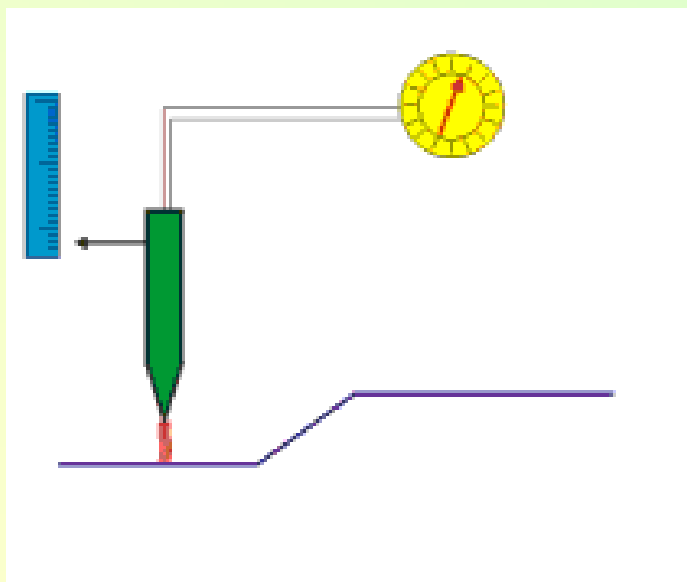
- tryb pracy ze stałym prądem

- tryb pracy ze stałą wysokością



Mody pracy

Mod stałoprądowy

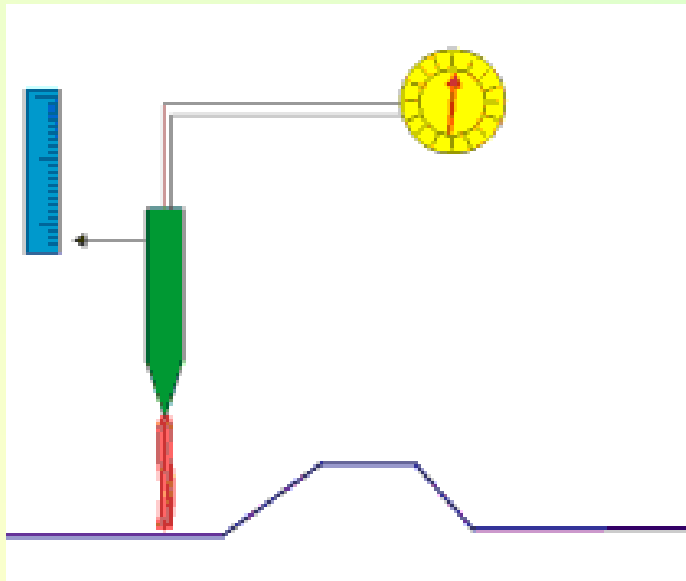


Skaner zmienia odległość pomiędzy ostrzem a próbką w taki sposób, aby prąd tunelowania był stały. Mierzone jest napięcie przyłożone do elementów piezoelektrycznych. To napięcie jest następnie przeliczane na zmianę długości tych elementów.

Ten sposób pracy jest zalecany, gdy nie znamy morfologii próbki lub, gdy powierzchnia jest silnie pofałdowana

Mody pracy

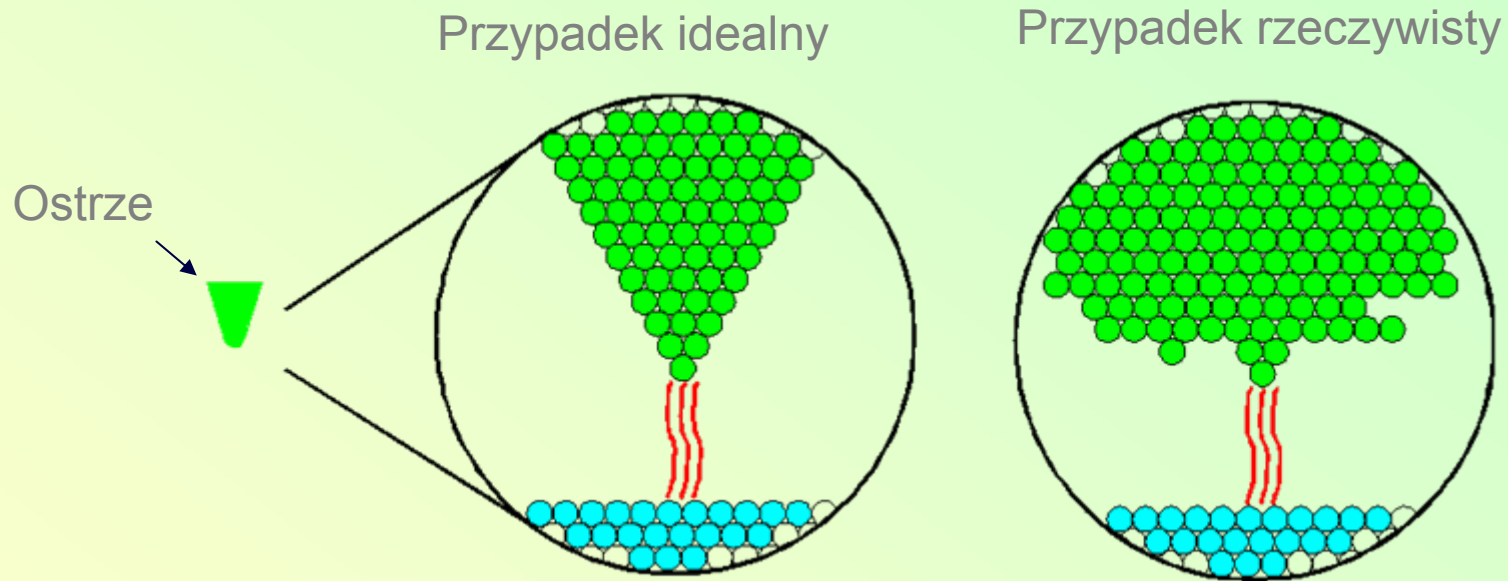
Mod stałej odległości



Odległość pomiędzy ostrzem a próbką jest stała. Mierzone są zmiany prądu tunelowego.

Ten sposób pracy jest zalecany, gdy badamy gładkie powierzchnie. Ze względu na silną zależność pomiędzy prądem tunelowania a odległością igła-próbka, przy tym sposobie pracy osiąga się dużą rozdzielczość.
Uwaga: Łatwo uszkodzić igłę.

Ostrze STM



$$j_p \propto \frac{U}{d} \exp(-A\sqrt{\phi}d)$$

j_p - prąd tunelowy (0.1-10 nA);

ϕ - uśredniona praca wyjścia elektrody i ostrza (kilka eV).

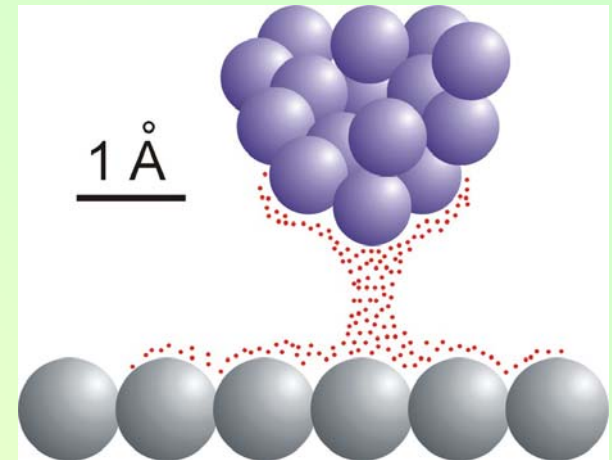
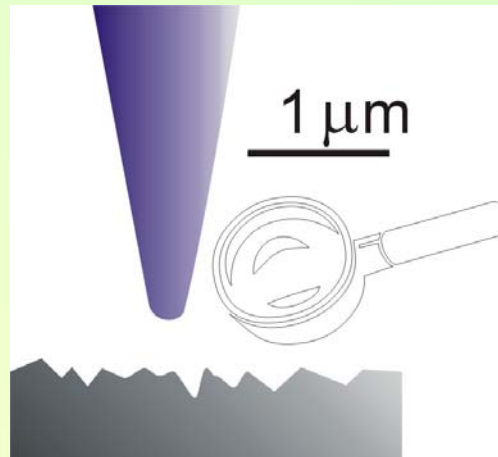
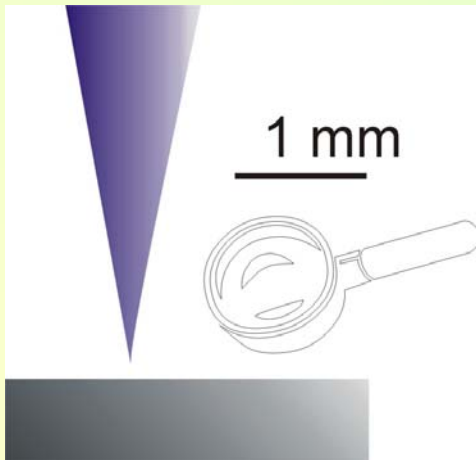
$A \sim 1.025 \text{ eV}^{-1/2} \text{ \AA}^{-1}$

U - napięcie pomiędzy podłożem i ostrzem (kilka V)

d - odległość ostrza od podłoża ($\sim \text{\AA}$)

Za względu na silną zależność prądu tunelowania od odległości, jedynie atom znajdujący się najbliżej powierzchni jest aktywny.

1. Ostrzenie igły

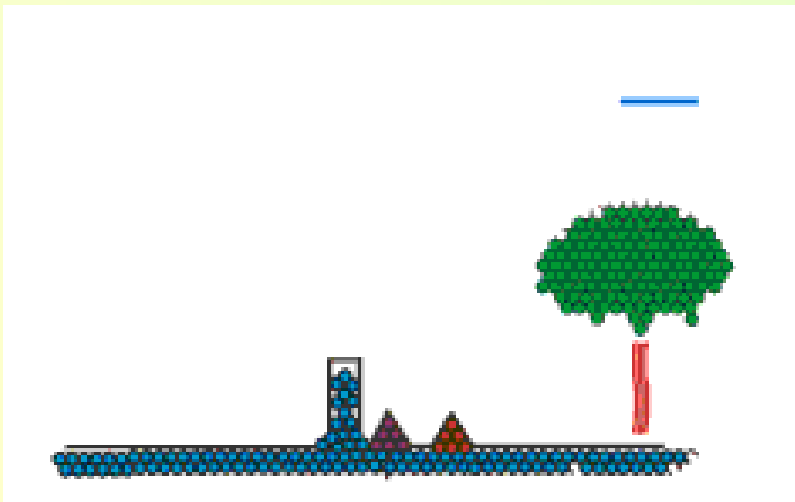
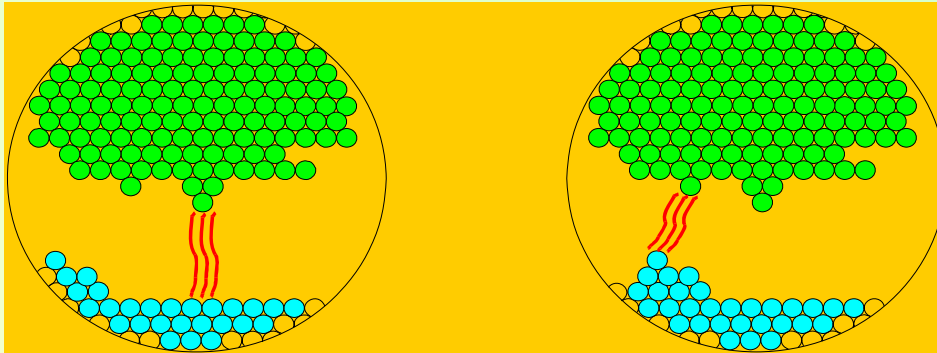


Ostrzenie igły c.d.



Zdjęcie za pomocą
techniki TEM;
Purdue University

Wady ostrza



Ponieważ ostrze ma duży promień niektóre elementy ukształtowania powierzchni nie są rejestrowane (fioletowy element)

Ponieważ ostrze ma kilka zakończeń w obrazie pojawiają się powtórzone struktury (duchy).

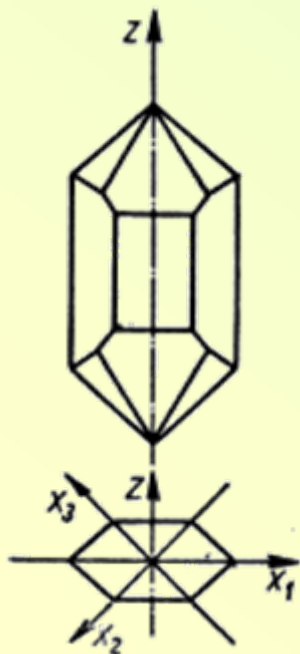
Jak przesuwac ostrze ?

Zjawisko piezoelektryczne

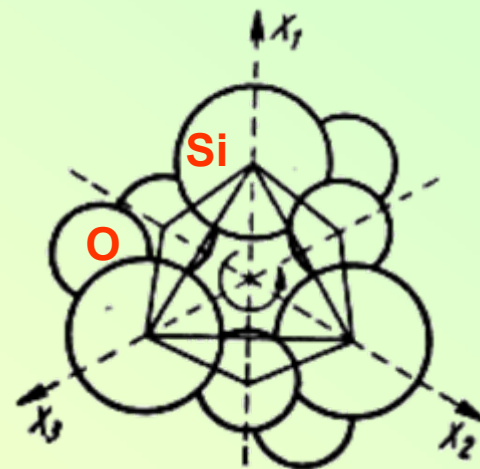
Odkrywczy: 1880 Piotr i Paweł Curie

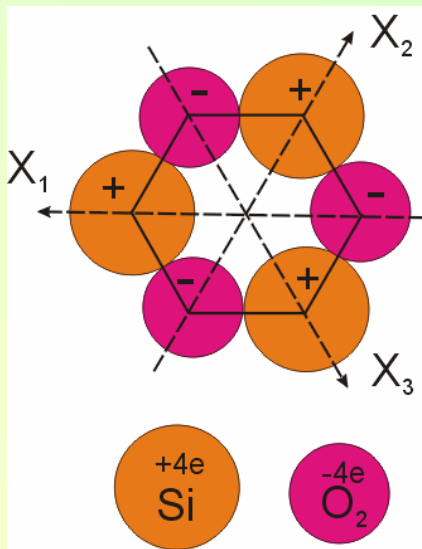
Przy ściskaniu lub rozciąganiu niektórych kryształów na ich krawędziach pojawiają ładunki elektryczne.

Materiały piezoelektryczne: kwarc, turmalin, sól Saignette'a, tytanian baru, piezoceramiki $\text{Pb}(\text{Ti},\text{Zr})\text{O}_3$ (PZT) i inne.

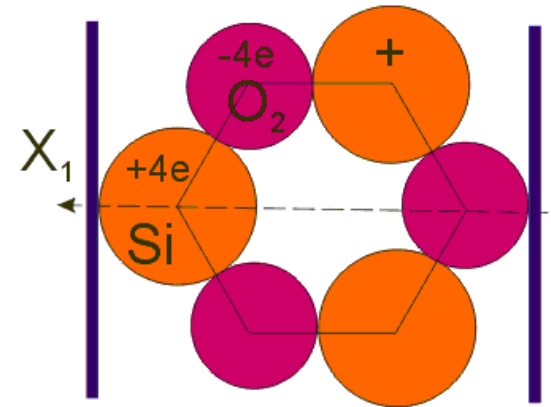
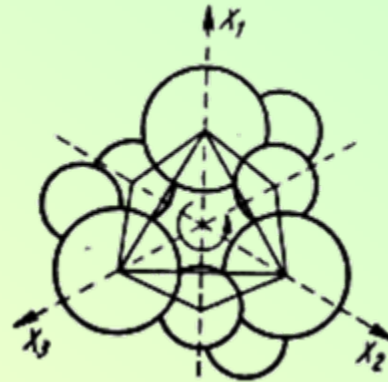


Komórka elementarna kwarcu SiO_2
(wiązanie jonowe)





Efekt piezo



Przesunięcie jonów wzdłuż X_1 powoduje , że na ściankach kryształu prostopadłych do osi X_1 wydziela się ładunek

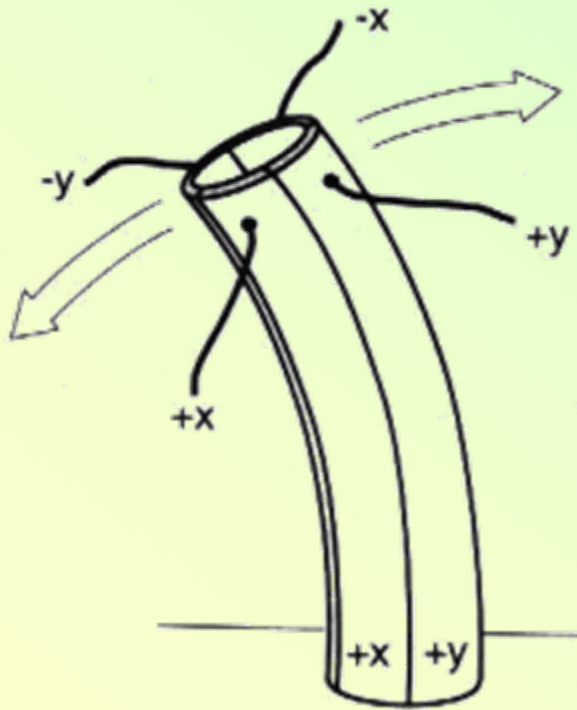
Podobne efekt pojawi się, gdy kryształ ściśniemy wzdłuż osi X_2 i X_3 .

Przyłożenie zewnętrznego pola elektrycznego wymusi ruch jonów krzemu i tlenu a tym samym zdeformuje kryształ

Przyłożenie napięcia elektrycznego U powoduje odkształcenia kryształu Δx_i

$$\Delta x_i = \alpha U$$

Skaner



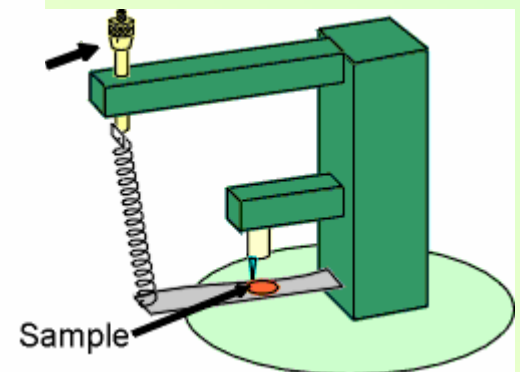
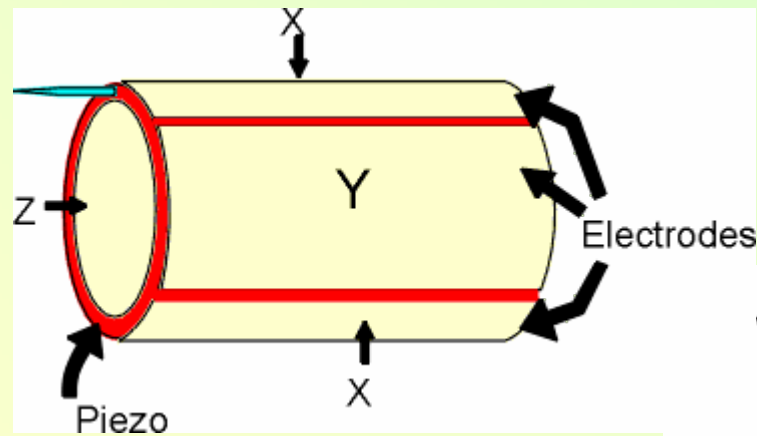
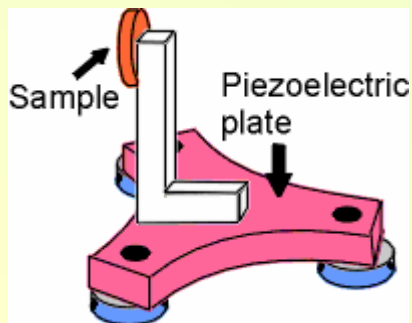
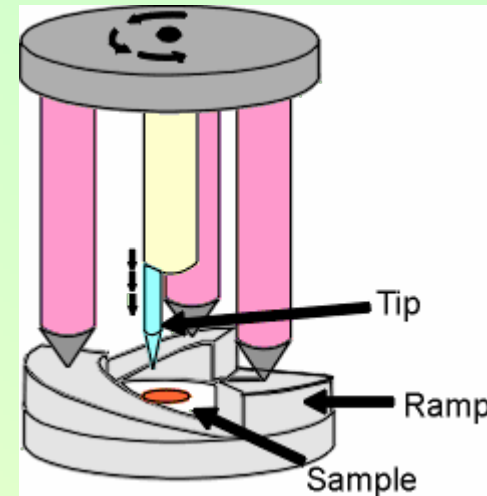
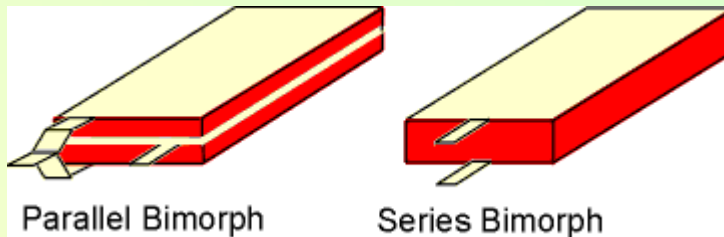
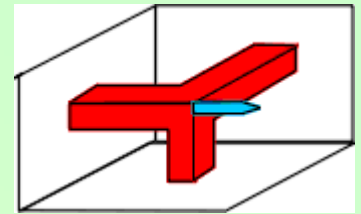
Odształcenia Δx_i są w pewnym zakresie proporcjonalne do przyłożonego napięcia U

$$\Delta x_i = \alpha_i U$$

$$|\alpha_i| = 1 - 6 \text{ \AA} / \text{V}$$

Skaner może być walcem wykonanym z piezoelektryka, podzielonym na 4 sektory. Do przeciwległych sektorów przykładamy napięcia o takich samych wartościach, lecz przeciwnych znakach. Po przyłożeniu napięcia odpowiedni sektor wydłuża się lub skraca, przechylając igłę zamocowaną na końcu skanera.

STM mechanika



Tłumienie drgań

Aby uzyskać atomową zdolność rozdzielczą odległość pomiędzy ostrzem a próbką musi być utrzymywana z dokładnością 0.01 Å.

Należy wyeliminować drgania !!!!

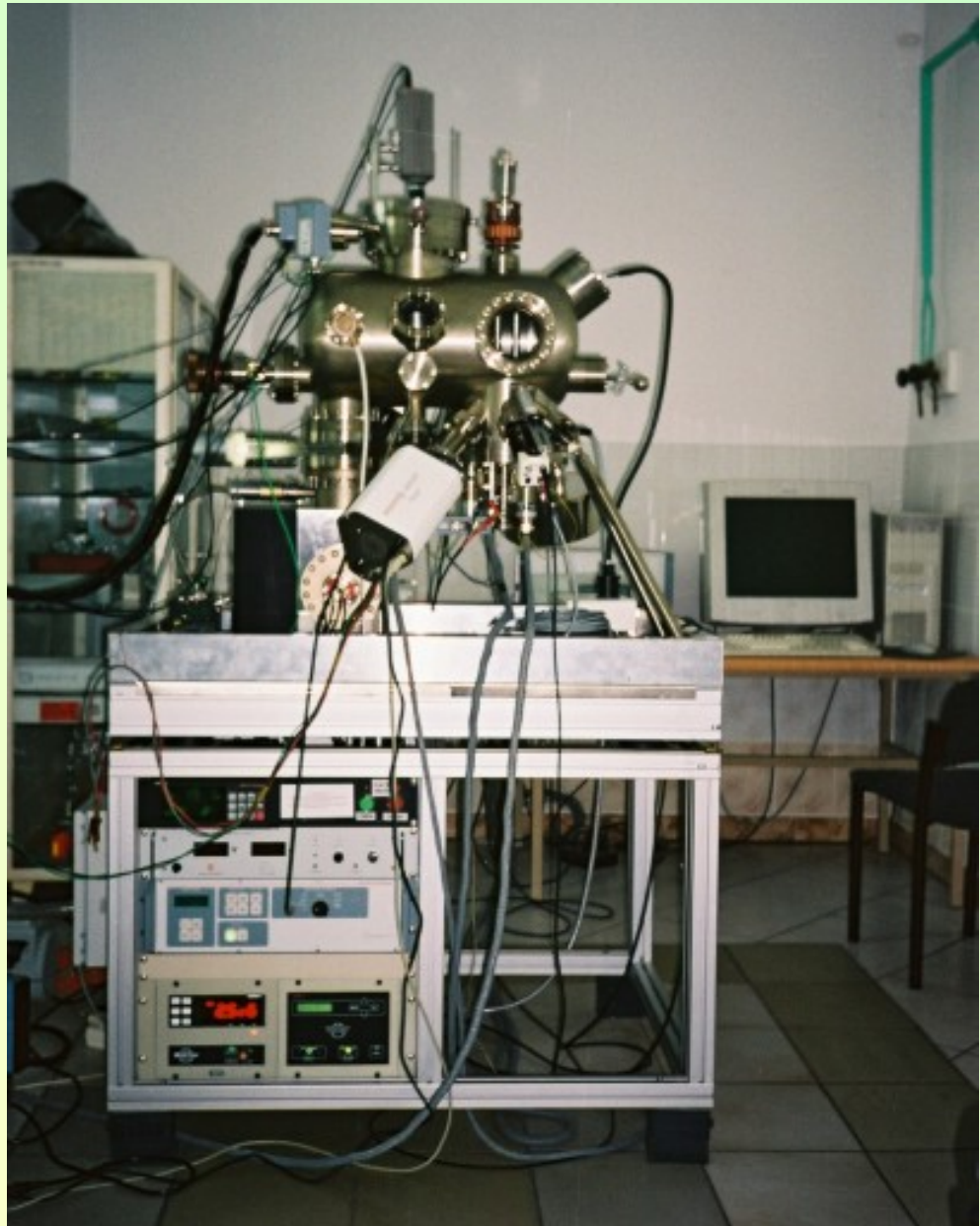
Drgania mogą być powodowane przez:

- vibracje budynku 15-20 Hz
- biegnących ludzi 2-4 Hz
- pompy próżniowe
- dźwięk.

Drgania można eliminować poprzez:

- zawieszenie mikroskopu na sprężynach (z dodatkowym tłumieniem przy pomocy prądów wirowych)
- pneumatyczne podpórki izolujące
- zwiększenie masy własnej podstawy.

STM



STM -2

10 μm skaner
piezoelektryczny

Inercyjny układ
transportu

Stacjonarny uchwyt na próbki

Uchwyt na próbkę

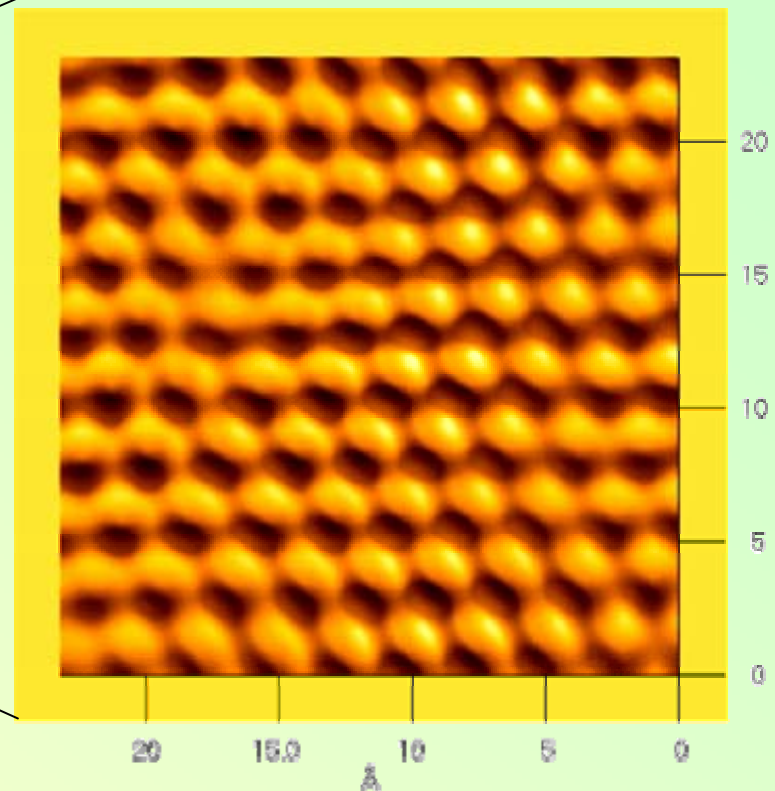
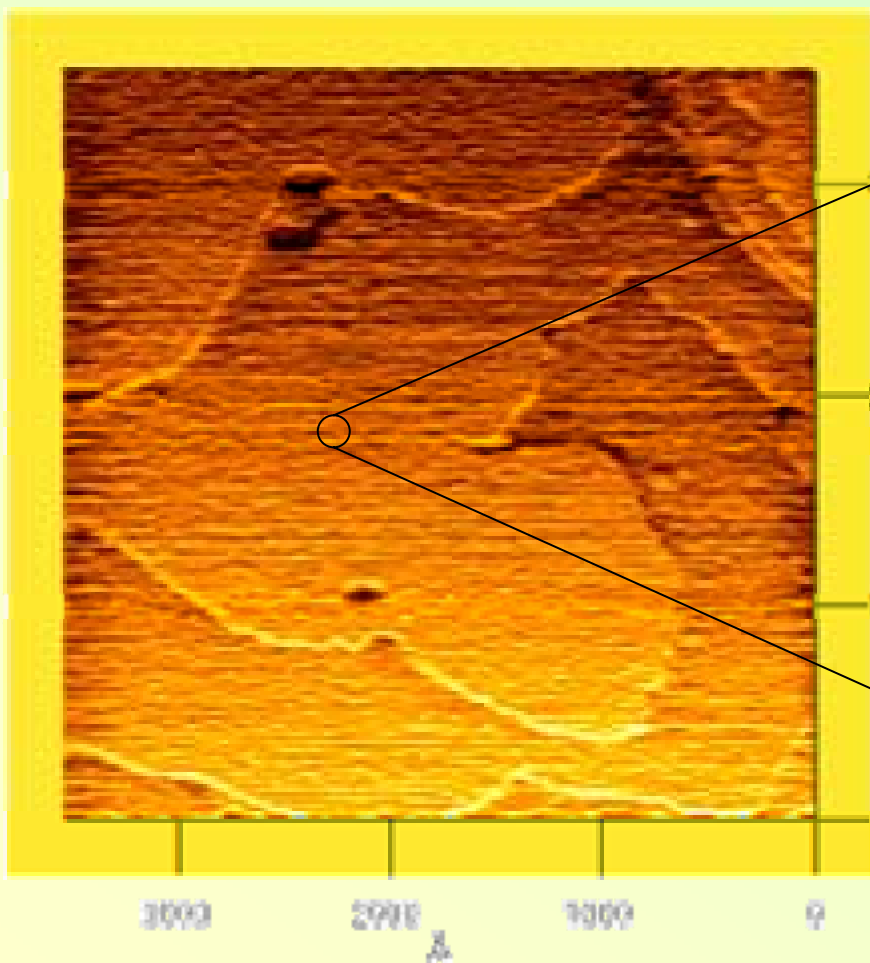
Izolacja
drgań

8 calowa flansa UHV

*Pracownia układów mezoskopowych
Zakładu Fizyki Doświadczalnej UJ*

Przykłady obrazów STM

Co możemy zobaczyć STM-em ?



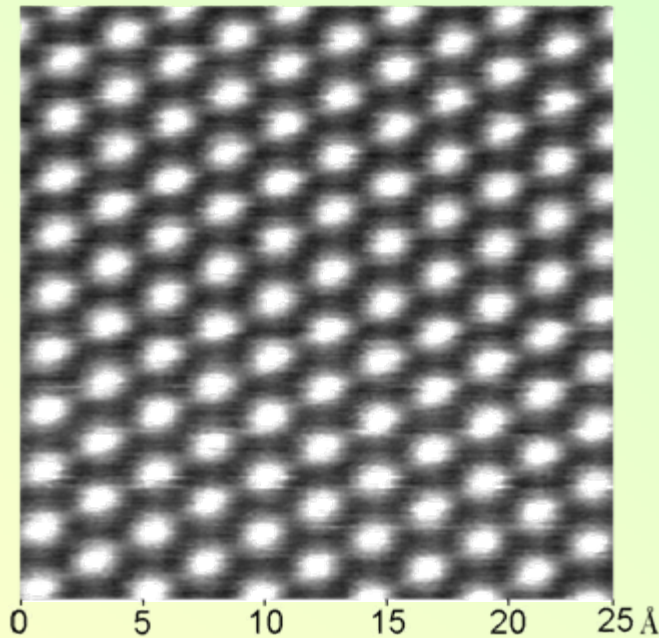
Powierzchnia cienkiej warstwy Au

P. Cyganik et al., IF UJ

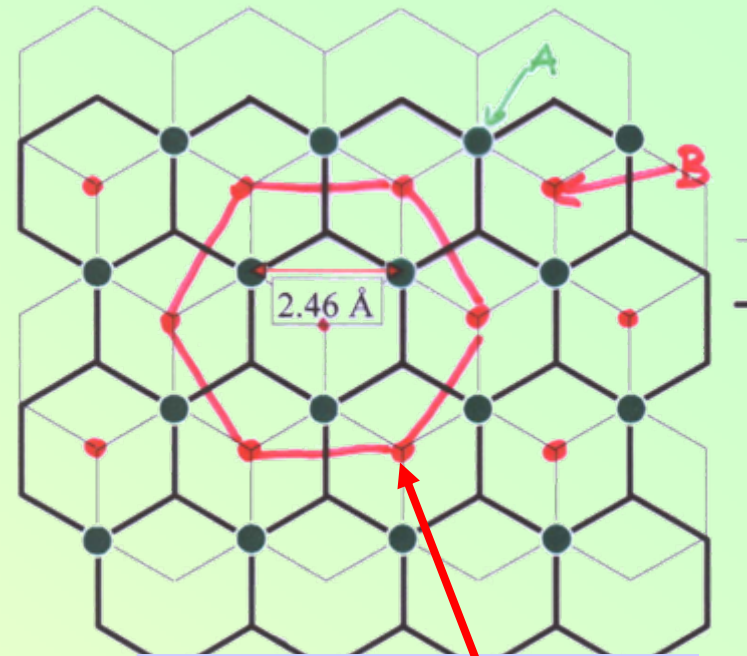
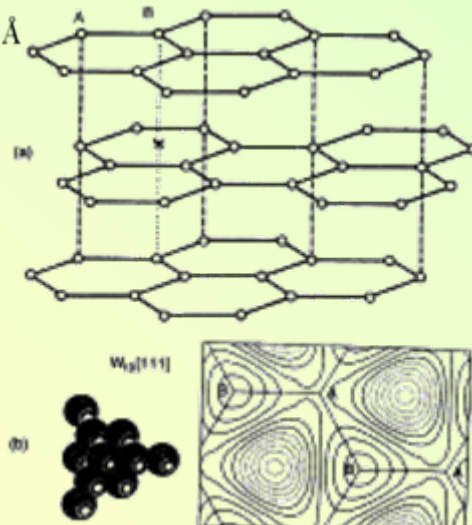
(111)Au

P. Cyganik et al., IF UJ

Czy zawsze widzimy rzeczywistość ?



Obraz STM powierzchni grafitu



To widzi mikroskop STM

Rzeczywista struktura grafitu

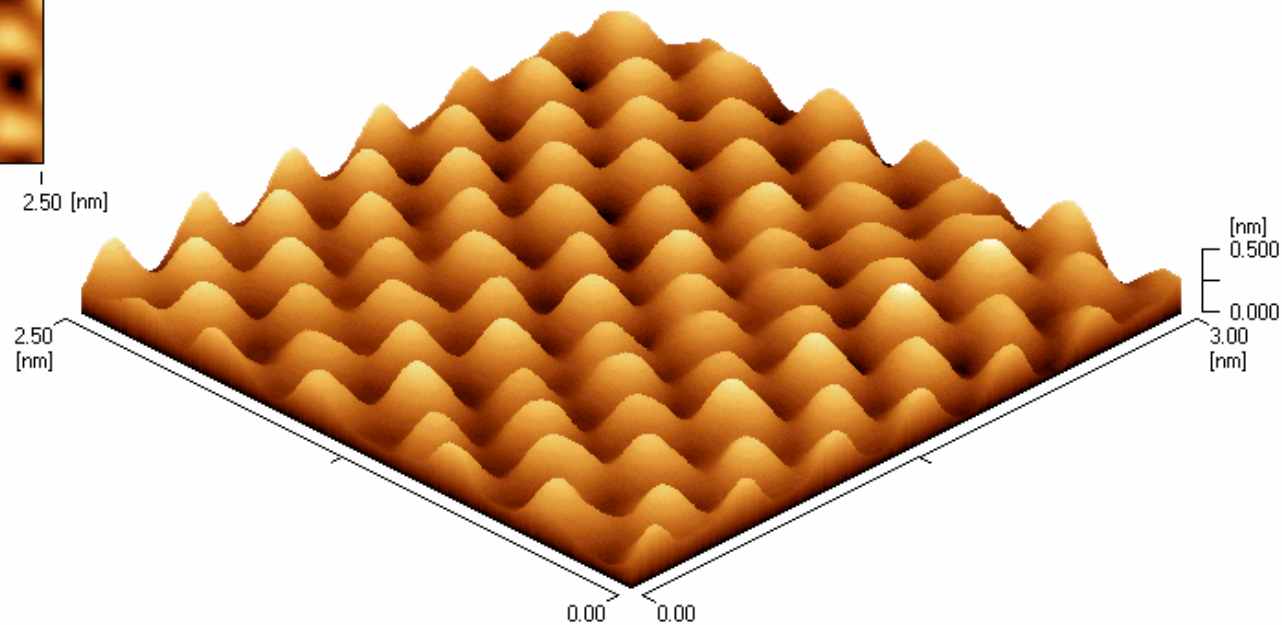
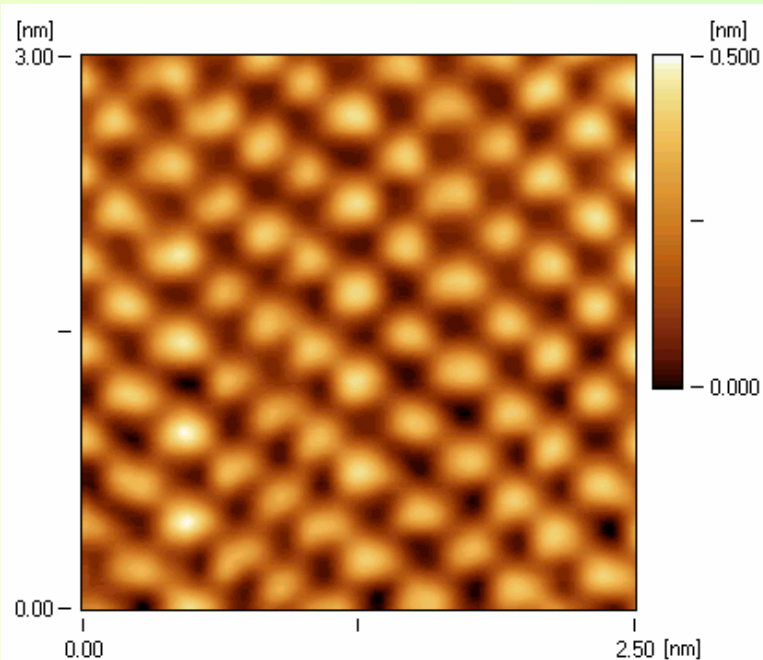
— pierwsza warstwa
— druga warstwa

Wynik obliczeń gęstości stanów

STM mierzy lokalną gęstość stanów elektronowych !!!

Galeria STM

Atomy na powierzchni
grafitu HOPG

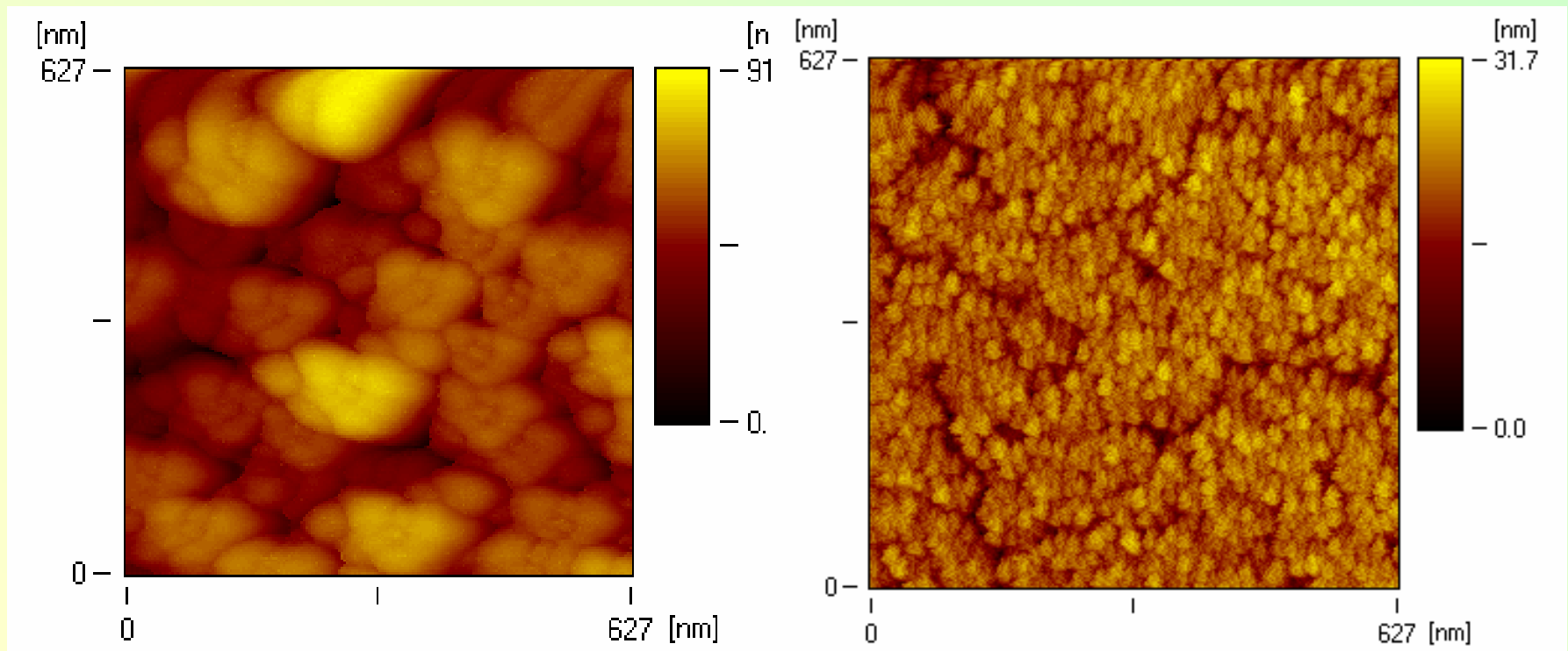


Galeria STM

Złoto napyłone na:

szkle

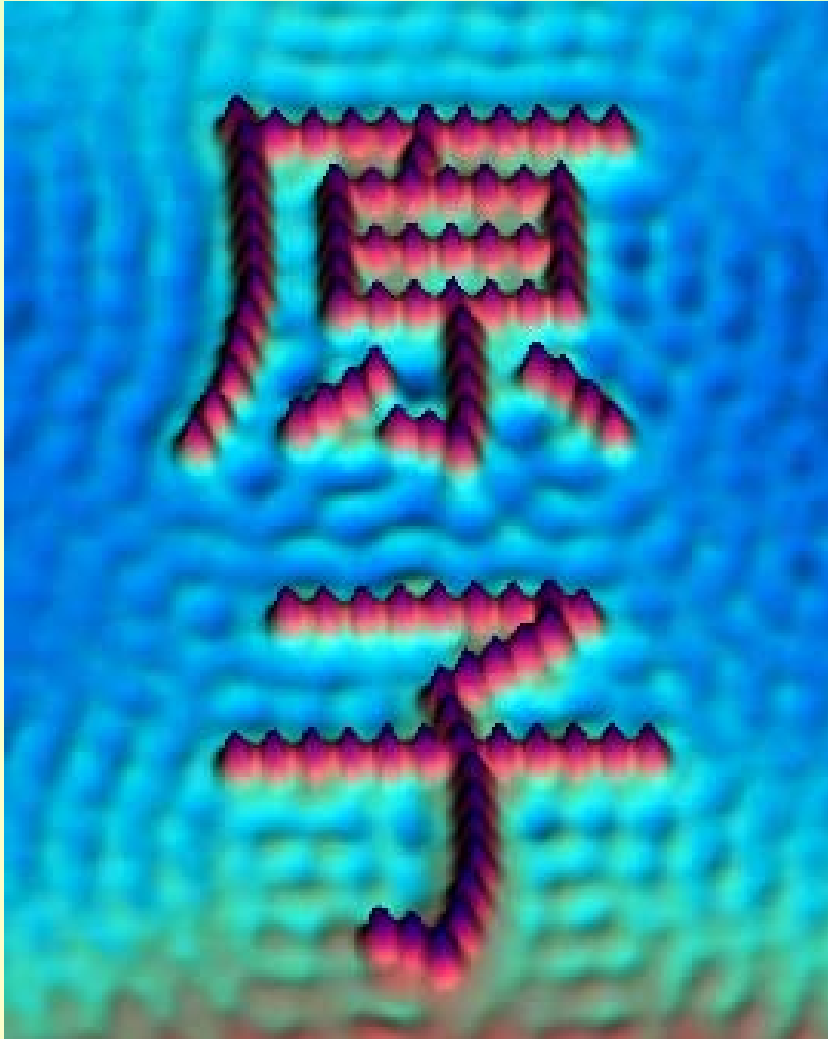
graficie



Obrazy 'atomowe'

Title: Atom

Media: Iron on Copper (111)

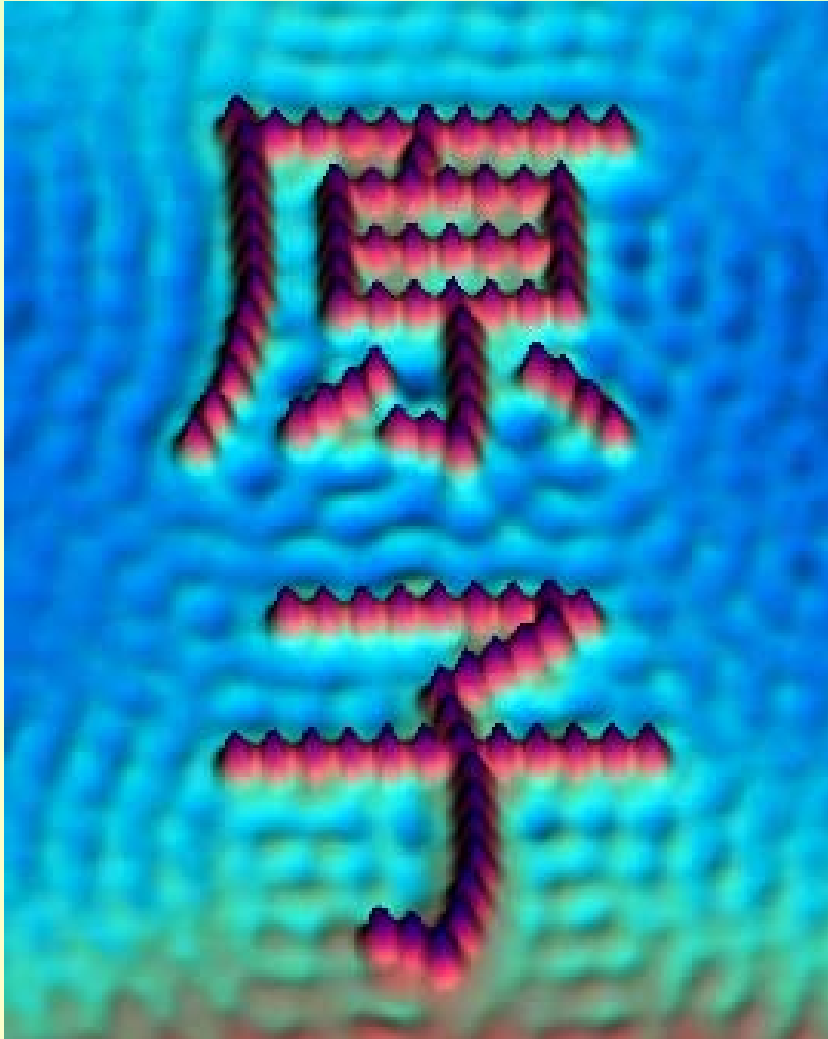


The Kanji characters for "atom."
The literal translation is
something like "original child."

<http://www.almaden.ibm.com/vis/stm/atomo.html>

Title: Atom

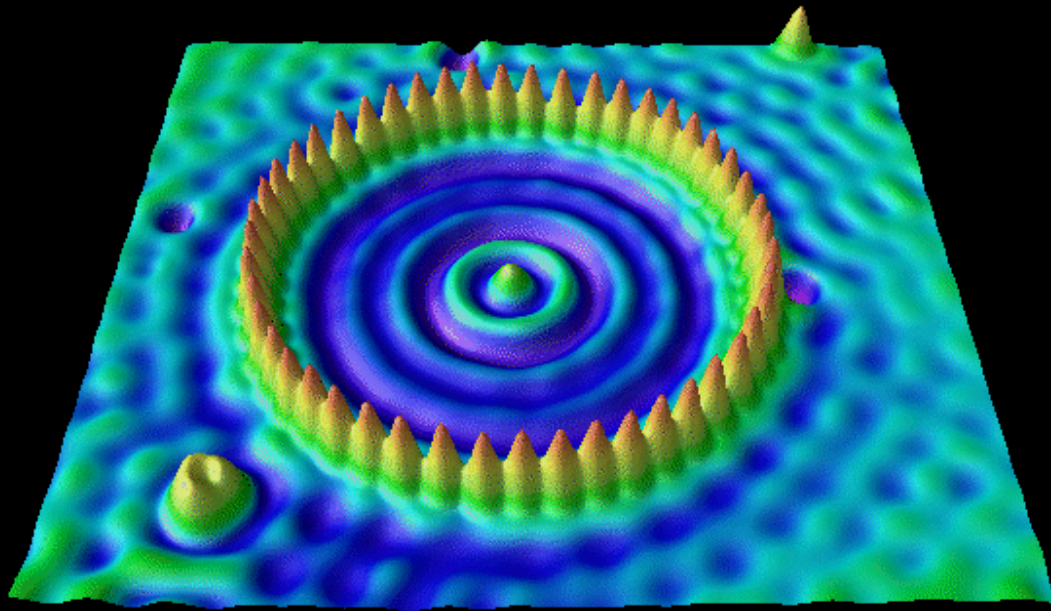
Media: Iron on Copper (111)



The Kanji characters for "atom."
The literal translation is
something like "original child."

<http://www.almaden.ibm.com/vis/stm/atomo.html>

Quantum Corrals

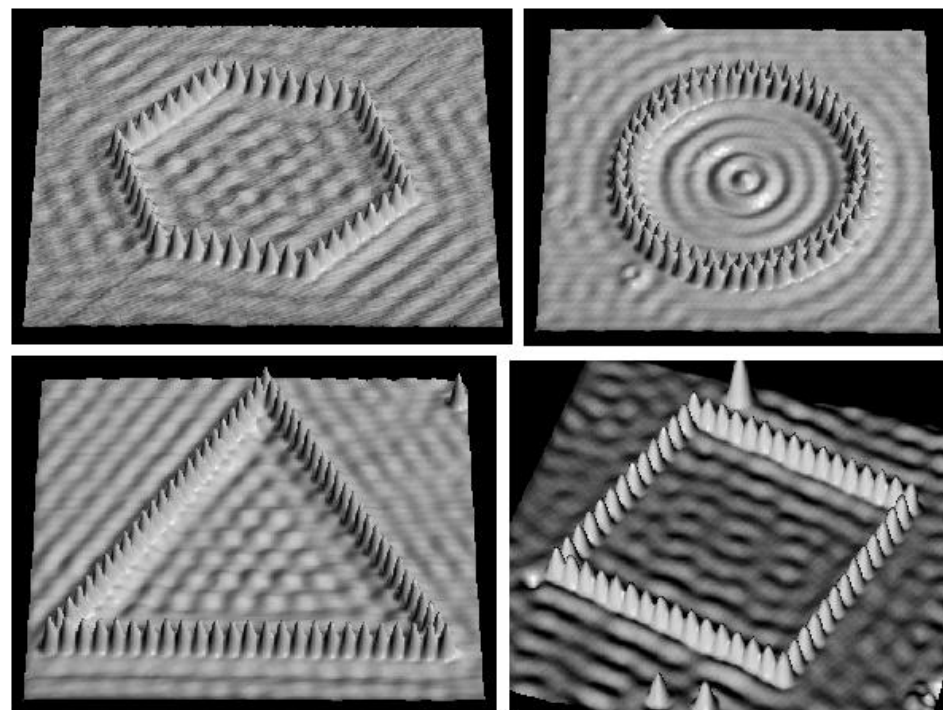
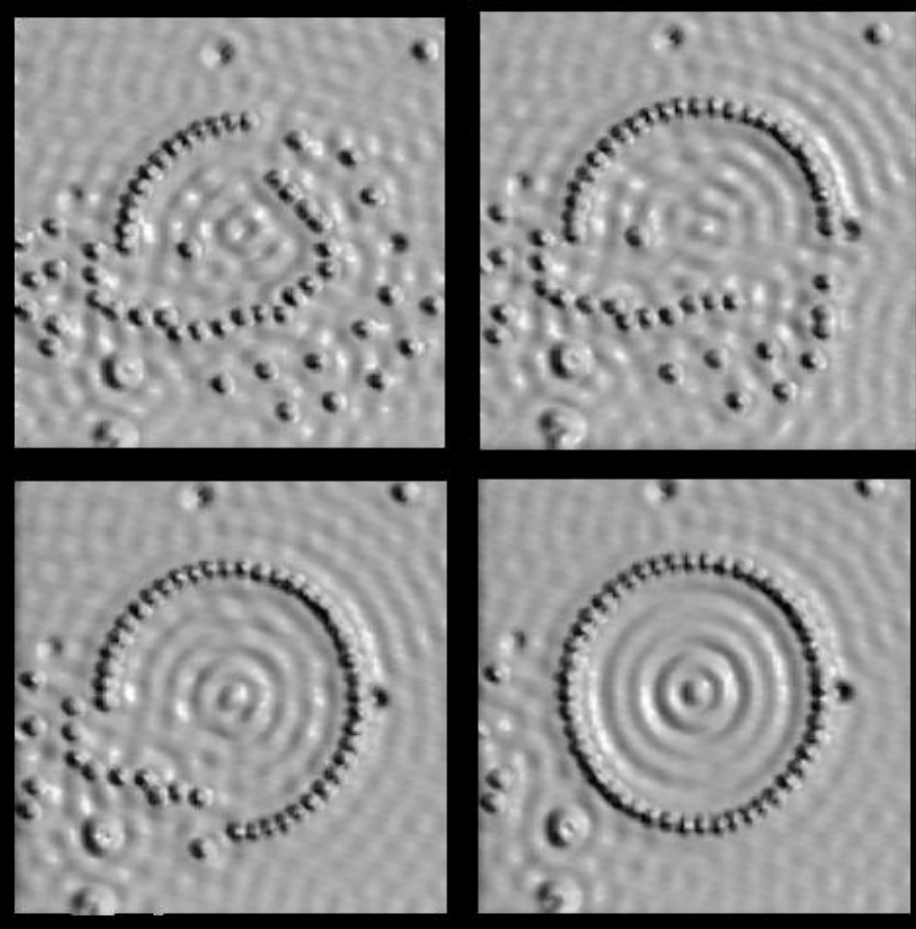


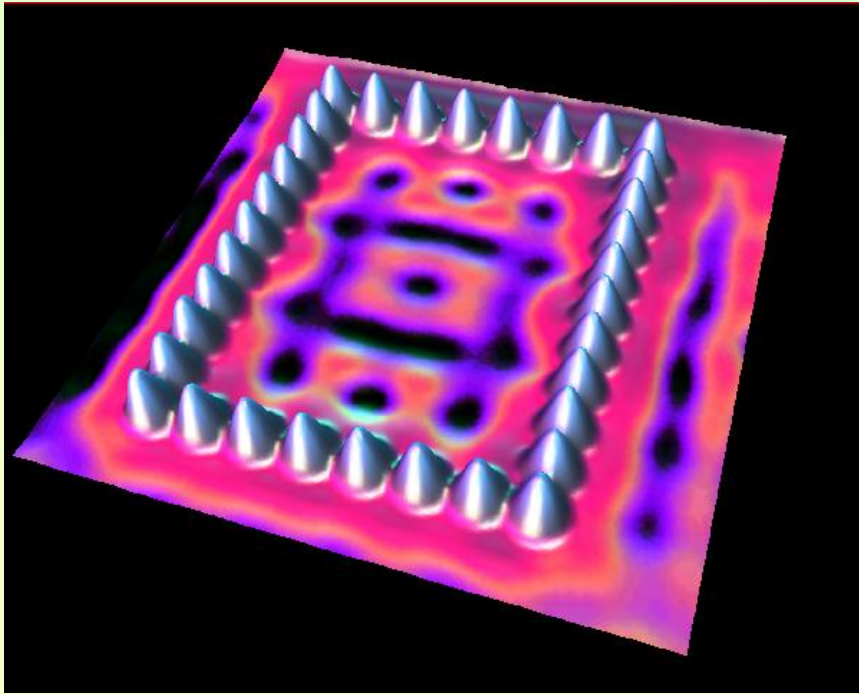
Surface state electrons on Cu(111) were confined to closed structures (corrals) defined by barriers built from Fe adatoms. The barriers were assembled by individually positioning Fe adatoms using the tip of a low temperature scanning tunneling microscope (STM). A circular corral of radius 71.3 Angstrom was constructed in this way out of 48 Fe adatoms.

This STM image shows the direct observation of standing-wave patterns in the local density of states of the Cu(111) surface. These spatial oscillations are quantum-mechanical interference patterns caused by scattering of the two-dimensional electron gas off the Fe adatoms and point defects.

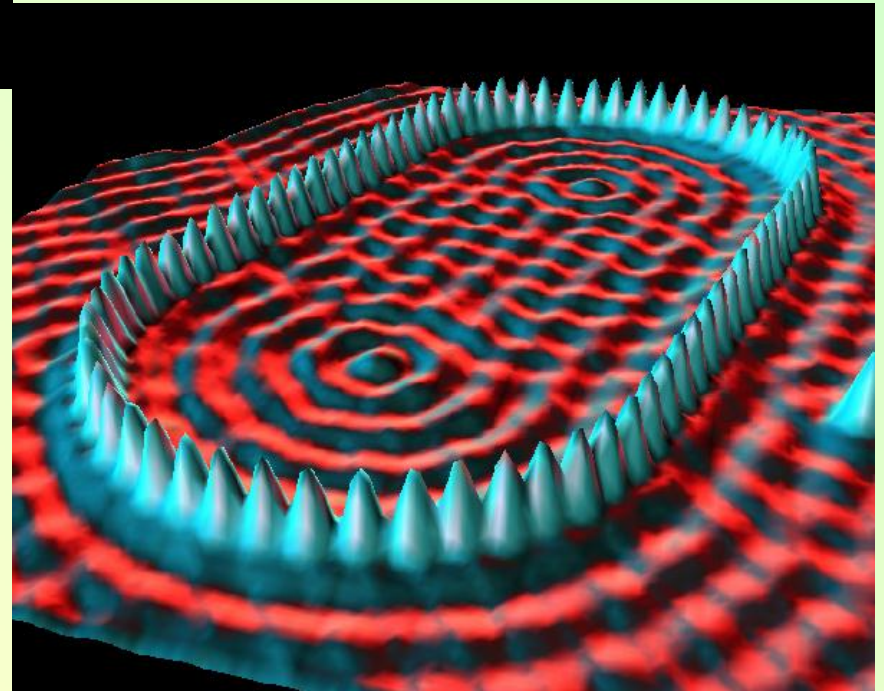
<http://www.almaden.ibm.com/vis/stm/stm.html>

Iron on Copper (111)





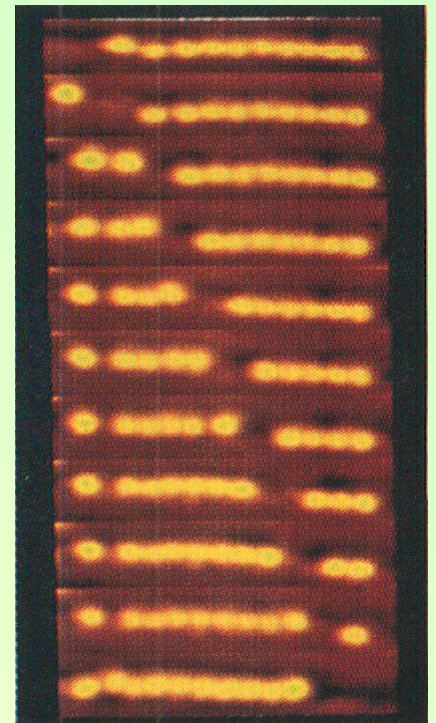
Iron on Copper (111)



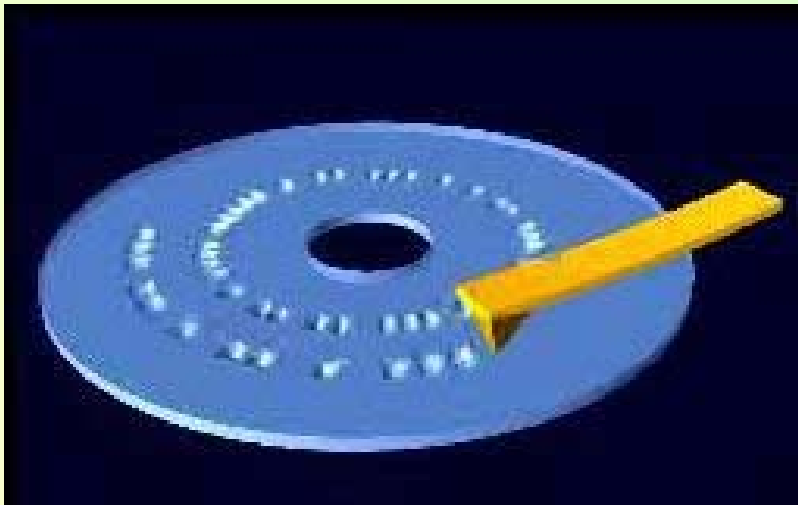
Liczydło atomowe

- Liczydło zrobiono z molekuł C-60 ustawionych wzdłuż uskoków na powierzchni miedzi

*M.T. Cuberes, R.R. Schlittler, J.K. Gimzewski
Appl. Phys. Lett. **69** (1996) 3016.*

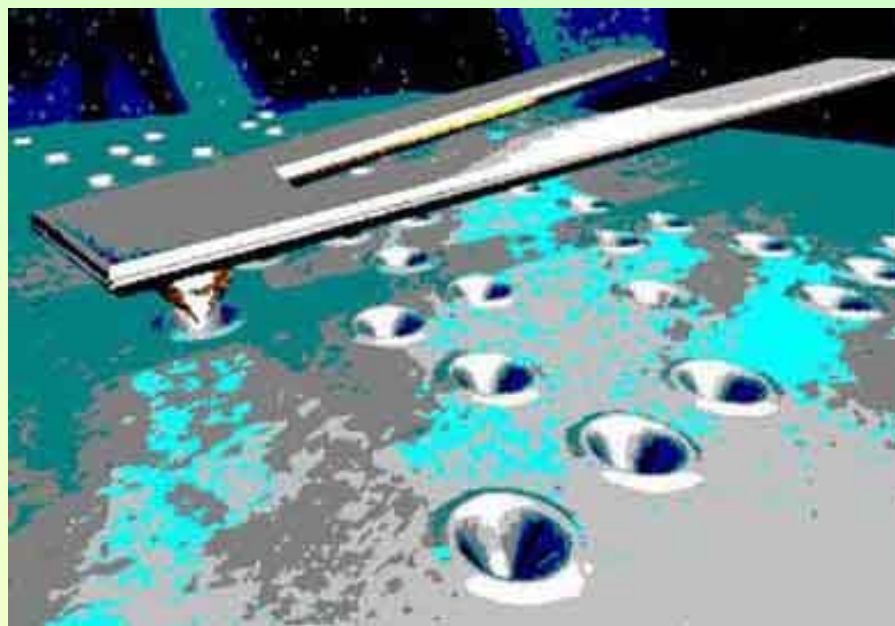
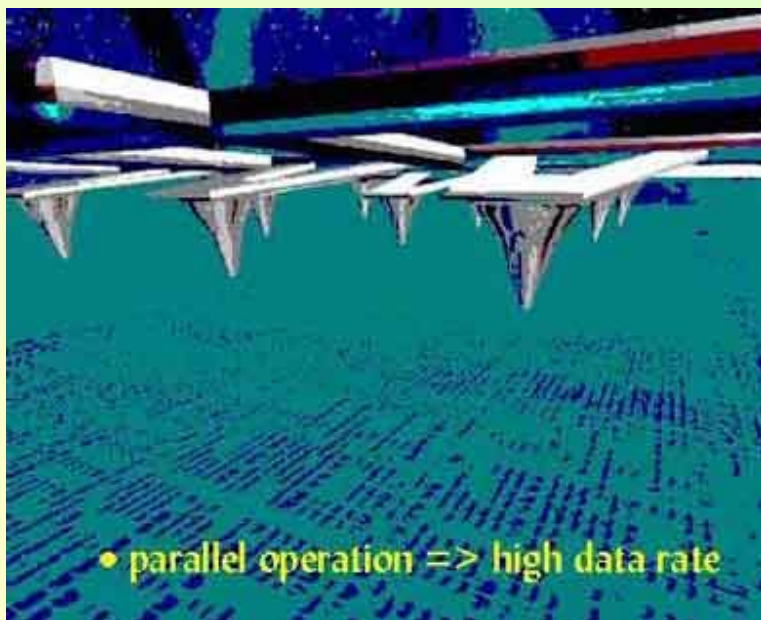


Zapis informacji



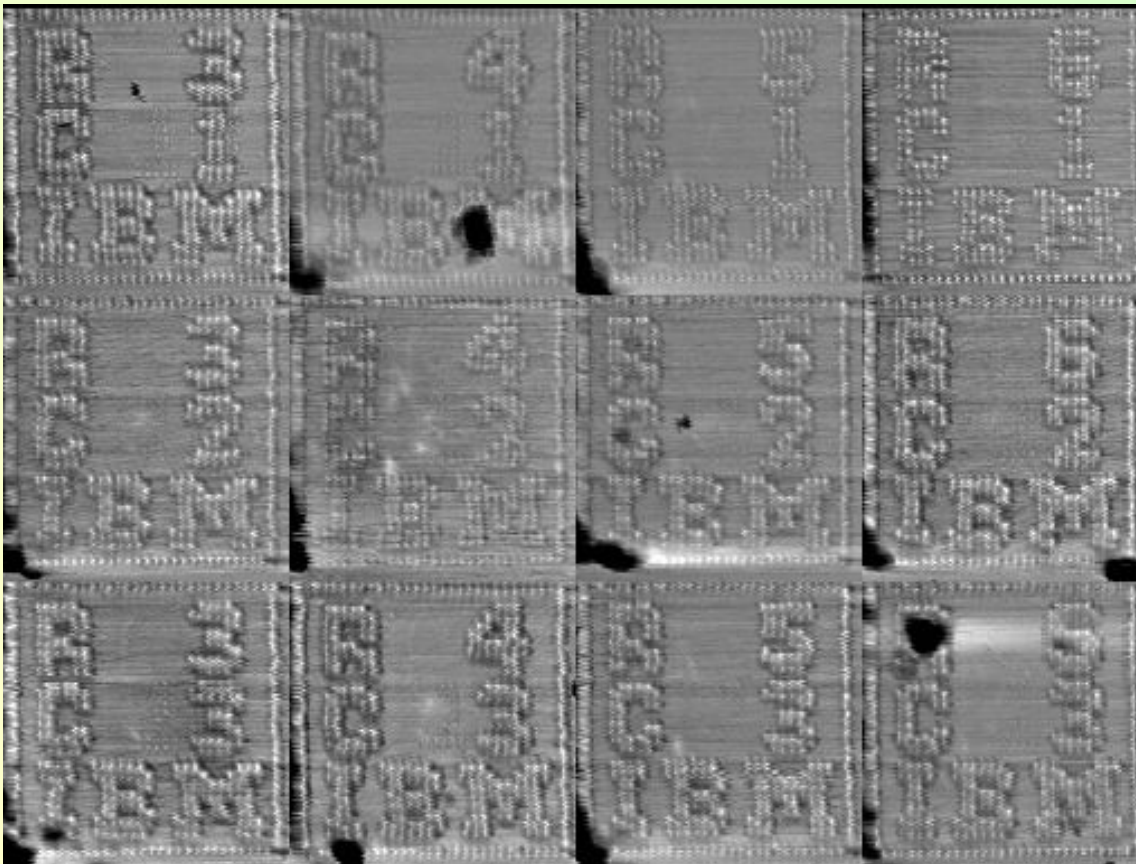
Ostra i twarda igła zostawia rysy a potem może to sama zobrazować - działa zatem jednocześnie jak głowica pisząca i czytająca.

A może by tak wziąć wiele igieł ?



Tak postąpili naukowcy z IBM w Zurichu oraz Uniwersytetu w Bazylei i skonstruowali układ wielu igieł nazywając go 'Milipede'

Nanometryczna maszyna drukarska



Przy pomocy „Milipede”
uzyskali gęstość zapisu 500
Gbit/cm².

Dyskietka 1.4 cala pomieści

20 Tbit
(200 dysków 100GB)

Zalety STM:

- rozdzielczość na poziomie atomowym (szczególnie dobra w osi pionowej)
- możliwość pracy w różnym środowisku (powietrze, próżnia, niskie, wysokie temperatury, itp...)
- oddziaływanie z pojedynczymi atomami a nie uśrednione z dużym obszarem powierzchni
- możliwe obserwacje w czasie rzeczywistym – wzrost, itp....
- spektroskopia
- możliwość modyfikacji powierzchni

Wady STM:

- możliwość badania tylko powierzchni przewodzących
- znaczna czułość na drgania
- trudny proces ostrzenia igły
- ograniczony technicznie maksymalny obszar obserwacji

