

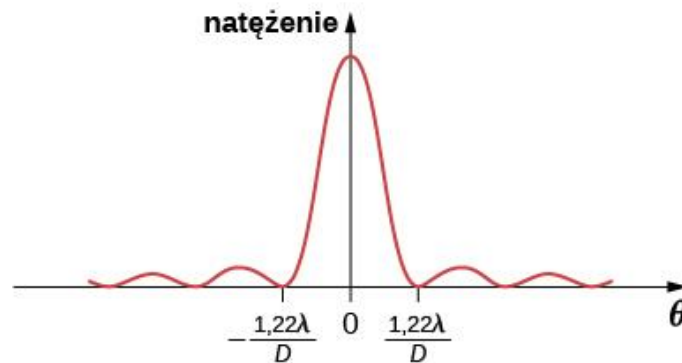
Wykład IV

Zastosowania techniki AFM do badania struktur półprzewodnikowych.

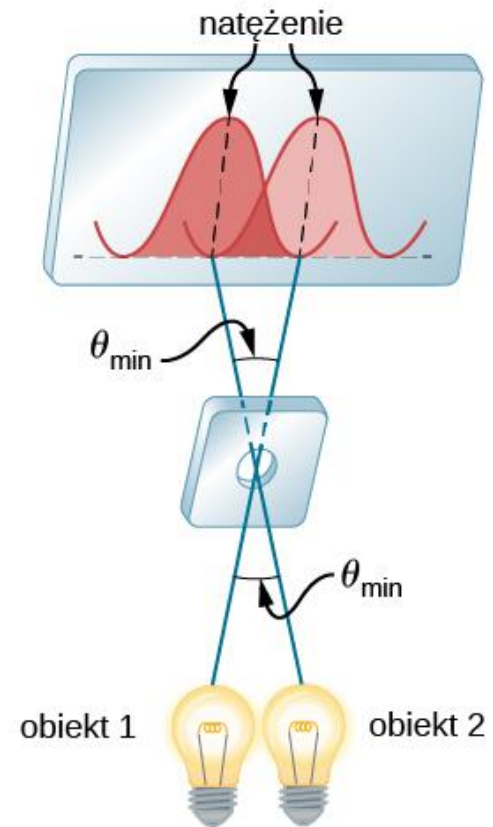
Sztuczne słońce

Dyfrakcja i rozdzielczość

Dyfrakcyjna granica rozdzielczości stanowi, że dwa punkty są rozróżnialne, gdy środek obrazu dyfrakcyjnego jednego z nich znajduje się w miejscu pierwszego minimum obrazu dyfrakcyjnego drugiego. Pierwsze minimum jest pod kątem $\theta = 1,22\lambda/D$, więc dwa obiekty punktowe będą rozróżnialne jeśli są rozdzielone kątem $\theta = 1,22\lambda/D$.

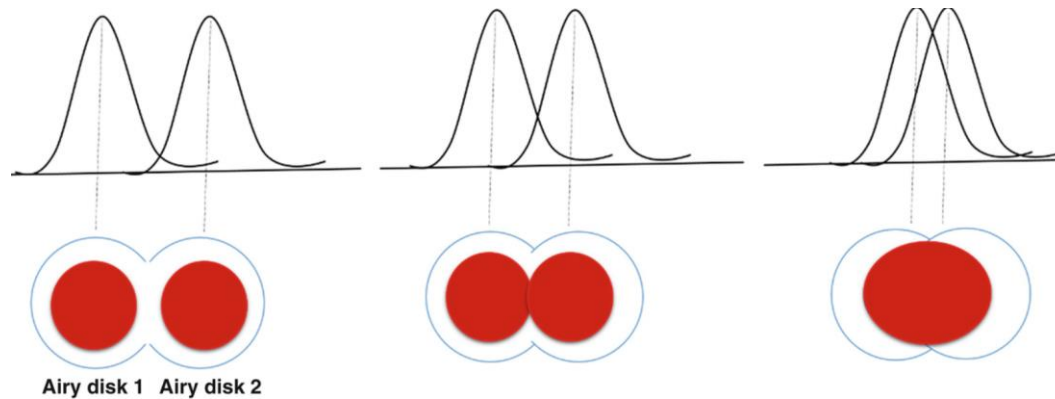


(a)



(b)

Dyfrakcja i powiększenie mikroskopu



Długość fali de Broglie'a w SEM

$$\lambda = \frac{h}{(2m_e \cdot e \cdot V)^{1/2}},$$

gdzie:

h – stała Plancka [eV·s],

m_e – masa spoczynkowa elektronu [kg],

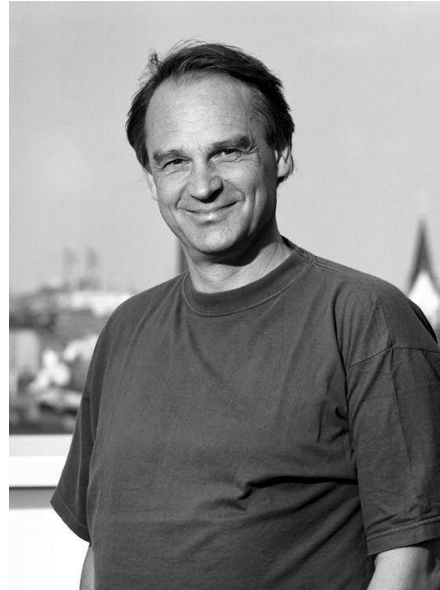
e – ładunek elektryczny elementarny [C],

V – napięcie pola elektrycznego [V].

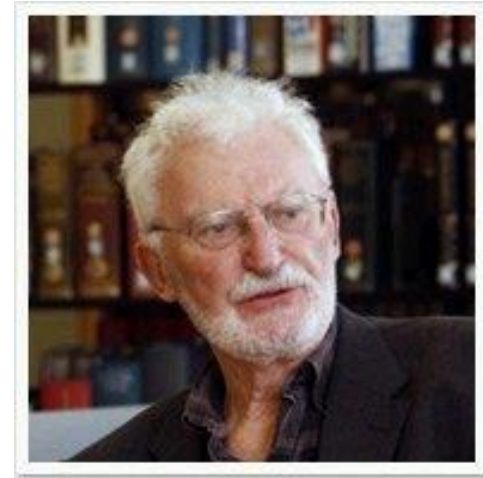
Dla $U = 300$ kV, długość fali elektronów $\lambda = 0,00197$ nm

Historia

- **1982 – STM IBM Zurych**
 - **1986 – Nagroda Nobla za STM**
 - **1985 – idea AFM'u**
 - **1986 – AFM**
- G. Binning, C.F Quate i Ch. Gerber**



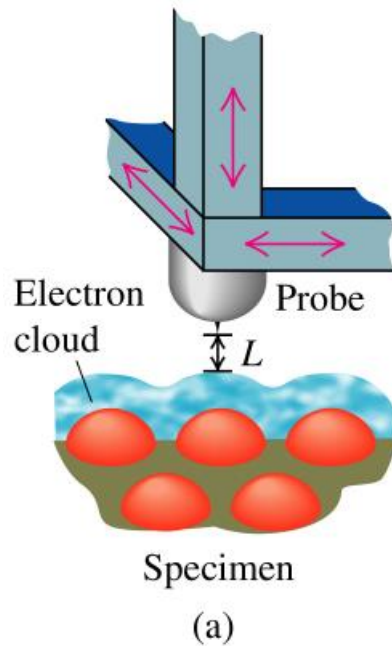
Gerd Binning



Heinrich Rohrer

STM Scanning Tunneling Microscope

Skaningowy mikroskop tunelowy (STM)



$$I \approx e^{-2\alpha L}$$

gdzie $\alpha = \sqrt{\frac{2m}{\hbar}(U_0 - E)}$

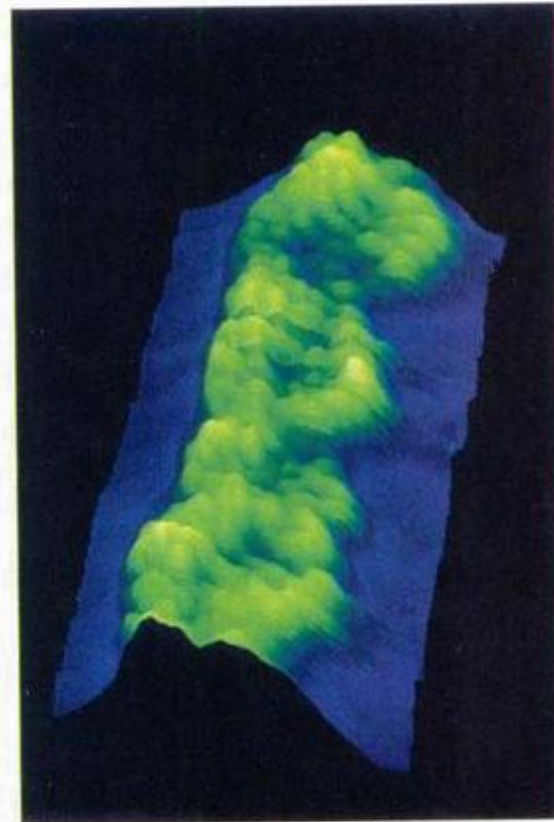
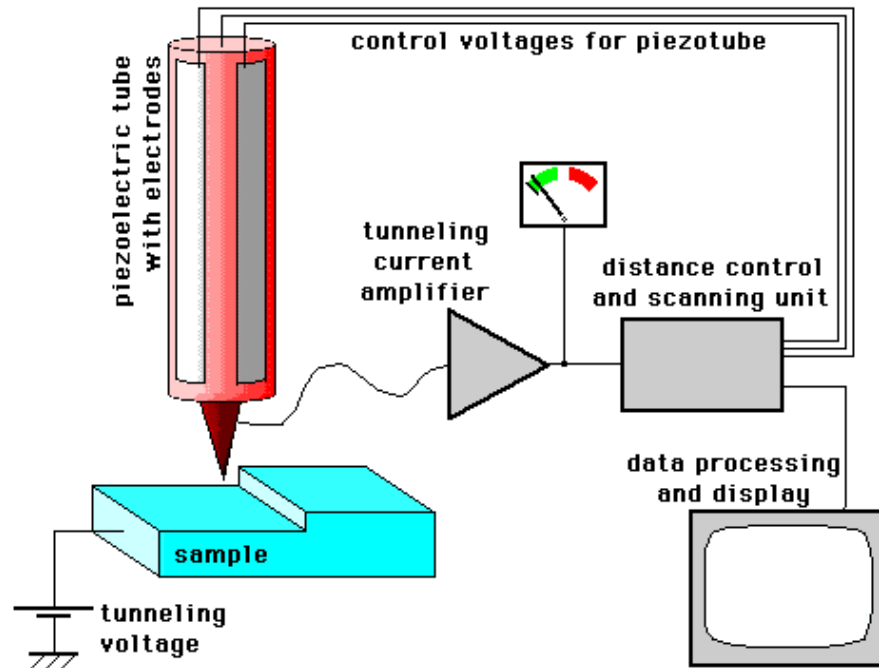


FIGURE 39-18 Image of cellular DNA, magnified about 2 million times, taken with a scanning tunneling microscope. Three turns of the DNA double helix can be seen in this false-color image.

STM

$$I \approx e^{-2\alpha L}$$

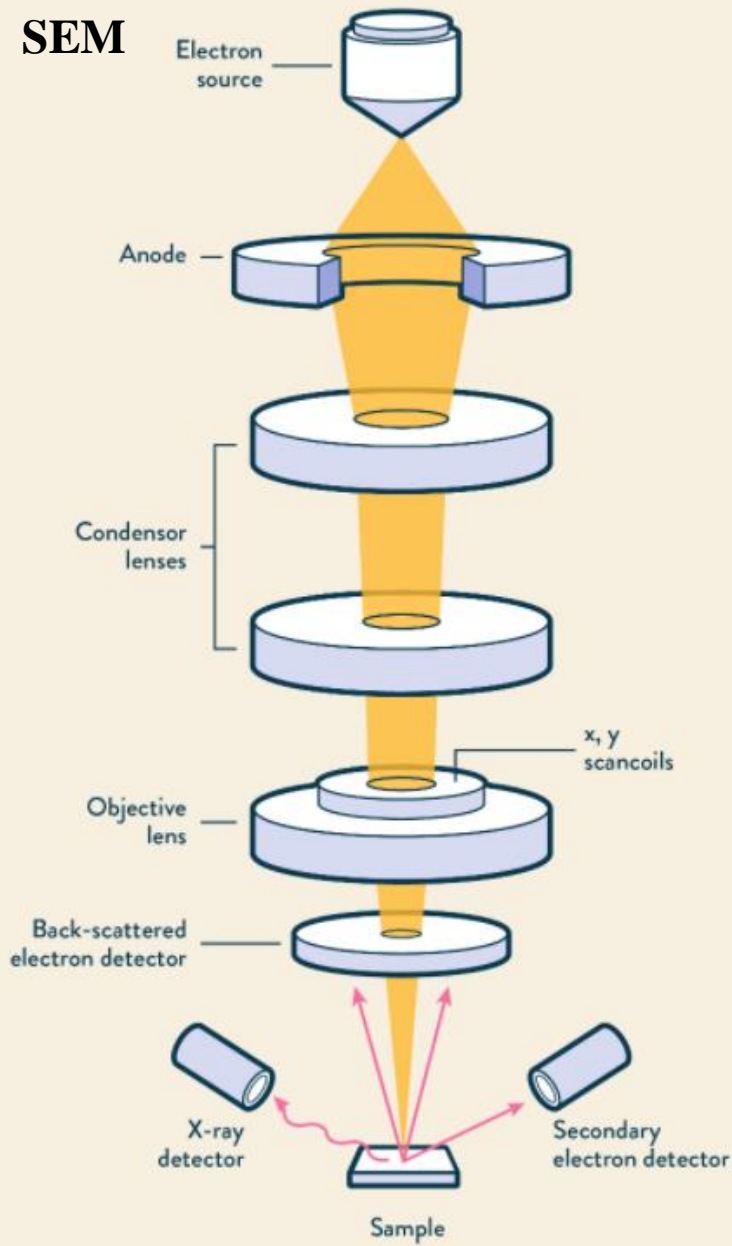


How an STM works ...

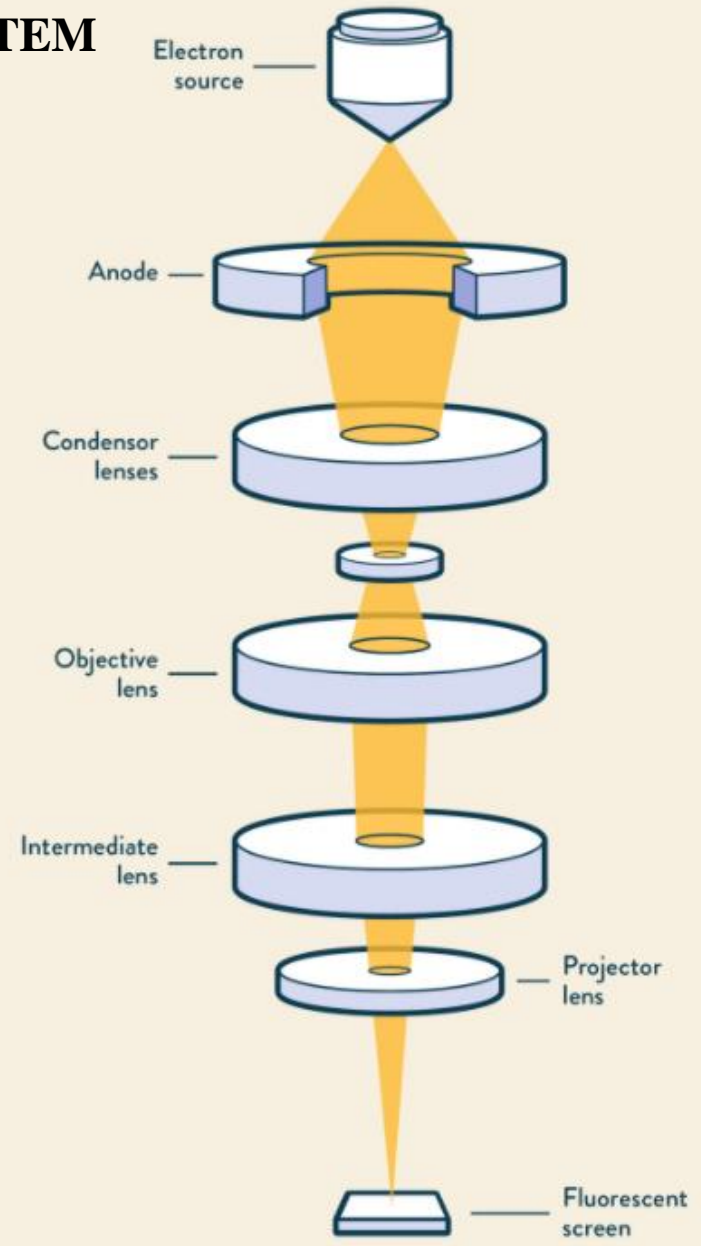
© Michael Schmid
Institut f. Allgemeine Physik
TU Wien 1997-2002

Elektrony tunelują z ostrza do próbki i vice-versa. Prąd tunelowy zależy od odległości między ostrzem, które jest przymocowana do piezoelektrycznej tuby, a powierzchnią próbki. Jeśli odległość między ostrzem i próbką się zmienia, prąd tunelowy również się zmienia. Wówczas w kontrolerze pojawia się sygnał zwrotny który odpowiednio zmienia napięcie polaryzacji tuby tak aby prąd tunelowy a zatem i odległość między ostrzem a powierzchnią próbki były stałe. Zmiany tego napięcia odwzorowują trójwymiarowy obraz powierzchni materiału w miarę jak igła skanuje powierzchnię próbki, linia po linii.

SEM

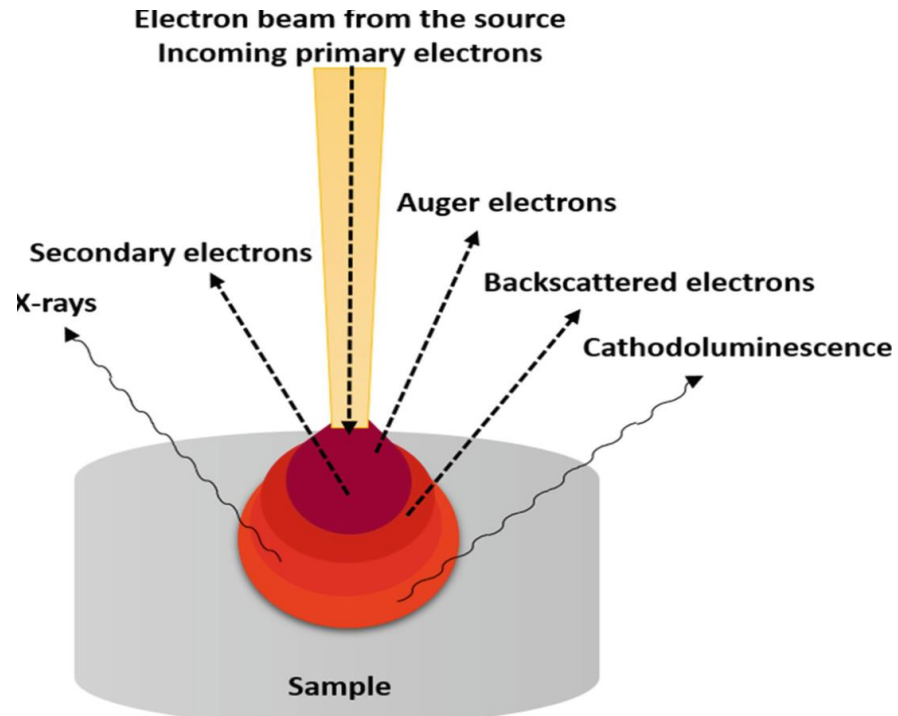
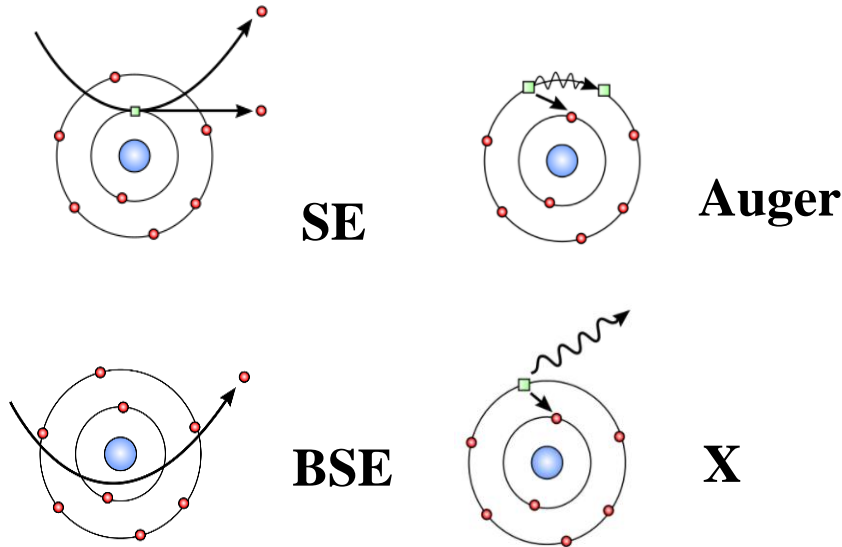


TEM



Skaningowy Mikroskop Elektronowy (SEM)

Miejsce po wybitym elektronie
zapęlnia elektron z wyższej powłoki



- SE** – secondary electrons - elektrony wtórne – morfologia powierzchni
- BSE** – backscattered electrons - elektrony odbite - skład
- X** – prom. Rentgenowskie, EDS – skład, kontrast
- Cathodoluminescence** – katodoluminescencja (defekty w półprzewodnikach)

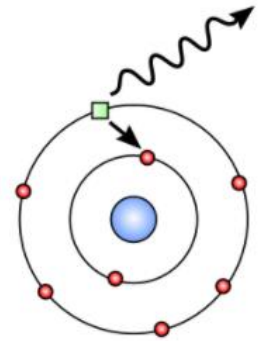
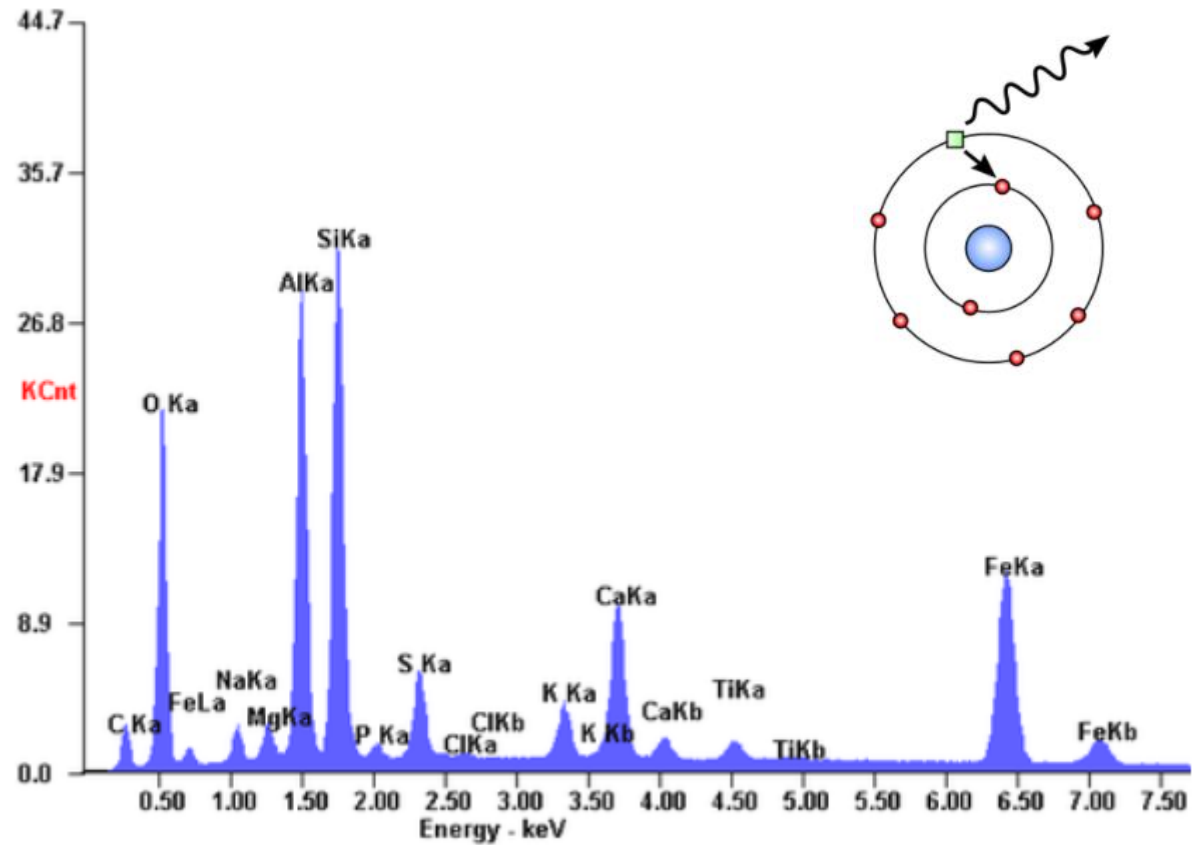
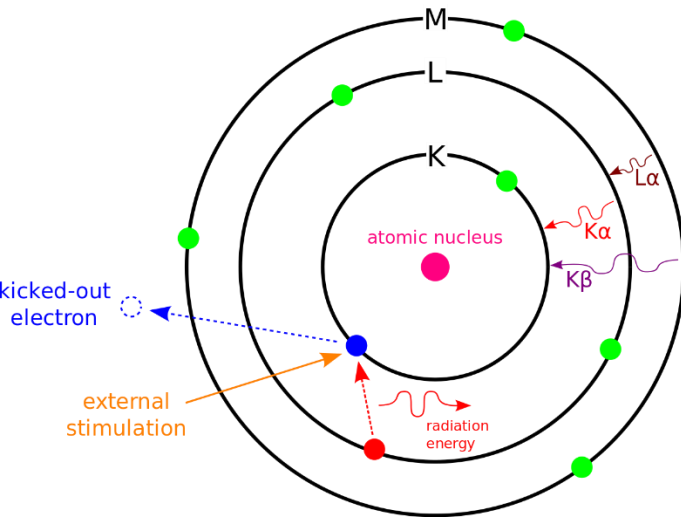
EDS

Spektroskopia dyspersji energii promieniowania rentgenowskiego (EDS - Energy Dispersive X-ray Spectrometry lub EDX - Energy Dispersive X-ray Analysis) – przystawka do SEM

EDS lub EDX to technika wykorzystująca pomiar promieniowania rentgenowskiego. Wzbudzenie charakterystycznego promieniowania rentgenowskiego zachodzi przez pierwotną wiązkę elektronów wytworzonych w mikroskopie, które wybijają elektrony z wewnętrznej powłoki (K, L, M) atomu próbki. Następnie, powstałe wolne miejsca po wybitym elektronie zajmowane jest przez elektron z powłoki o wyższej energii. Różnica energii elektronów między tymi dwoma poziomami powoduje powstanie charakterystycznego promieniowania rentgenowskiego, dla którego długość fali mieści się w przedziale od 0,7 do 110 Å .

EDS pozwala na przeprowadzenie mikroanalizy ilościowej próbki. Zawartość pierwiastków wyznacza się poprzez proporcjonalną zależność liczby emitowanych impulsów charakterystycznego promieniowania rentgenowskiego od stężenia pierwiastków w badanej objętości. W celu określenia stężenia pierwiastków w próbce, konieczne jest przeprowadzenie porównania ze wzorcem o ustalonym składzie chemicznym.

Widmo EDS



Przykładowe widmo EDS otrzymane dla próbki popiołu.

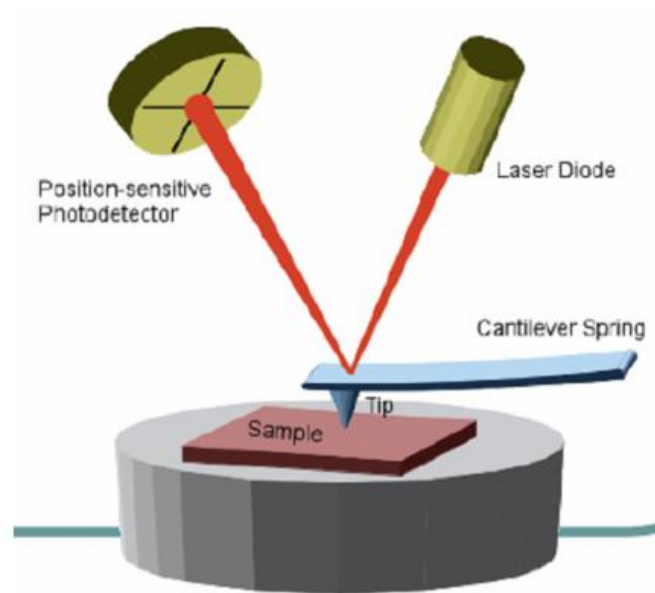
K – powłoka na którą przechodzi elektron
 α , β – powłoka z której przechodzi elektron (L,M)

Tabela 1. Porównanie podstawowych właściwości mikroskopów: optycznego, elektronowego i sił atomowych

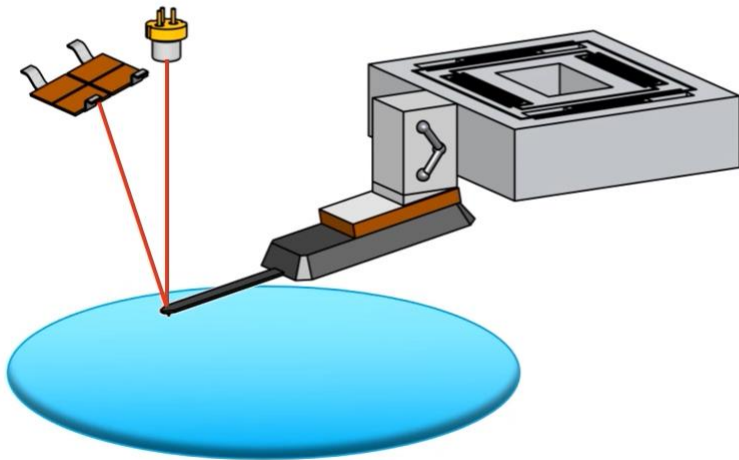
Cecha mikroskopu	Mikroskop optyczny	SEM	AFM
Rozdzielczość względem osi x,y	1000 nm	5 nm	0,1 nm
Rozdzielczość względem osi z	-	-	0,01 nm
Powiększenie	do 2000	do 10^6	do 10^8
Głębokość ostrości	średnia	mała	mała
Środowisko prowadzenia badań	powietrze, ciecz, próżnia	próżnia	powietrze, ciecz, próżnia
Sposób przygotowania próbek	prosty	dość złożony	prosty
Wymagane cechy próbek	Nie może być całkowicie przezroczysta dla fal świetlnych	Brak powierzchniowego ładunku elektrycznego, brak gazowania w próżni	Powierzchnia nie może mieć punktów o dużych różnicach współrzędnej z

	Raman	Infrared	SEM	TEM	Nanoindentation	AFM/SPM
sample prep/ requirements	minimal	minimal	conductive coating	thin sectioning fixation staining	smooth	smooth
surface sensitivity	via confocal (500+ nm)	via ATR	nm's (SE) to 10s of nm (BS)	none (but requires thin sections)	nm - um	nm
vacuum needed?	no	no	yes	yes	no	no
morphology	with poor resolution	no	yes	yes	with poor resolution	yes
chemical specificity	yes	yes	yes (EDS)	yes (EDS, EELS)	no	no
true height (Z)	via confocal (very limited)	no	no	no	yes	yes
mechanical properties	no	no	no	no	yes	Yes
nanoelectrical properties	no	no	no	no	no	yes

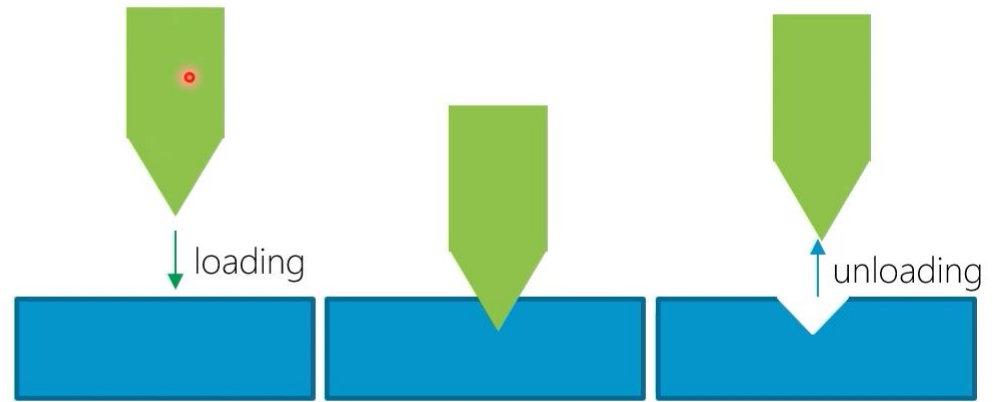
AFM



AFM vs instrumented nanoindentation

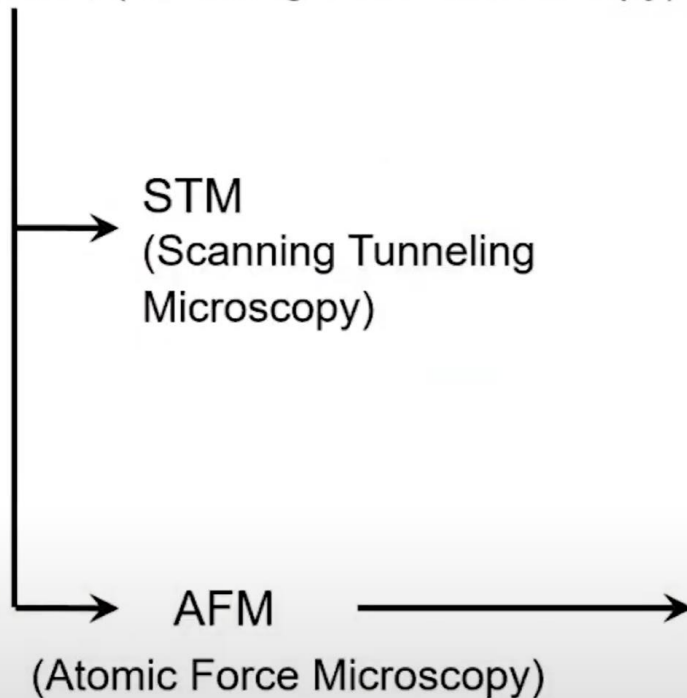


AFM measures in *elastic* regime
Higher vertical and lateral resolution
Effective for softer materials
Special very stiff cantilevers for plastic sample deformation exist



Instrumented nanoindentation measures in *plastic* regime
Effective for stiffer materials
Allows addressing e.g. hardness, loss and storage modulus, creep, stress relaxation fracture toughness, scratch resistance, critical load, thin film adhesion, delamination

SPM ; (Scanning Probe Microscopy)



Optional Modes

Electrical Property

- Electrostatic Force Microscopy(EFM)
- Kelvin Probe Force Microscopy (KPFM)
- Conductive AFM(I-AFM)
- Scanning Spreading-Resistance Microscopy (SSRM)
- Scanning Capacitance Microscopy(SCM)

Mechanical Property

- Force spectroscopy
- PinPoint nanomechanical mode
- Lateral Force Microscopy (LFM)
- Lithography

Thermal Property

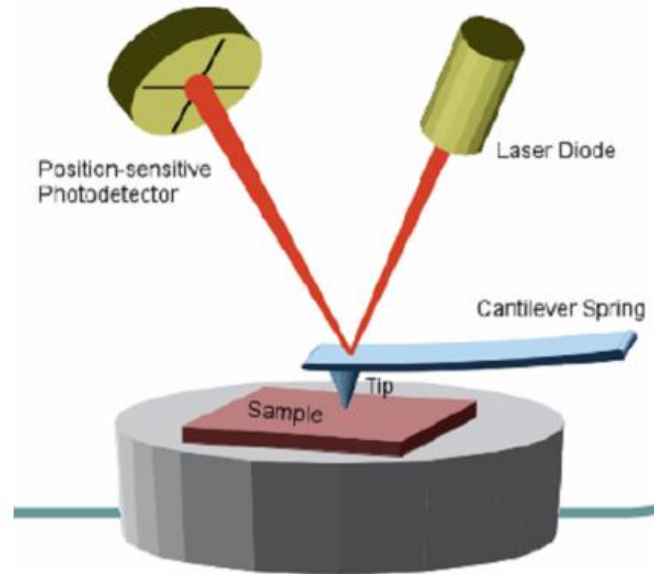
- Scanning Thermal Microscopy(SThM)

Magnetic Property

- Magnetic Force Microscopy(MFM)

AFM – zasada działania

PSPD – Position Sensitive Photodetector



AFM działa podobnie jak STM, ale w oparciu o pomiar niewielkich sił oddziaływania pomiędzy ostrzem skanującym i badaną powierzchnią. Siły te powodują ugięcie dźwigni do której umocowane jest ostrze. Ugięcie dźwigni odwzorowuje topografię skanowanej powierzchni.

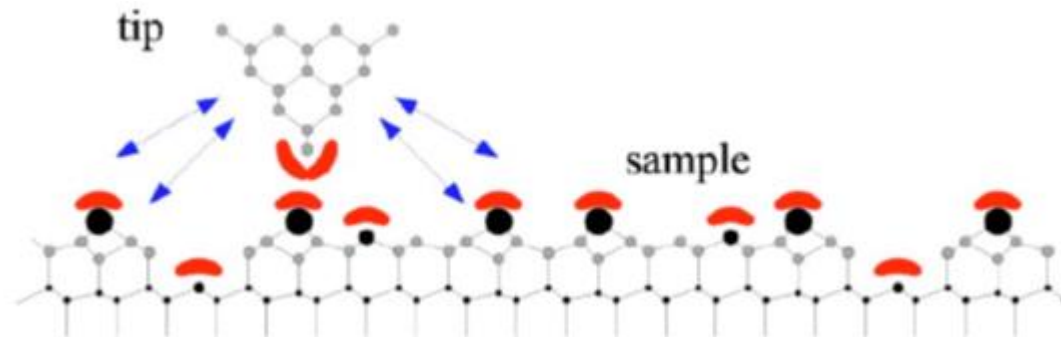
We współczesnej wersji AFM wiązka światła lasera pada na dźwignię i po odbiciu jest kierowana na 4-segmentową fotodiode (PSPD). Sygnał na wyjściu fotodiody jest miarą ugięcia dźwigni, które z kolei zależy od odległości między ostrzem i próbką.

Siły działające na ostrze

Mikro-dźwignia jest wykonana ze sprężystego materiału, dlatego jej wygięcie pod wpływem sił oddziaływania z powierzchnią spełnia prawo Hooke'a

$$\vec{F} = -k \cdot \vec{z}$$

gdzie z jest ugięciem dźwigni. Stała sprężystości dźwigni jest podana w specyfikacji przez producenta. Zakładając, że $k = 0.2 \text{ N/m}$ (typowa wartość), dla ugięcia równego $1 \mu\text{m}$, otrzymujemy wartość siły $F = 0.2 \mu\text{N}$.



Franz J. Giessibl*
REVIEWS OF MODERN PHYSICS,
VOLUME 75, JULY 2003

Siły krótkozasięgowe – orbitale atomowe próbki i ostrza przekrywają się (czerwone pola)

Siły dalekozasięgowe – niebieskie strzałki

Siły oddziaływania ostrze - próbka

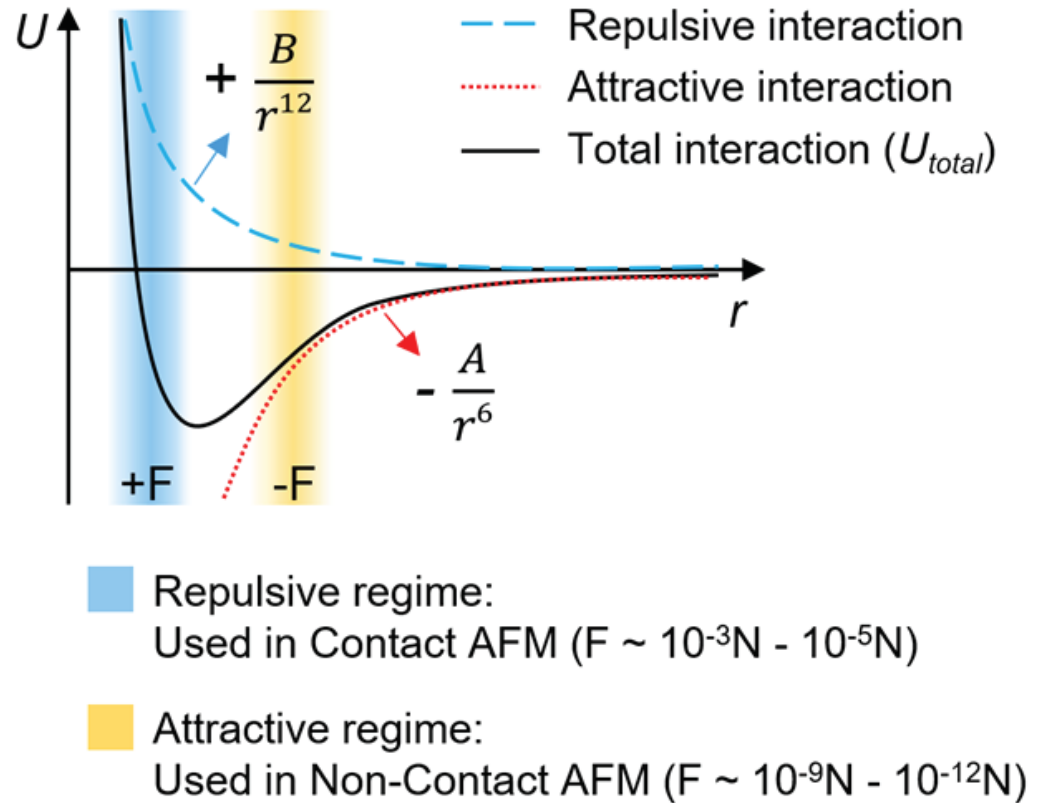
Potencjał Lennarda-Jonesa

$$V_{LJ} = -4\varepsilon \left(\frac{\sigma^6}{r^6} - \frac{\sigma^{12}}{r^{12}} \right)$$

Potencjał przyciągający

Potencjał odpychający

σ - położenie równowagowe



Siły oddziaływania ostrze - próbka

Odpychające

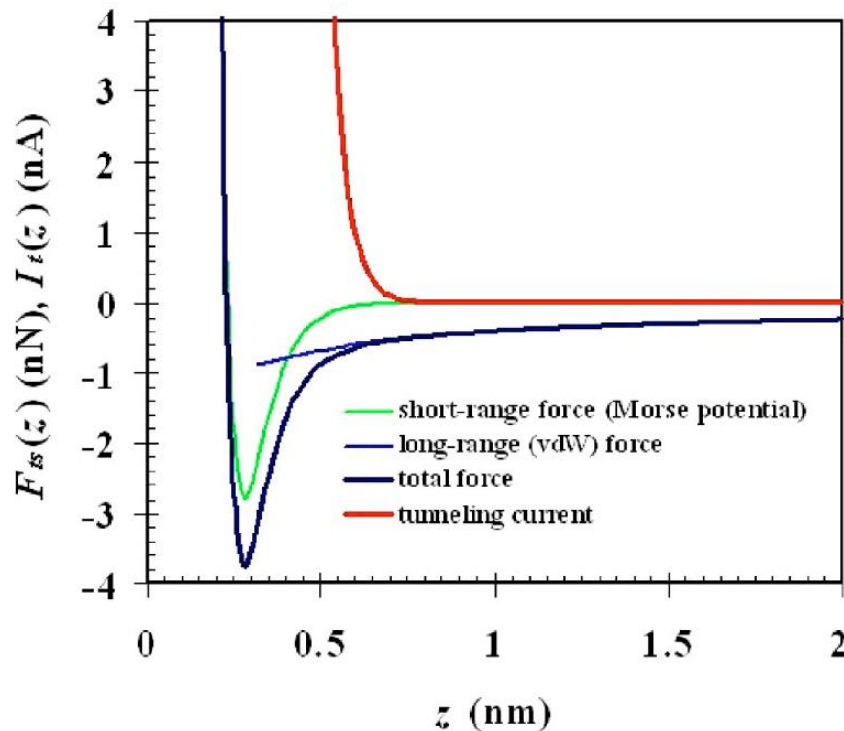
- Siły wynikające z zakazu Pauliego

Przyciągające

- Siły van der Waalsa – przyciągające - fluktuacja momentów dipolowych atomów, wzajemna polaryzacja.
- Siły przyciągające elektrostatyczne - występują gdy ostrze i próbka są przewodzące.
- Siły kapilarne - woda na powierzchni próbki przyciąga ostrze

STM i AFM - porównanie

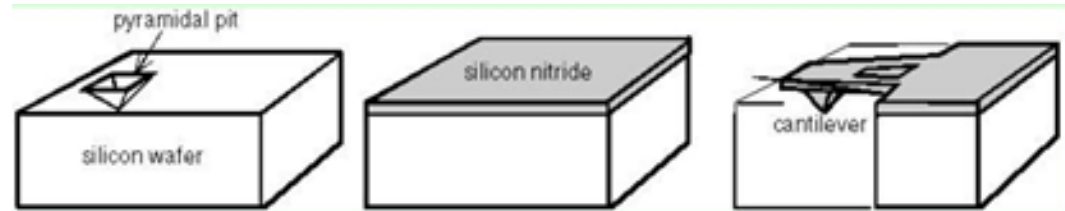
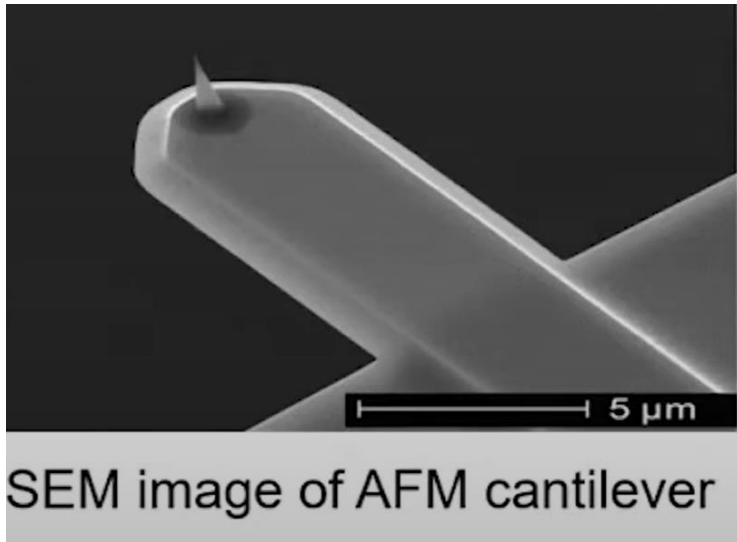
Franz J. Giessibl*
REVIEWS OF MODERN PHYSICS,
VOLUME 75, JULY 2003



STM – prąd tunelowy jest monotoniczną funkcją odległości ostrza od powierzchni. Jest to funkcja wykładnicza. Dlatego w pętli sprzężenia zwrotnego wystarczy zastosować wzmacniacz logarytmiczny, który zapewni liniową zmianę napięcia kontrolera w funkcji odległości ostrze-próbka.

AFM - siły oddziaływania nie są monotoniczną funkcją odległości ostrze-próbka. Stąd trudności w stabilizacji pracy pętli sprzężenia zwrotnego.

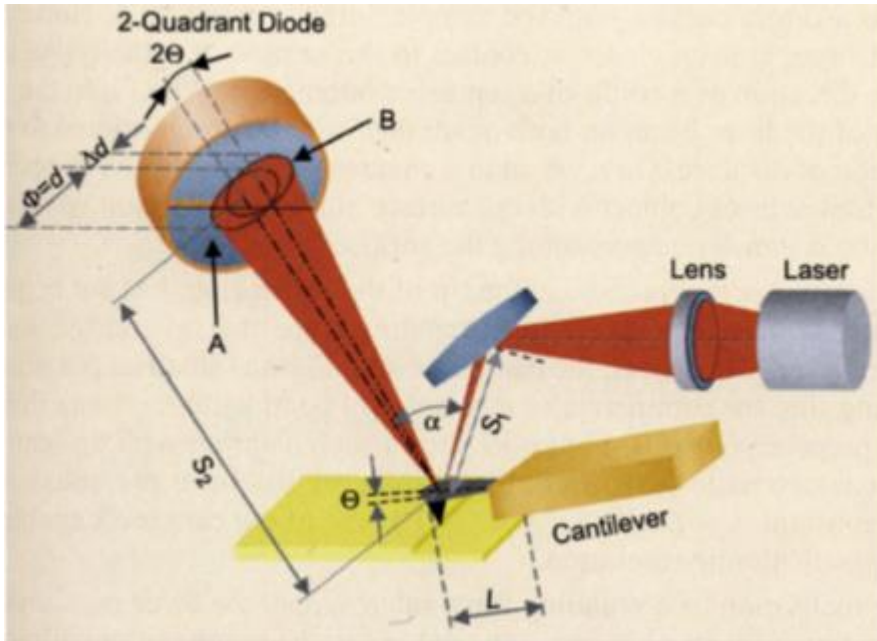
AFM – ostrze



Ostrza mają rozmiary rzędu ok. 15nm, długość od 3 do 20 μ m i są przymocowane do sprężystej mikro-dźwigni o długości 100-200 μ m. Zwykle ostrza są wykonane z Si (bądź Si_3N_4), w procesie nanolitografii. Jeśli AFM pracuje w modzie przewodzącym, wówczas ostrze pokrywa się warstwą przewodzącą.

Zwykle są w kształcie litery V, różnią się stałą sprężystości (od 0.01 – 100 N/m) i częstością rezonansową. Promień krzywizny ostrzy wynosi od 10 do 100 nm.

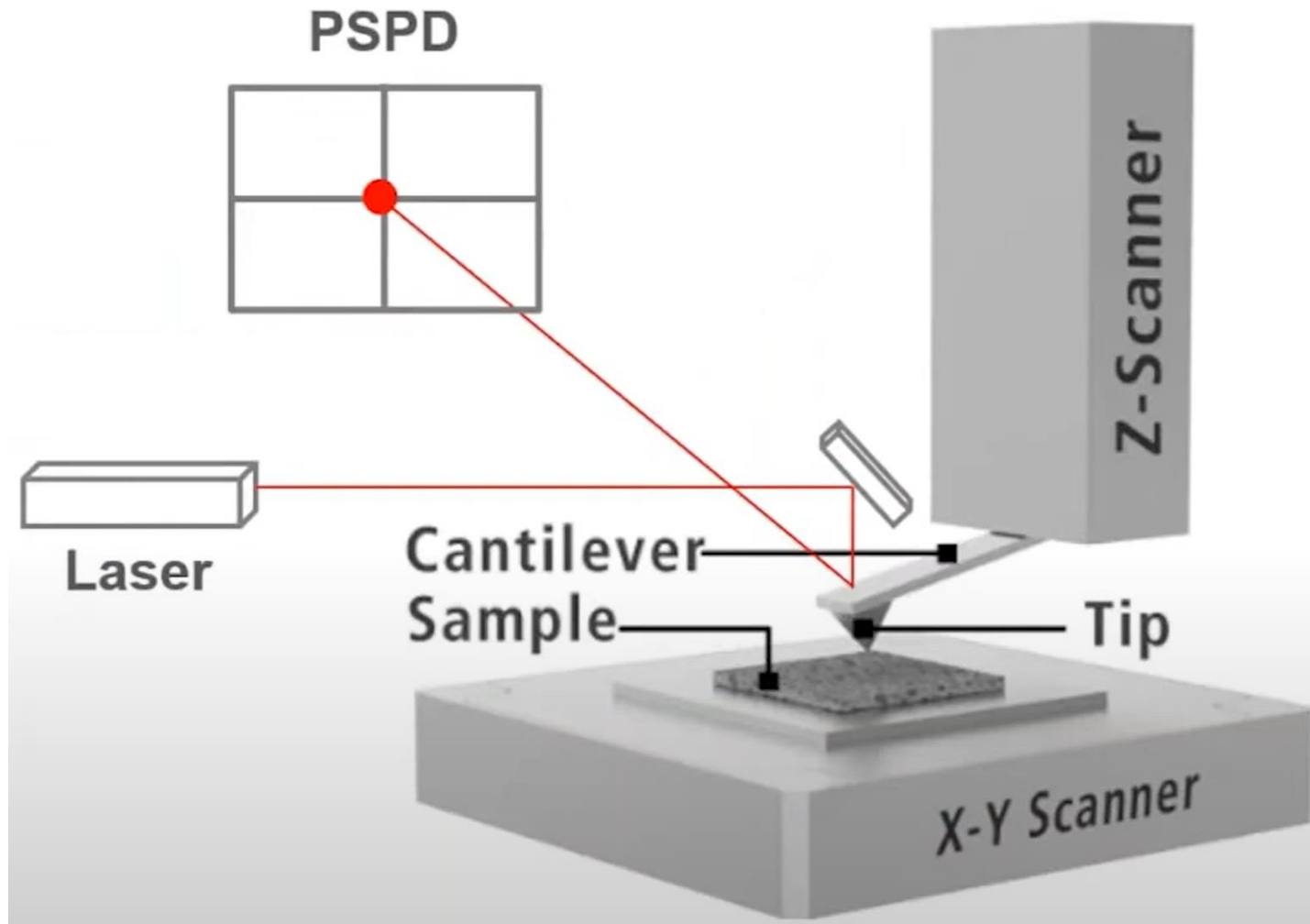
Dźwignia optyczna (optical lever)



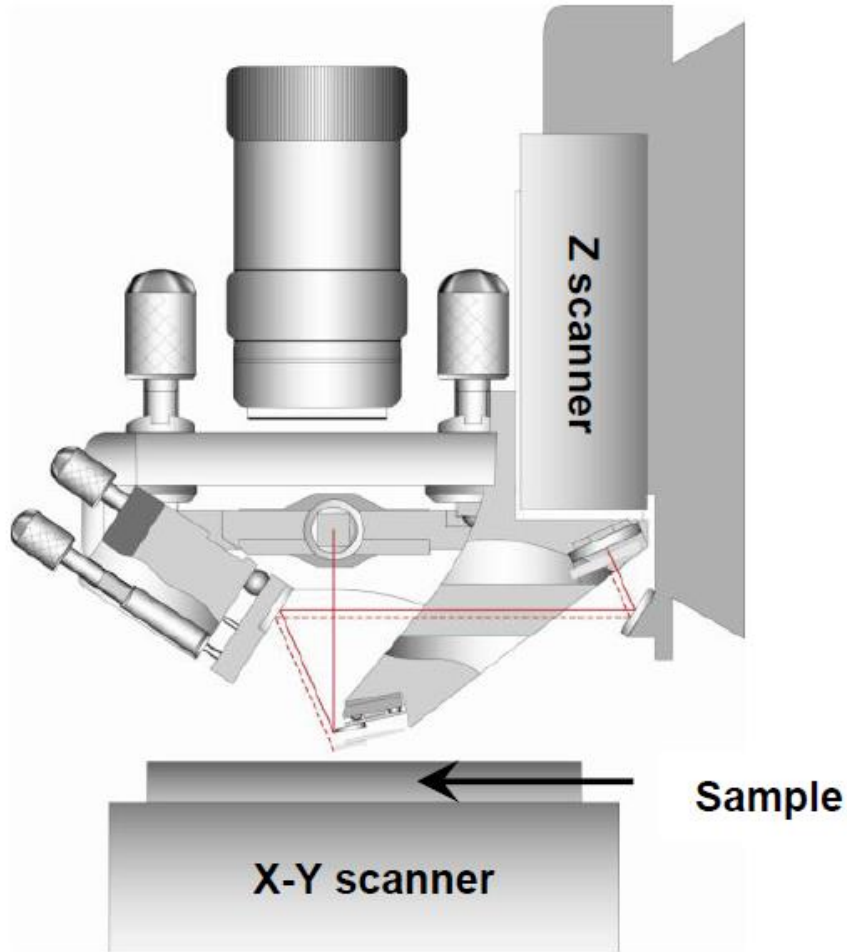
Na skutek ugięcia dźwigni, pozycja wiązki laserowej na detektorze ulega przesunięciu. PSPD ma rozdzielczość rzędu 1 nm. Stosunek odległości pomiędzy dźwignią a PSPD do całkowitej długości dźwigni jest równy wzmocnieniu geometrycznemu. W wyniku tego system potrafi wykrywać pionowe ruchy dźwigni i ostrza nawet w zakresie poniżej 0.1 nm.

Do monitorowania przemieszczeń dźwigni stosuje się również interferometrię.

Elementy AFM



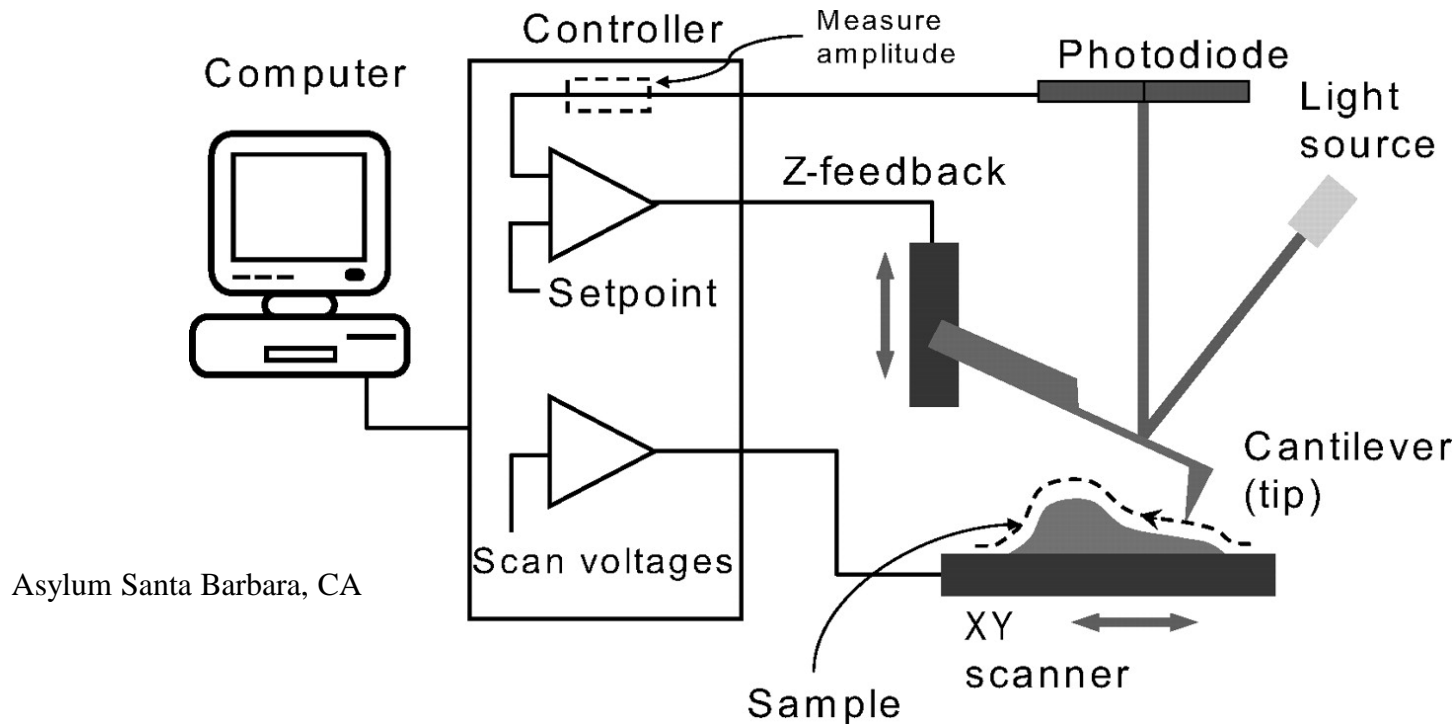
AFM z separowanymi piezo-skanerami X-Y i Z



Skanner X-Y skanuje próbkę w płaszczyźnie xy, skaner Z – tylko w kierunku osi z.

Niezależność skanowania X-Y i Z oraz fakt, że siłownik skanera Z ma szybkość odpowiedzi 10kHz, pozwala na szybsze skanowanie powierzchni próbki

Sprzężenie zwrotne osi z

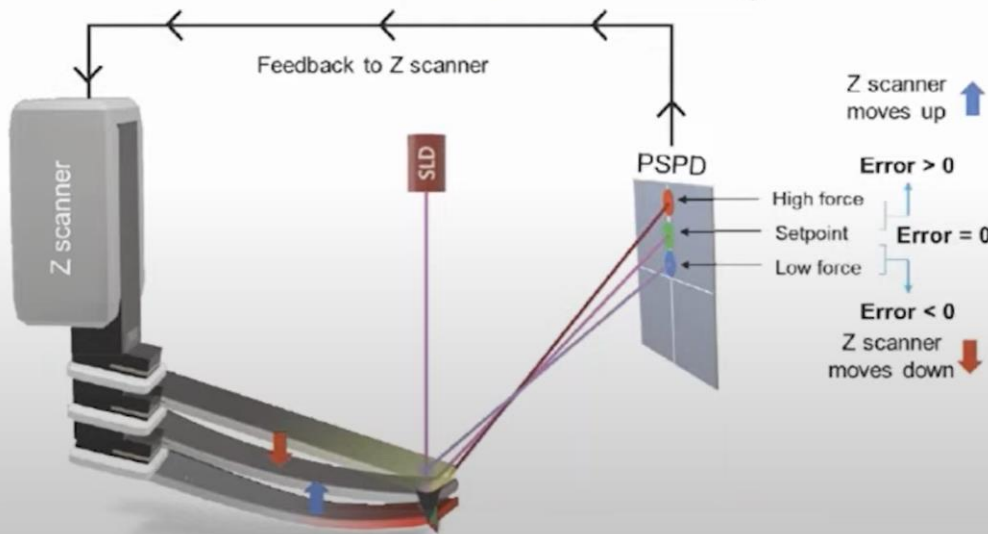
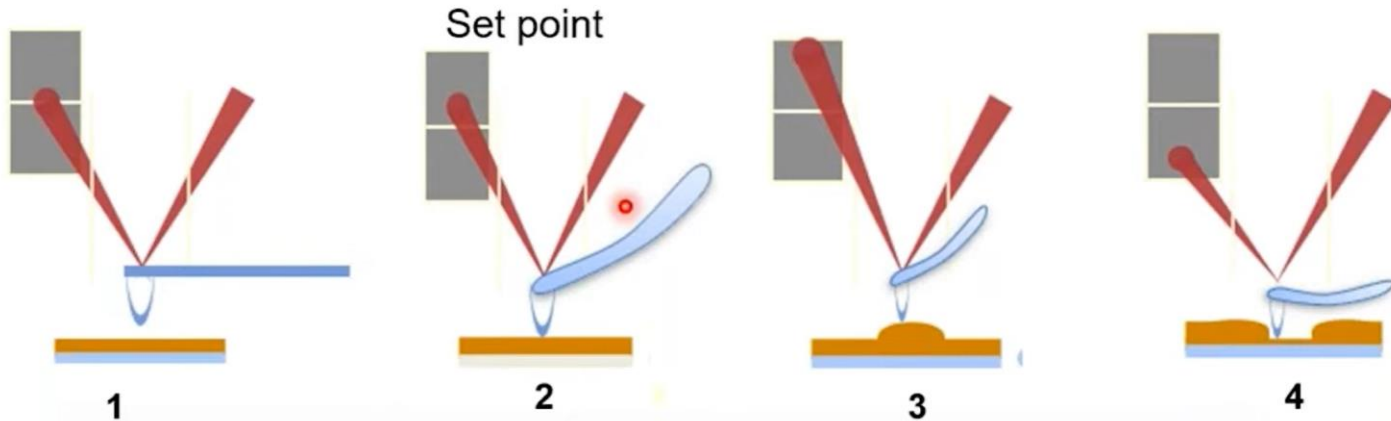


Asylum Santa Barbara, CA

Ostrze skanuje powierzchnię próbki (lub stolik wraz z próbką przemieszczają się w płaszczyźnie X-Y względem ostrza, dzięki efektowi piezoelektrycznemu). Światło odbite od ostrza pada na fotodiode. Zmiana pozycji odbitego światła powoduje zmianę sygnału na wyjściu fotodiody. Ta zmiana jest z kolei przekazywana do kontrolera, który reguluje napięcie na elemencie piezoelektrycznym, do którego jest przymocowana dźwignia z ostrzem. Element ten wydłuża się lub skraca wzdłuż osi Z w zależności od przyłożonego napięcia. Wtedy ostrze odpowiednio opada lub się podnosi.

Sprężenie zwrotne w AFM

Park's AFM



$$\text{error} = U_{PSD\text{signal}} - U_{PSD\text{set point}}$$

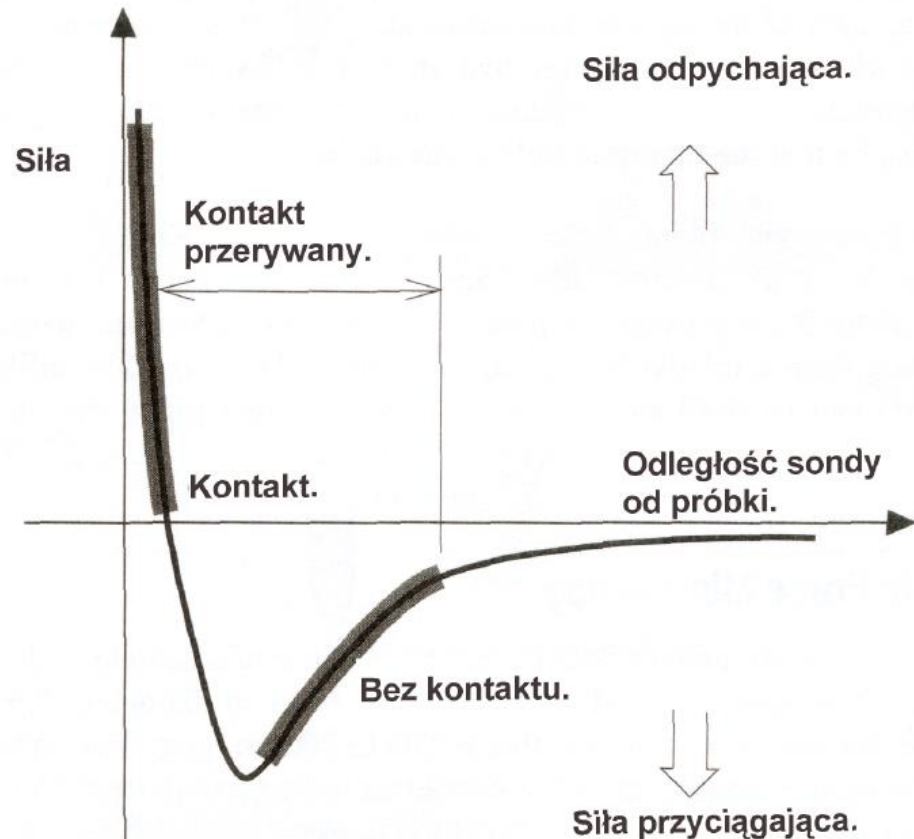
A schematic diagram of feedback mechanism in AFM

Tryby działania – dwa sposoby podziału

- **Interakcja ostrza z próbką**
 - Tryb kontaktowy (contact mode)
 - Tryb bezkontaktowy (noncontact mode)
 - Tryb kontaktu przerywanego (tapping mode)
- **Dynamika mikro-dźwigni**
 - Tryb statyczny
 - Stałej siły
 - Stałej wysokości
 - Tryb dynamiczny
 - Modulowana częstotliwość
 - Modulowana amplituda
 - Tryb kontaktu przerywanego (tapping mode)

Podział ze względu na interakcję ostrza z próbką

- Tryb kontaktowy (contact mode, CM)
- Tryb bezkontaktowy (noncontact mode NC)
- Tryb kontaktu przerywanego (tapping mode)

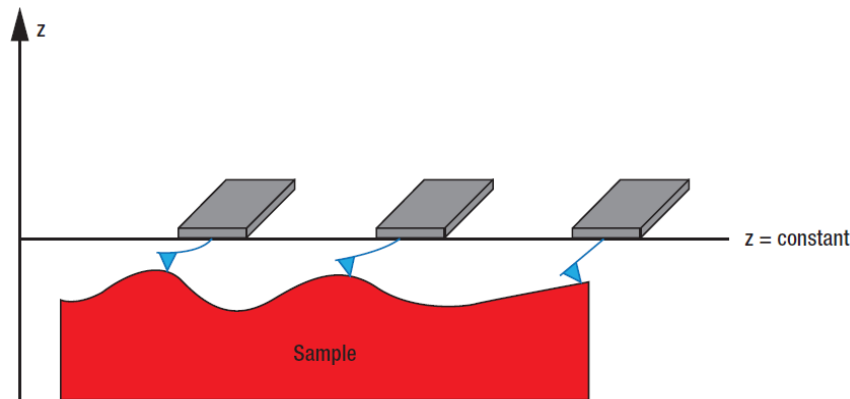


Tryb kontaktowy – stała wysokość

W trybie kontaktowym, ostrze pozostaje w kontakcie z powierzchnią próbki (odległość ostrze – próbka $< 1\text{nm}$). AFM pracuje w reżimie sił odpychania. Wadą tej metody jest możliwość uszkodzenia próbki lub ostrza. Siła w tym trybie jest rzędu 10^{-8}N do 10^{-6}N

- Tryb stałej wysokości

Jest to najprostszy tryb pracy ponieważ odległość ostrza od próbki jest ustalona i nie jest konieczna pętla sprzężenia zwrotnego. Dźwignia ugina się w miarę jak przemieszcza się po badanej powierzchni. Ugięcie odwzorowuje bezpośrednio topografię powierzchni. Ten tryb pracy może być stosowany jeśli wiadomo, że powierzchnia próbki jest odpowiednio płaska.

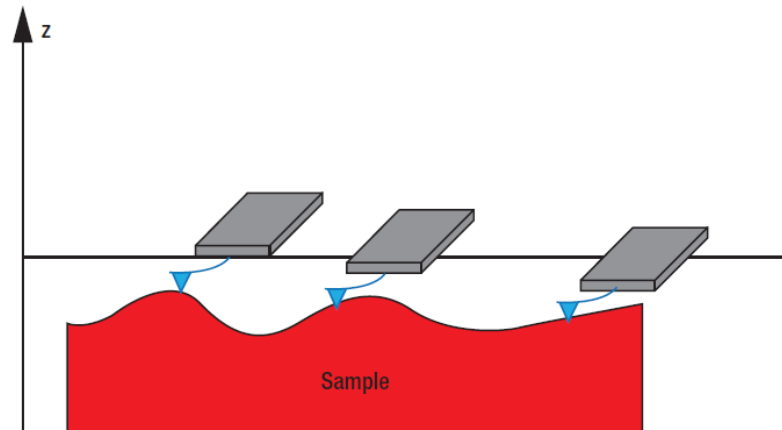


Tryb kontaktowy – stała siła

- Tryb stałej siły

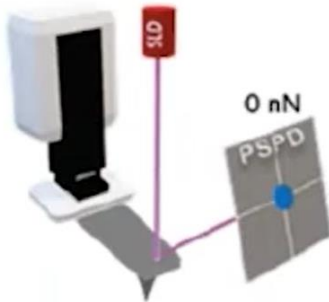
Pętla sprzężenia zwrotnego jest włączona, aby kontrolować wysokość ostrza nad próbką a tym samym ugięcie dźwigni tak aby utrzymać stałą siłę oddziaływania ostrze-próbka. Sygnał kontrolera w pętli sprzężenia zwrotnego wzdłuż osi z w funkcji współrzędnych x, y odwzorowuje topografię powierzchni. Ten tryb pracy pozwala na skanowanie próbek z głębszymi nierównościami. Ze względu na zaangażowanie pętli sprzężenia zwrotnego, ten tryb pracy jest wolniejszy od trybu stałej wysokości.

EDU AFM-1
Thorlabs

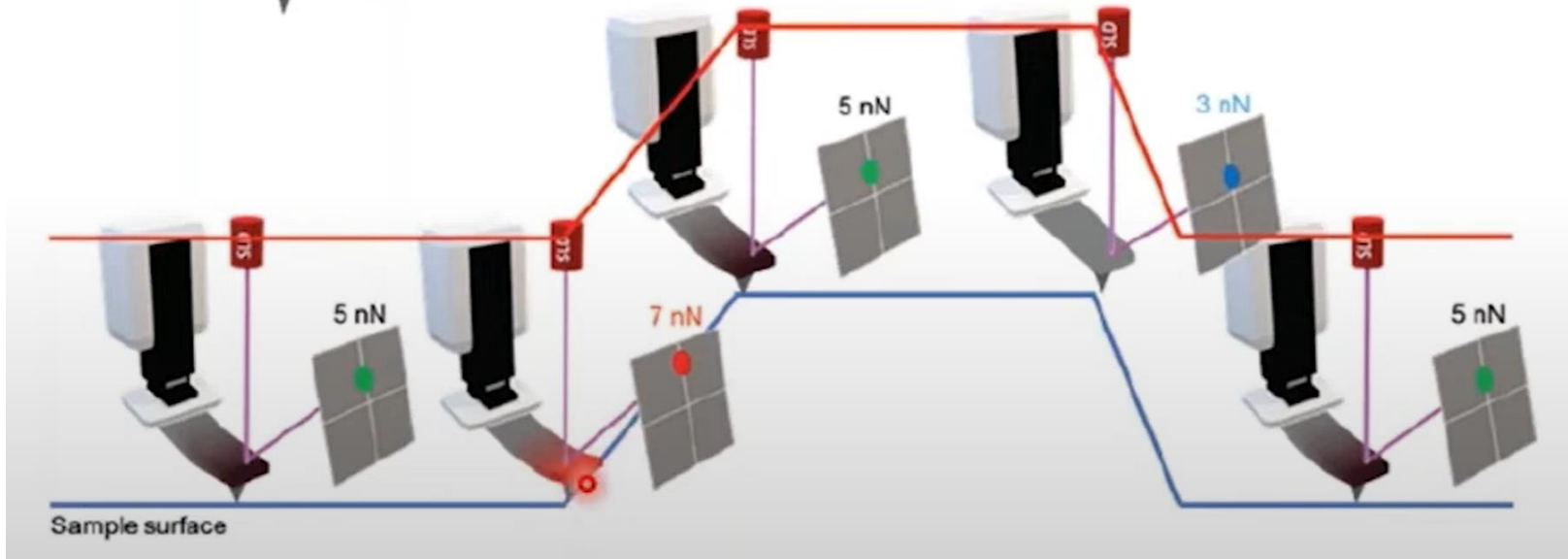


Tryb kontaktowy – stała siła

No tip-sample interaction before contact



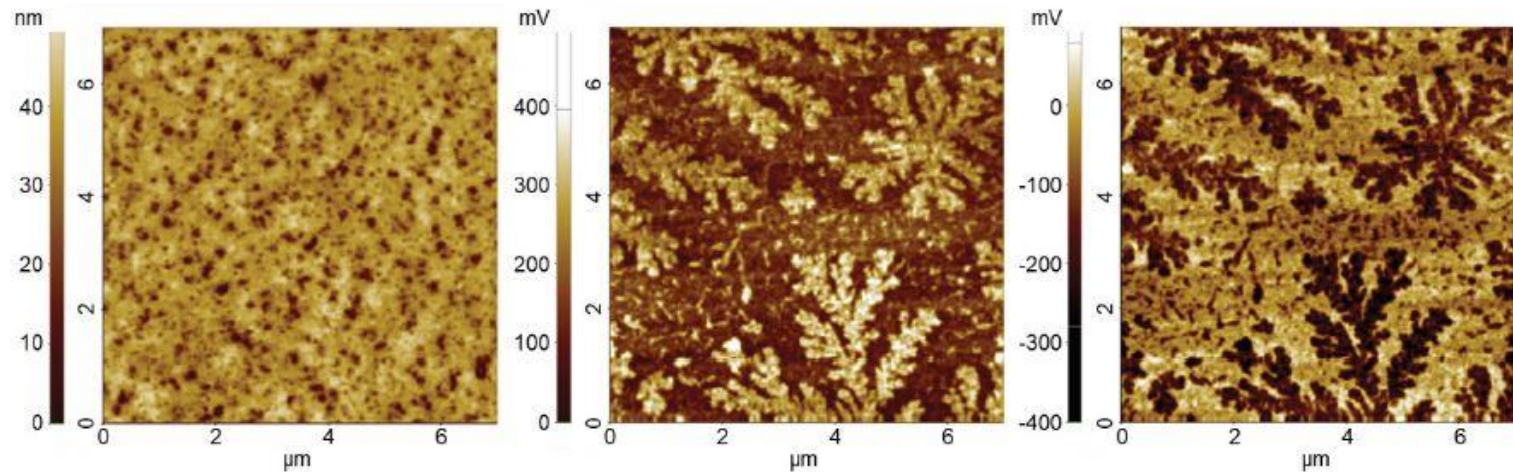
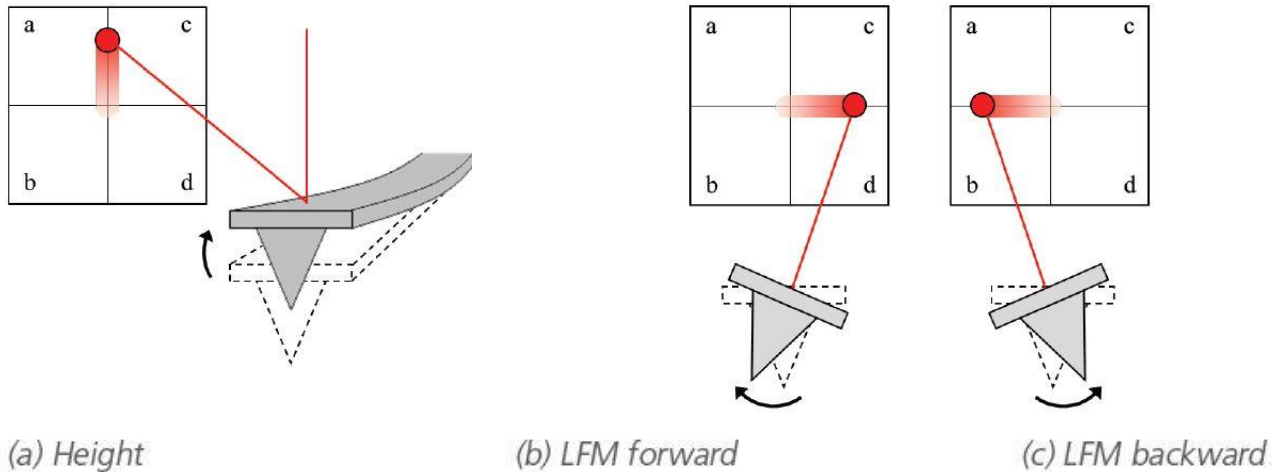
Sample height	Current force	Setpoint	Error	Z scanner
Flat	5 nN	5 nN	0	Hold
High	7 nN		+2	Up
Low	3 nN		-2	Down



Tryb kontaktowy – siły boczne Lateral Force Microscope (LFM)

- Tryb stałej wysokości – siły boczne

Korzystając z diody 4-segmentowej, można łatwo wyznaczyć skreślenie ostrza na krawędziach i na chropowatych powierzchniach.



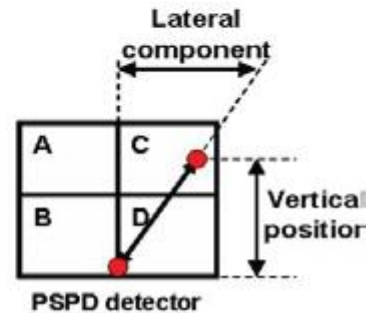
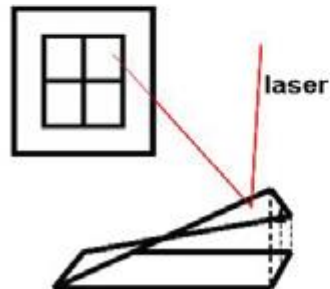
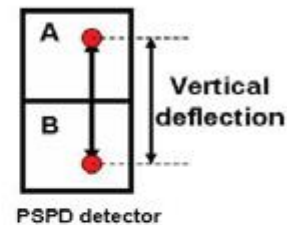
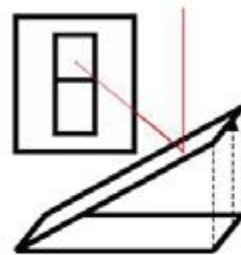
Fotodioda PSPD

Zwykle aby zmierzyć topografię powierzchni próbki wykorzystuje się sygnał z dwóch połączonych górnych i dolnych sekcji PSPD, jest to tzw. sygnał $A - B$:

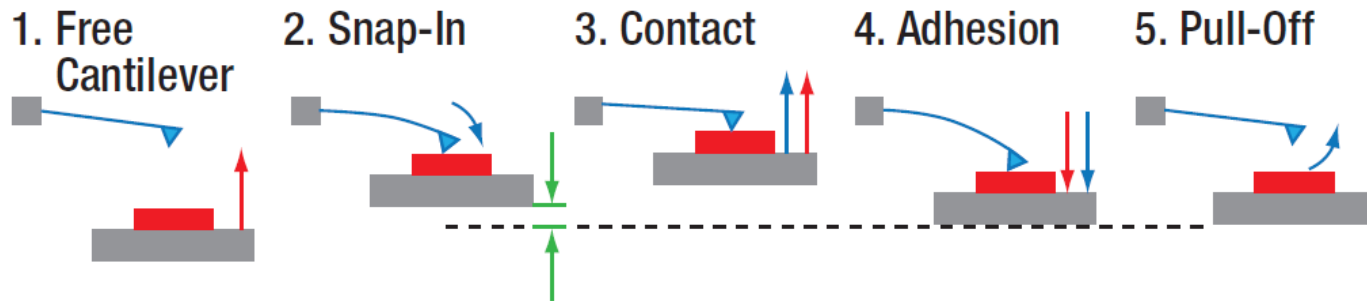
$$\text{Sygnał topografii} = (A + C) - (B + D)$$

W przypadku sygnału LFM wykorzystuje się wszystkie sygnały PSPD:

$$\text{Sygnał sił tarcia} = (A + B) - (C + D)$$

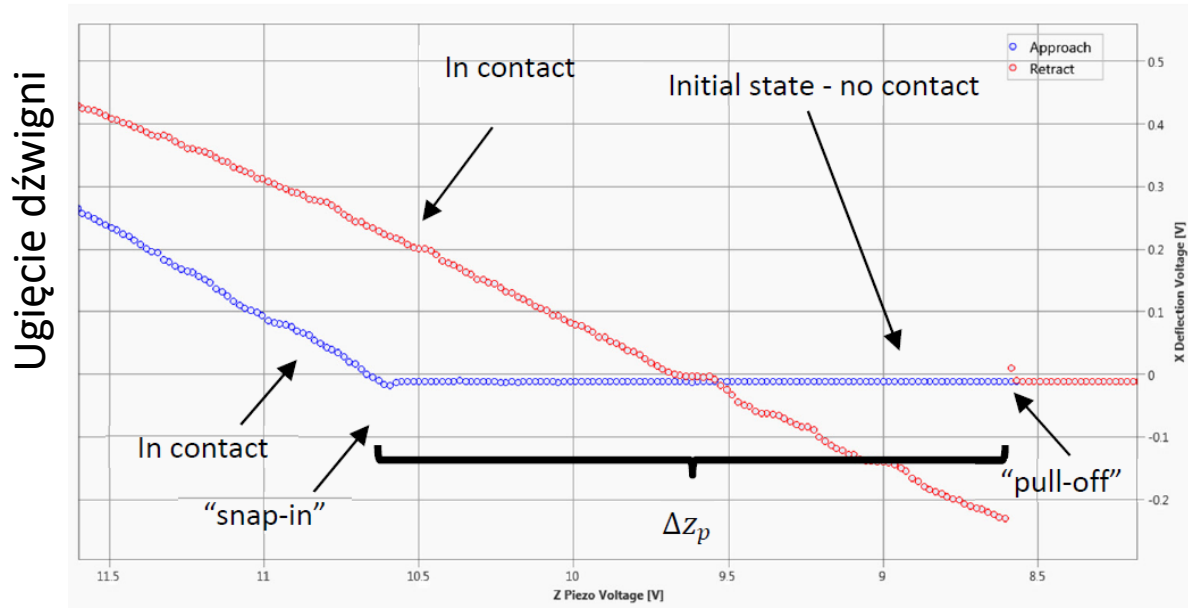


Tryb kontaktowy - wyznaczenie siły adhezji



Schemat pomiaru siła-odległość, na podstawie którego wyznacza się siłę adhezji. Siła ta jest kombinacją siły oddziaływania elektrostatycznego, van-der Waalsa i sił kapilarnych

EDU AFM-1
Thorlabs



$$F = k \cdot \Delta z_p$$

Odległość dźwignia - próbka

Tryb bezkontaktowy dynamiczny

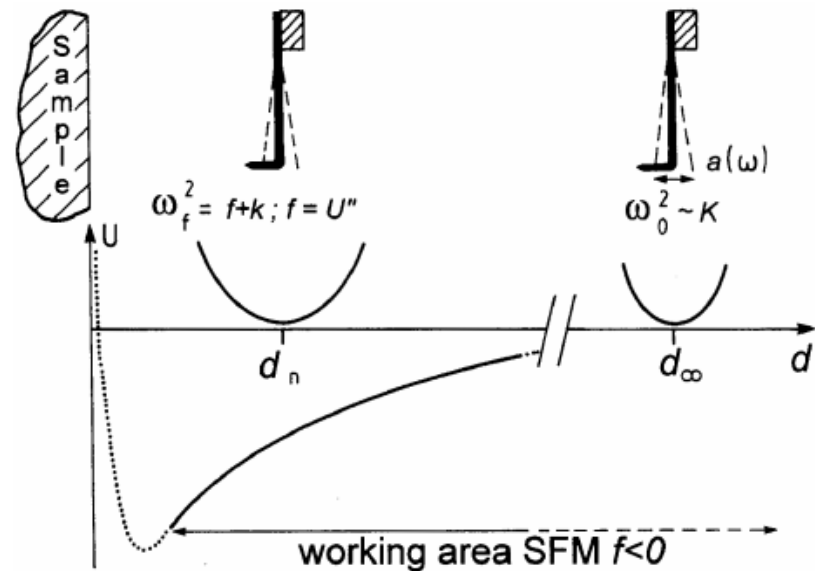
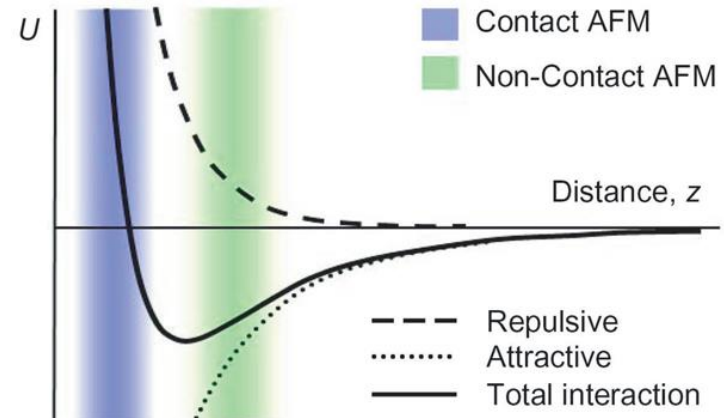
Mod NC-AFM – ostrze jest w odległości kilku do kilkudziesięciu nm od próbki.

Siła w tym trybie jest rzędu $10^{-12} N$.

W trybie bezkontaktowym, dźwignia wraz z ostrzem jest pobudzana do drgań o częstotliwości nieco większej od rezonansowej. Dopóki ostrze jest poza zasięgiem sił vdW wykonuje drgania harmoniczne, których częstotliwość zależy od stałej sprężystości dźwigni, k . W miarę jak dystans do próbki maleje i oddziaływania przyciągające vdW zaczynają dominować, częstotliwość drgań maleje, bo nowa stała sprężystości maleje:

$$k_{eff} = k + f,$$

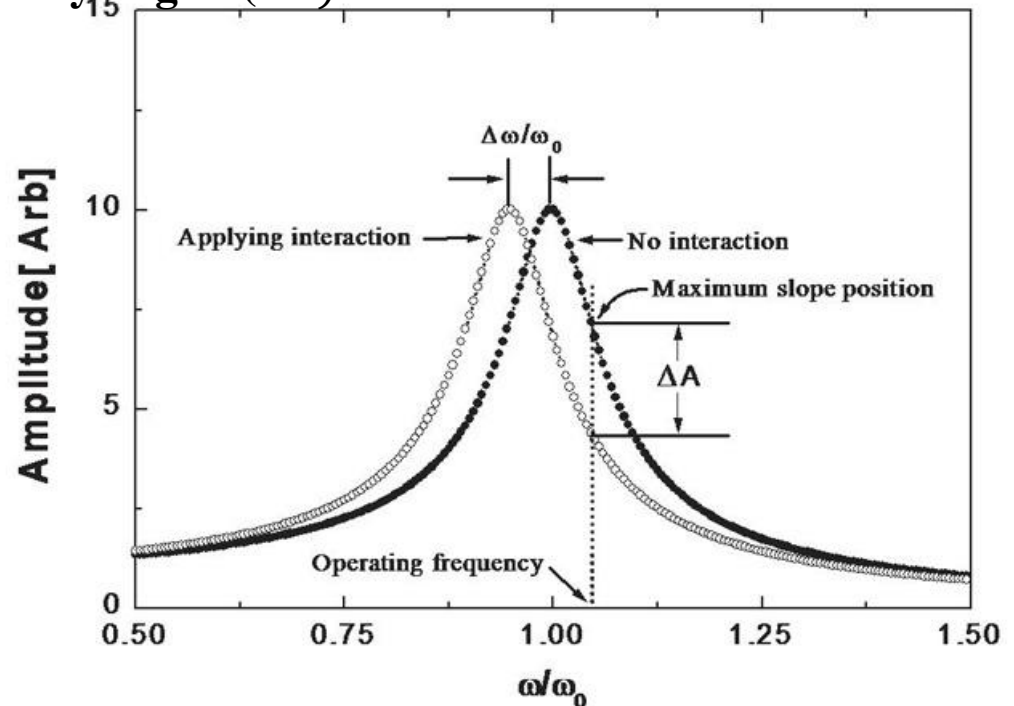
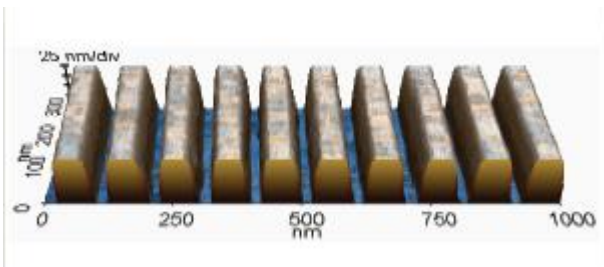
gdzie $f = \frac{\partial F_{vdW}}{\partial z} < 0$ (dla siły przyciągającej).



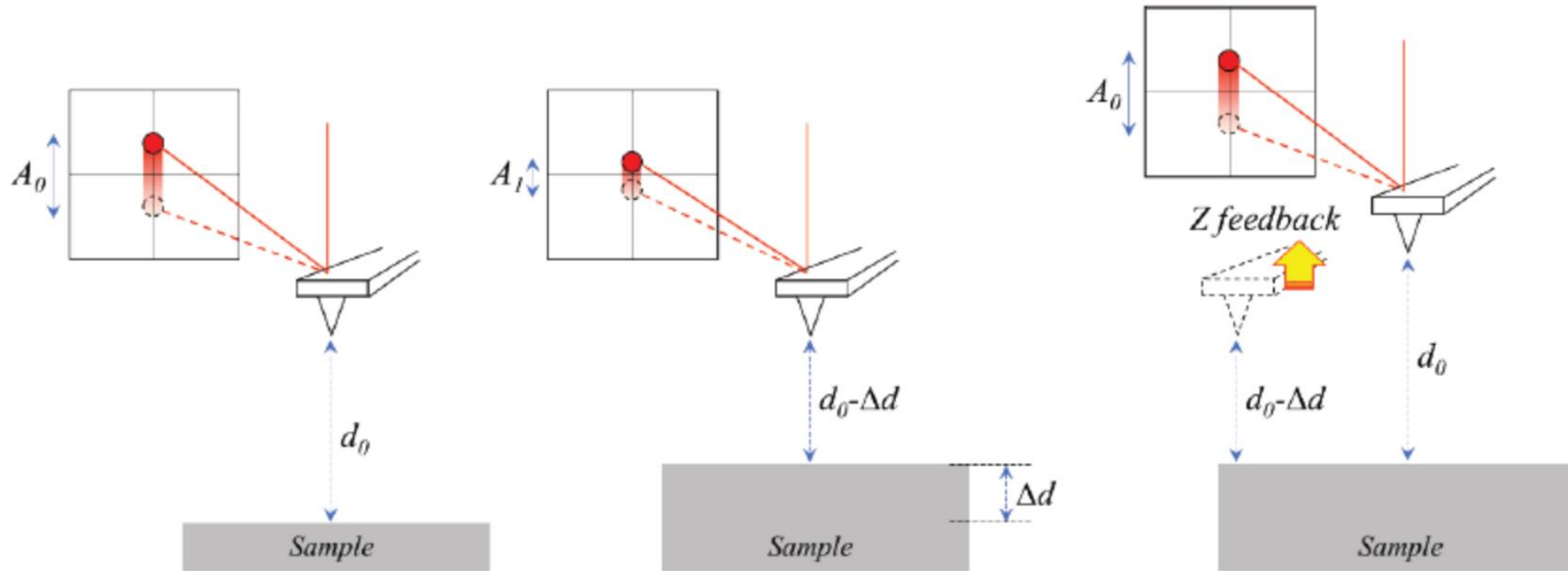
Tryb bezkontaktowy dynamiczny

Z wykresu amplitudy drgań od częstości $A(\omega)$ wynika, że jeśli nowa częstość rezonansowa jest mniejsza od częstości ω_0 , to amplituda drgań przy częstości wibracji ostrza (*ang. operating freq.*) również spada (o ΔA), a więc zarówno częstość jak i amplituda odwzorowują odległość ostrze-próbka. Sygnał w pętli sprzężenia zwrotnego konieczny do utrzymania stałej amplitudy czy częstości drgań, odwzorowuje topografię powierzchni.

W celu zwiększenia czułości pracy w trybie NC, zwykle częstość wibracji ostrza jest ustawiana na nieco większą aniżeli częstość rezonansowa w zakresie dużego nachylenia krzywej rezonansowej. Wówczas pojawienie się oddziaływania skutkuje w istotnej zmianie amplitudy drgań (ΔA).

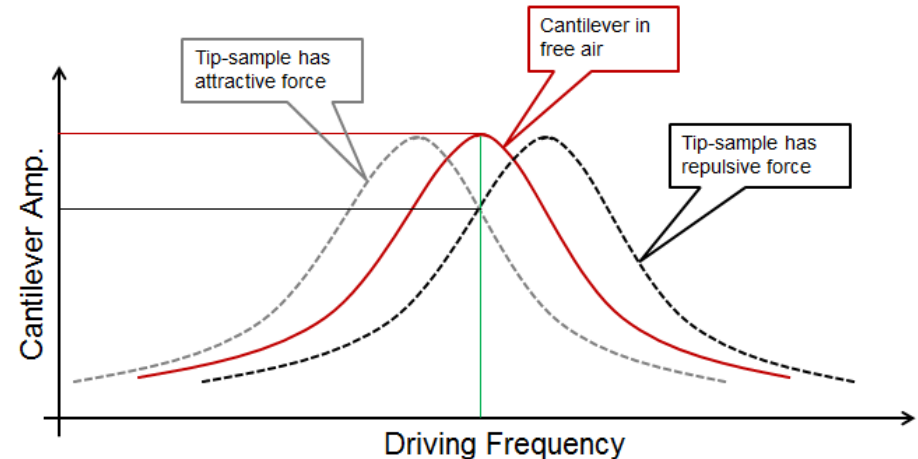
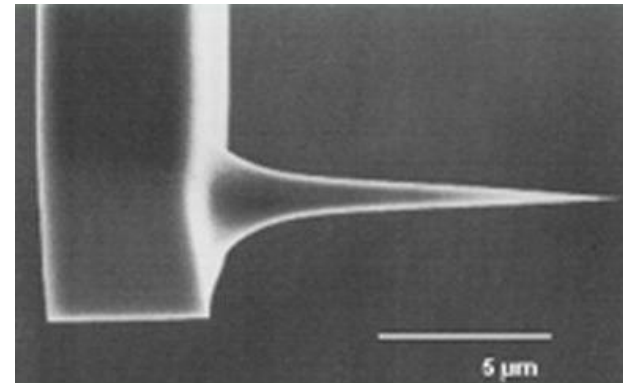
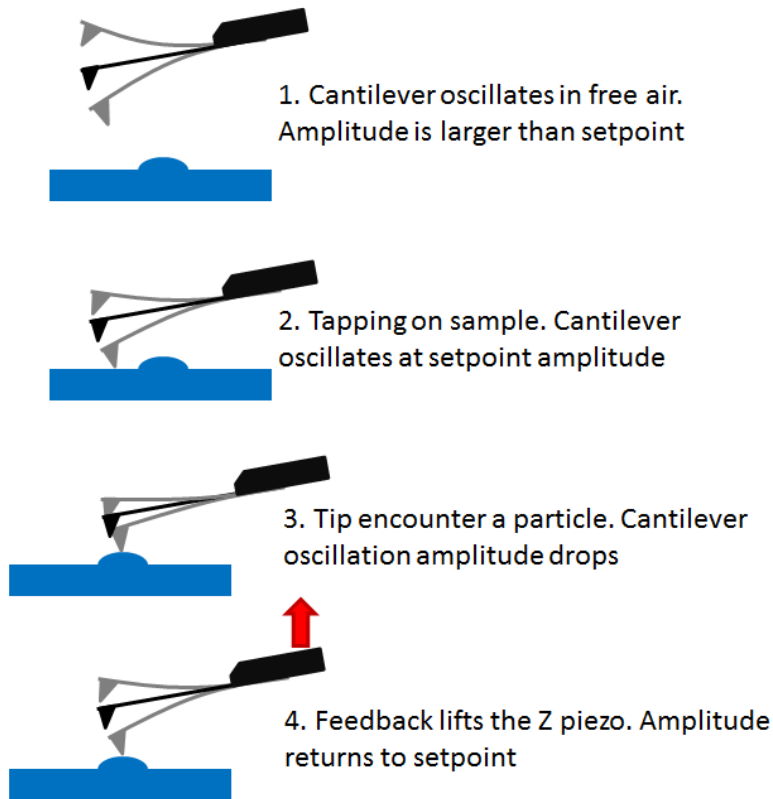


Tryb bezkontaktowy dynamiczny



Tryb przerywany (Tapping Mode)

Jest to tryb podobny do trybu dynamicznego bezkontaktowego. Różnica polega na tym, że ostrze jest bliżej próbki i oscylując delikatnie uderza w próbkę. Częstość dźwigni 200-400kHz, nieco mniejsza od częstości rezonansowej (odwrotnie niż w modzie NC). Dźwignia wykonana z Si ze zintegrowanym ostrzem. Jest to tryb o największej czułości.

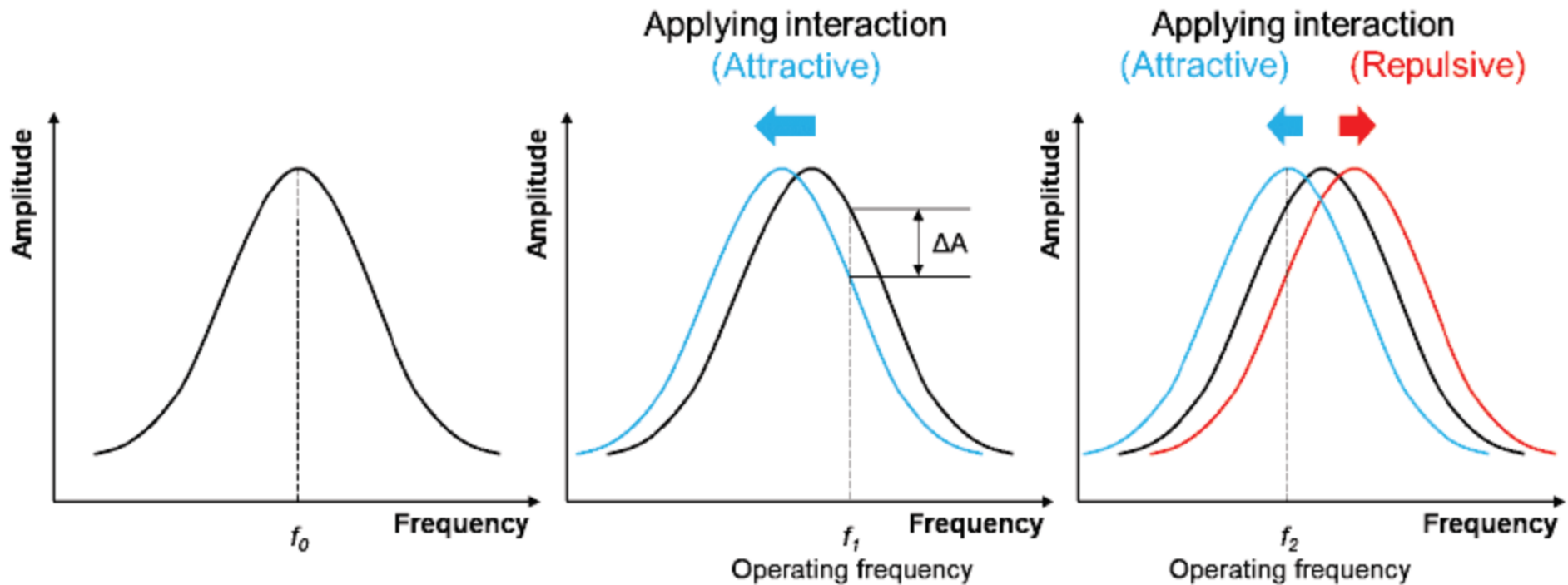


Tapping mode = DFM mod – dynamic force mode

Ten mod pracy eliminuje wpływ obecności cieczy, który jest nie do zaniechania w modzie kontaktowym, nie ma również wpływu sił tarcia jak w modzie kontaktowym (ostrze oscyluje pionowo do powierzchni próbki), próbka jest narażona na zniszczenie.

Układ sprzężenia zwrotnego utrzymuje częstość pracy (f_1) nieco mniejszą niż częstość rezonansowa f_0 . W miarę jak ostrze zbliża się do próbki, stała sprężystości zmniejsza się ze względu na siły przyciągające vdW. Częstość rezonansowa maleje (osiąga f_{eff}) a amplituda przy częstości pracy f_1 maleje o ΔA . Układ sprzężenia zwrotnego utrzymuje stałą amplitudę. Sygnał konieczny do utrzymania stałej amplitudy odzwierciedla topografię powierzchni.

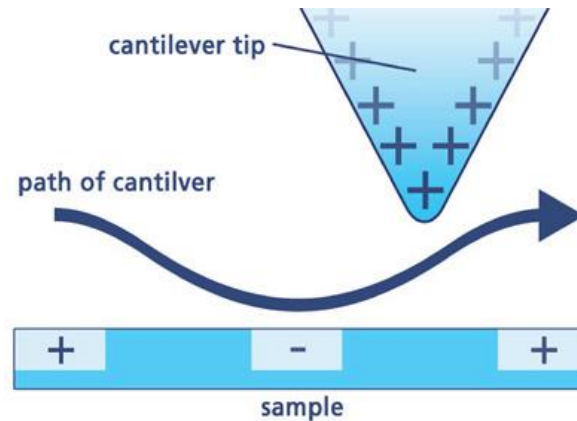
Non-contact vs tapping mode



<https://www.parksystems.com/index.php/park-spm-modes/91-standard-imaging-mode/2204-tapping-mode>

Mikroskop sił elektrostatycznych EFM

<https://www.parksystems.com/index.php/park-spm-modes/93-dielectric-piezoelectric/228-electric-force-microscopy-efm>



Pomiędzy ostrzem i próbką przykładane jest napięcie stałe. Dźwignia z ostrzem przesuwa się nad próbką i ugina góra/dół odwzorowując zarówno topografię jak i ładunek i potencjał na powierzchni. Sygnał topografii należy wyeliminować aby znaleźć rozkład potencjału na powierzchni.

AFM Park System umożliwia pomiar w trybie:

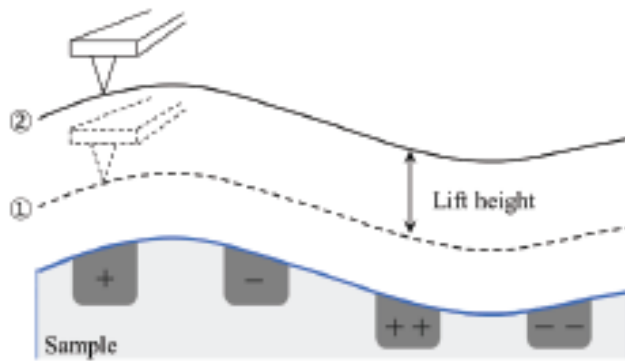
- **Standard EFM,**
- **Enhanced EFM (jeden skan)**
- **Scanning Kelvin Probe Microscope (KPFM).**

EFM standardowy i jeden skan

Pomiędzy ostrzem powleczonym warstwą przewodzącą i próbką przykładane jest napięcie stałe.

Siły vdW: $F_{vdW} \sim r^{-6}$

Siły elektrostatyczne: $F_{el} \sim r^{-2}$



First pass (Van der Waals force)
Second pass (Electrostatic force)

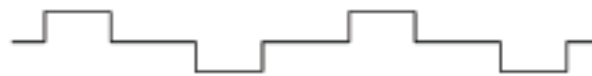
AFM height (using lock-in 1, First pass)



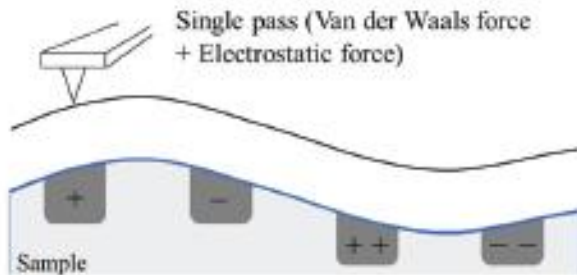
EFM Amplitude (using lock-in 1, Second pass)



EFM Phase (using lock-in 1, Second pass)



dwa skany



Single pass (Van der Waals force + Electrostatic force)

AFM height (using lock-in 1, Single pass)



EFM Amplitude (using lock-in 2, Single pass)



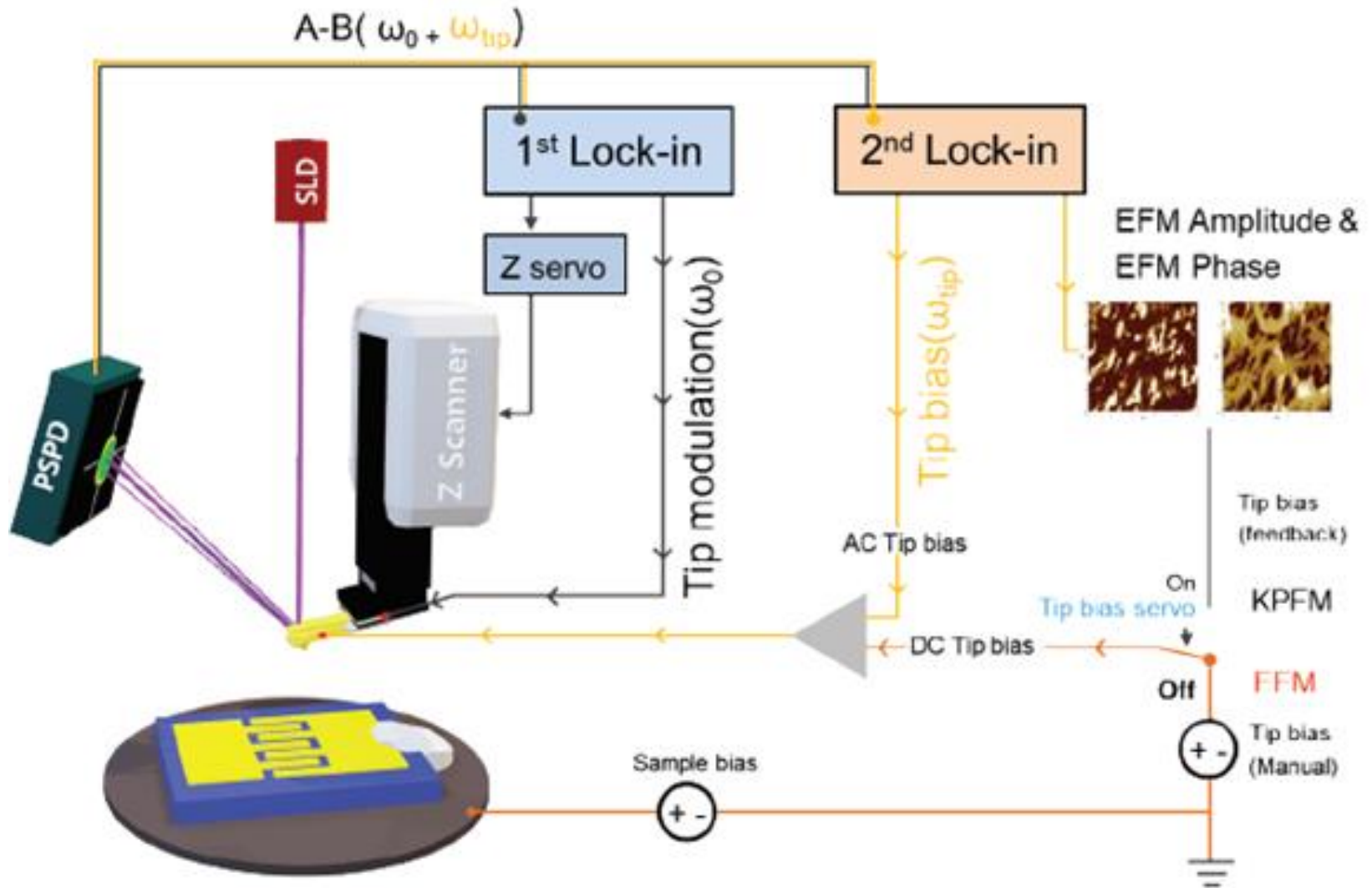
EFM Phase (using lock-in 2, Single pass)



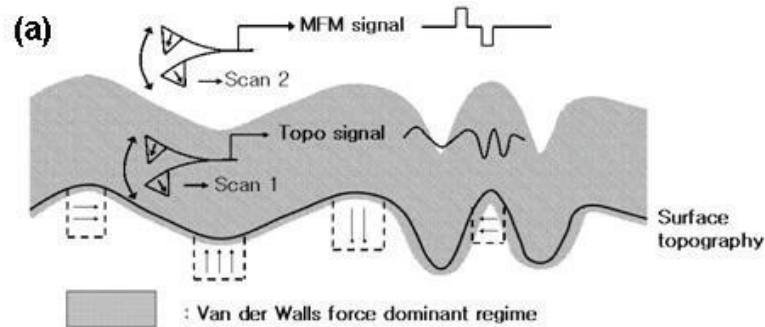
jeden skan

Mechanical oscillation in resonance frequency for topography + Electrical tip bias in AC frequency for EFM signal

EFM – jeden skan



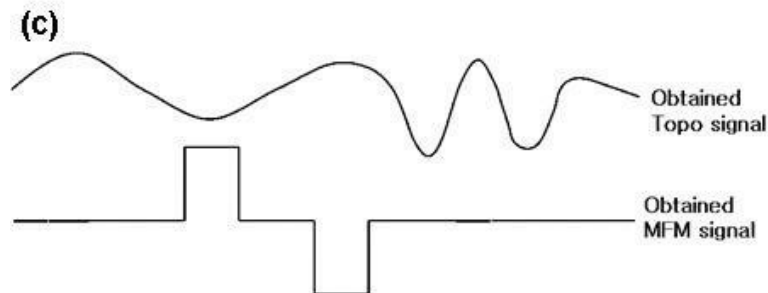
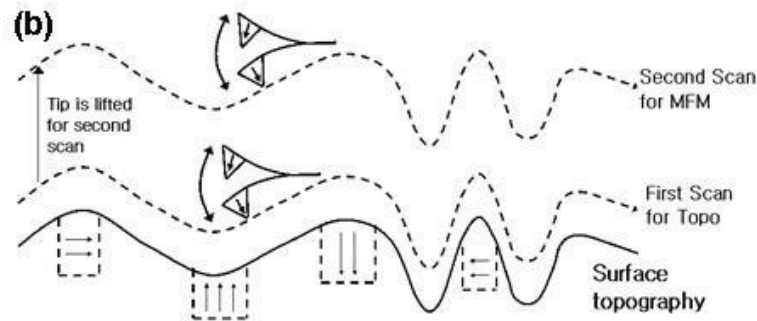
Pomiar pola magnetycznego (MFM)



**Ostrze pokryte warstwą ferromagnetyka.
Próbka magnetyczna.**

Metoda pomiaru:

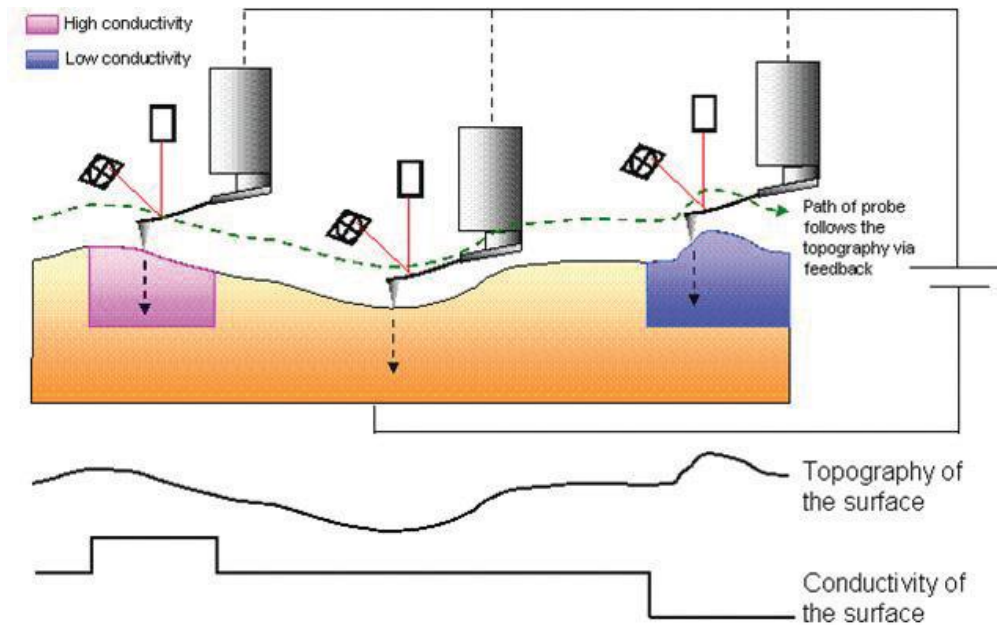
- Zasięg oddziaływań
- Dwa skany



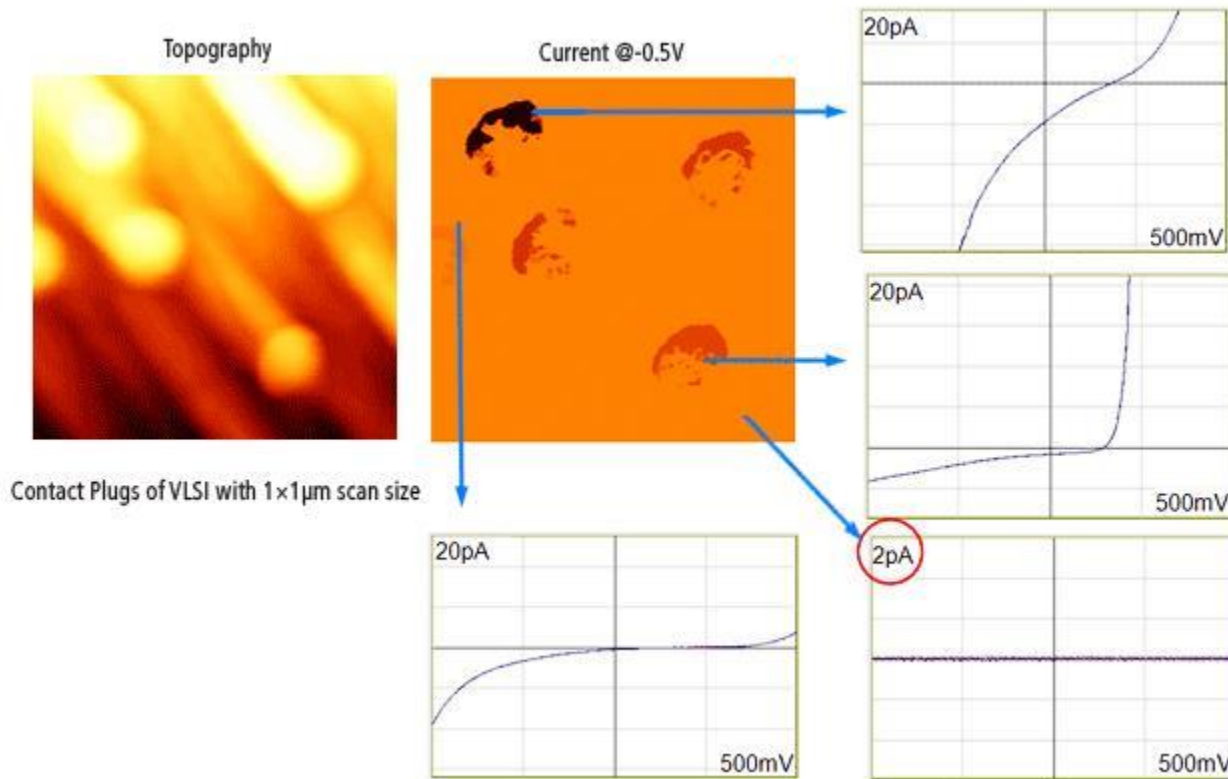
Conductive FM

Praca w trybie kontaktowym ze stałą siłą (stałe ugięcie).

Ostrze jest pokryte warstwą przewodzącą (Au, Pt), pomiędzy ostrze i próbkę przykładane jest napięcie stałe. Mierzony jest prąd płynący między próbką a ostrzem, podobnie jak w STM.



I-V w nanoskali

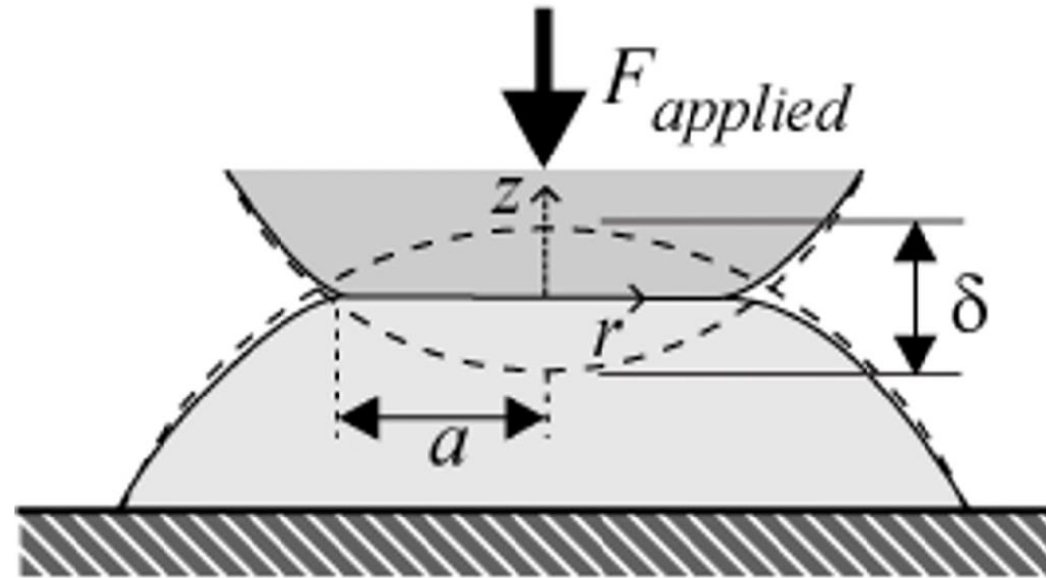


<https://www.parksystems.com/index.php/park-spm-modes/94-electrical-properties/234-i-v-spectroscopy>

What is the resolution of AFM?

Lateral resolution: depends!

Lateral resolution will depend on tip radius, sample stiffness, and applied load



For $F \sim 1$ nN and $r \sim 10$ nm:

$2a \sim 1$ nm, $\delta \sim 0.25$ Å for Si on Si ($E \sim 100$ GPa)

$2a \sim 3$ nm, $\delta \sim 0.2$ nm on glassy polymer ($E \approx 2$ GPa)

$2a \sim 10$ nm, $\delta \sim 2.5$ nm on rubbery polymer ($E \approx 100$ MPa)

Park System XE-70



Stacja XE-70 STM



Monitory



Oświetlacz

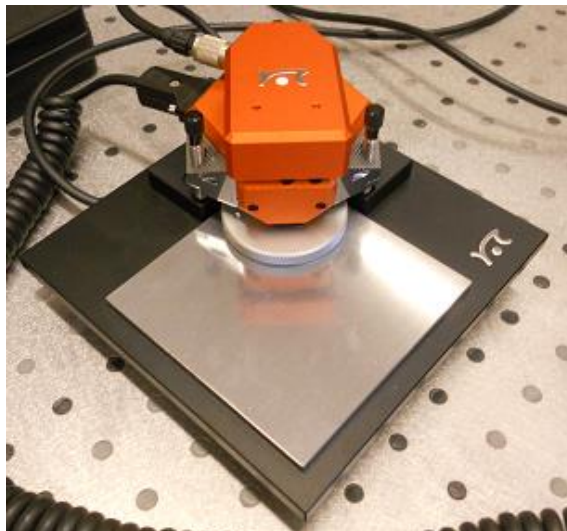


Kontroler AFM



Komputer

Nanosurf Easy Scan 2



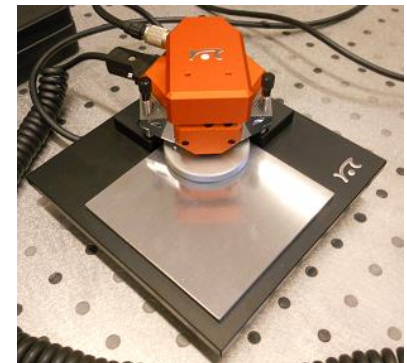
Park System XE-70

- Rozdzielczość
 - Poprzeczna
(5x5 μm) 0,76 \AA
 - Pionowa
(0,85 μm) 0,125 \AA



Nanosurf Easy Scan 2

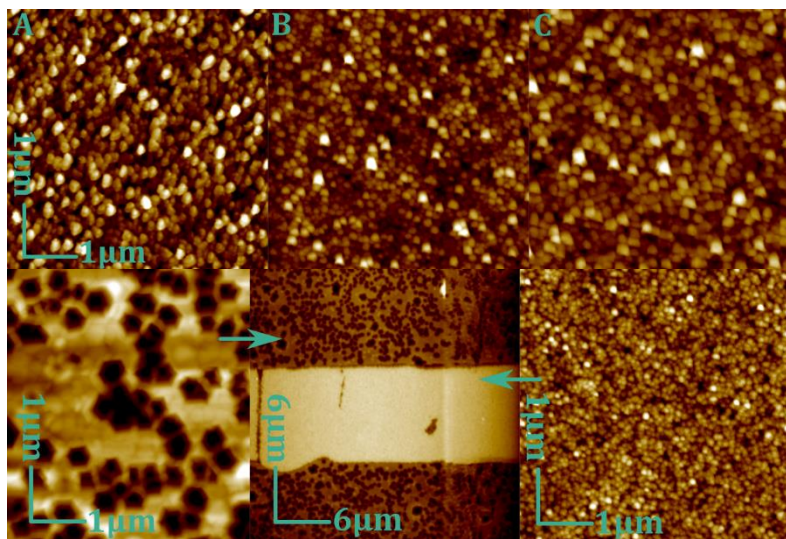
AFM Scan Head:	10 μm	70 μm	110 μm
Maximum Scan range ¹⁾	10 μm	70 μm	110 μm
Maximum Z-range	2 μm	14 μm	22 μm
Drive resolution Z ²⁾	0.027 nm	0.21 nm	0.34 nm
Drive resolution XY ²⁾	0.15 nm	1.1 nm	1.7 nm



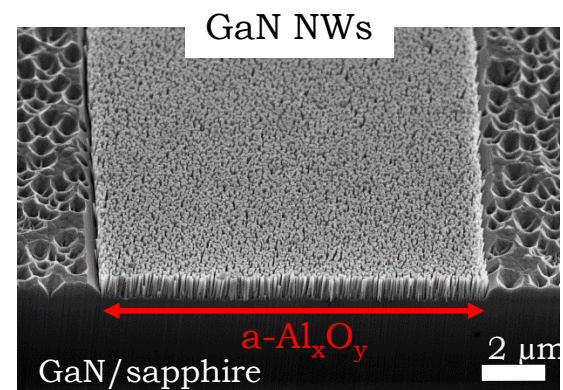
AFM w NLTK

Nanodruty GaN

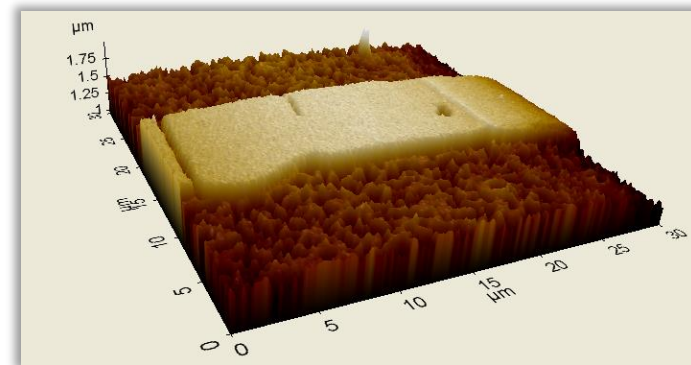
AFM



SEM



AFM

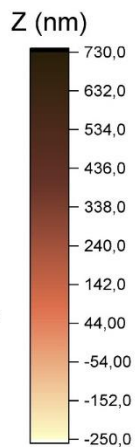
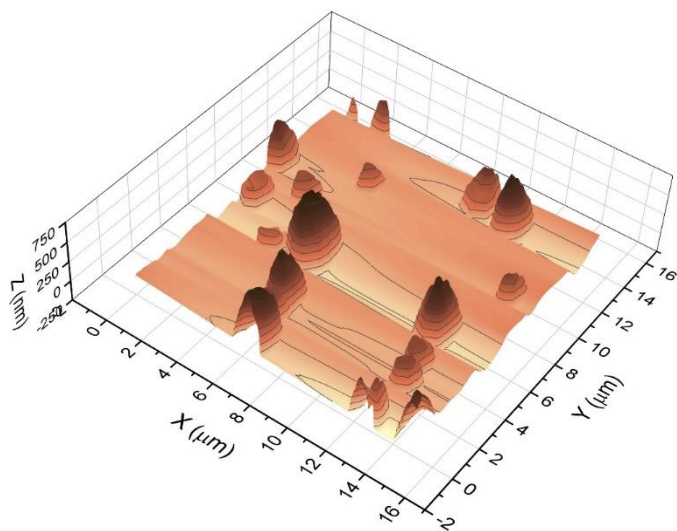


Próbka	Koncentracja nanodrutów (μm^{-2})	Średnica nanodrutów (μm)	Wysokość (nm)
A	42	0.10-0.25	160
B	60	0.10-0.20	80
C	33	0.15-0.25	60
D	92	0.05-0.15	40

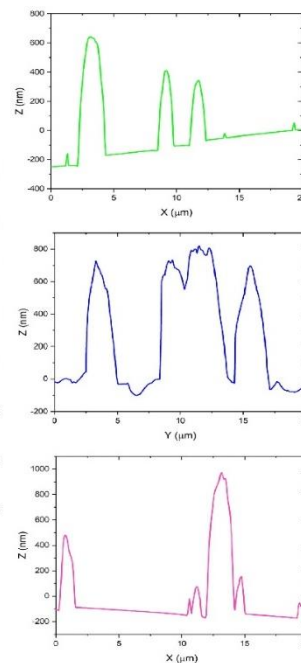
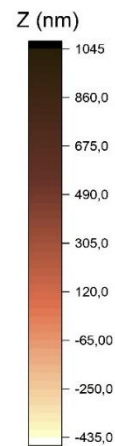
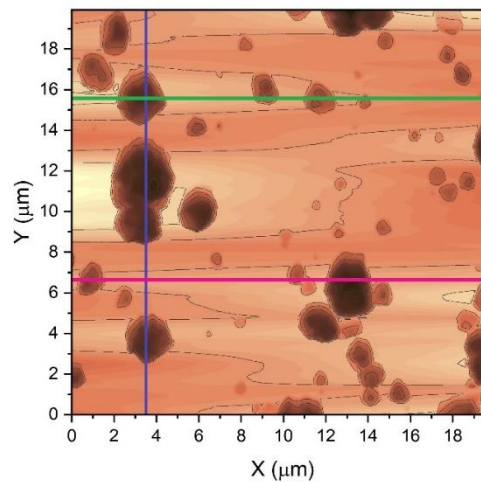
AFM w NLTK

Mikrokryształy GaAs na Si

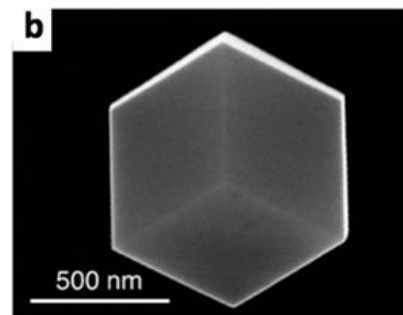
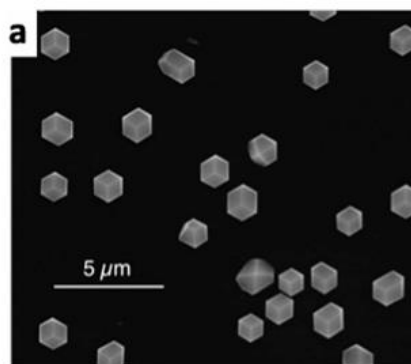
Próbka z mikrokryształami GaAs #287 - V/III = 6



Próbka z mikrokryształami GaAs #283 - V/III = 10



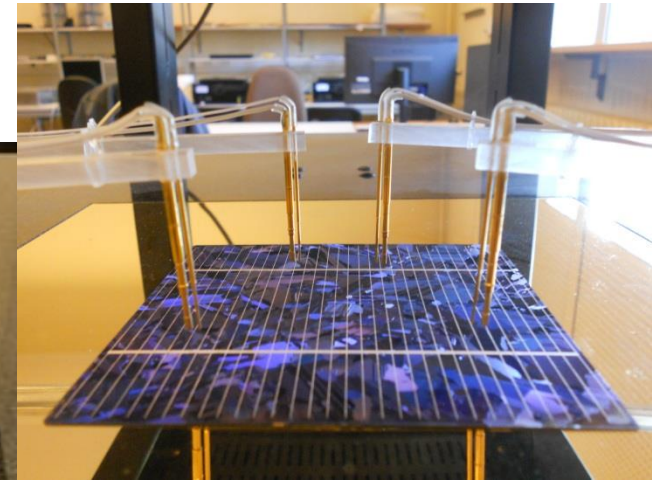
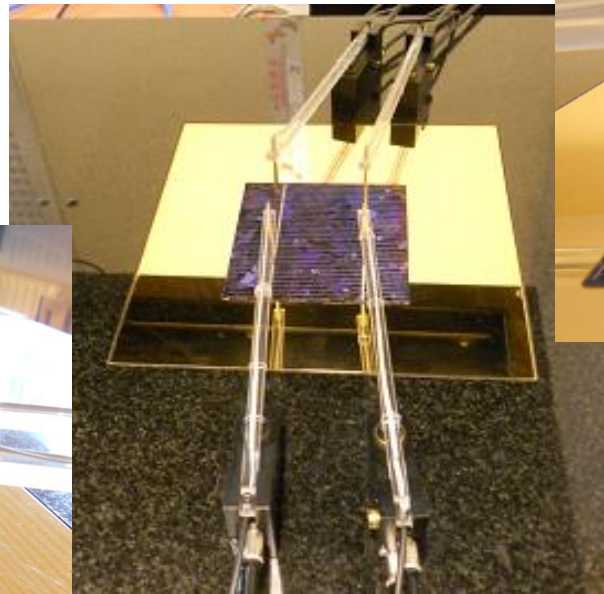
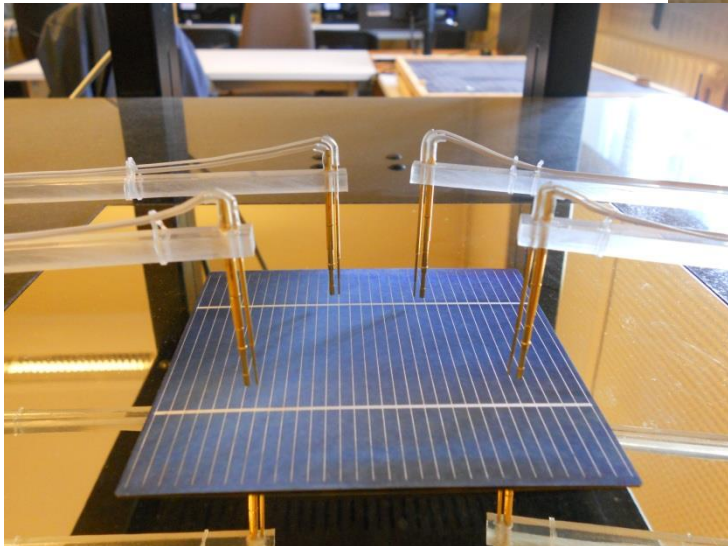
SEM



Sztuczne Słońce

Pomiar charakterystyki I-V na symulatorze słońca

Solar Cells I-V Curve Tracer



Pomiar charakterystyki I-V na symulatorze słońca

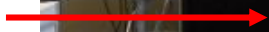
Układ do pomiaru charakterystyk prądowo-napięciowych na symulatorze słońca składa się z:

- komputera z monitorem i oprogramowaniem
- kontrolera temperatury
- lampy symulującej Słońce z oprogramowaniem (Solar Simulator)
- pompy próżniowej
- stolika pomiarowego z głowicami

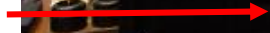
Pomiar charakterystyki I-V na symulatorze słońca



Monitor



Komputer



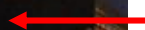
Lampa
symulująca
słońce



Stolik z
głowicami

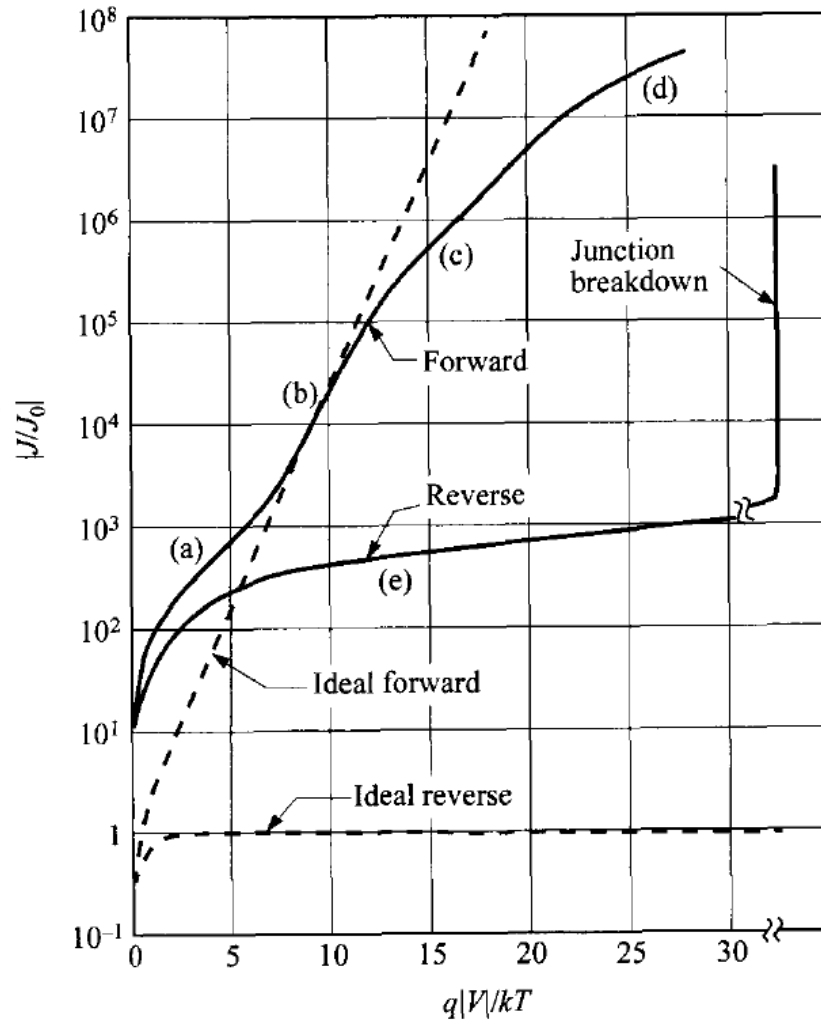


Kontroler
temperatury



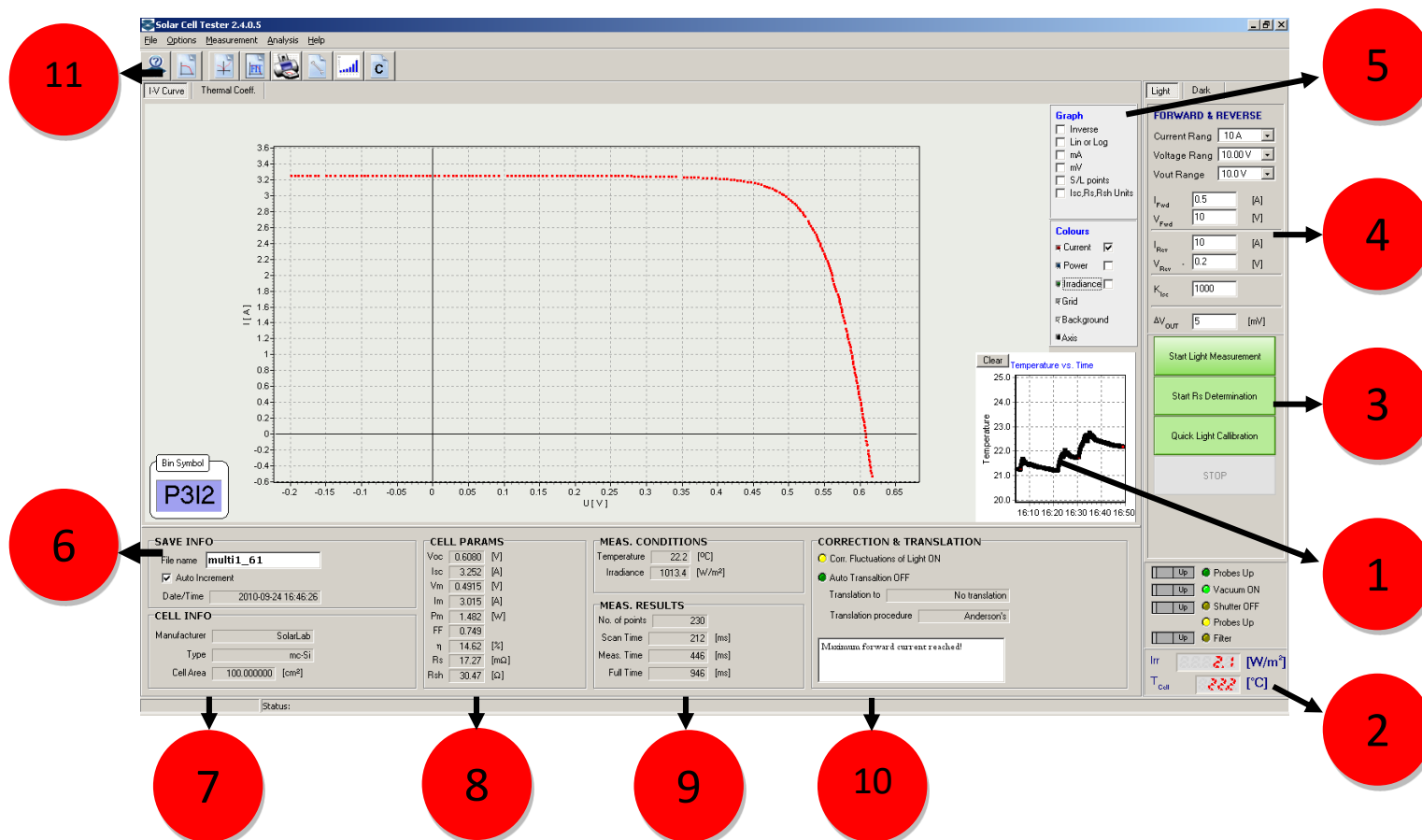
Charakterystyka ciemna I-V w rzeczywistym złączu p-n

- (a) prąd rekombinacji,
- (b) prąd dyfuzyjny,
- (c) prąd przy dużym napięciu w kier. przewodzenia („high injection”)
- (d) wpływ rezystancji szeregowej,
- (e) Prąd upływu

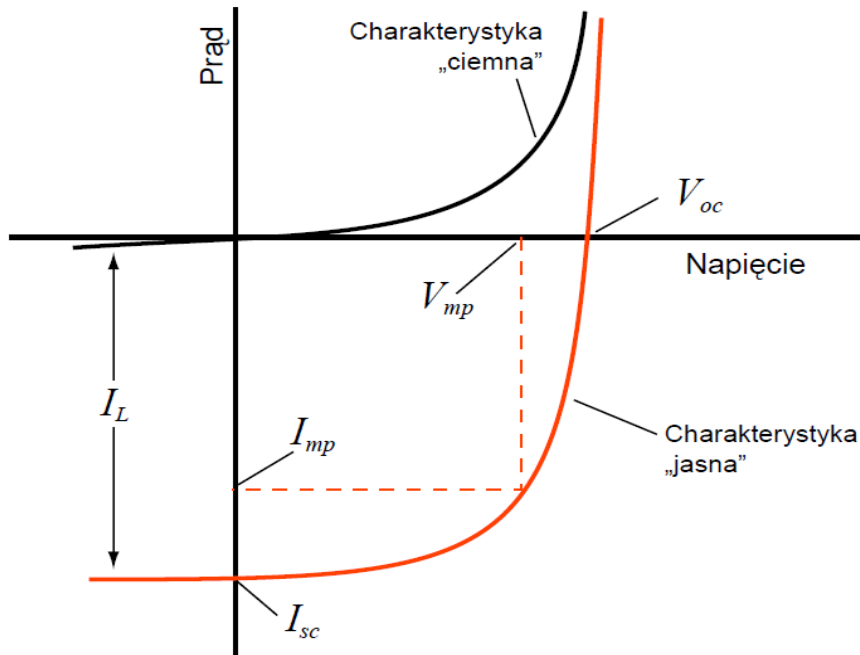


Pomiar charakterystyki I-V na symulatorze słońca

Opis programu Solar Cell I-V Curve Tracer



Sprawność ogniwa



Współczynnik wypełnienia

$$FF = \frac{j_{mp} \cdot V_{mp}}{j_{sc} \cdot V_{OC}}$$

W przypadku idealnej diody

$$FF = \frac{v_{OC} - \ln(v_{OC} + 0.72)}{v_{OC} + 1} \quad *$$

gdzie $v_{OC} = V_{OC} \frac{q}{kT}$

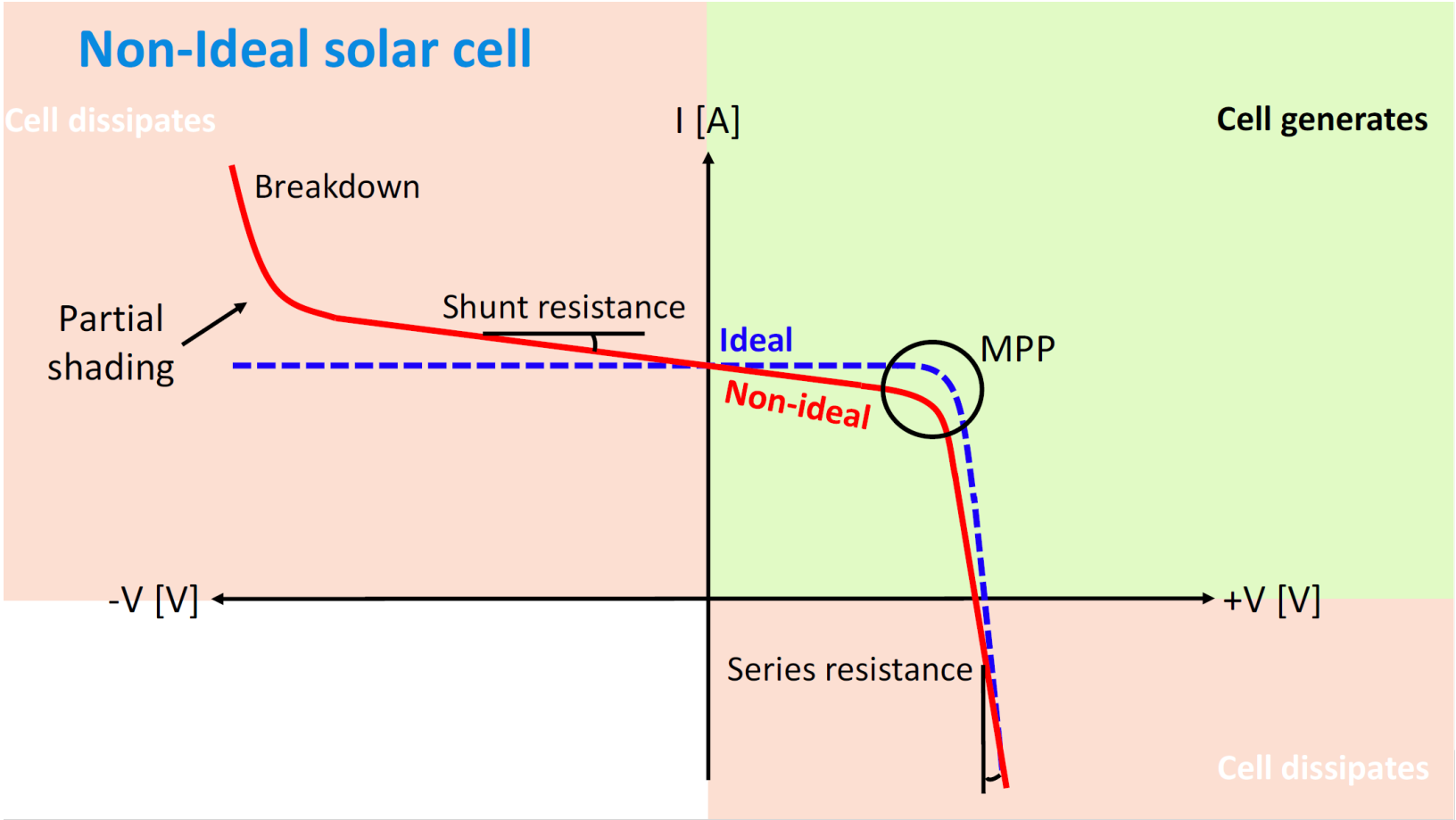
(równanie * jest słuszne, gdy $v_{OC} > 10$)

Sprawność

$$\eta = \frac{P_{max}}{I} = \frac{j_{mp} \cdot V_{mp}}{I} = \frac{FF \cdot j_{sc} \cdot V_{OC}}{I}$$

I – natężenie promieniowania padającego na ogniwo ($AM1.5, 1000W/m^2$)

Ogniwo rzeczywiste



Zależność prądu zwarcia i napięcia rozwarcia od natężenia oświetlenia

$$\bullet I_{sc} = qN_{ph}(E_g) = qP/h\nu \sim P$$

Prąd ciemny płynący przez złącze p-n spolaryzowane napięciem V_{oc} , wyraża się równaniem:

$$I_d = I_0 \left[\exp\left(\frac{qV_{oc}}{kT}\right) - 1 \right]$$

Ten prąd równoważy w rozwartym oświetlonym złączu p-n maksymalny prąd fotogeneracji, czyli I_{sc} :

$$I_{sc} = I_d = I_0 \left[\exp\left(\frac{qV_{oc}}{kT}\right) - 1 \right]$$

Po przekształceniu:

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_{sc}}{I_0} + 1\right) \approx \frac{kT}{q} \ln \frac{I_{sc}}{I_0}$$

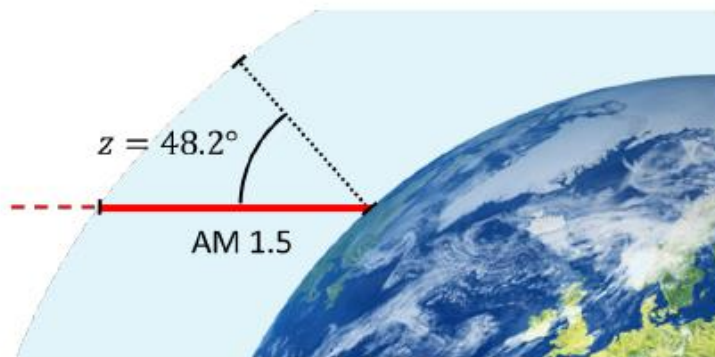
Ponieważ $I_{sc} \sim P$, to

$$\bullet V_{oc} \sim \ln P$$

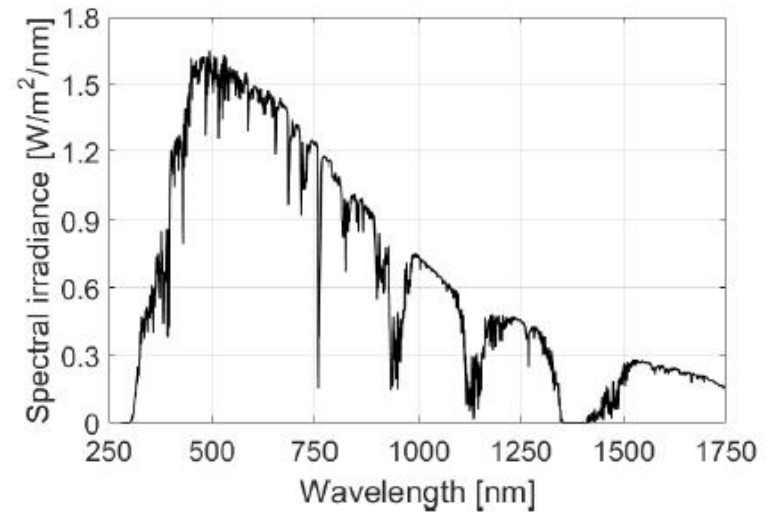
Symulator Słońca

Standard Test Conditions (STC)

1. AM1.5 spectrum



2. 1000 W/m^2



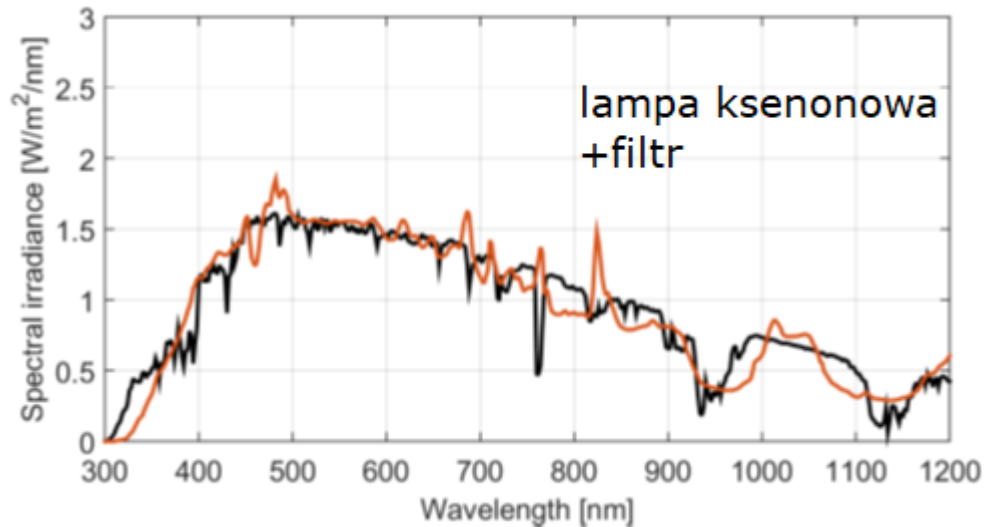
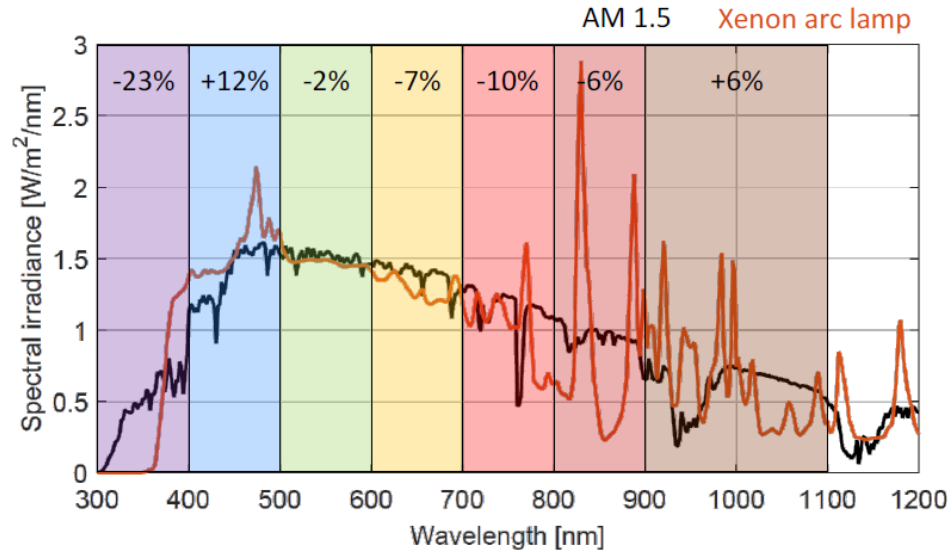
3. temperatura ogniwa 25°C

Klasyfikacja symulatorów

IEC 60904-9 Class

	Class A	Class B	Class C
1. Zgodność spektrum	$\pm 25\%$	$\pm 40\%$	+100%/-60%
2. Jednorodne oświetlenie	$\leq 2\%$	$\leq 5\%$	$\leq 10\%$
3. Brak stabilności czasowej	$\leq 2\%$	$\leq 5\%$	$\leq 10\%$

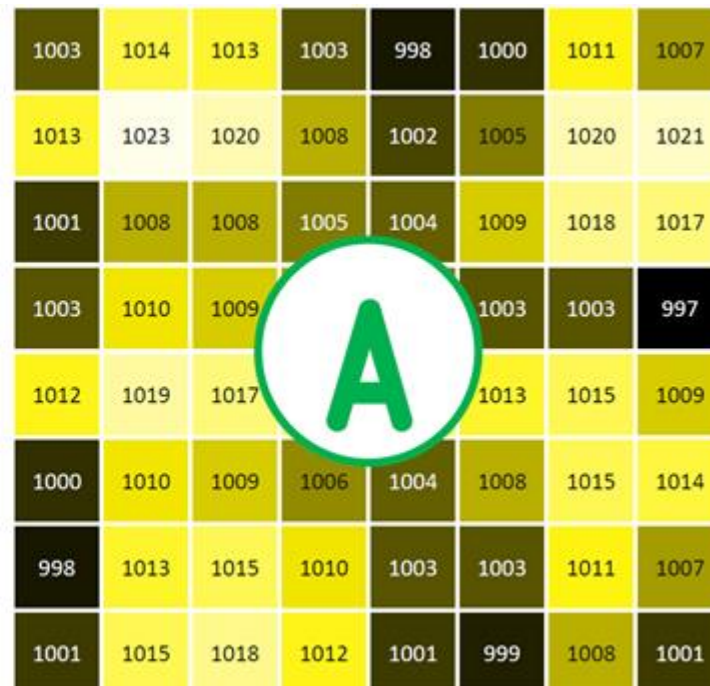
Dopasowanie spektralne – lampa Xe



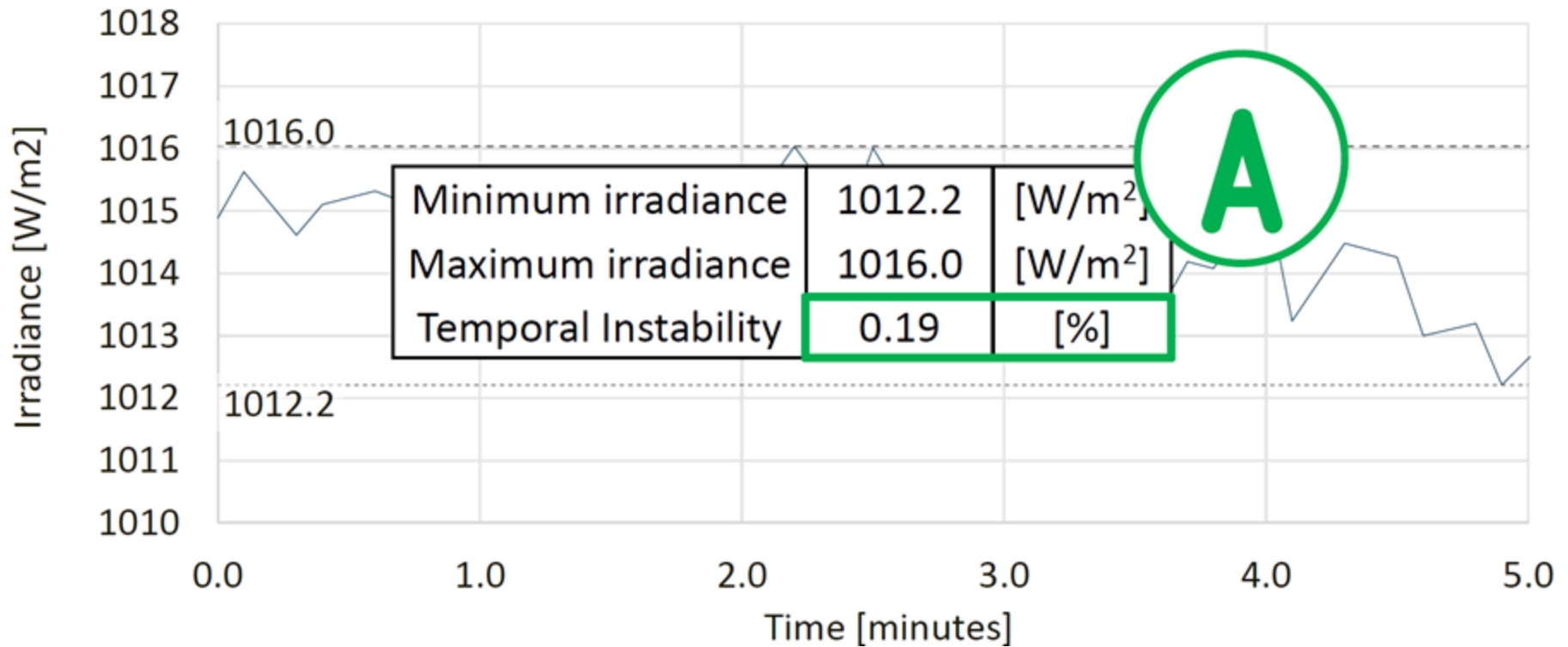
Jednorodne oświetlenie - przykład

$$\text{Uniformity (\%)} = \frac{\text{Irr}_{\text{max}} - \text{Irr}_{\text{min}}}{\text{Irr}_{\text{max}} + \text{Irr}_{\text{min}}} \cdot 100$$

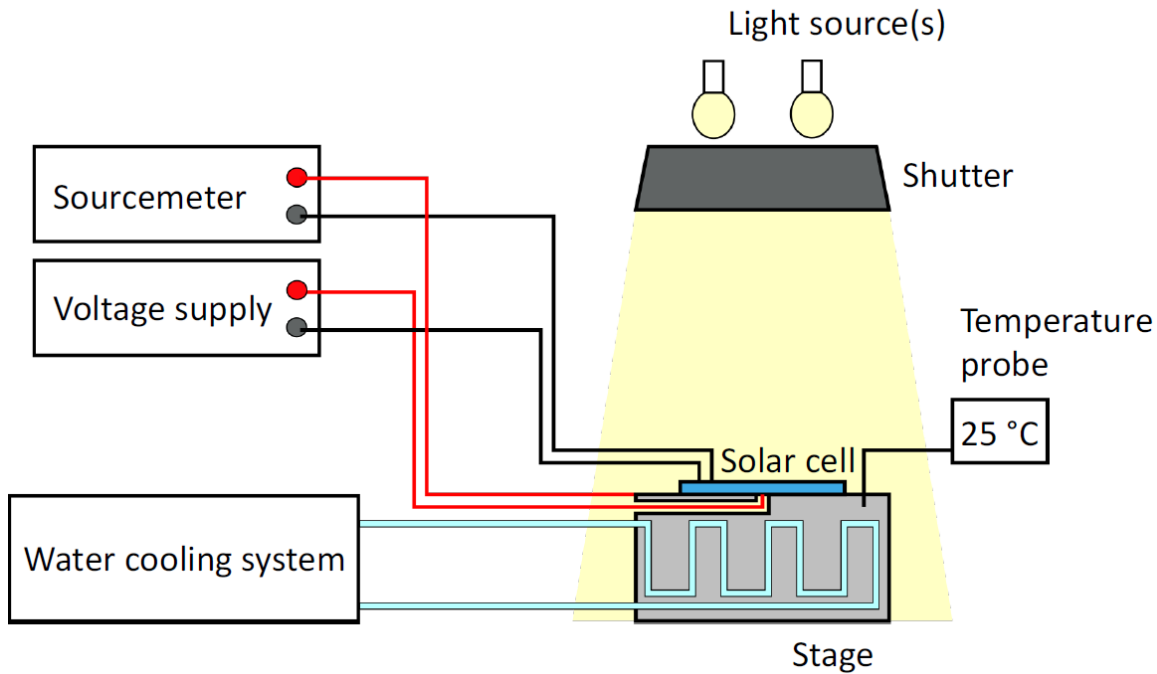
Minimum intensity	997.4	[W/m ²]
Maximum intensity	1023.4	[W/m ²]
Uniformity	1.29	[%]



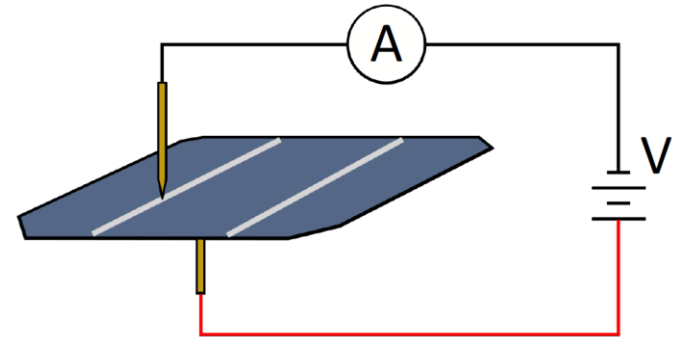
Stabilność w czasie - przykład



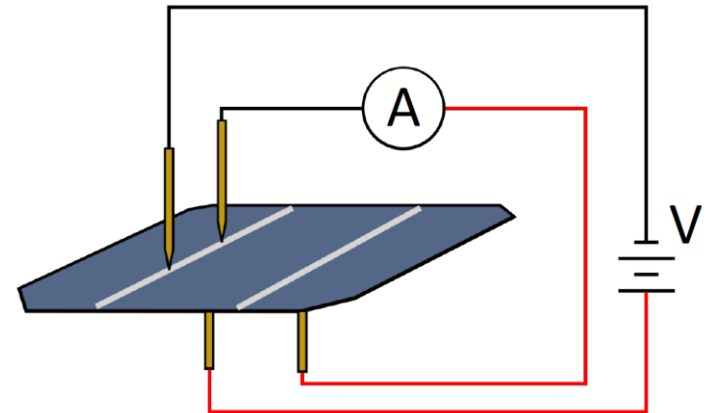
Układ pomiarowy



Sonda dwu-punktowa



Sonda cztero-punktowa



Ogniwo referencyjne

