

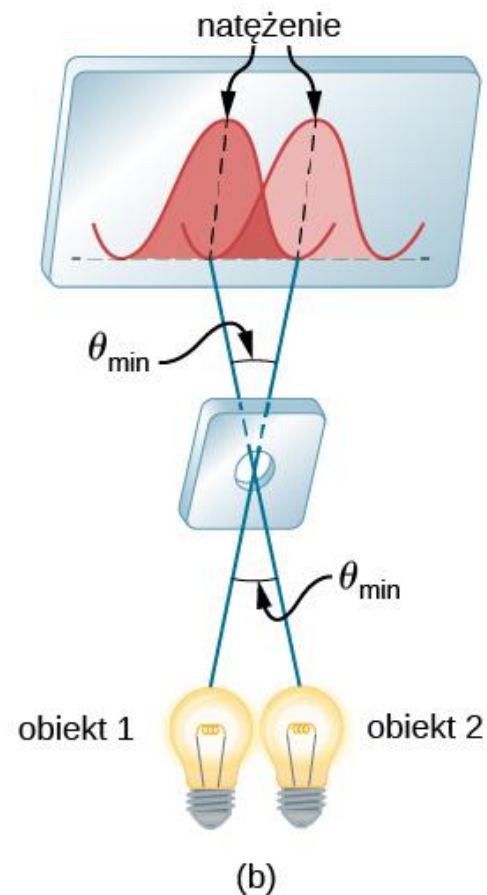
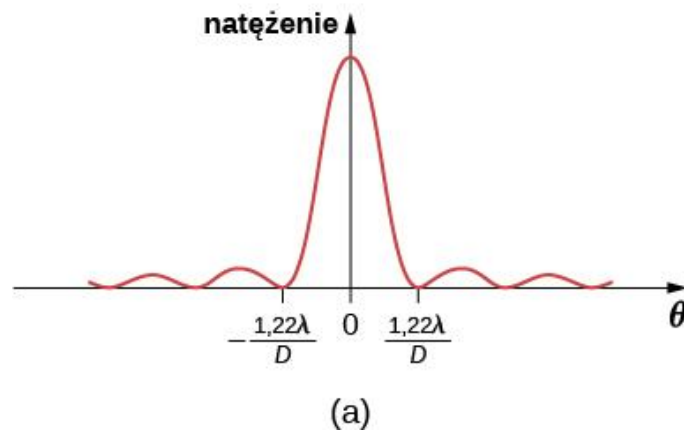
Wykład IV

Zastosowania techniki AFM do badania struktur półprzewodnikowych.

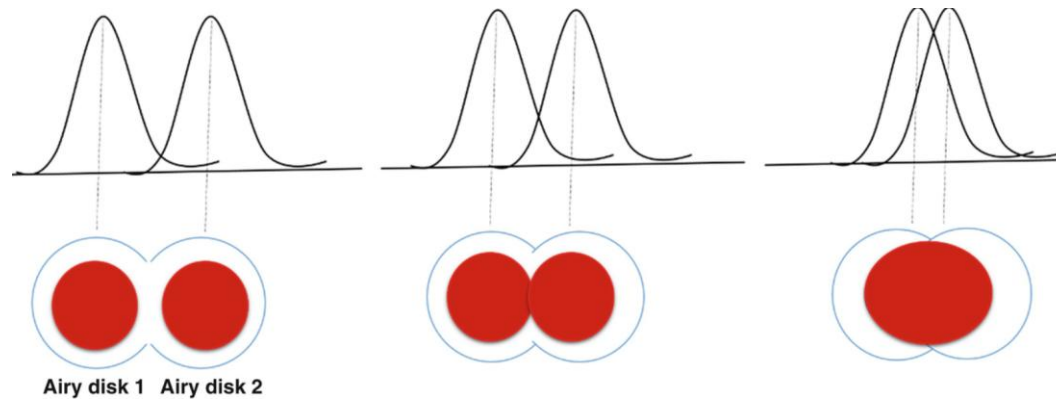
Sztuczne słońce

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 $\theta = 1,22\lambda/D$.



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],

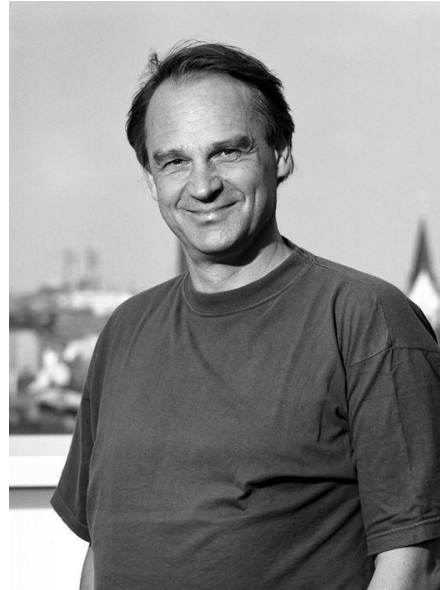
e – ładunek elektryczny elementarny [C],

V – napięcie pola elektrycznego [V].

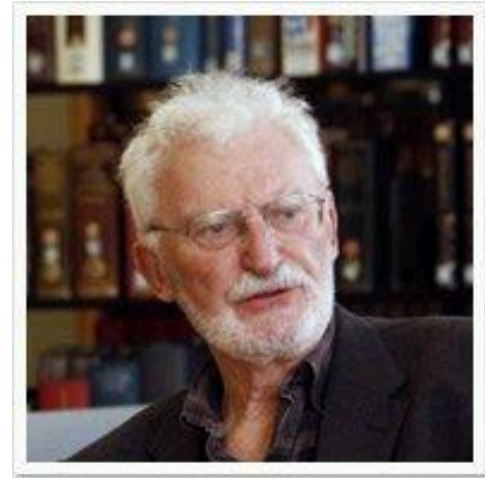
Dla $U = 300$ kV, długość fali elektronów $\lambda = 0,00197$ nm

Historia

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



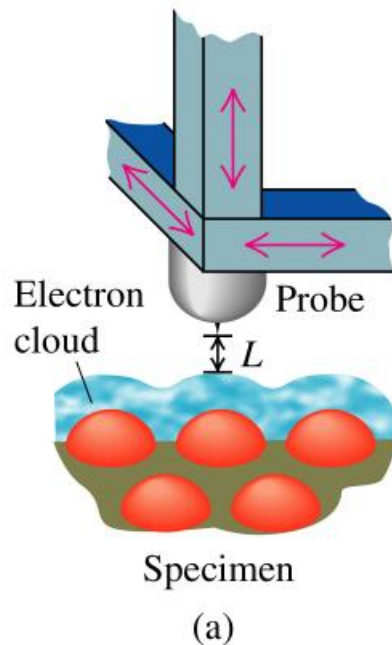
Gerd Binning



Heinrich Rohrer

STM Scanning Tunneling Microscope

Skaningowy mikroskop tunelowy (STM)



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

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

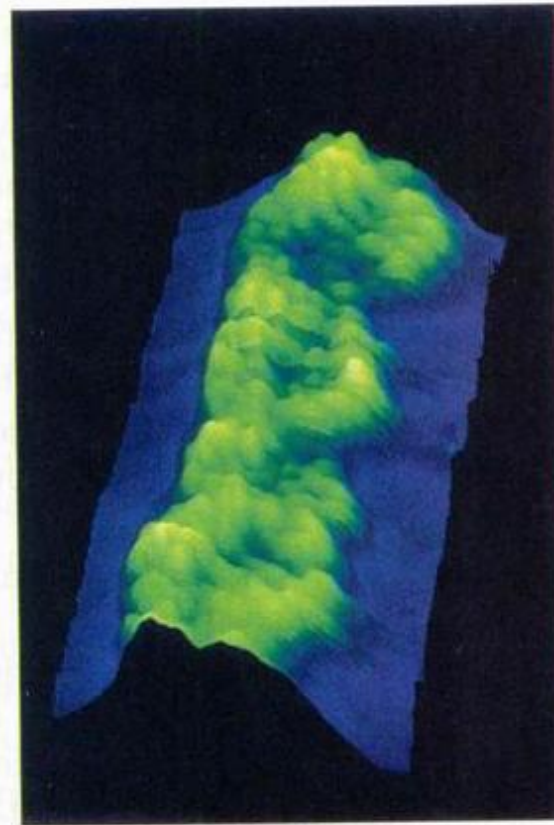
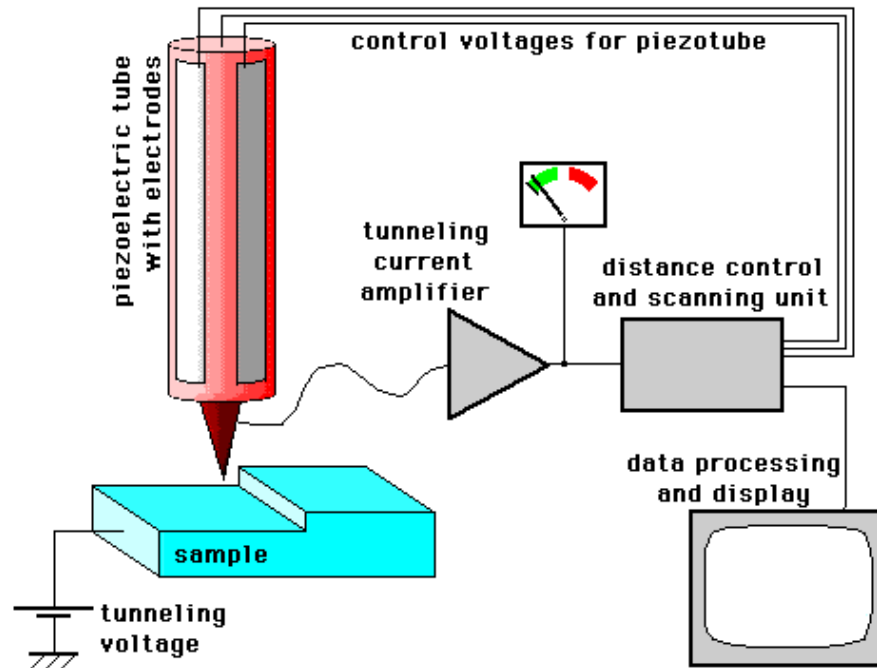


FIGURE 39-18 Image of cellular DNA, magnified about 2 million times, taken with a scanning tunneling microscope. Three turns of the DNA double helix can be seen in this false-color image.

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 przymocowane 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.

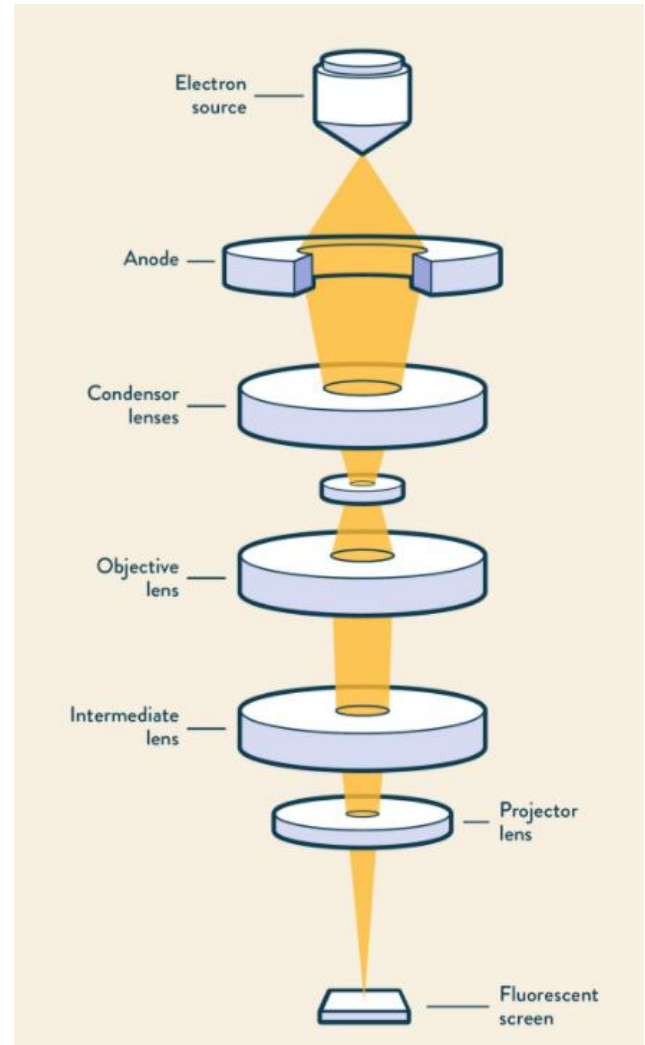
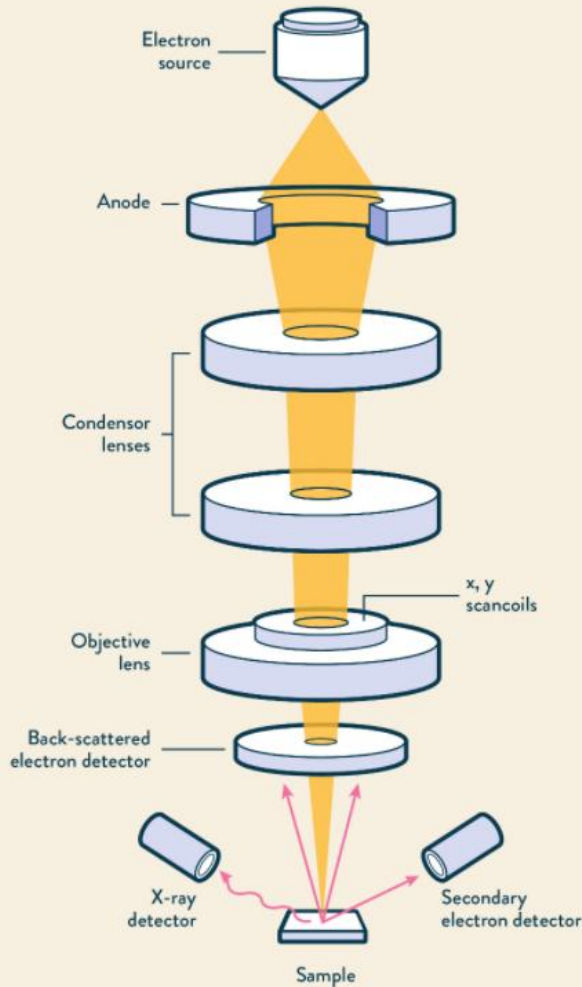
SEM vs TEM

SEM i TEM - dyfrakcja

SEM tworzy obraz poprzez wykrywanie odbitych lub wybitych elektronów

TEM wykorzystuje elektrony transmitowane przez próbkę do tworzenia obrazu.

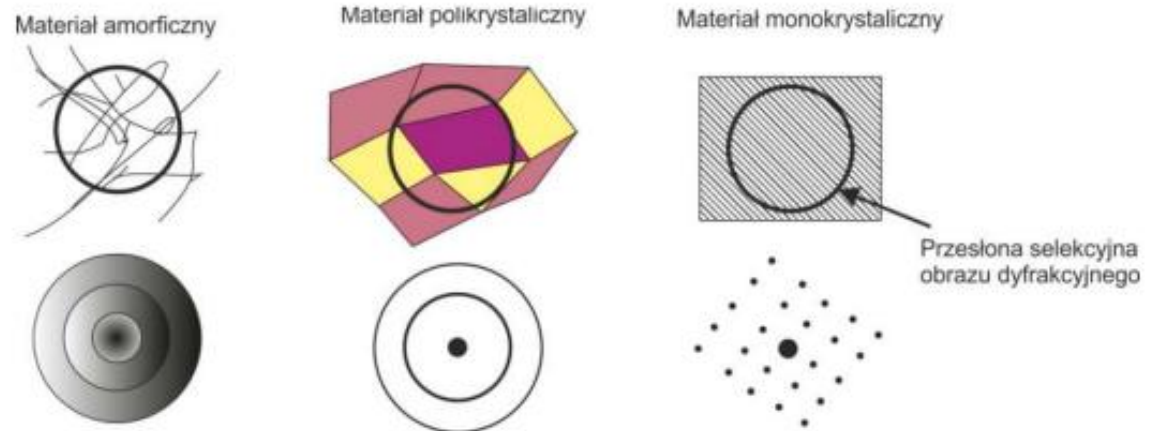
TEM - struktura krystaliczna, morfologia i informacje o stanie naprężenia;
SEM –informacja na temat powierzchni próbki i jej składu.



SEM i TEM

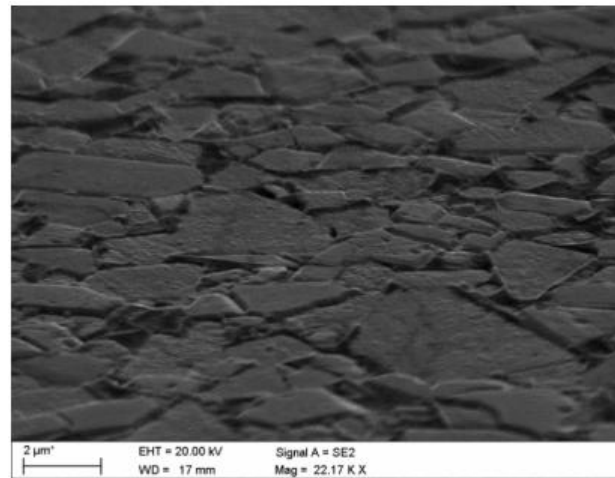
Obrazy otrzymywane z TEM

**Koherentne ugięcie fali
elektronowej na
atomach;
rozpraszanie elastyczne
– bez straty energii**

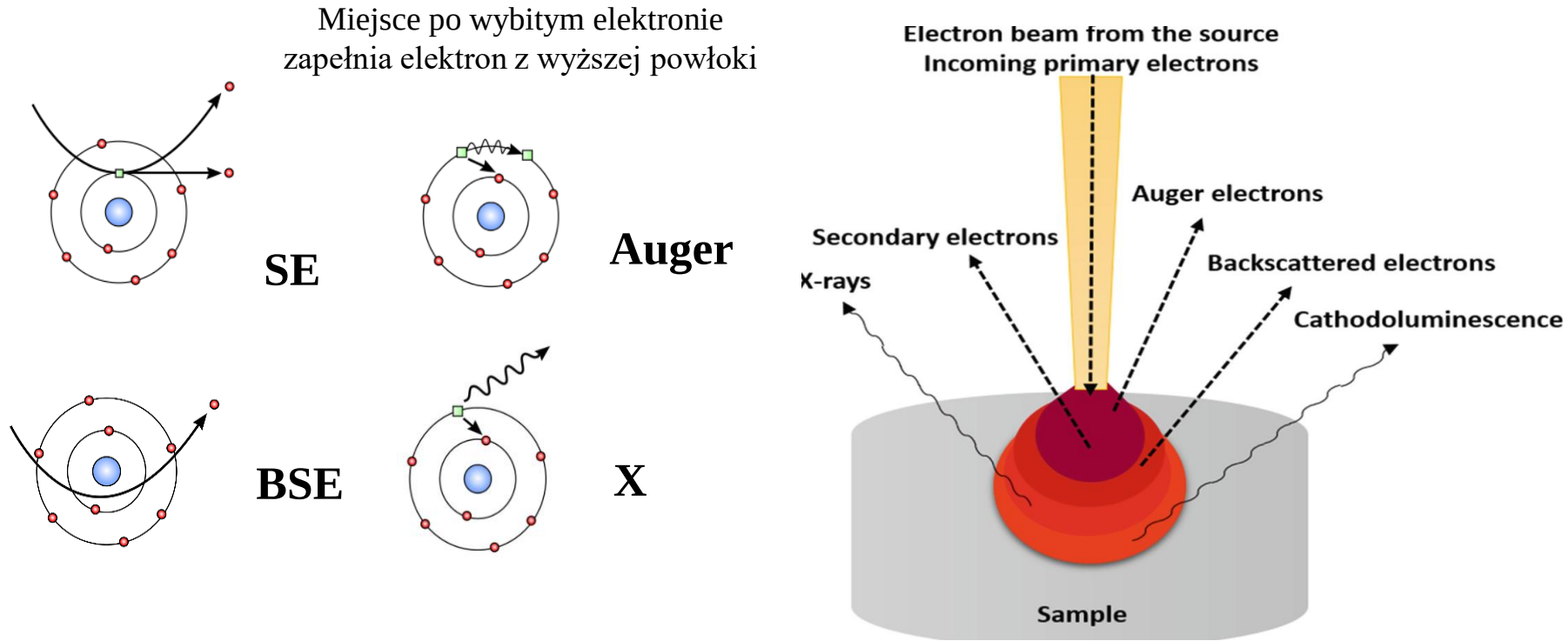


Obraz otrzymywany z SEM (węgiel spiekany)

**rozpraszanie nieelastyczne –
ze stratą energii**



Skaningowy Mikroskop Elektronowy (SEM)



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

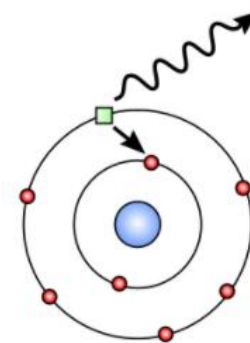
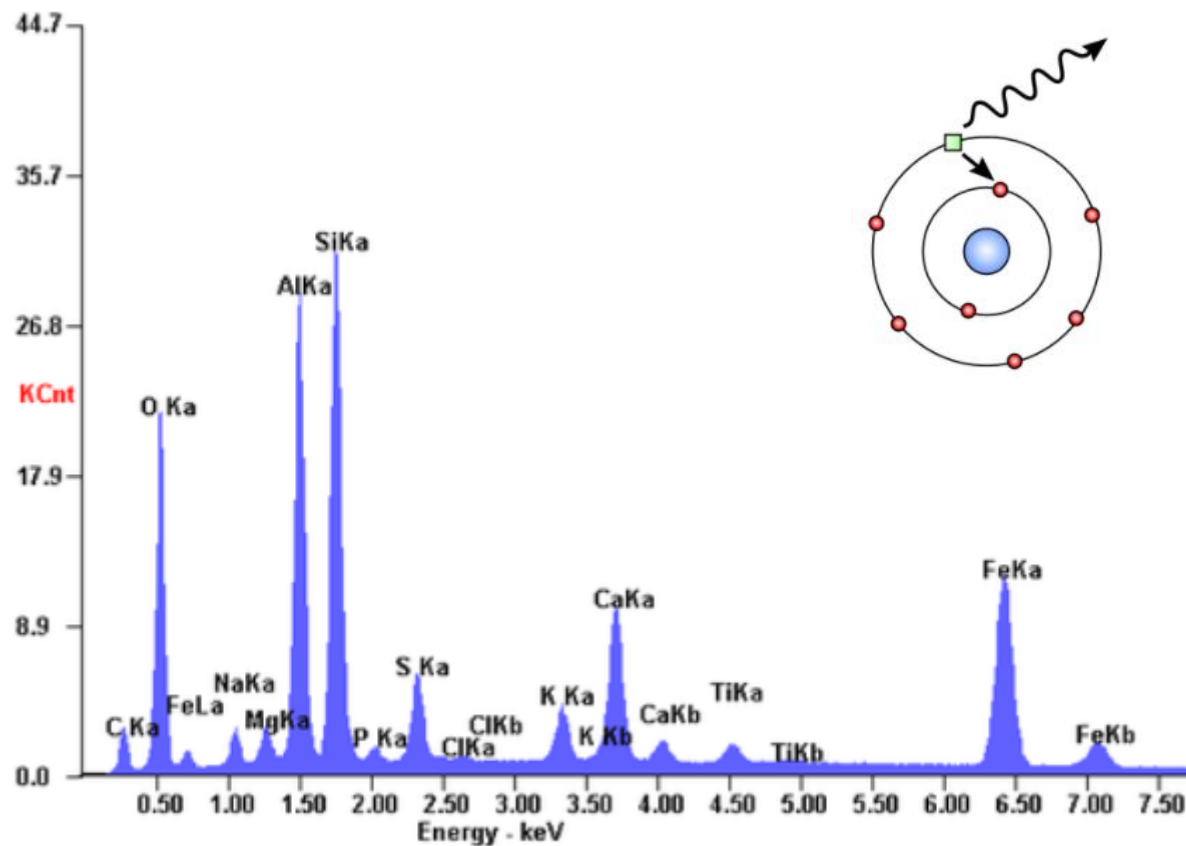
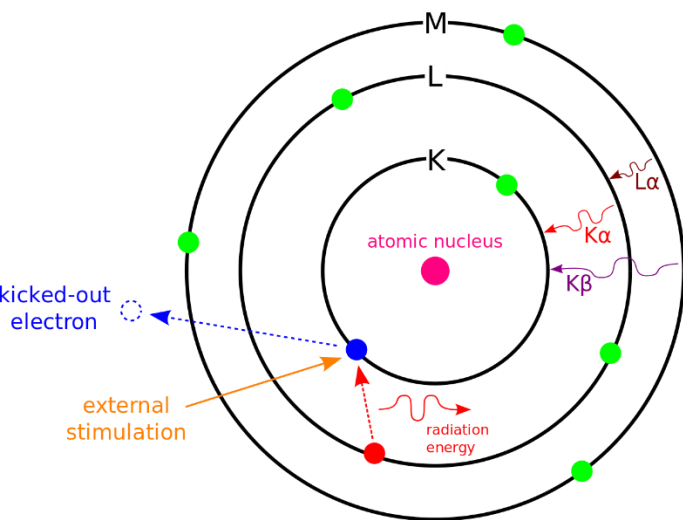
EDS

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 miejsce po wybitym elektronie zajmowane jest przez elektron z powłoki o wyższej energii. Różnica energii elektronu 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.

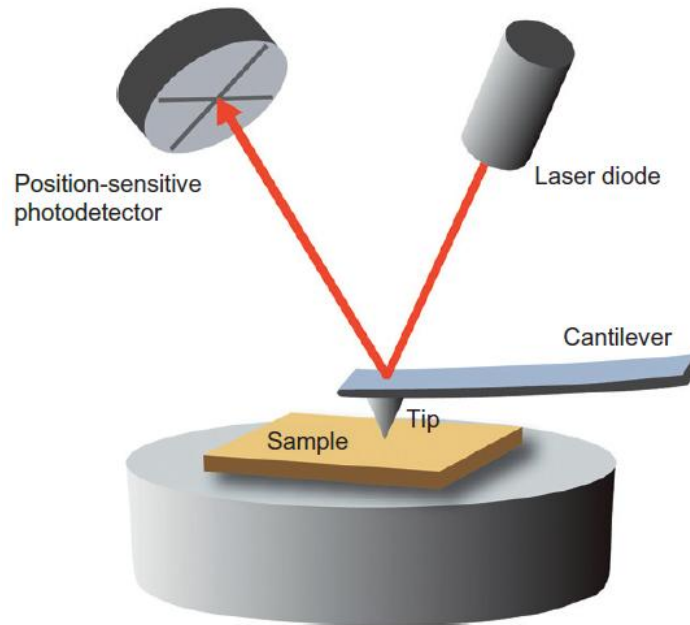
K – powłoka na którą przechodzi elektron
 α , β – powłoka z której przechodzi elektron (L,M)

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
Głębia 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

AFM – zasada działania

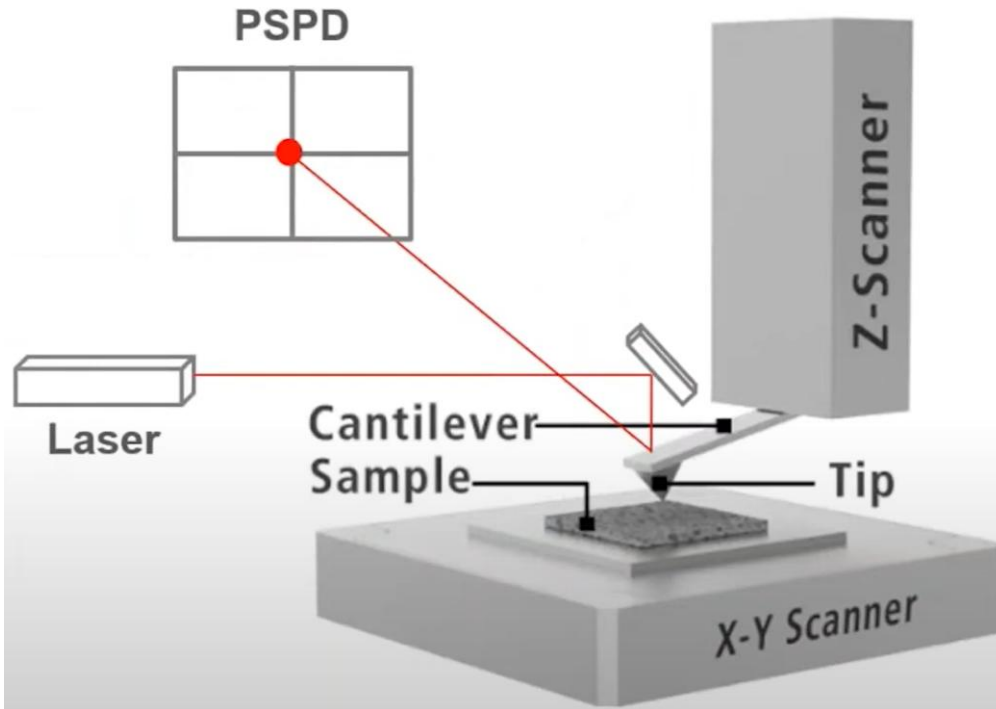
PSPD – Position Sensitive Photodetector – fotodetektor czuły na lokalizację światła



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.

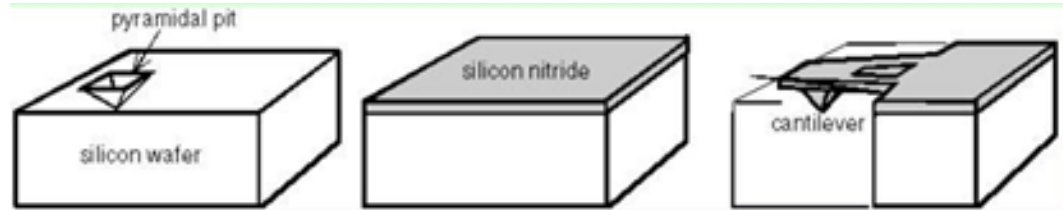
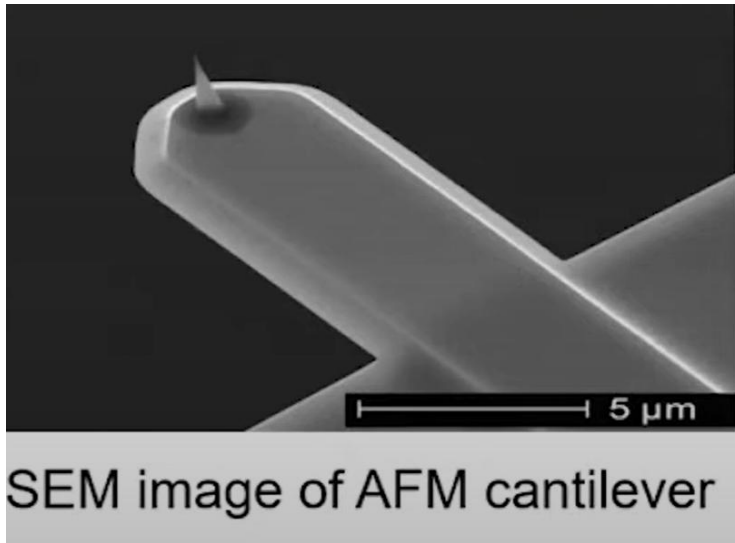
Elementy AFM



Skaner 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

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 Si₃N₄), 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 częstotliwością rezonansową. Promień krzywizny ostrzy wynosi od 10 do 100 nm.

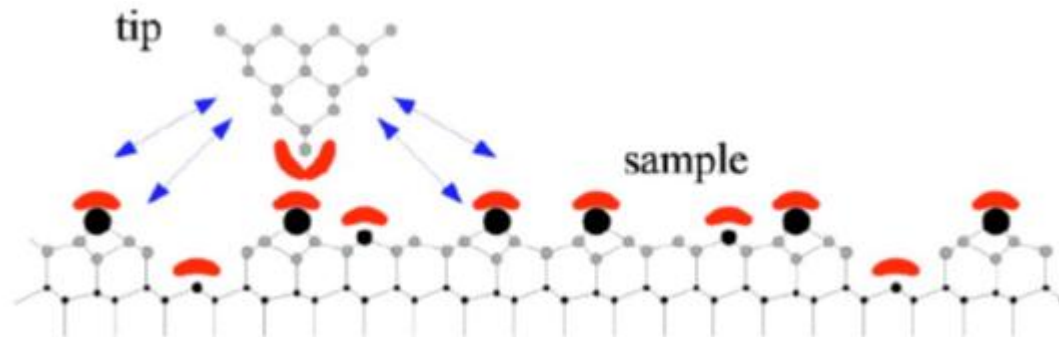
Siły działające na ostrze

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

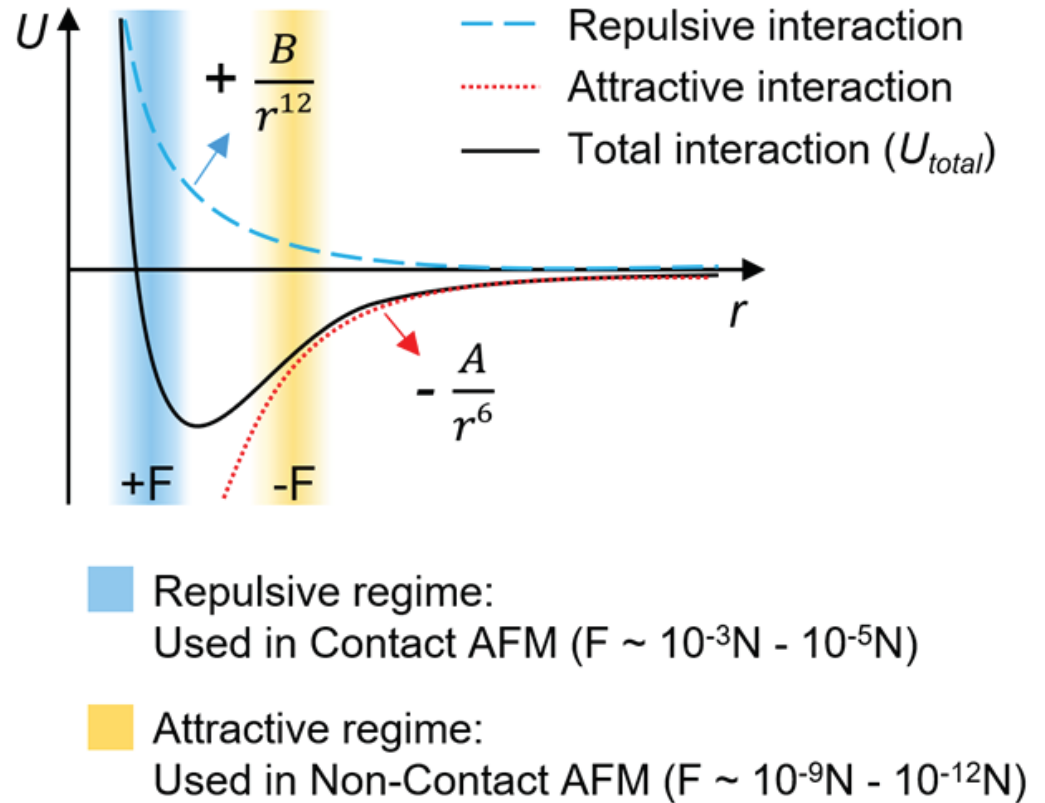
Potencjał Lennarda-Jonesa

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

Potencjał
Przyciągający
(attractive)

Potencjał
Odpychający
(repulsive)

σ - położenie równowagowe



Siły oddziaływania ostrze - próbka

Odpychające

- Siły wynikające z zakazu Pauliego

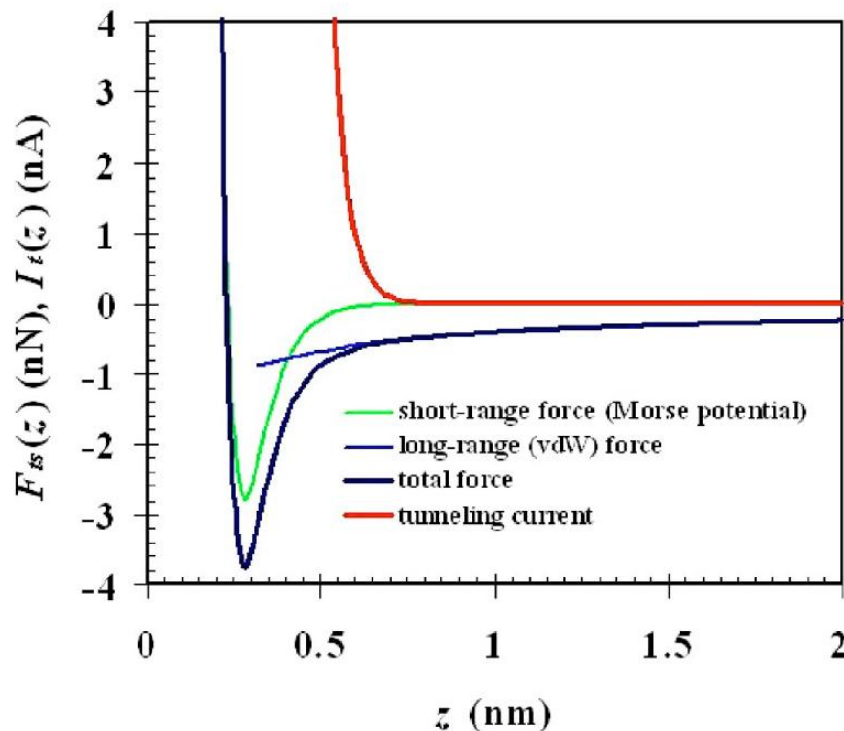
Przyciągające

- 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*

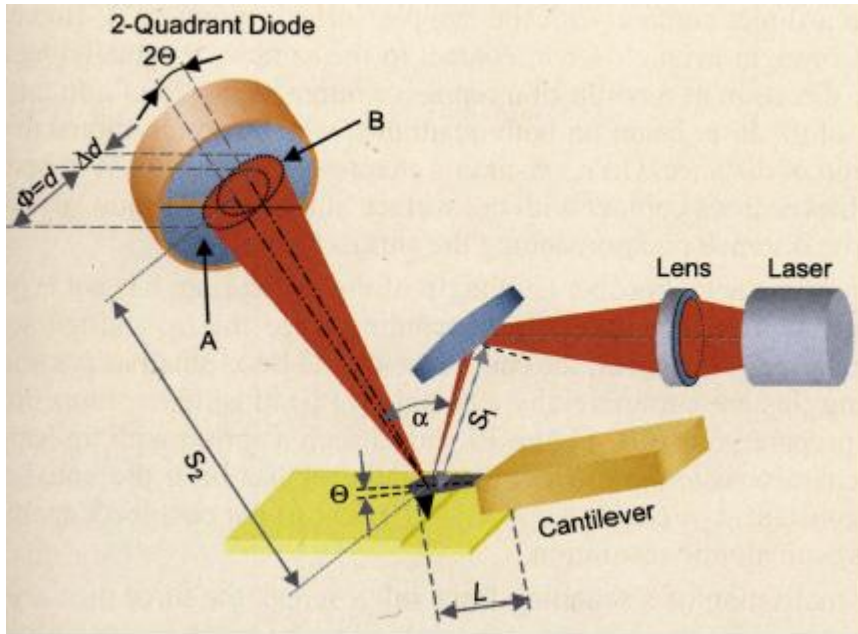
REVIEWS OF MODERN PHYSICS,
VOLUME 75, JULY 2003



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.

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.

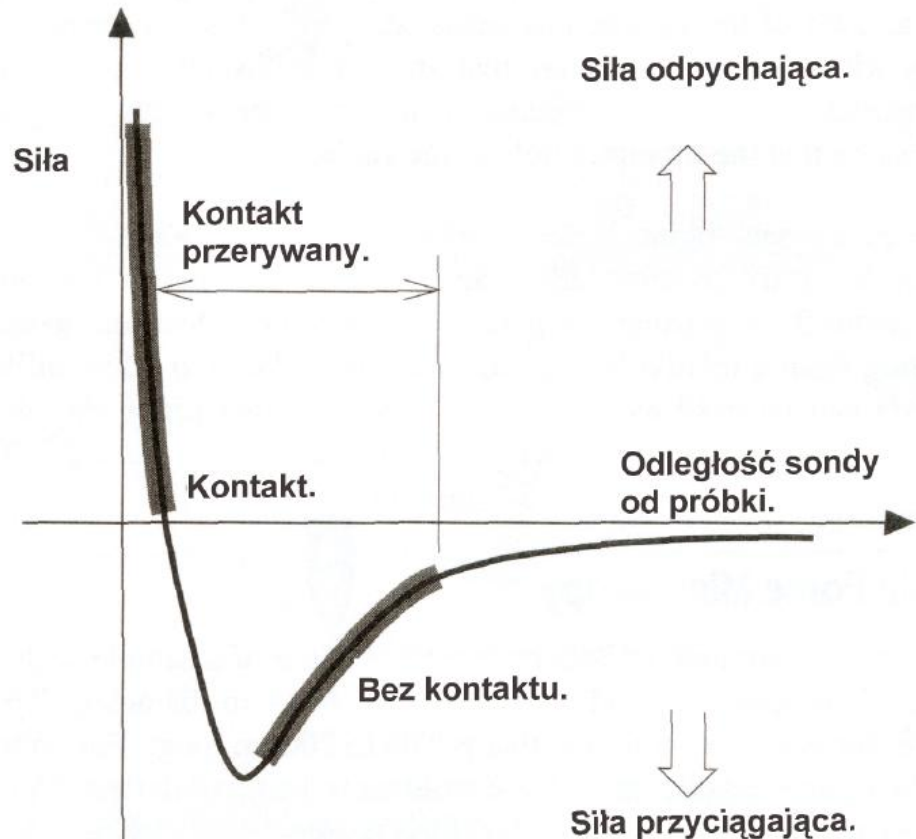
Do monitorowania przemieszczeń dźwigni stosuje się również interferometry.

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)

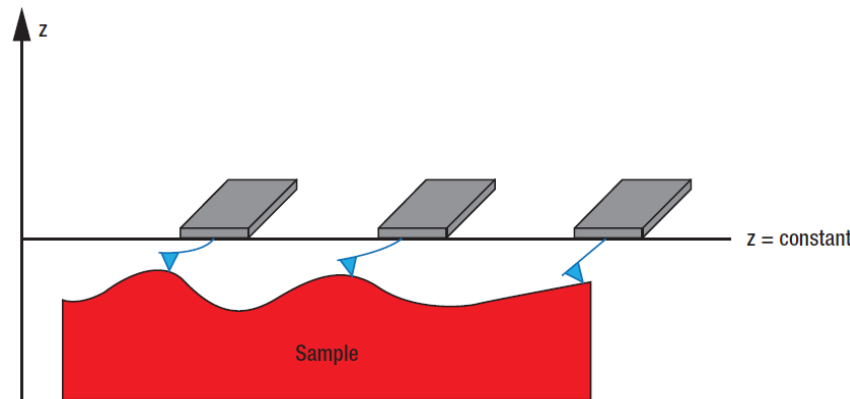


Tryb kontaktowy – stała wysokość

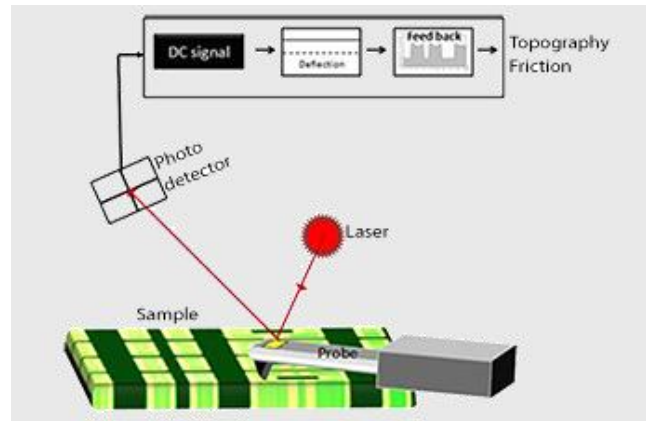
W trybie kontaktowym, ostrze pozostaje w kontakcie z powierzchnią próbki (odległość ostrze – próbka $< 1\text{nm}$). AFM pracuje w reżimie sił odpychania. Wadą tej metody jest możliwość uszkodzenia próbki lub ostrza. Siła w tym trybie jest rzędu 10^{-8}N do 10^{-6}N

- 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 wysokość



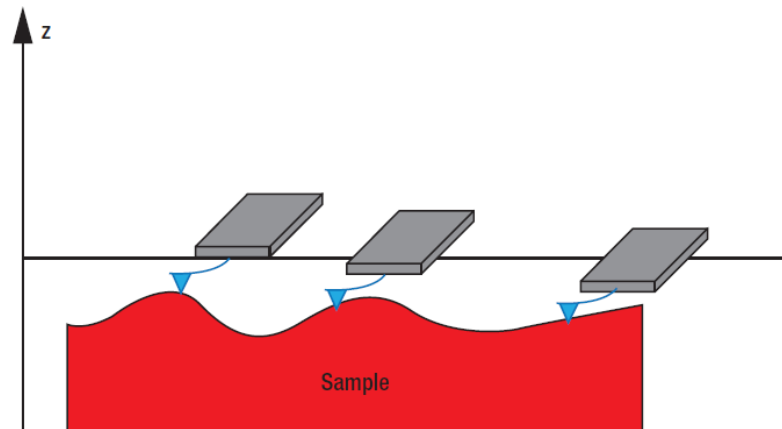
Brak pętli sprzężenia zwrotnego

Tryb kontaktowy – stała siła

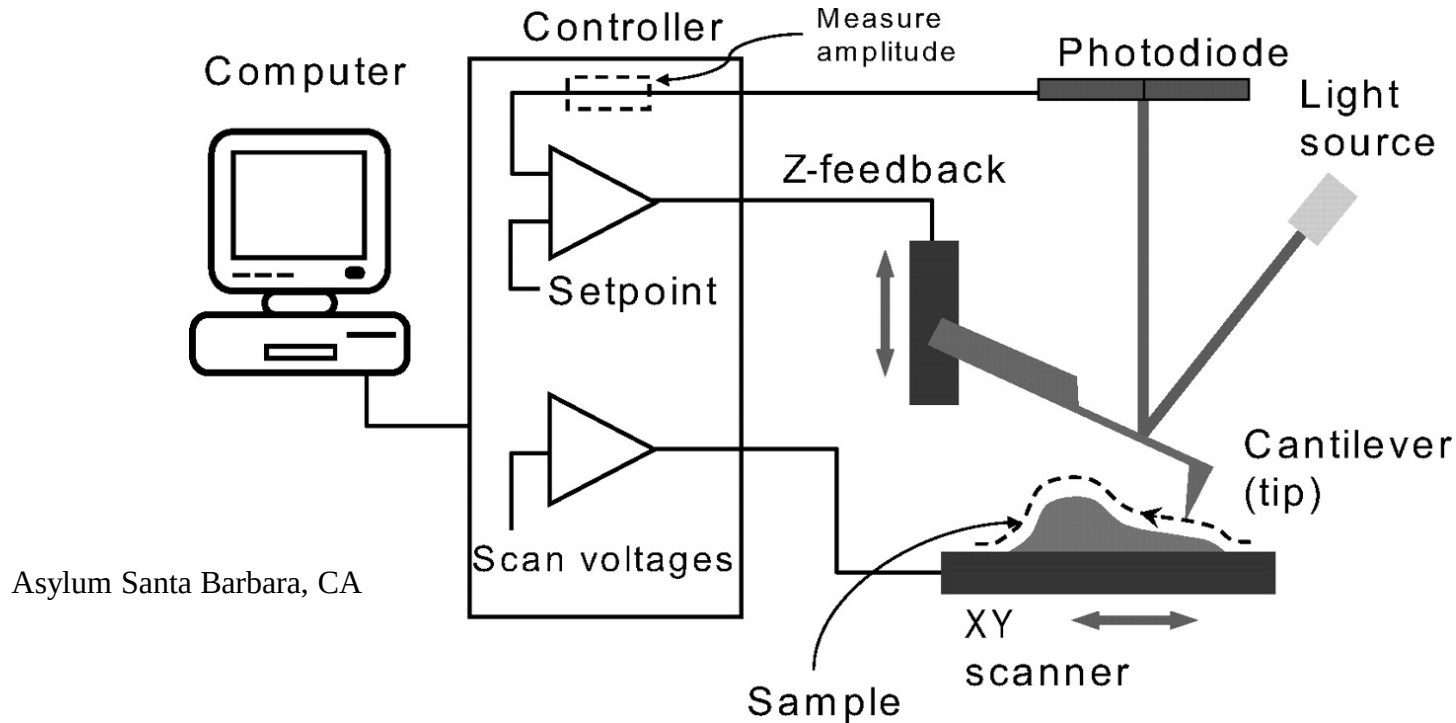
- Tryb stałej siły

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



Sprzężenie zwrotne osi z

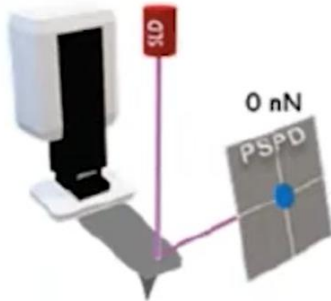


Ostrze skanuje powierzchnię próbki (lub stolik wraz z próbką) przemieszczają się w płaszczyźnie X-Y względem ostrza, dzięki efektowi piezoelektrycznemu). Światło odbite od ostrza pada na fotodiody. Zmiana pozycji odbitego światła powoduje zmianę sygnału na wyjściu fotodiody. Ta zmiana jest z kolei przekazywana 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.

Tryb kontaktowy – stała siła

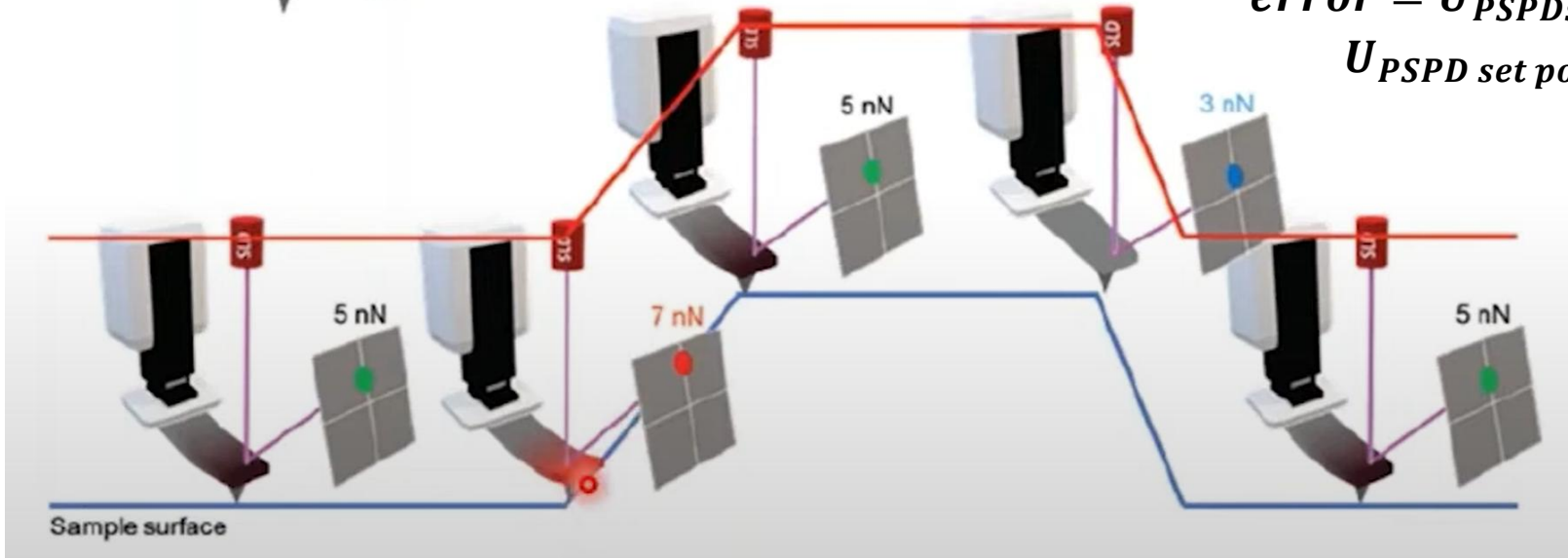
Sprzężenie zwrotne

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

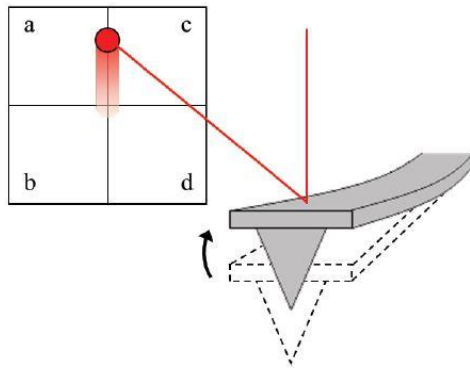
$$error = U_{PSPD signal} - U_{PSPD set point}$$



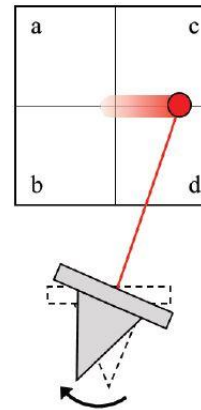
Tryb kontaktowy – siły boczne Lateral Force Microscope (LFM)

- Tryb stałej wysokości – siły boczne

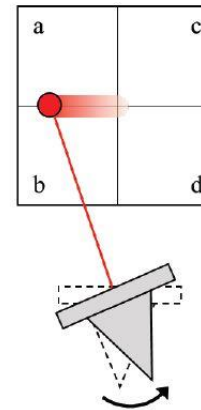
Korzystając z diody 4-segmentowej, można łatwo wyznaczyć skreślenie ostrza na krawędziach i na chropowatych powierzchniach.



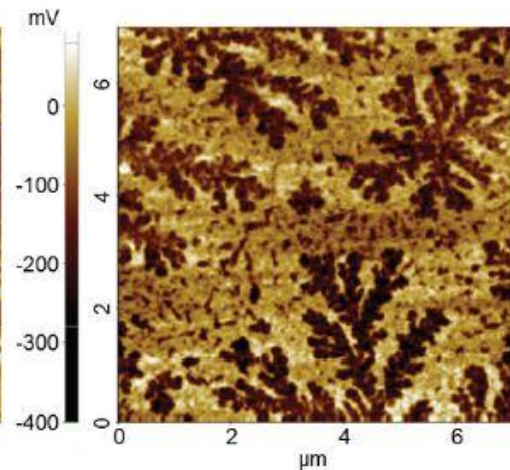
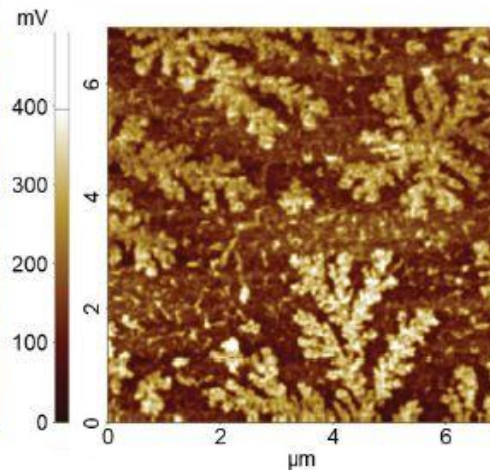
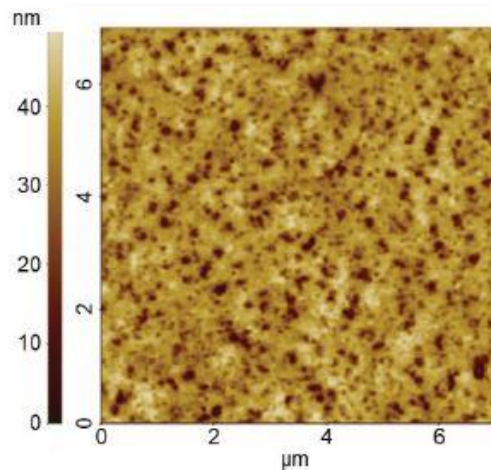
(a) Height



(b) LFM forward



(c) LFM backward



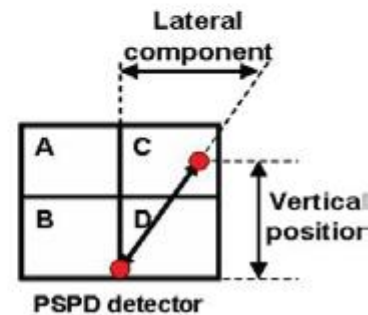
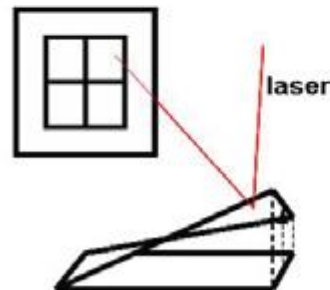
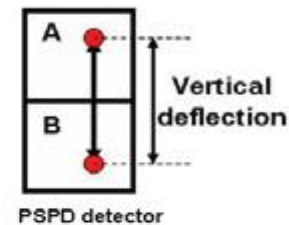
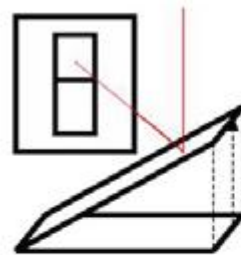
Fotodioda PSPD

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

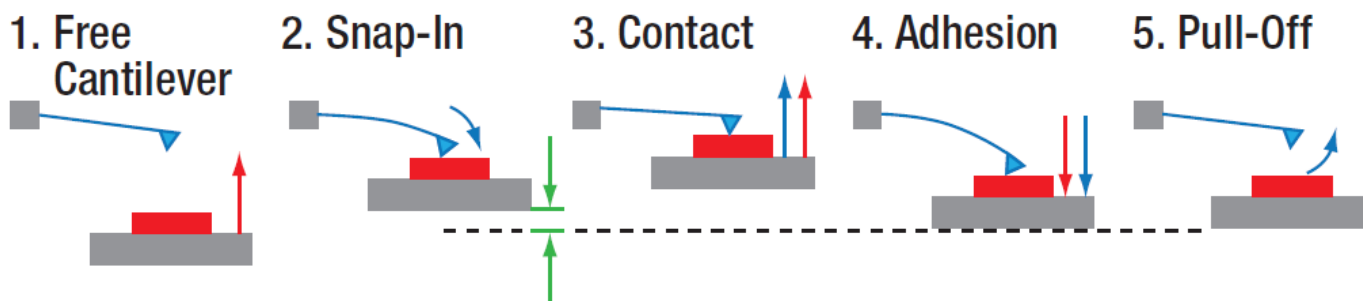
$$\text{Sygnał topografii} = (A + C) - (B + D)$$

W przypadku sygnału LFM wykorzystuje się wszystkie sygnały PSPD:

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

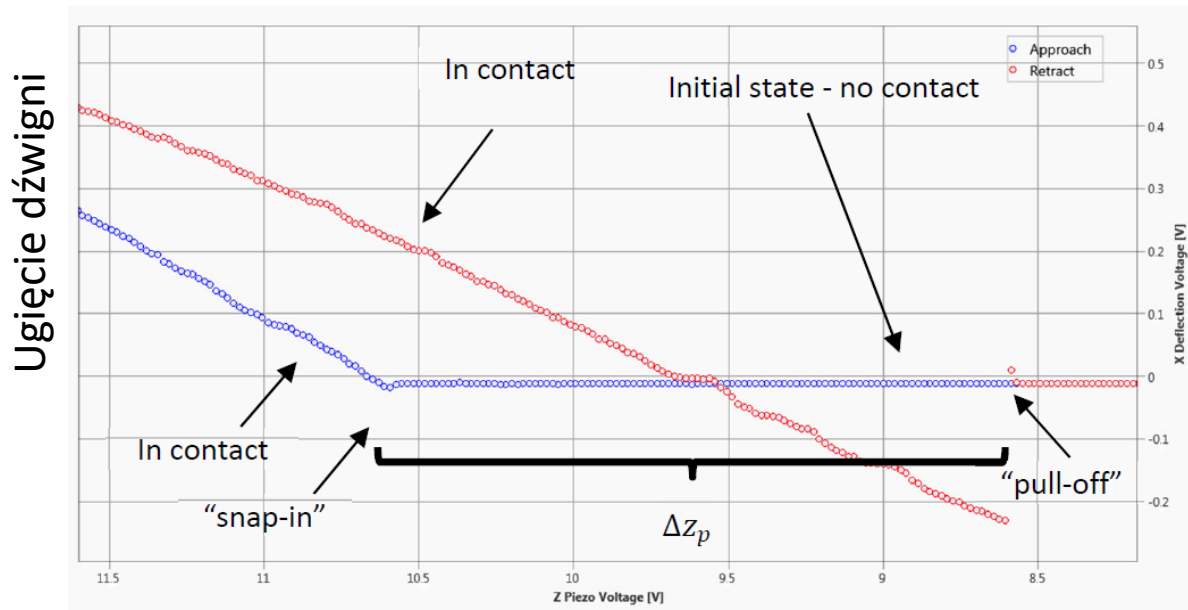


Tryb kontaktowy - wyznaczenie siły adhezji



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

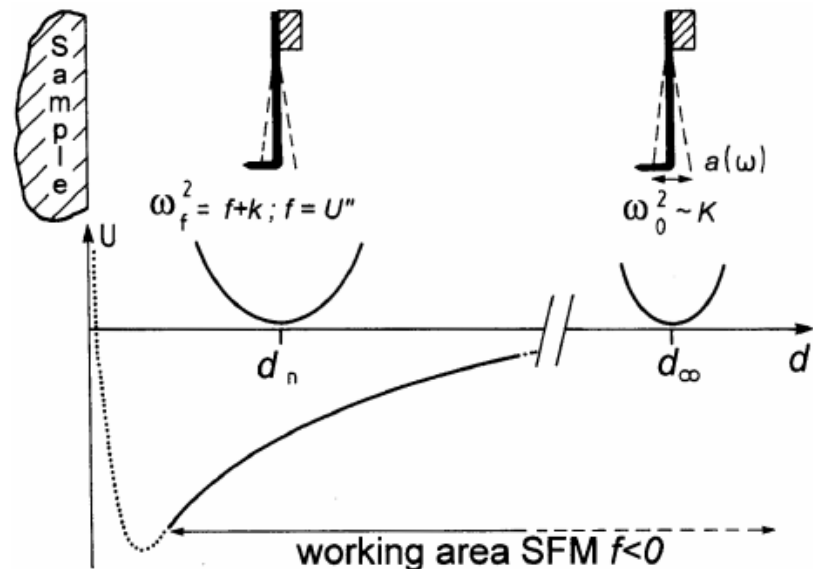
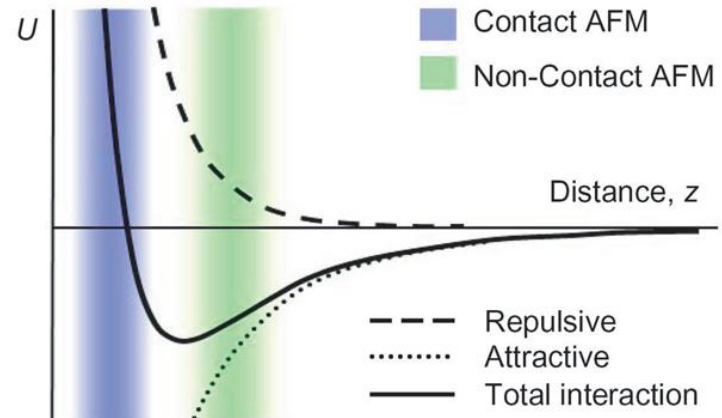
Mod NC-AFM – ostrze jest w odległości kilku do kilkudziesięciu nm od próbki.

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:

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

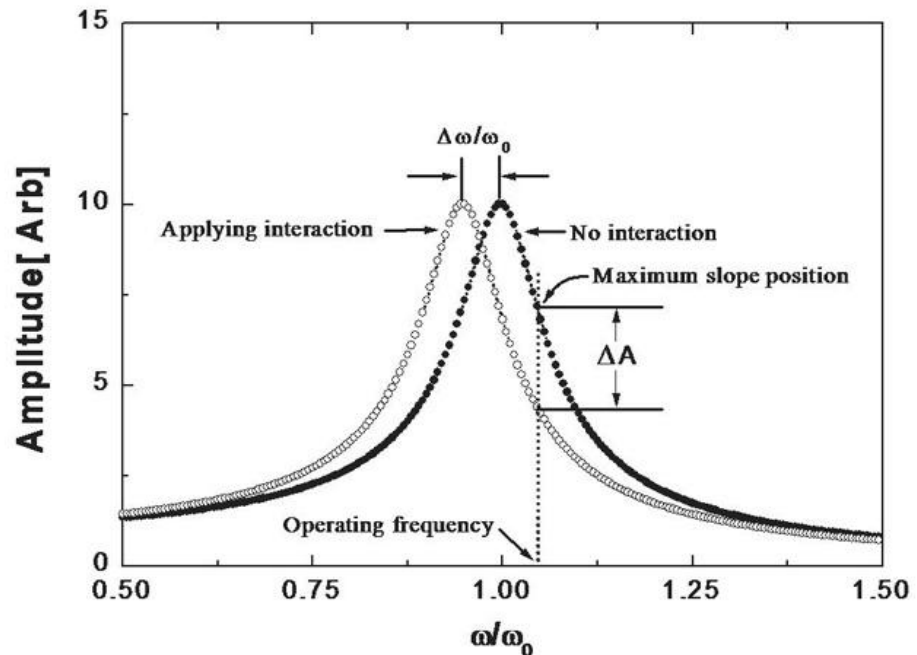
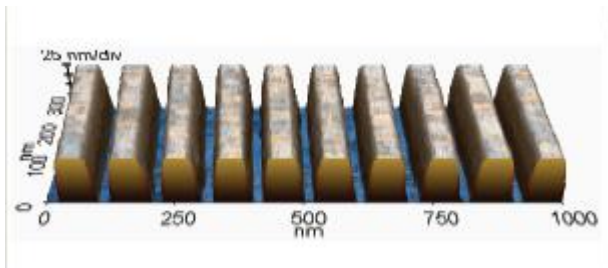
gdzie $f = \frac{\partial F_{vdW}}{\partial z} < 0$ (dla siły przyciągającej).



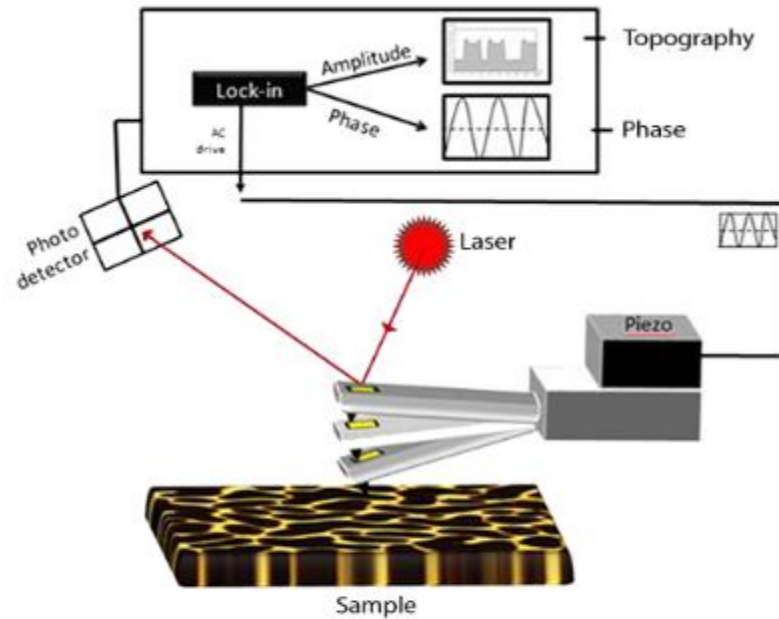
Tryb bezkontaktowy dynamiczny

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 vibracji 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 vibracji 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).



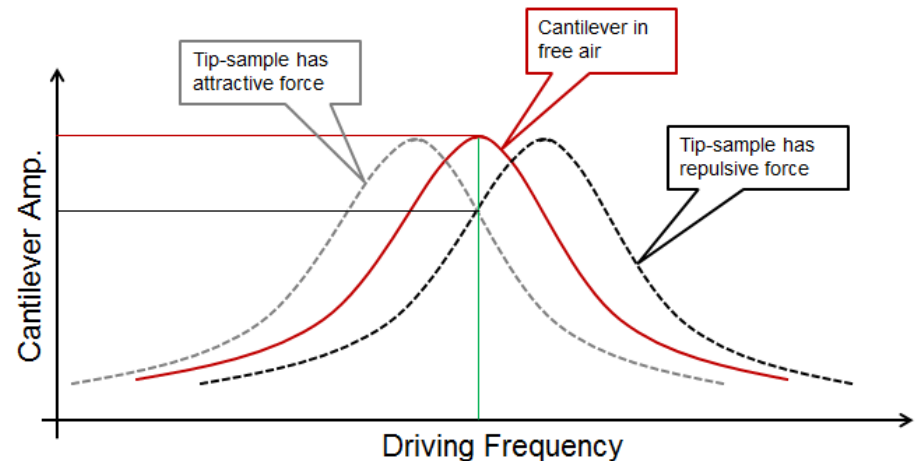
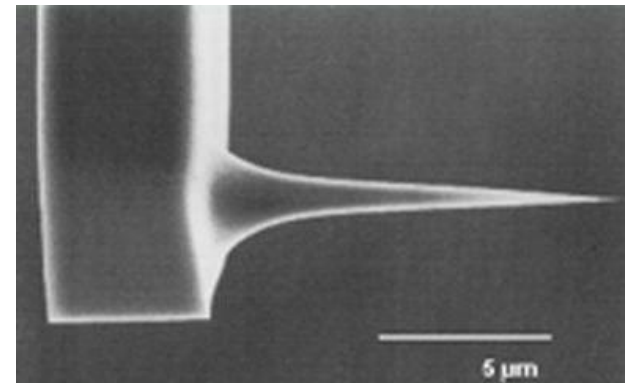
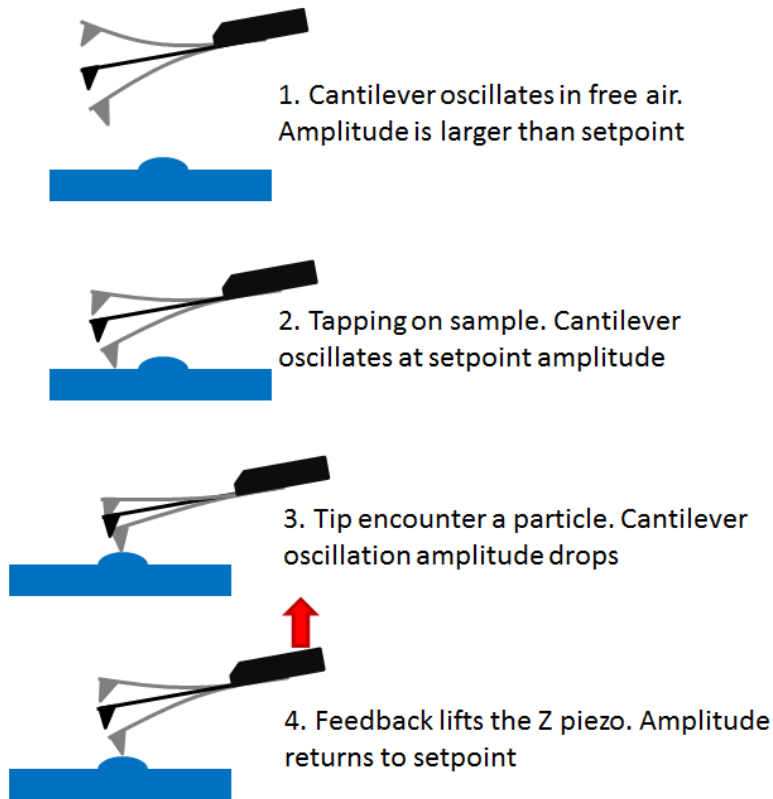
Tryb bezkontaktowy dynamiczny



*Schematic of dynamic AFM mode (DFM)
operation*

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.

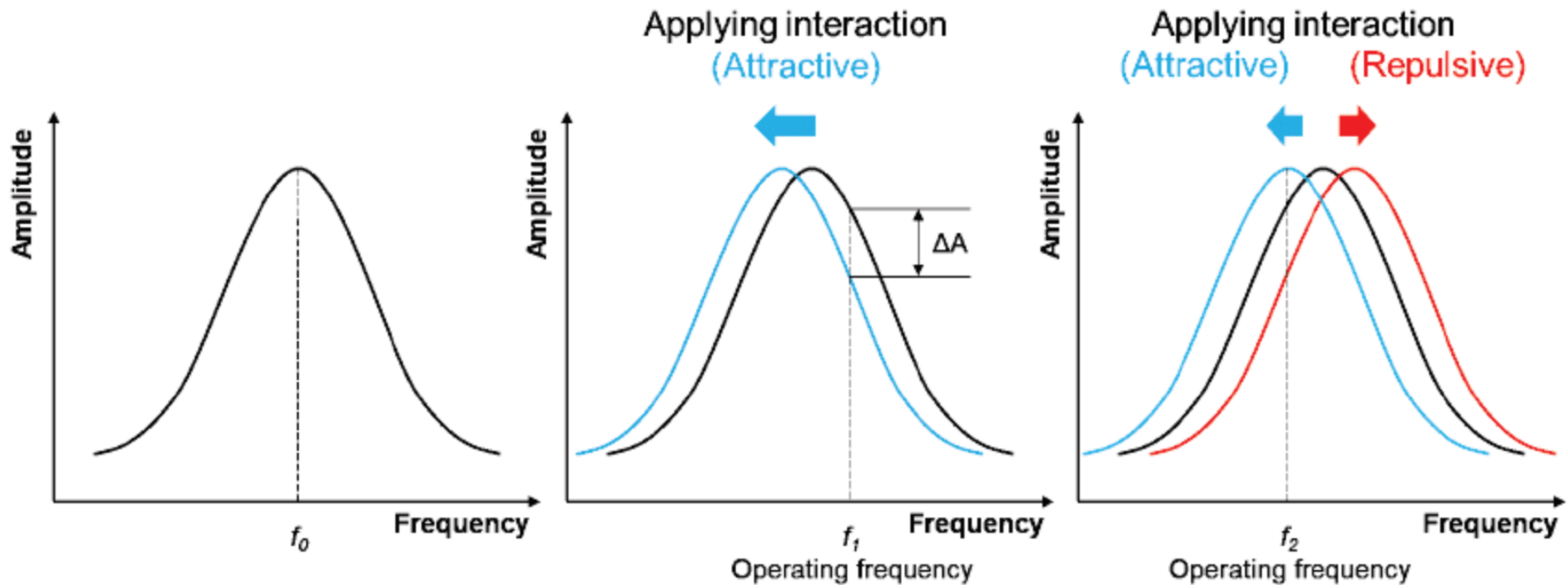


Tapping mode

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).

Układ sprzężenia zwrotnego utrzymuje częstość pracy (f_1) nieco mniejszą niż częstość rezonansowa f_0 . W miarę jak ostrze zbliża się/oddala do/od próbki, stała sprężystości zmniejsza się /zwiększa ze względu na siły przyciągające vdW/ odpychające. Częstość rezonansowa maleje/rośnie (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>

Park System XE-70



Stacja XE-70 STM



Monitory



Oświetlacz

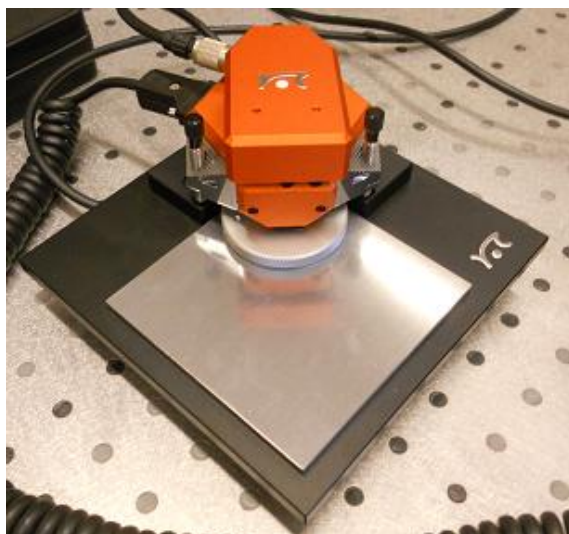


Kontroler AFM



Komputer

Nanosurf Easy Scan 2



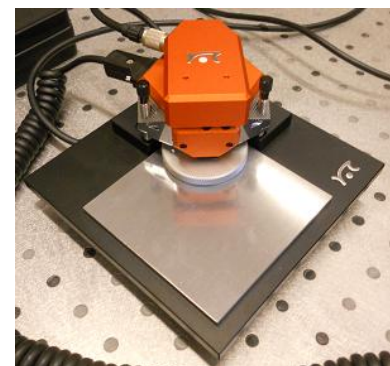
Park System XE-70

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



Nanosurf Easy Scan 2

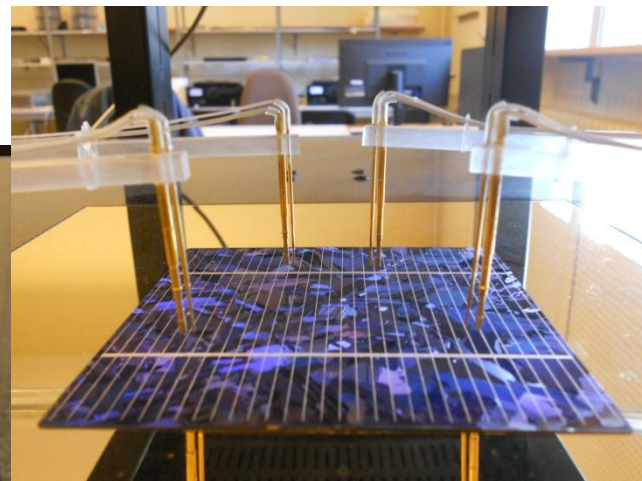
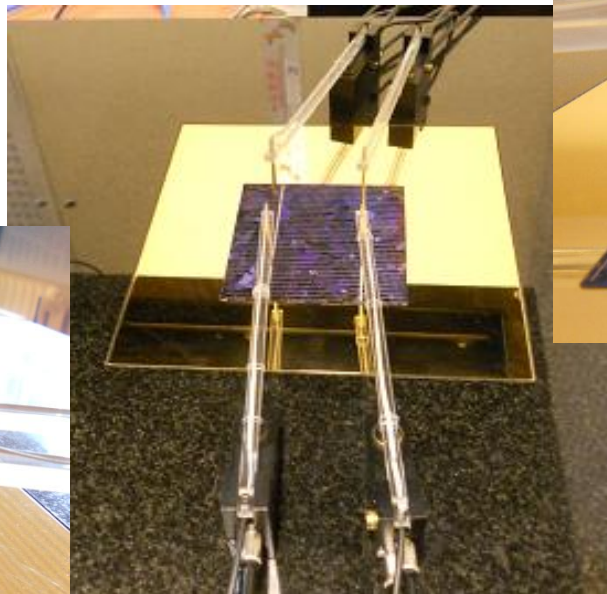
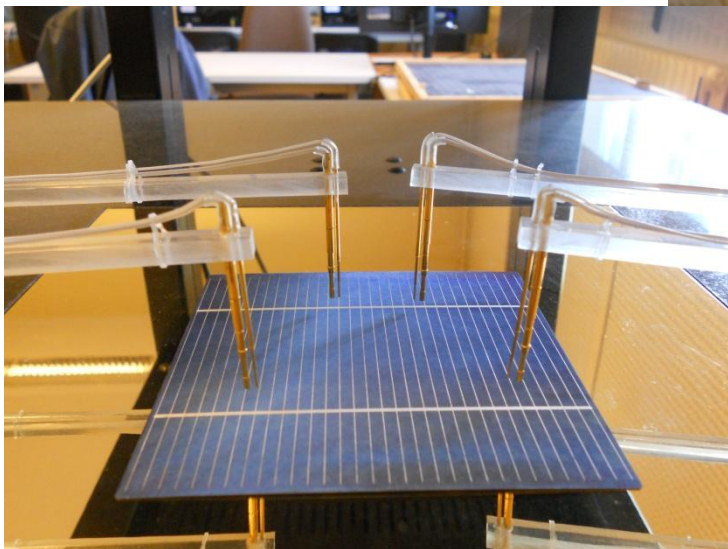
AFM Scan Head:	10 μm	70 μm	110 μm
Maximum Scan range ¹⁾	10 μm	70 μm	110 μm
Maximum Z-range	2 μm	14 μm	22 μm
Drive resolution Z ²⁾	0.027 nm	0.21 nm	0.34 nm
Drive resolution XY ²⁾	0.15 nm	1.1 nm	1.7 nm



Sztuczne Słońce

Pomiar charakterystyki I-V na symulatorze słońca

Solar Cells I-V Curve Tracer



Pomiar charakterystyki I-V na symulatorze słońca

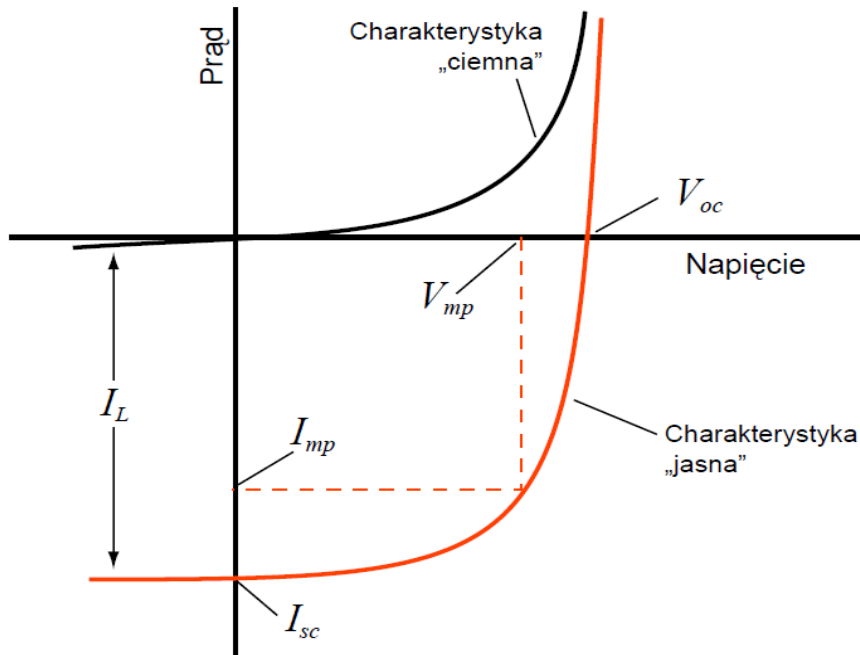
Układ do pomiaru charakterystyk prądowo-napięciowych na symulatorze słońca składa się z:

- 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



Sprawność ogniwa



Współczynnik wypełnienia

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

W przypadku idealnej diody Si

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

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

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

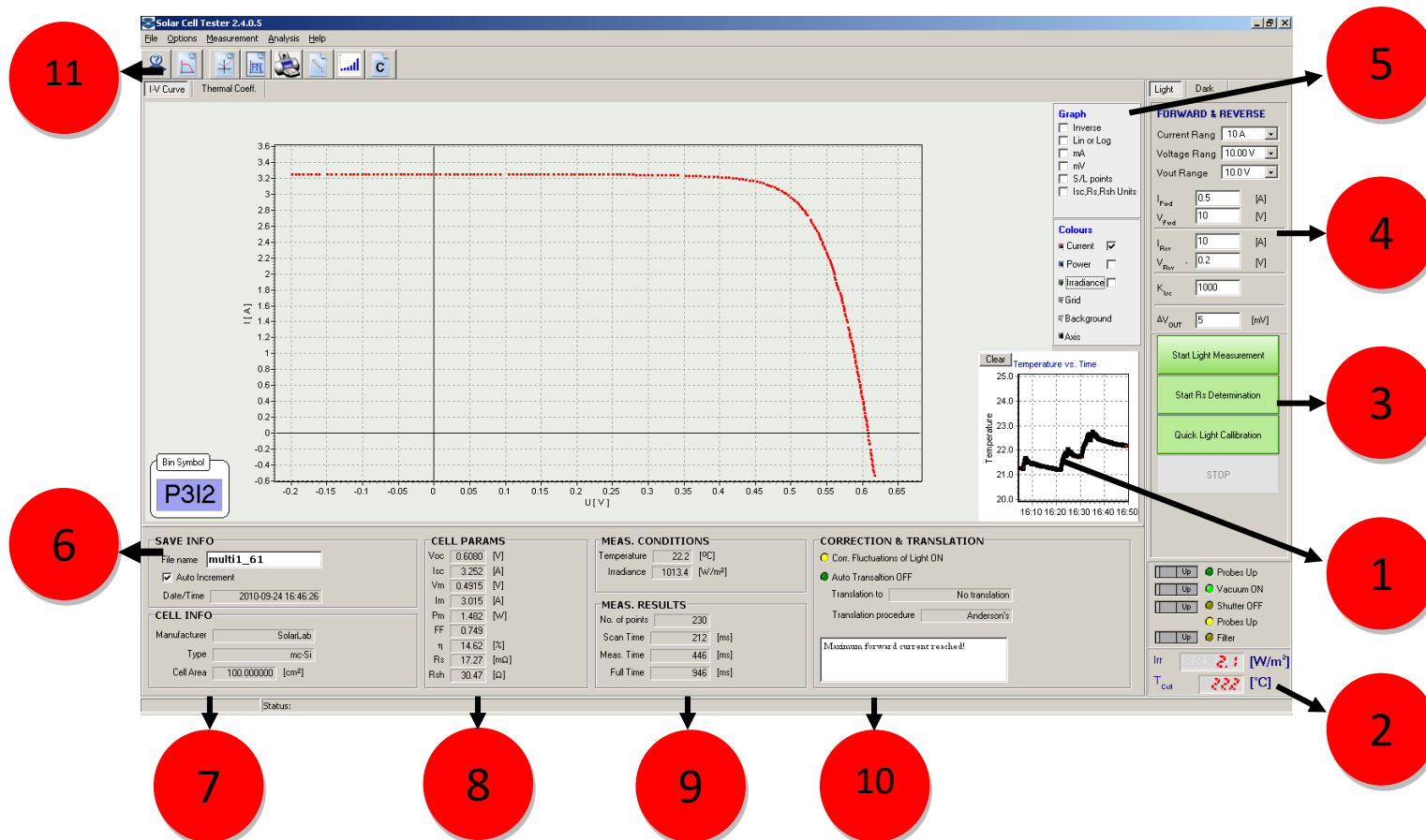
Sprawność

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

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

Pomiar charakterystyki I-V na symulatorze słońca

Opis programu Solar Cell I-V Curve Tracer



Zależność prądu zwarcia i napięcia rozwarcia od natężenia oświetlenia

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

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

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

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

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

Po przekształceniu:

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

Ponieważ $I_{sc} \sim P$, to

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

Wpływ temperatury

- Na napięcie rozwarcia:

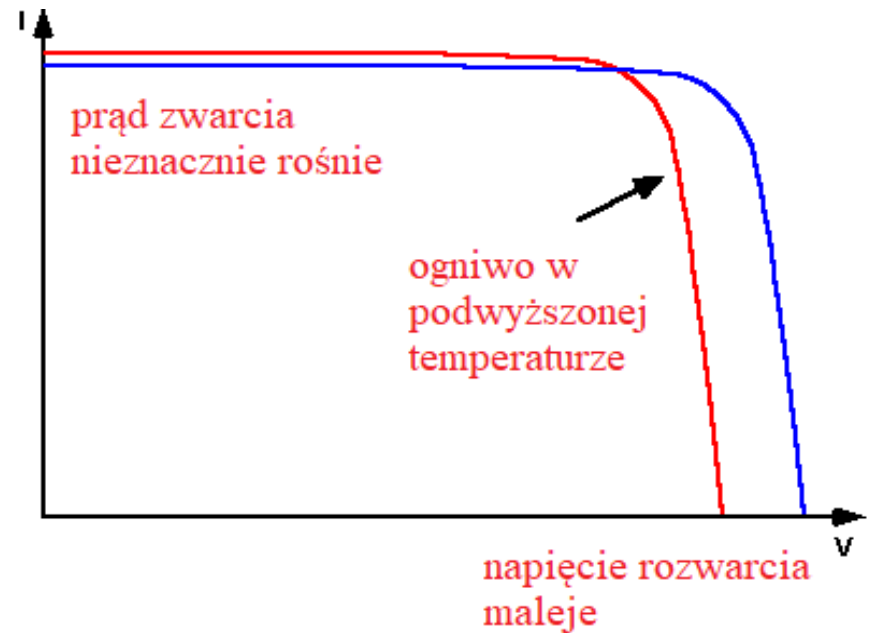
$$\frac{\partial V_{oc}}{\partial T} = - \left(\frac{nV_g - V_{oc}}{T} + \gamma \frac{nk_B}{q} \right),$$

$$\text{dla Si } \frac{dV_{oc}}{dT} = -2,2 \frac{mV}{^\circ C}$$

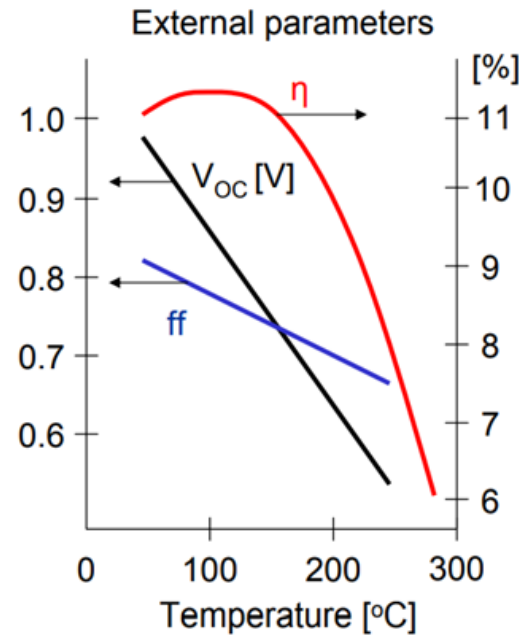
- Na prąd zwarcia:

Prąd zwarcia rośnie ze wzrostem temperatury, głównie ze względu na zmniejszenie się przerwy wzbronionej półprzewodnika ze wzrostem temperatury. Dla Si względna zmiana prądu zwarcia przypadająca na 1°C wynosi:

$$\frac{1}{I_{sc}} \frac{dI_{sc}}{dT} \approx 0,0006/^\circ C$$



Wpływ temperatury



- Względna zmiana współczynnika wypełnienia przypadająca na 1°C dla ogniwa Si

$$\frac{1}{FF} \frac{dFF}{dT} \approx \left(\frac{1}{V_{oc}} \frac{dV_{oc}}{dT} - \frac{1}{T} \right) \approx -0,0015/^{\circ}\text{C}$$

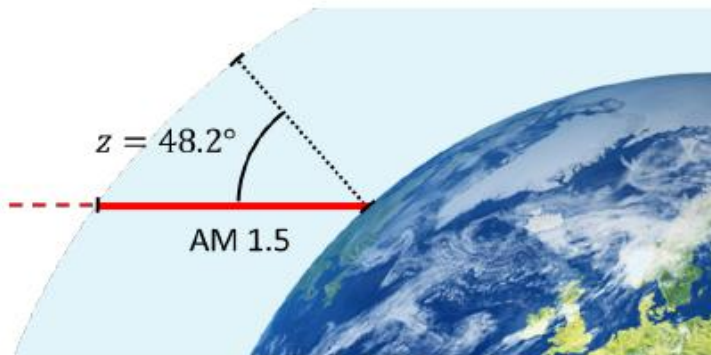
- Względna zmiana mocy w maksimum, przypadająca na 1°C dla ogniwa Si

$$\frac{1}{P_M} \frac{dP_M}{dT} \approx - \frac{0,004 \div 0,005}{^{\circ}\text{C}}$$

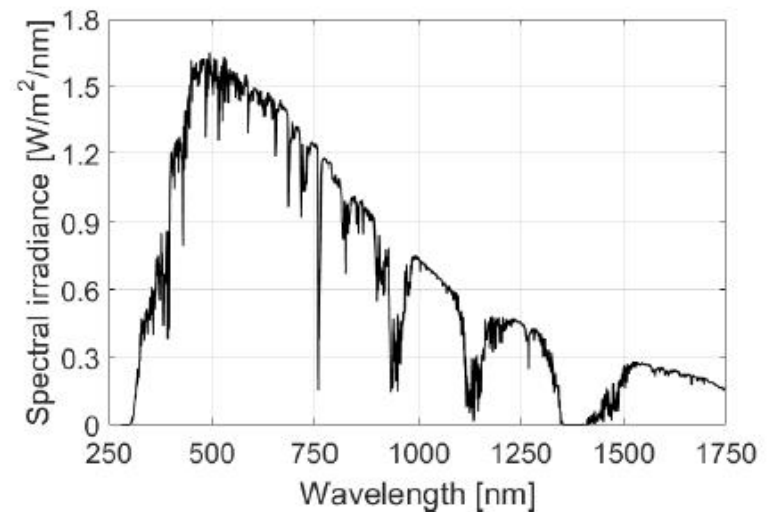
Symulator Słońca

Standard Test Conditions (STC)

1. AM1.5 spectrum



2. 1000 W/m²



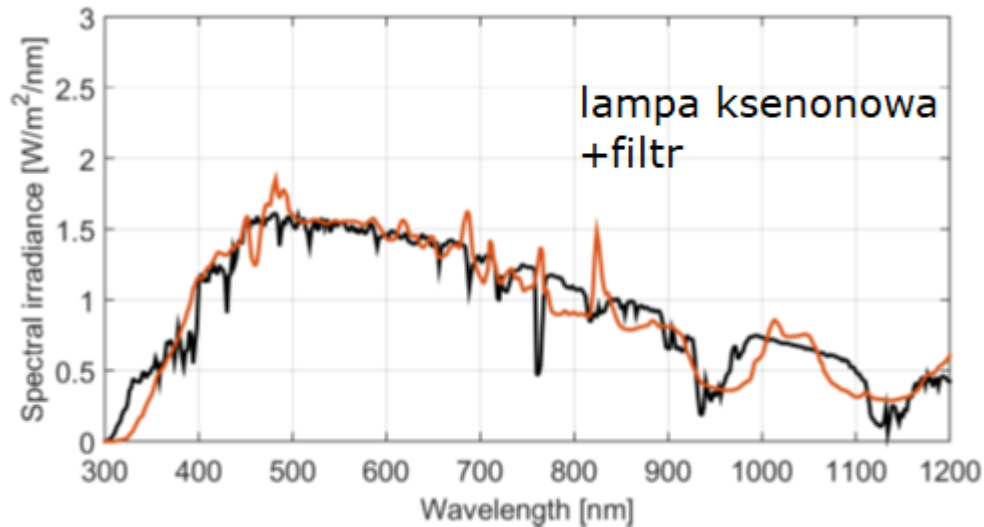
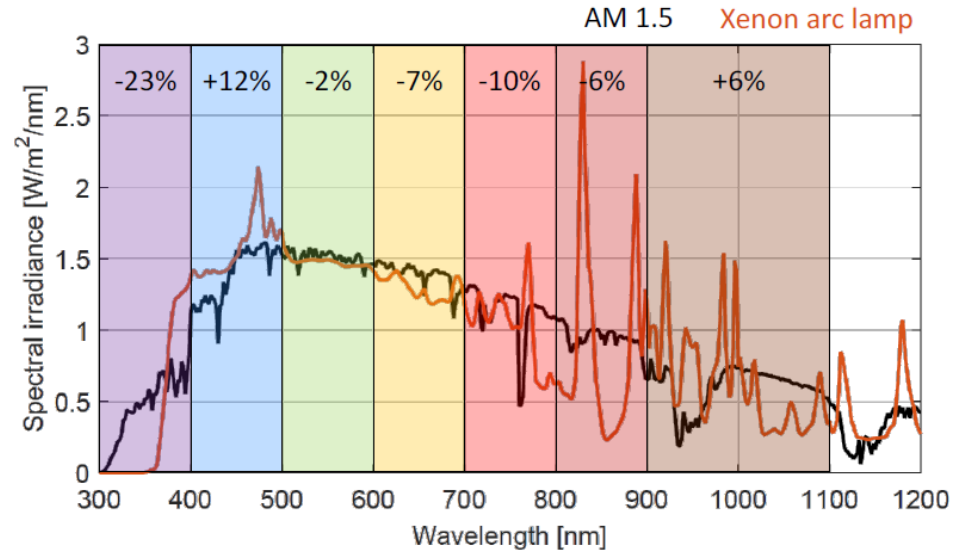
3. temperatura ogniwa 25 °C

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	$\leq 2\%$	$\leq 5\%$	$\leq 10\%$

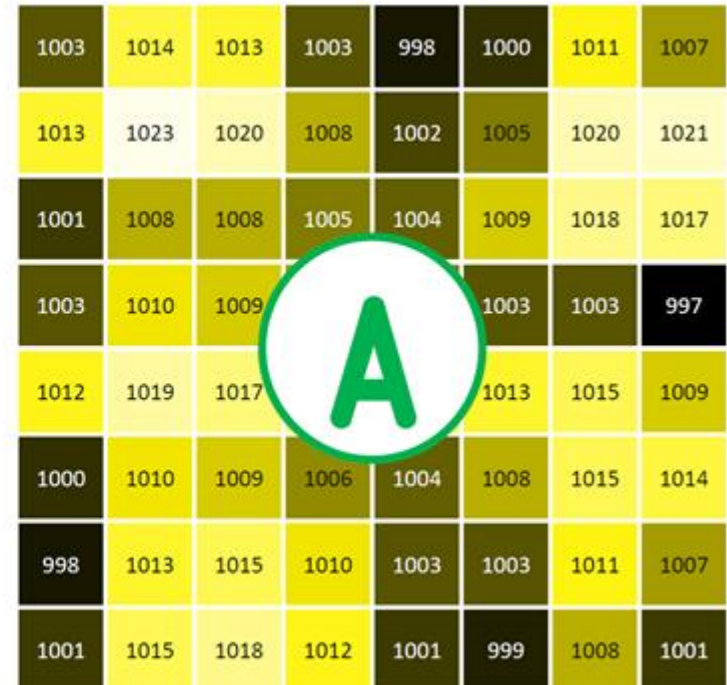
Dopasowanie spektralne – lampa Xe



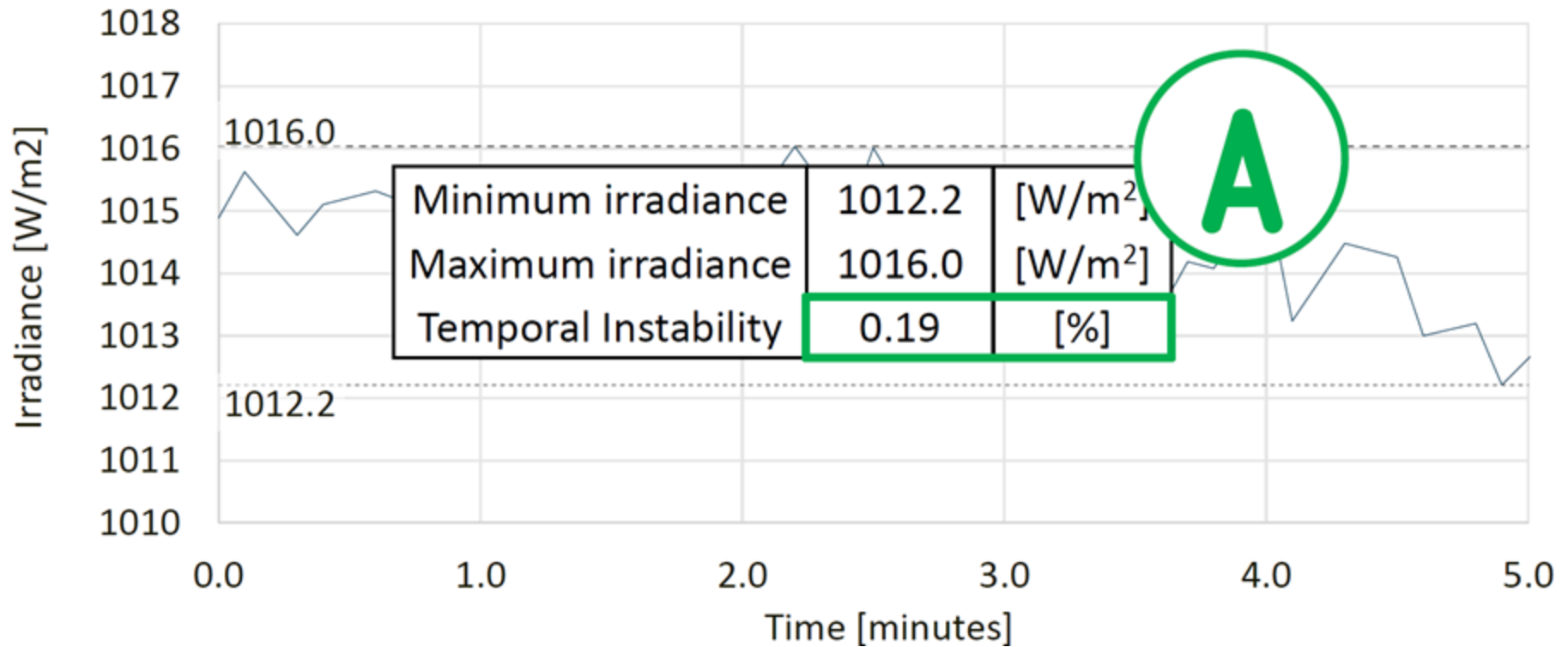
Jednorodne oświetlenie - przykład

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

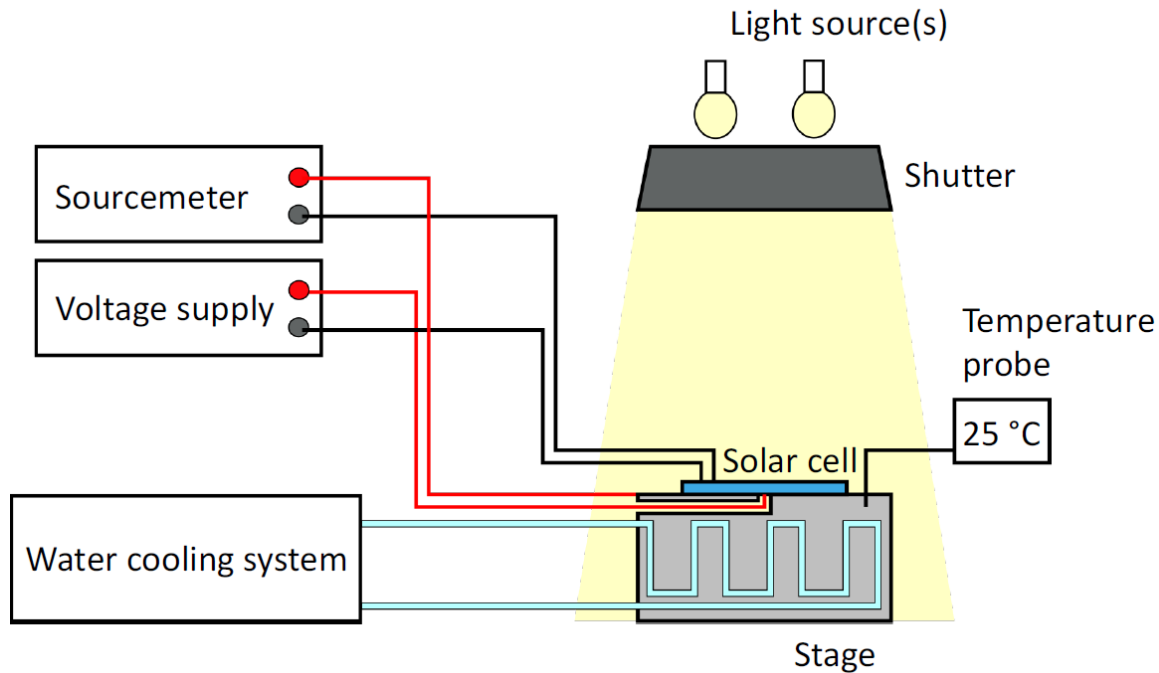
Minimum intensity	997.4	[W/m ²]
Maximum intensity	1023.4	[W/m ²]
Uniformity	1.29	[%]



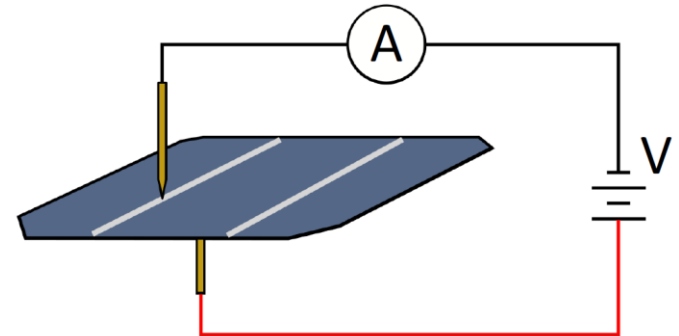
Stabilność w czasie - przykład



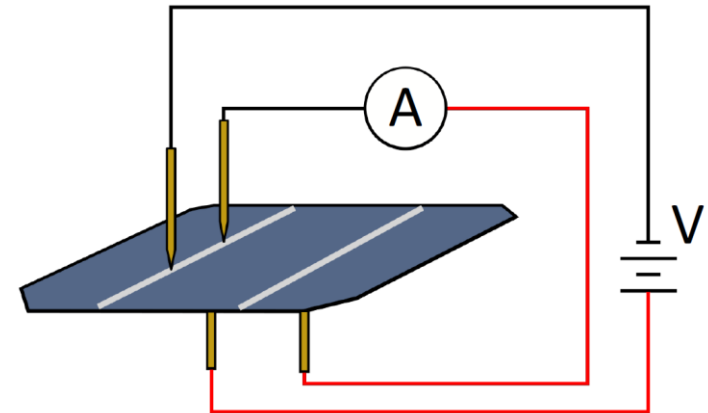
Układ pomiarowy



Sonda dwu-punktowa



Sonda cztero-punktowa



Ogniwo referencyjne

