

Podstawowe właściwości elektronu

Ładunek elektronu (e)	$(-)1.602 \times 10^{-19} \text{C}$
1 eV	$1.602 \times 10^{-19} \text{J}$
Masa spoczynkowa m_0	$9.1099 \times 10^{-31} \text{kg}$
Energia kinetyczna (ładunek x różnica potencjałów)	$1.602 \times 10^{-19} \text{Nm}$ (dla potencjału 1V)
Stała Plancka	$6.626 \times 10^{-34} \text{Js}$
Szybkość światła w próżni	$2.998 \times 10^8 \text{m/s}$

Podstawowe właściwości elektronu cd.

λ - długość fali elektronowej

h - stała Plancka

p - pęd elektronu

$$\lambda = \frac{h}{p} \quad (1)$$

Pęd elektronu jest przekazywany przez różnicę potencjału V , co daje w rezultacie energię elektronu równą: eV .

$$eV = \frac{m_0 v^2}{2} \quad (2)$$

Pęd p jest równy masie elektronu m_0 x prędkość v .

Zastępując v z równania (2) otrzymujemy:

$$p = m_0 v = \sqrt{(2m_0 eV)} \quad (3)$$

Łącząc równania (1), (2) i (3) otrzymujemy zależność pomiędzy długością fali elektronowej λ a napięciem przyspieszającym elektrony w mikroskopie V :

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{(2m_0 eV)}} \quad (4)$$

W przypadku elektronów pęd wyliczamy z zasady zachowania energii: *Energia potencjalna elektronu musi być równa energii kinetycznej.*

Ważne stwierdzenie:

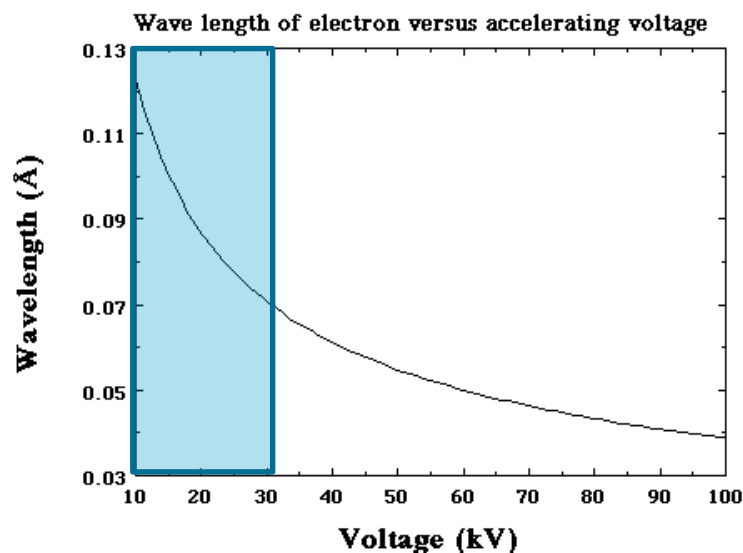
Poprzez zwiększanie napięcia przyspieszającego elektrony w mikroskopie zmniejszamy λ - długość fali elektronowej!!!

Nie można pominąć efektów relatywistycznych w mikroskopie elektronowym powyżej energii elektronów 100 keV, gdy prędkość elektronu jako cząstki jest większa niż 1/2 prędkości światła.

Musimy zatem równanie (4) zmodyfikować:

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2m_0eV \left[\frac{1 + eV}{2m_0c^2} \right]}}$$

$$\lambda = \frac{12.2630}{\sqrt{V + 0.97845 \times 10^{-6} V^2}}$$



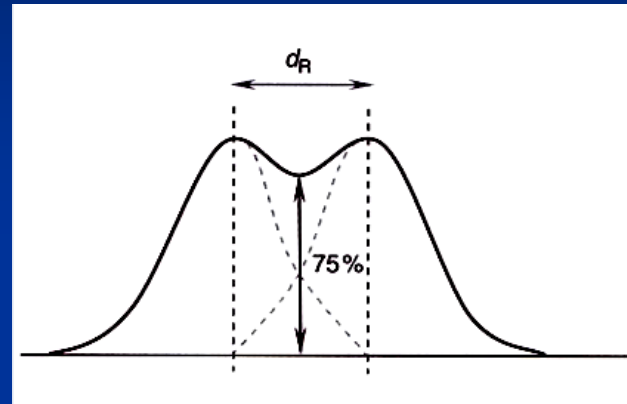
Zależność długości fali od napięcia przyspieszającego elektrony

Napięcie przyspieszające V (kV)	Relatywistyczna długość fali λ , nm
20	0.00859
30	0.00698
40	0.00602
50	0.00536
60	0.00487
70	0.00448
80	0.00418
90	0.00392
100	0.00370
200	0.00251
300	0.00197
400	0.00164
500	0.00142
600	0.00126
700	0.00113
800	0.00103
900	0.00094
1000	0.00087
2000	0.00050
4000	0.00028

Mikroskopia optyczna – Zdolność rozdzielcza

Z teorii dyfrakcji światła widzialnego wynika następujący wzór na zdolność rozdzielczą:

$$r = \frac{0.61\lambda}{\mu \sin \alpha}$$



Kryterium Rayleigh'a

r – zdolność rozdzielcza = **rozdzielczość na obrazie dwóch szczegółów**

λ – długość fali promieniowania elektromagnetycznego

μ – współczynnik załamania światła

α – kąt padania promienia świetlnego (tzw. kąt aperturowy *divergence angle*)

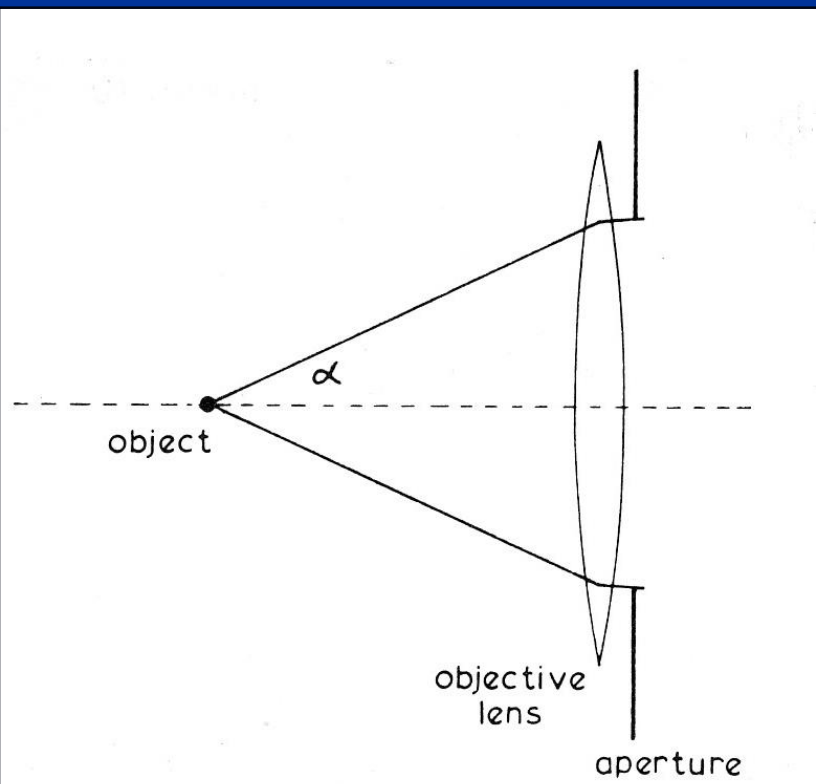
Aby uzyskać jak najmniejsze r należy zmniejszać λ , zwiększać μ i α !

Dla mikroskopu optycznego

λ – zmniejszamy do **400 nm** (światło zielone), a nawet do **200 nm** (bliski ultrafiolet)

μ – zwiększamy poprzez zanurzenie soczewek w oleju

$\sin \alpha$ – zwiększany poprzez dobór odpowiednich apertur



Praktycznie: wartość mianownika, tj.
 $\mu \sin \alpha$ nigdy nie przekroczy 1.6!

Absolutna zdolność rozdzielcza w
mikroskopii optycznej wynosi **150 nm**
(tj. **0.15 μm**) dla światła zielonego !

Obraz dwuwymiarowy!!!

Mikroskopia optyczna

$$\lambda = 400 - 700 \text{ nm}$$

Mikroskopia elektronowa

$$\lambda = 0.0005 - 0.01 \text{ nm}$$

Zasadnicza zmiana w długości użytego promieniowania elektromagnetycznego !!!

$$r = \frac{0.61\lambda}{\mu \sin \alpha}$$

$$\mu \geq 1$$

$$\text{max. } r = 150 \text{ nm}$$

$$r_1 = \frac{0.61\lambda}{\alpha}$$

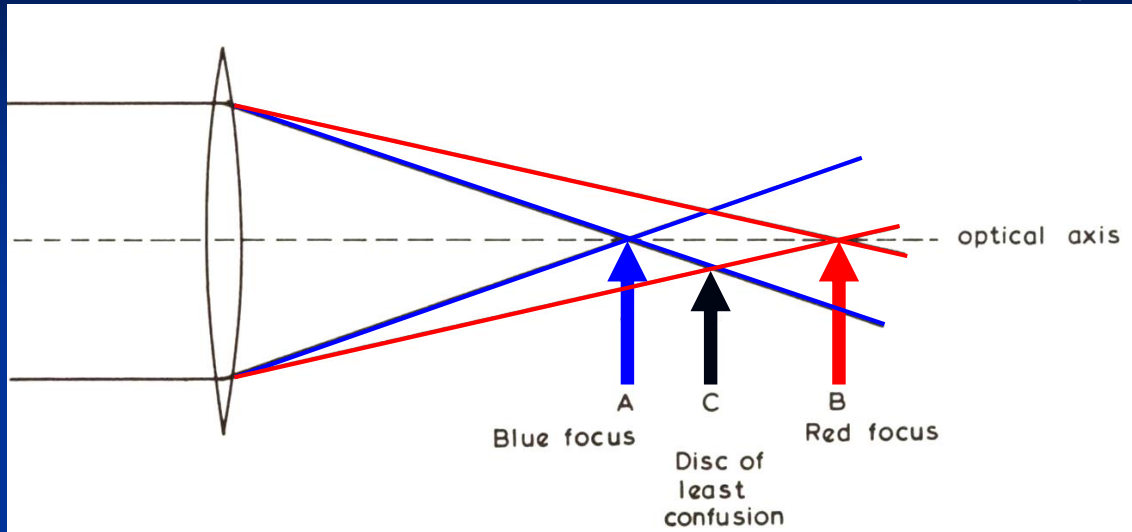
$$\mu = 1 \text{ (próżnia)}$$

dla $\lambda = 0.0037 \text{ nm}$ i $\alpha = 0.1 \text{ radiana}$
 $r = 0.02 \text{ nm} = 0.2 \text{ \AA} (!?)$

teoretyczna: bo występuje
aberracja sferyczna

Wady soczewek

Aberracja chromatyczna



bliska podczerwień to zakres 0,8–2,5 μm
średnia podczerwień to zakres 2,5–25 μm
daleka podczerwień to zakres 25–1000 μm

UV skrajny – długość fali: 10–121 nm
UV daleki – długość fali: 122–200 nm
UV pośredni – długość fali: 200–300 nm
UV bliski – długość fali: 300–400 nm

rozmyte ognisko

$$d_c = c_c \alpha \frac{\Delta E}{E}$$

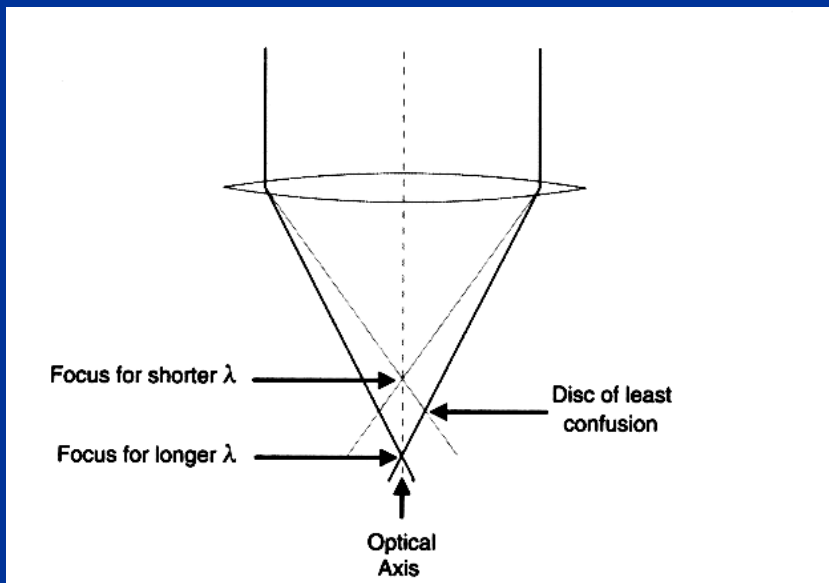
gdzie:

d_c – rozmycie wiązki (*disc of least confusion*)

c_c – współczynnik aberracji chromatycznej

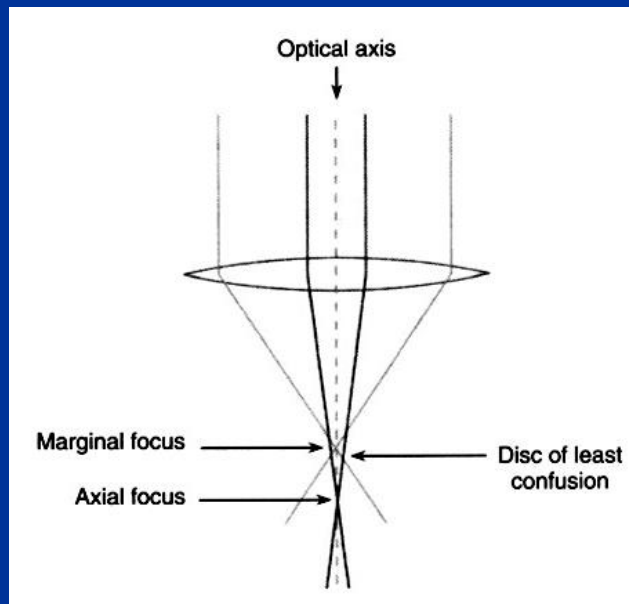
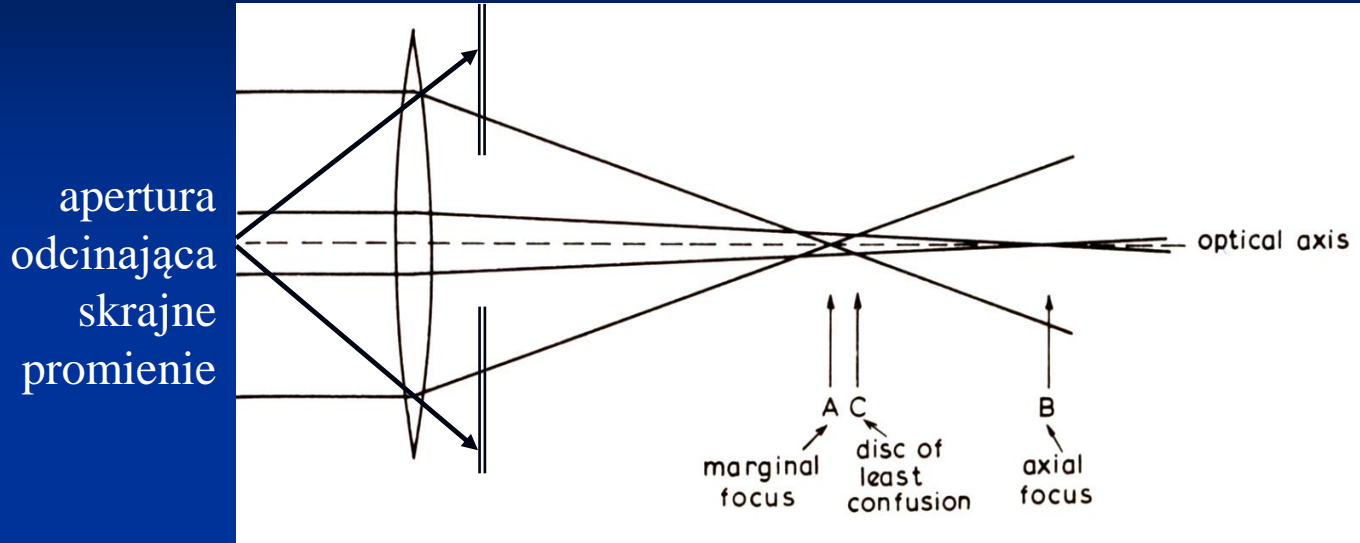
α – kąt zbieżności

$\frac{\Delta E}{E}$ – rozmycie energetyczne względem
pierwotnej energii wiązki elektronowej



Wady soczewek

Aberracja sferyczna



rozmyte ognisko

$$d_s = 0.5c_s\alpha^3$$

gdzie:

d_s – rozmycie wiązki (*disc of least confusion*)

c_s – współczynnik aberracji sferycznej

α – kąt zbieżności

Mikroskopia elektronowa

aberracja chromatyczna: łatwo usuwalna
aberracja sferyczna: **trudno usuwalna!!!**
rozwiązanie: wiązka elektronów blisko osi
elektronooptycznej
(stosowanie apertur o małej średnicy)

$$\mathbf{r}_s = \mathbf{c}_s \alpha^3$$

Hawkes (1972)

$$\mathbf{r}_{\text{optimum}} = \sqrt{\mathbf{r}_1^2 + \mathbf{r}_s^2}$$

$$\mathbf{r}_{\text{optimum}} = \sqrt{\left(0.61 \frac{\lambda}{\alpha}\right)^2 + \left(\mathbf{c}_s \alpha^3\right)^2}$$

$$\alpha_{\text{optimum}} = 0.67 \lambda^{1/4} c_s^{-1/4}$$

Dla energii 100 keV ($\lambda=0.0037$ nm) i $c_s=3$ mm $\rightarrow \alpha_{\text{opt}} = \sim 15$ mrad = 0.86°

$$r_{\text{optimum}} = 1.21 \lambda^{3/4} c_s^{-1/4}$$

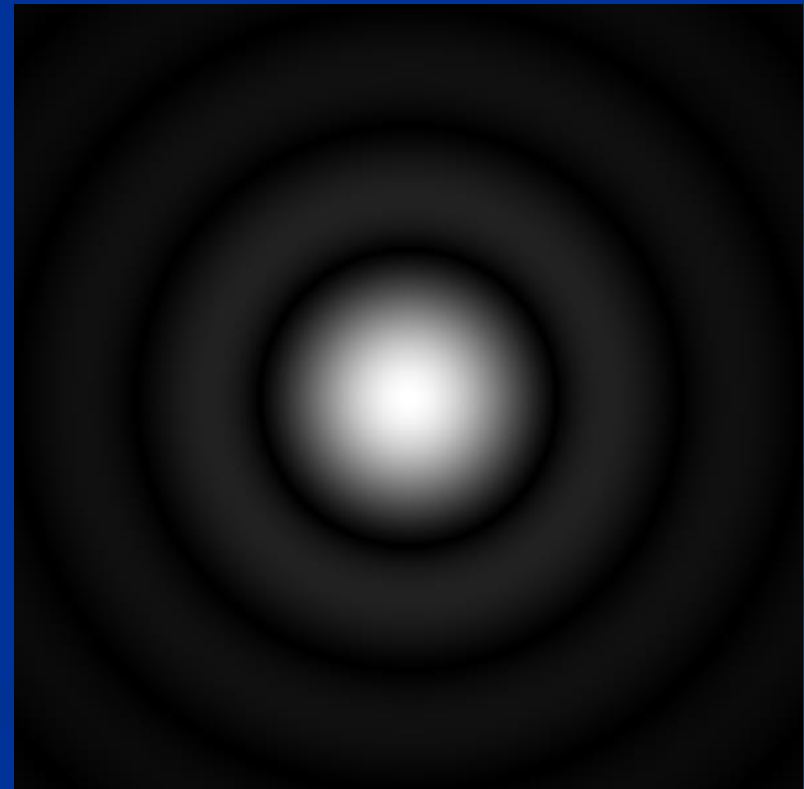
Zdolność rozdzielcza TEM (HREM)
punktowa 0.12 nm = 1.2 \AA

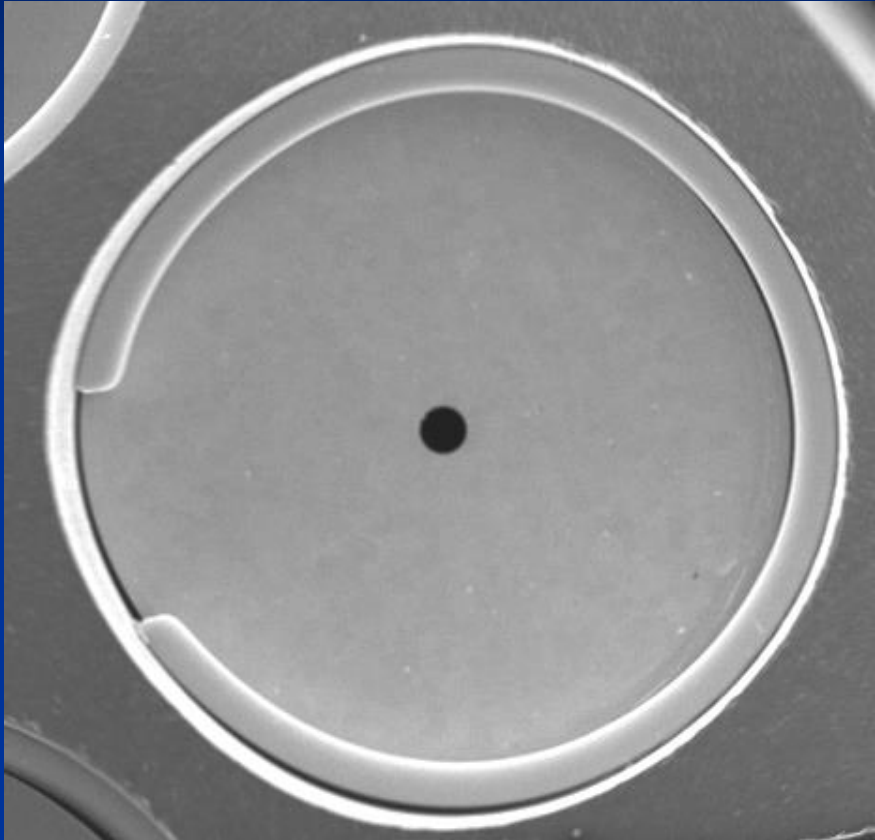
**Ograniczenie dyfrakcyjne d_d (plamka Airygo) –
niepunktowe obrazy ograniczające zdolność rozdzielczą**

$$d_d = 0.6 \frac{\lambda}{\alpha}$$

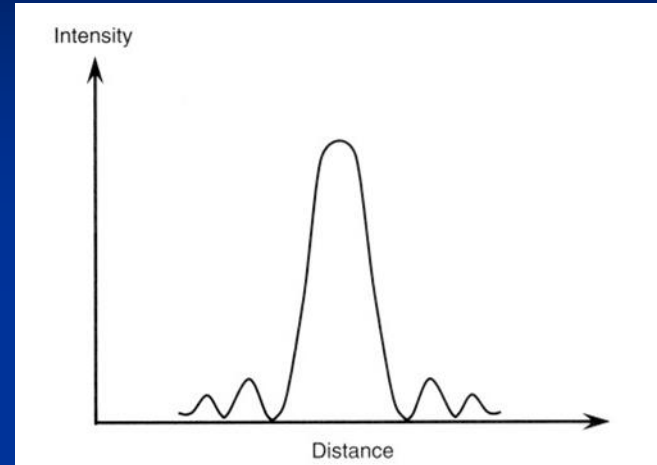
gdzie: d_d – odległość między pierwszymi
zerowymi pierścieniami

$$\lambda = \frac{1.226}{\sqrt{E_0}}$$





Apertura soczewki obiektywowej 200 μm

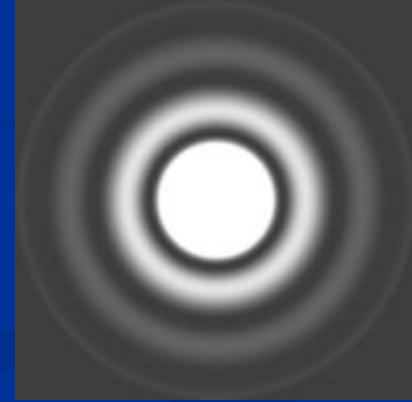
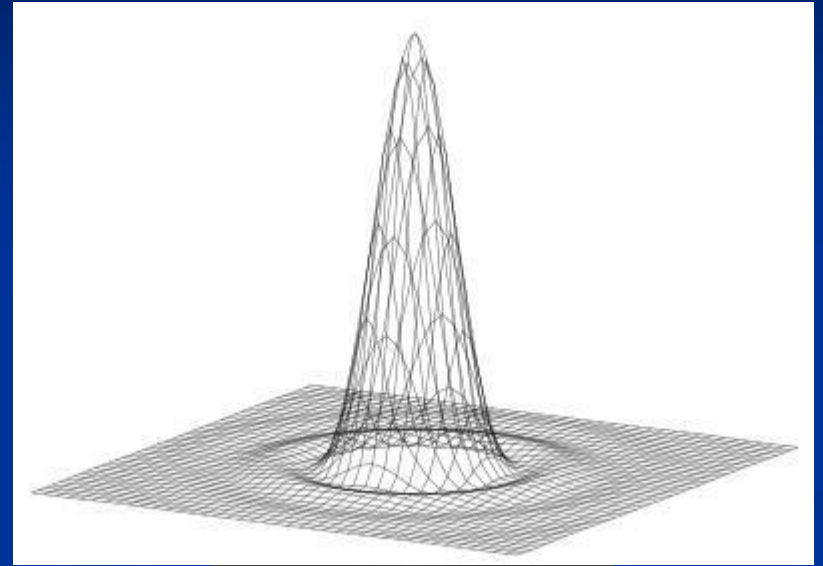
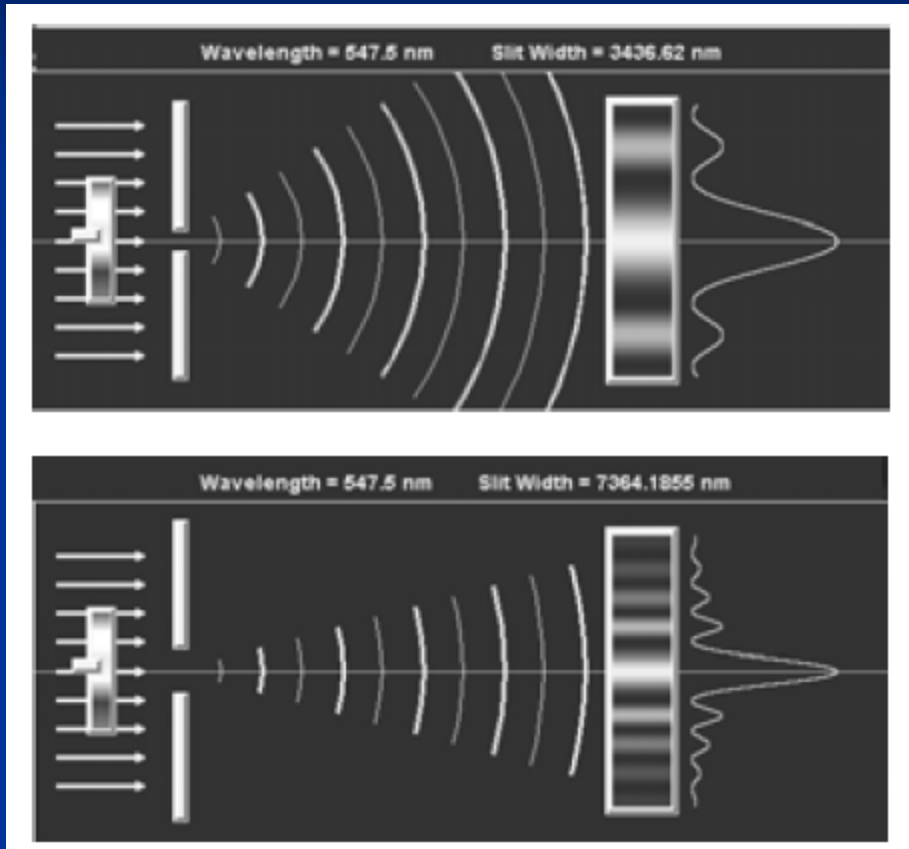


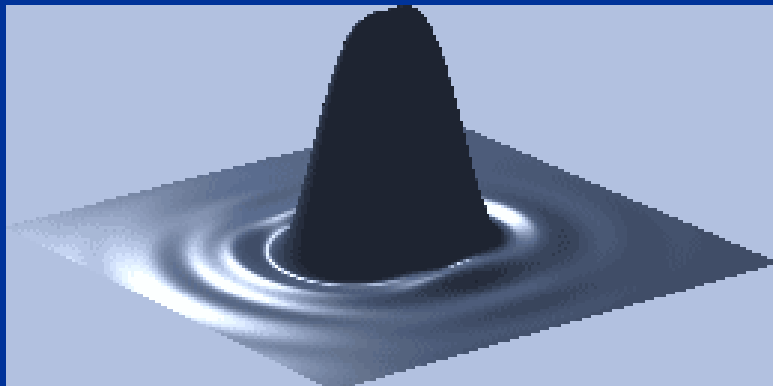
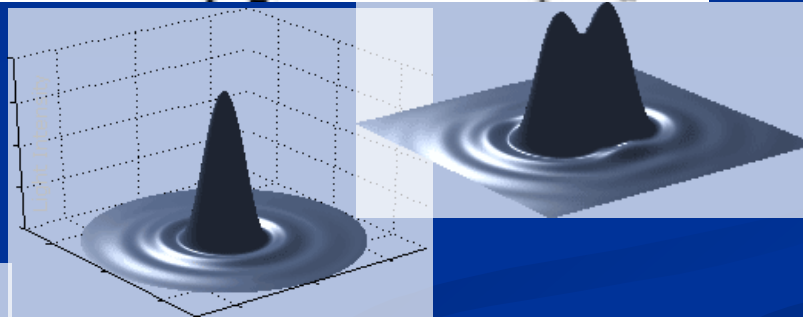
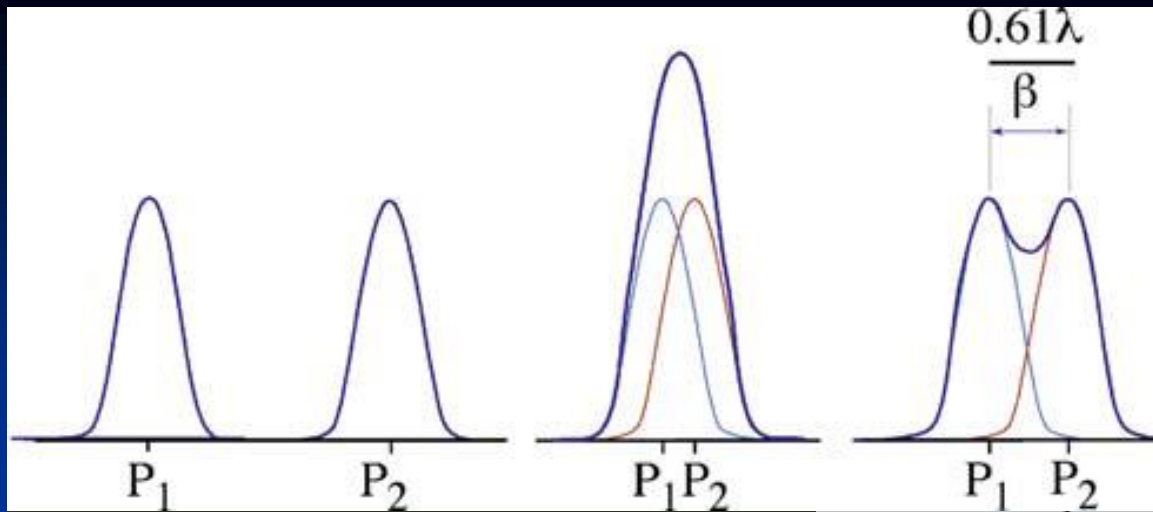
Dyfrakcja na aperturze

Airy rings

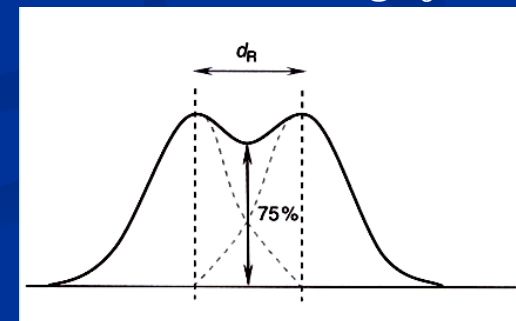
Im α (kąt aperturowy) rośnie
tym efekt dyfrakcyjny maleje,
ale z kolei aberracja sferyczna
rośnie

Im α rośnie, tym efekt dyfrakcyjny maleje





Kryterium Rayleigha
*maksimum pierwszej
 linii pokrywa się z
 minimum drugiej*



Jeżeli średnica centralnego dysku Airyego jest większa w stosunku do reprezentującego go piksela – ma to wpływ na jakość obrazu – pogarsza się zdolność rozdzielcza w mikroskopie!

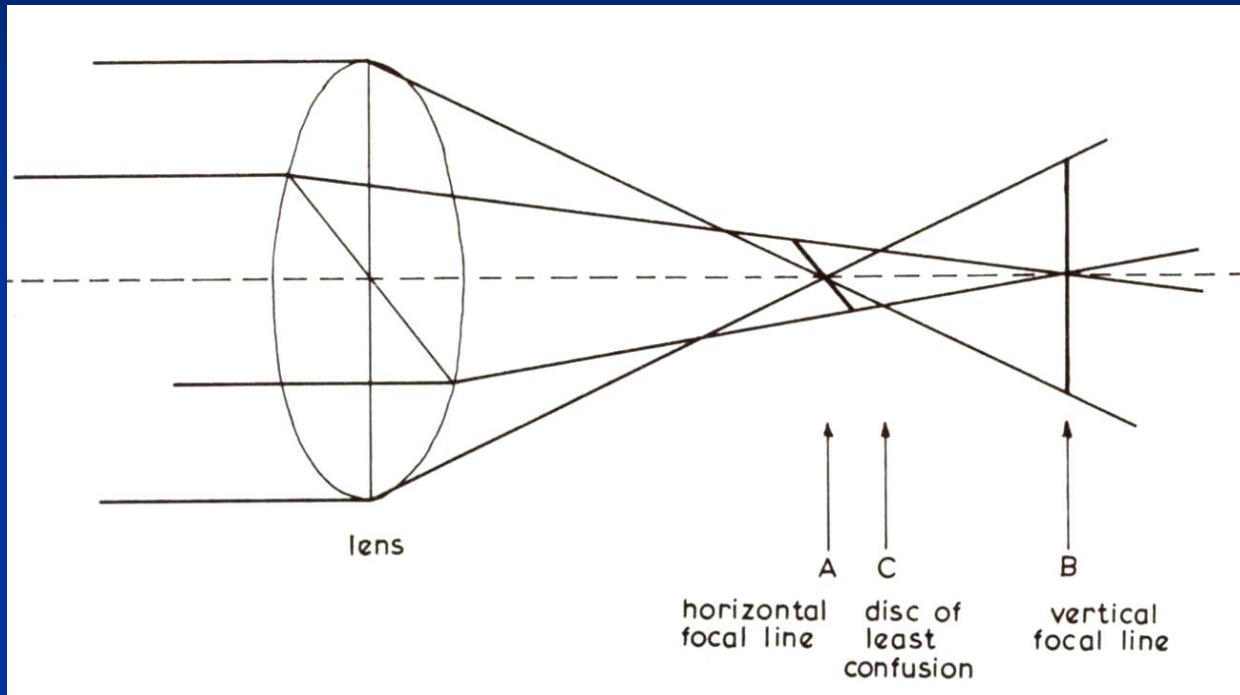
Efektywna zdolność rozdzielcza

$$d_{eff}^2 = \left(0.6 \frac{\lambda}{\alpha}\right)^2 + (0.5 c_s \alpha^3)^2 + \left(c_c \alpha \frac{\Delta E}{E_0}\right)^2 + d_g^2$$

d_g – rozmycie gaussowskie plamki

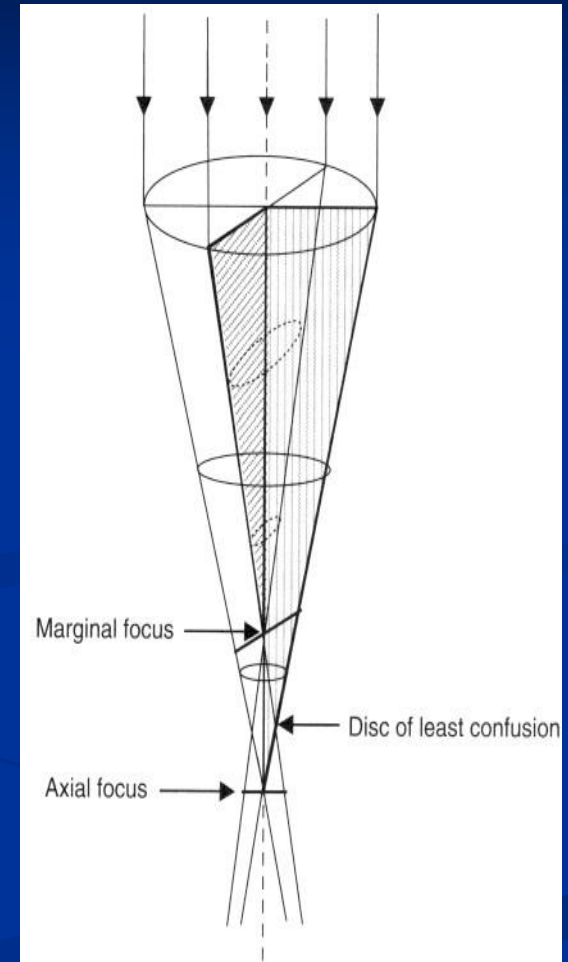
Wady soczewek

Astygmatyzm



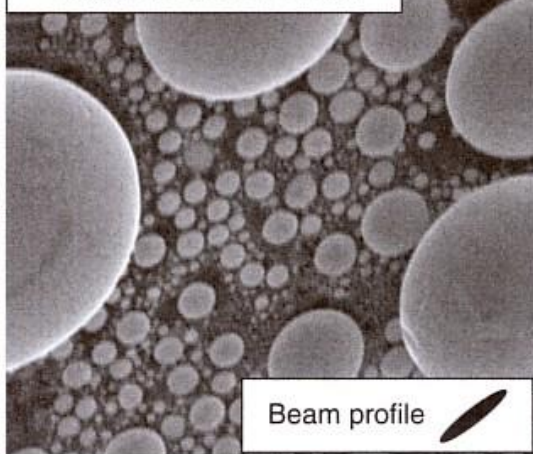
**Zmienne właściwości optyczne soczewki
w osi poziomej i pionowej**

**(w tym przypadku soczewka załamuje
promienie silniej w osi pionowej)**

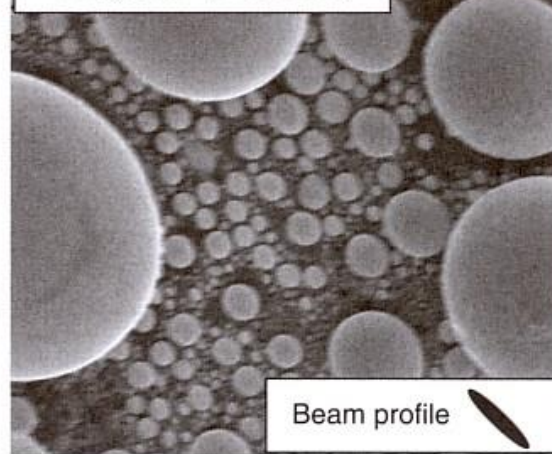


rozmyte ognisko

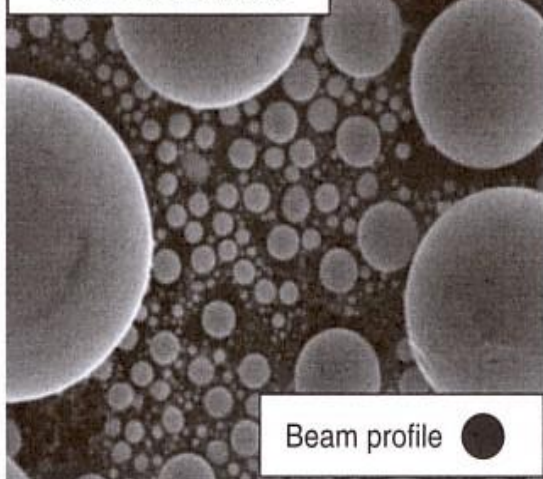
Astigmatic (under focus)



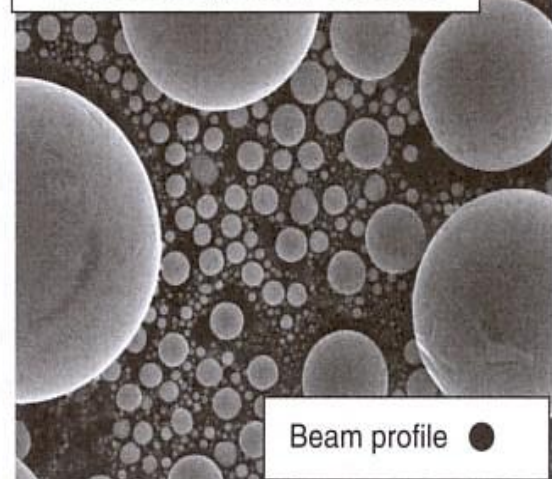
Astigmatic (over focus)



In focus, astigmatic



In focus, astigmatism corrected

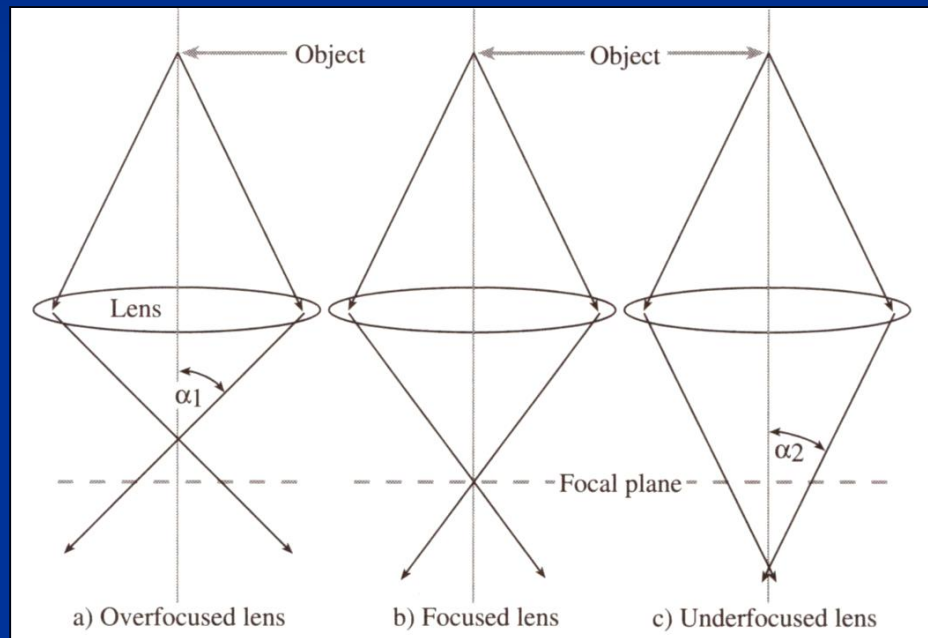


Głębina ostrości

Kiedy obraz jest ostry?

Kiedy znajduje się w **płaszczyźnie ogniskowej soczewki**.

Jeżeli znacznie przesuniemy obiekt powyżej lub poniżej płaszczyzny ogniskowej – obserwowany obraz ulega rozmyciu.



Zakres zmian położenia obiektu, dla których oko ludzkie nie rozróżnia zmian ostrości obrazu (pomimo niewielkich odchyłeń od płaszczyzny ogniskowej):

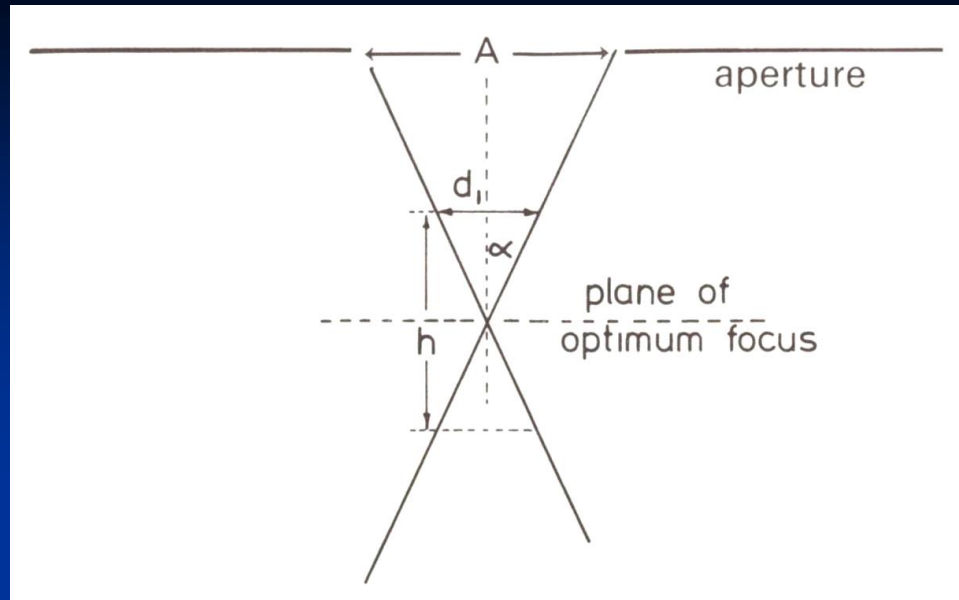
głębina ostrości

$$\frac{\frac{d_1}{2}}{\frac{h}{2}} = \operatorname{tg} \alpha$$

$$\frac{d_1}{h} = \operatorname{tg} \alpha$$

$$h = \frac{d_1}{\operatorname{tg} \alpha}$$

$$d_1 = r_1 = \frac{0.61\lambda}{\mu \sin \alpha}$$



$$h = \frac{0.61\lambda}{\mu \sin \alpha \operatorname{tg} \alpha}$$

Dla mikroskopii optycznej:

$\alpha = 45^\circ$ zdolność rozdzielcza równa jest głębi ostrości

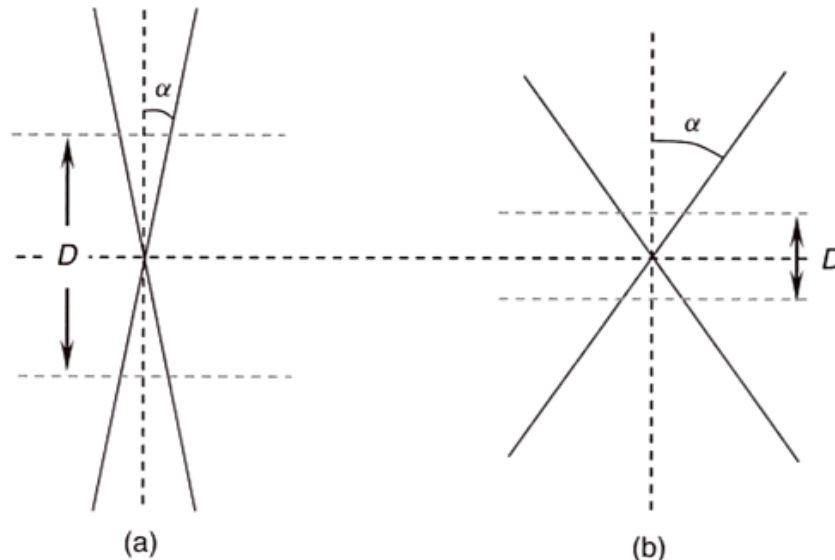
dla $\alpha = 5^\circ$ $d = 5 \mu\text{m}$, $h = 40 \mu\text{m}$

Mikroskopia elektronowa

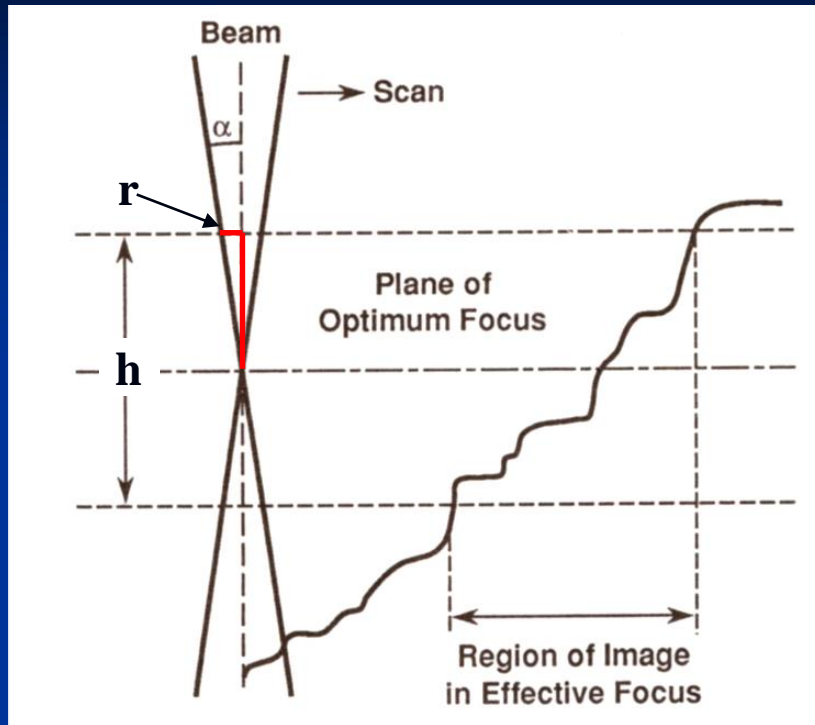
$$h = \frac{0.61\lambda}{\alpha^2}$$

bardzo silna zależność głębi ostrości od kąta aperturowego!

zależność teoretyczna



Głębia ostrości (SEM)



dla LCD wielkość plamki to $100 \mu\text{m} = 0.1 \text{ mm}$,

$r = 1$ piksel,

relacja piksela do obserwowanej powierzchni dana jest zależnością:

$$r = \frac{0.1\text{mm}}{M(\text{pow.})}$$

$$h = \frac{2r}{\alpha} = \frac{0.2(\text{mm})}{\alpha M}$$

Aby zwiększyć głębię ostrości można:

- zmniejszyć powiększenie (ale przecież chcemy prowadzić obserwacje pod bardzo dużym powiększeniem (rozwiązanie niepraktyczne))
- zmniejszyć kąt aperturowy α !!!
Jak?
- Przez zastosowanie apertur o różnej średnicy!!!

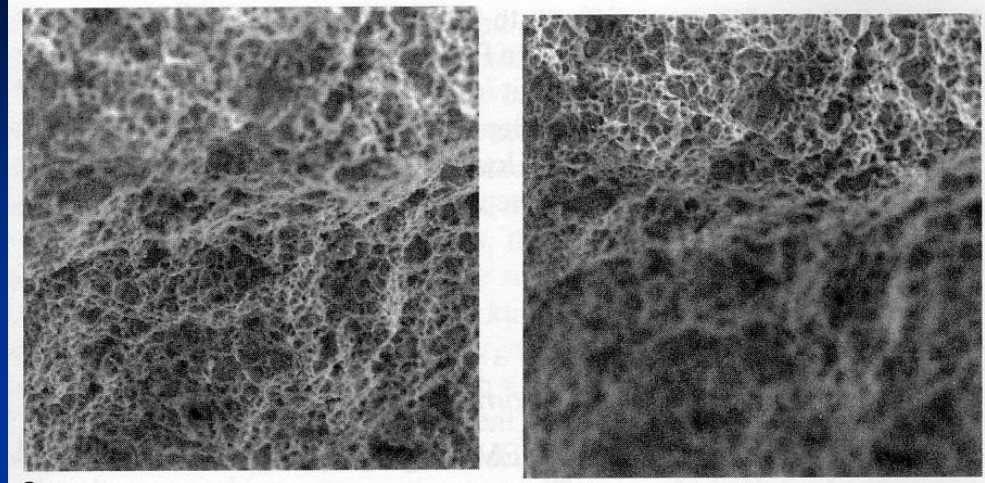
Table 4.3. Depth of Field at 10-mm Working Distance

Magnification	100- μm aperture 0.29° ($\alpha = 5 \times 10^{-3}$ rad)	200- μm aperture 0.57° ($\alpha = 10^{-2}$ rad)	600- μm aperture 1.72° ($\alpha = 3 \times 10^{-2}$ rad)
10 \times	4 mm	2 mm	670 μm
50 \times	800 μm	400 μm	133 μm
100 \times	400 μm	200 μm	67 μm
500 \times	80 μm	40 μm	13 μm
1 000 \times	40 μm	20 μm	6.7 μm
10 000 \times	4 μm	2 μm	0.67 μm
100 000 \times	0.4 μm	0.2 μm	0.067 μm

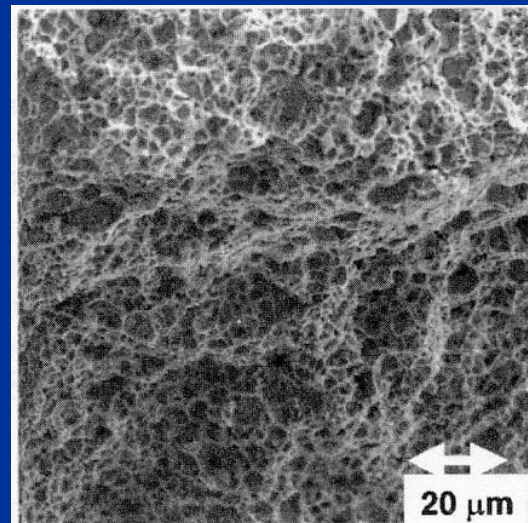
Głębina ostrości „h” rośnie, gdy:

- zmniejszamy kąt aperturowy (stosujemy mniejszą średnicę apertury)
- zmniejszamy powiększenie

Głębia ostrości

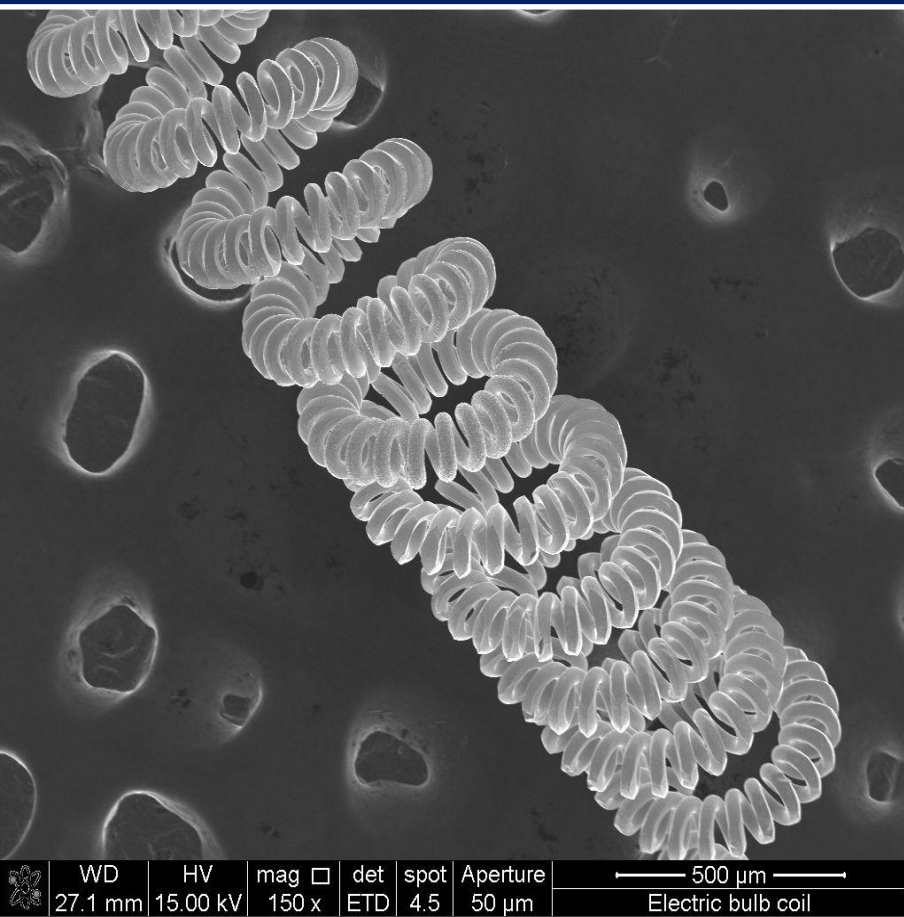


Ognisko w dolnej części Ognisko w górnej części
Apertura 130 μm

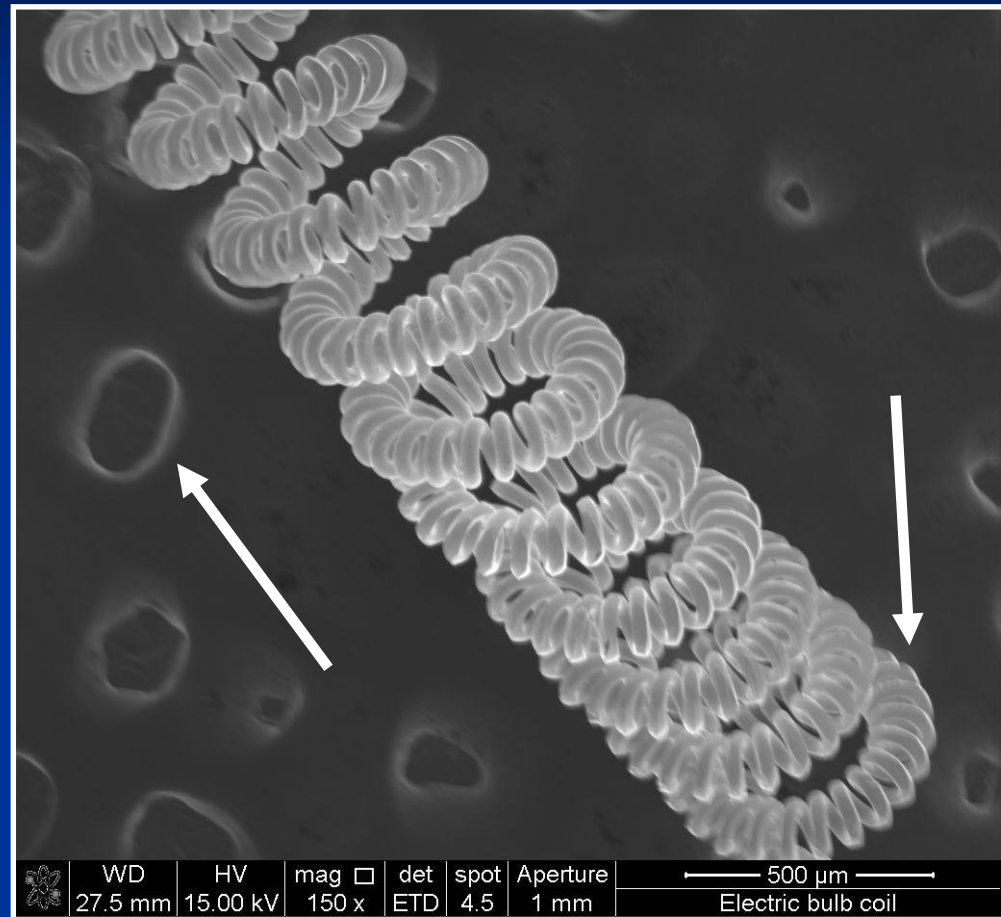


Duża głębia ostrości
Apertura 70 μm

Głębia ostrości



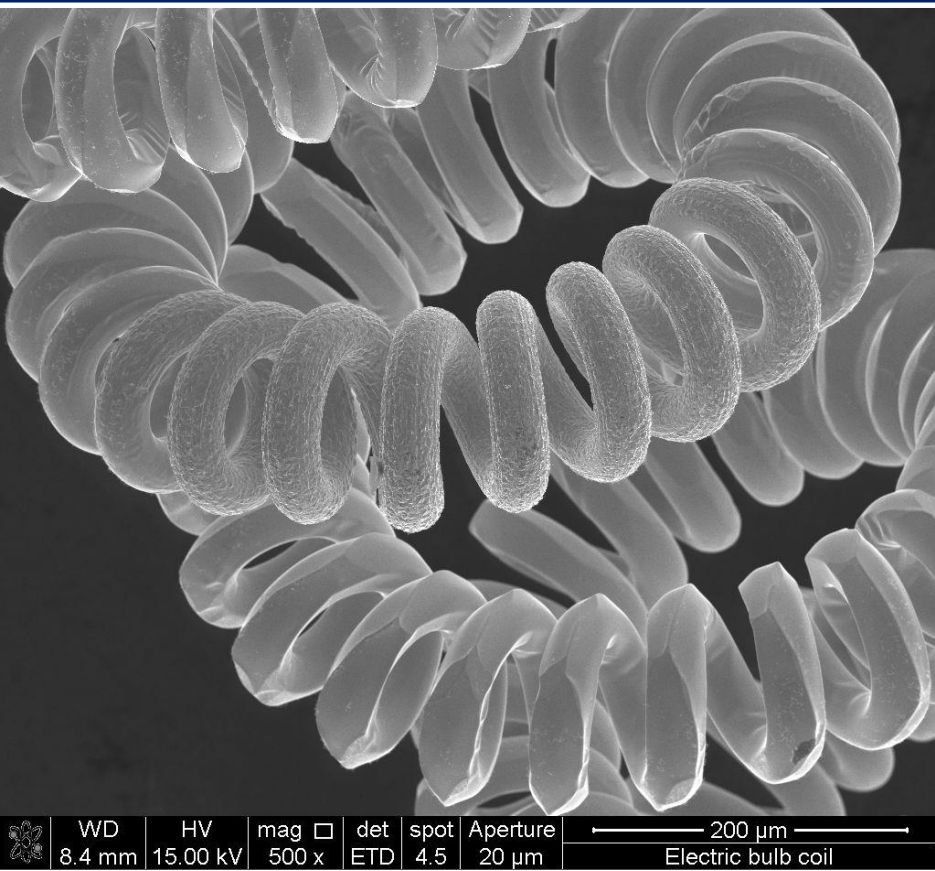
Średnica apertury 50 µm



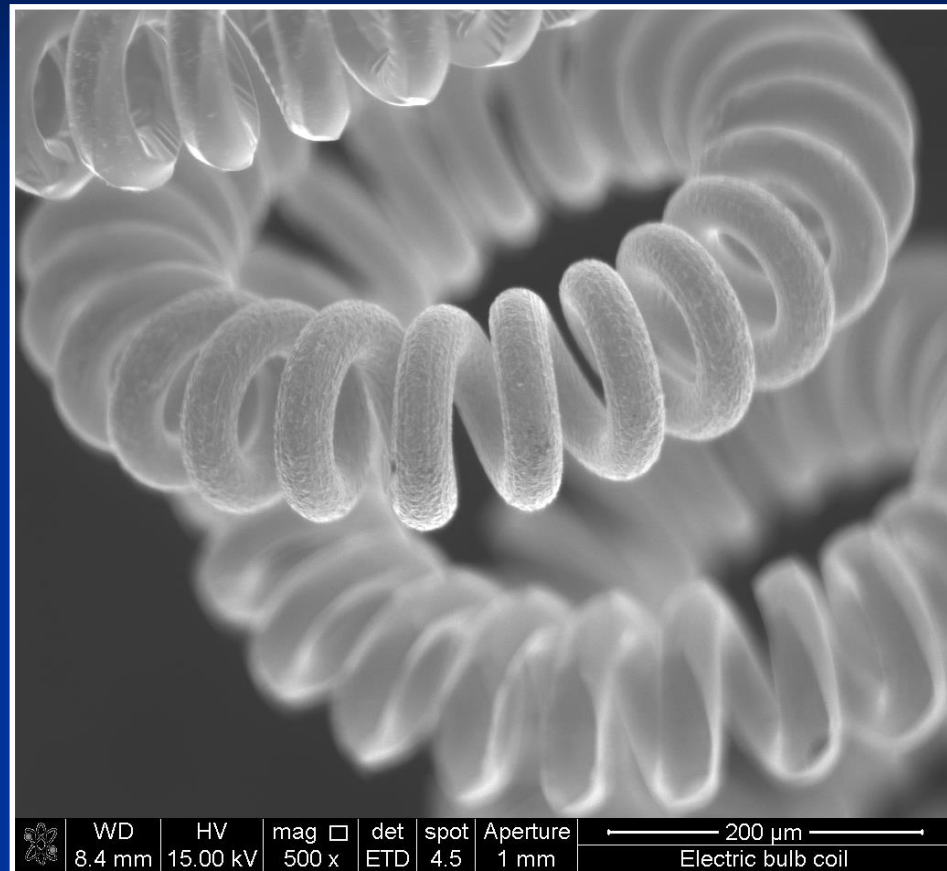
Średnica apertury 1000 µm

WD ca 27 mm

Głębia ostrości



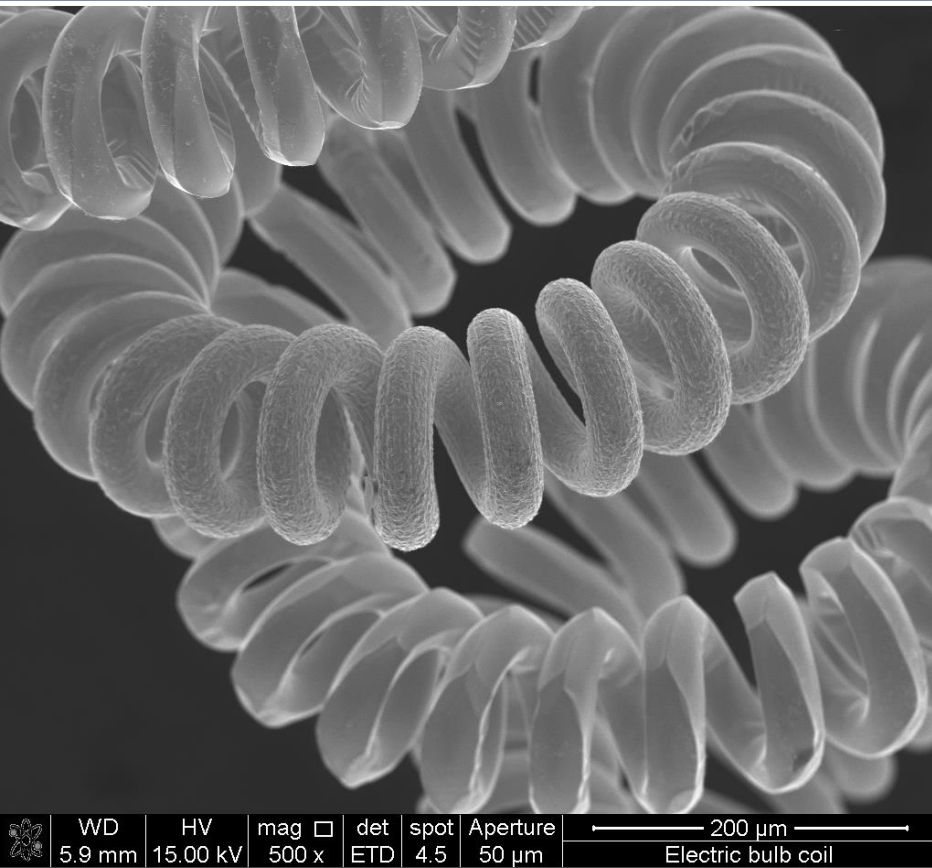
Średnica apertury 20 µm



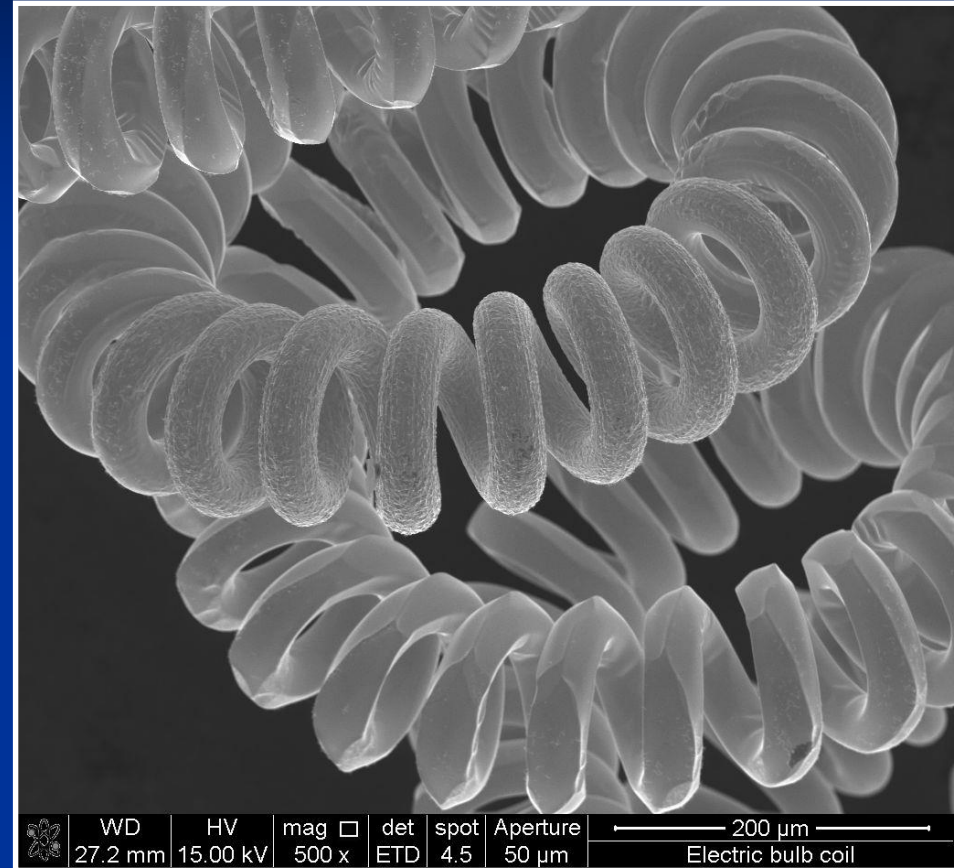
Średnica apertury 1000 µm

WD 8.4 mm

Głębia ostrości



WD 5.9 mm



WD 27.2 mm

Średnica apertury 50 μm

Wraz z zwiększającą się wartością WD maleje kąt aperturowy, a w konsekwencji rośnie głębia ostrości

Poprawa głębi
ostrości poprzez
zwiększenie WD

DP – *depth of field*
WD – *working distance*

WD = 3 mm

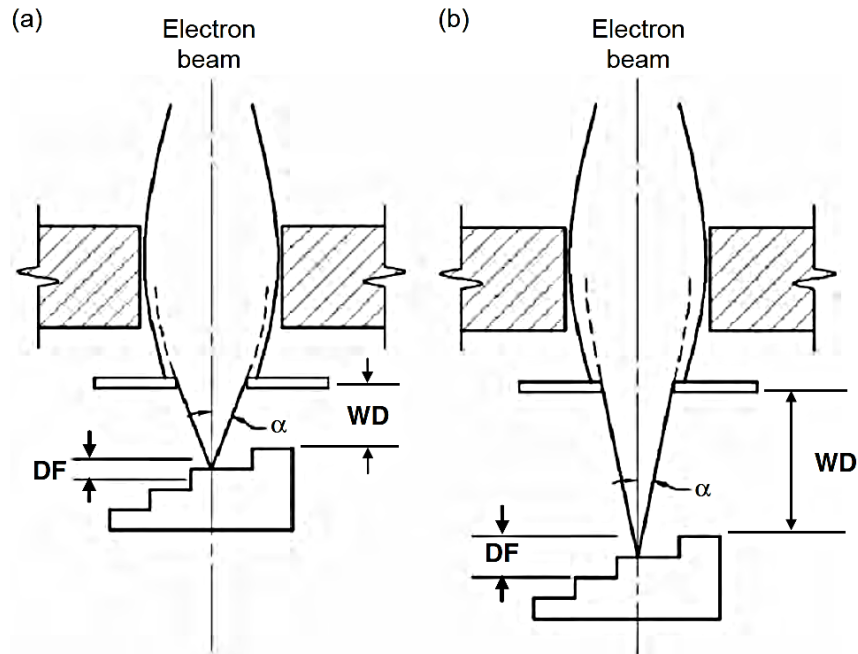


FIGURE 1.19. Beam diagram showing enhancement of depth of field (DF) by increasing working distance (WD). (a) Short working distance and (b) long working distance.

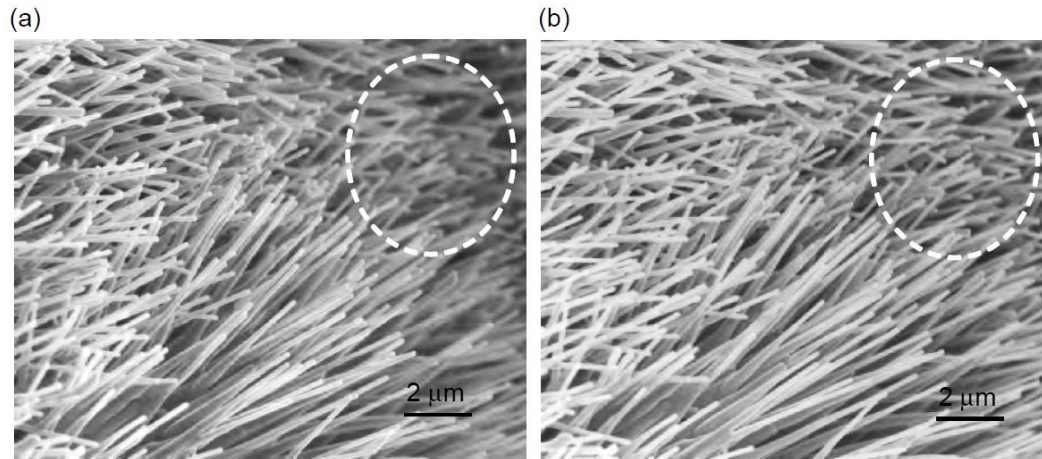
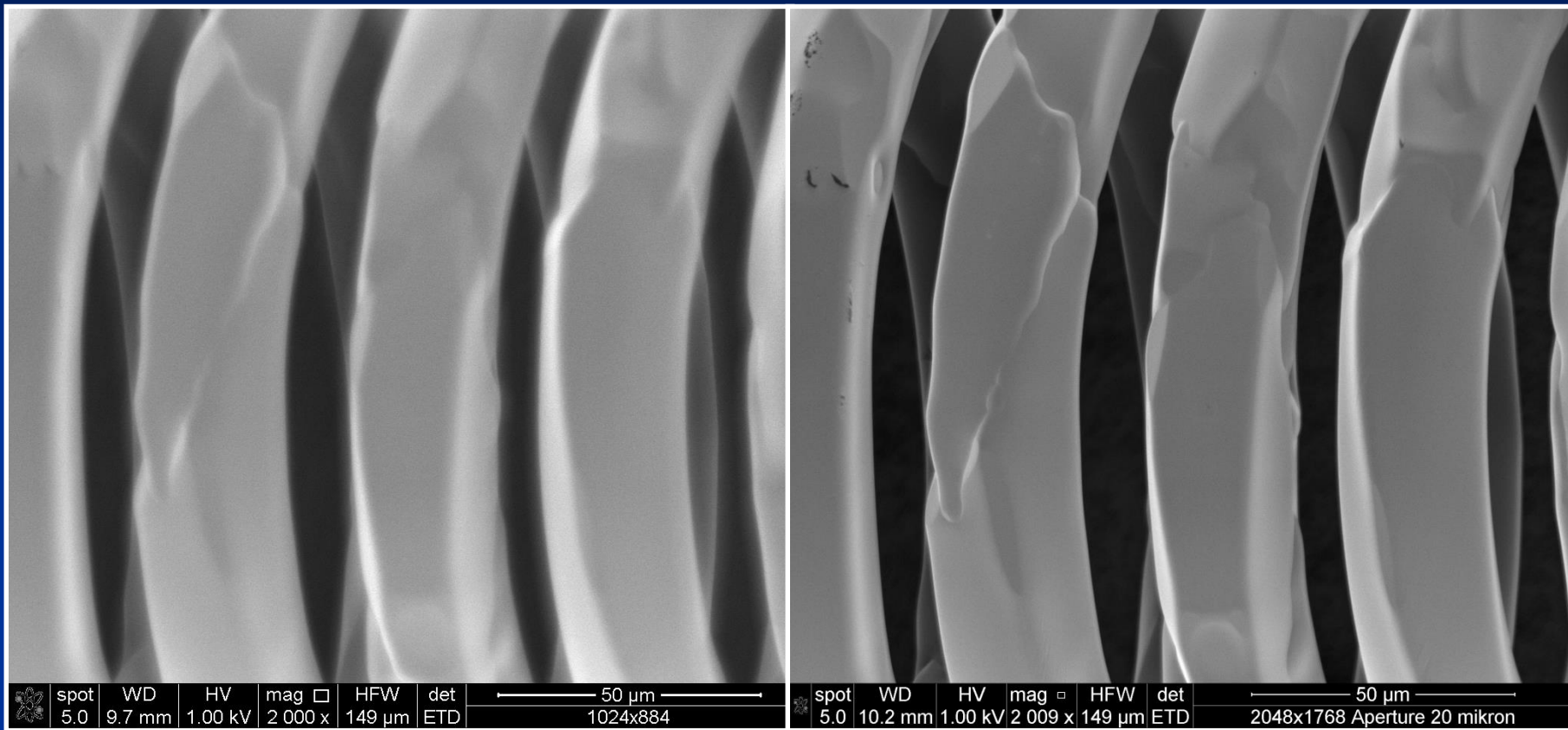


FIGURE 1.20. Well aligned Co-doped ZnO nanowires array fabricated by chemical vapor deposition, showing the enhancement of depth of field by increasing the working distance from (a) 3 mm to (b) 12 mm, which is emphasized by circles.

WD = 12 mm

Zdolność rozdzielcza i wpływ apertury



WD 9.7 mm

HV 1 kV

1024x884

Średnica apertury 50 µm

WD 10.2 mm

HV 1 kV

2048x1768

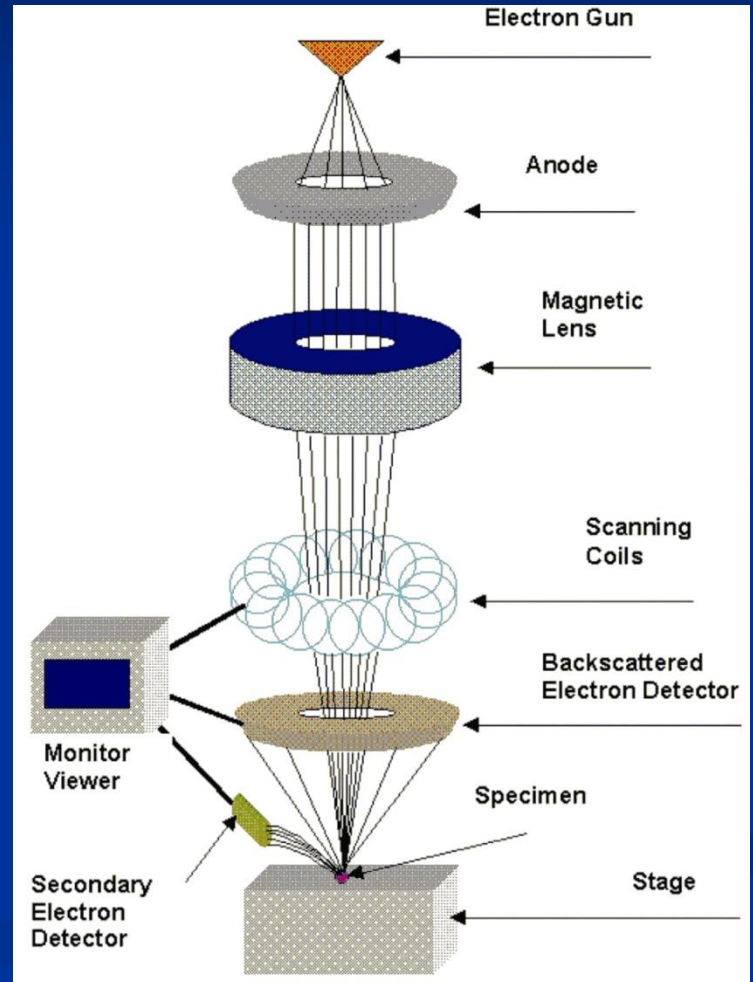
Średnica apertury 20 µm

XL SERIES

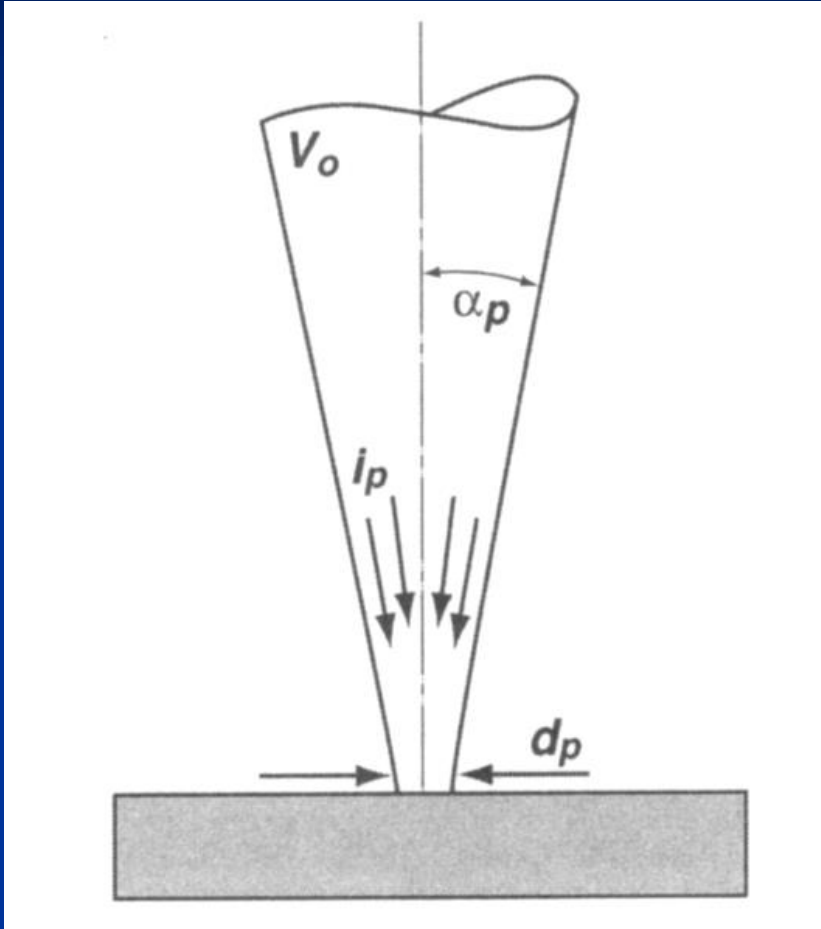
Scanning Electron Microscopes



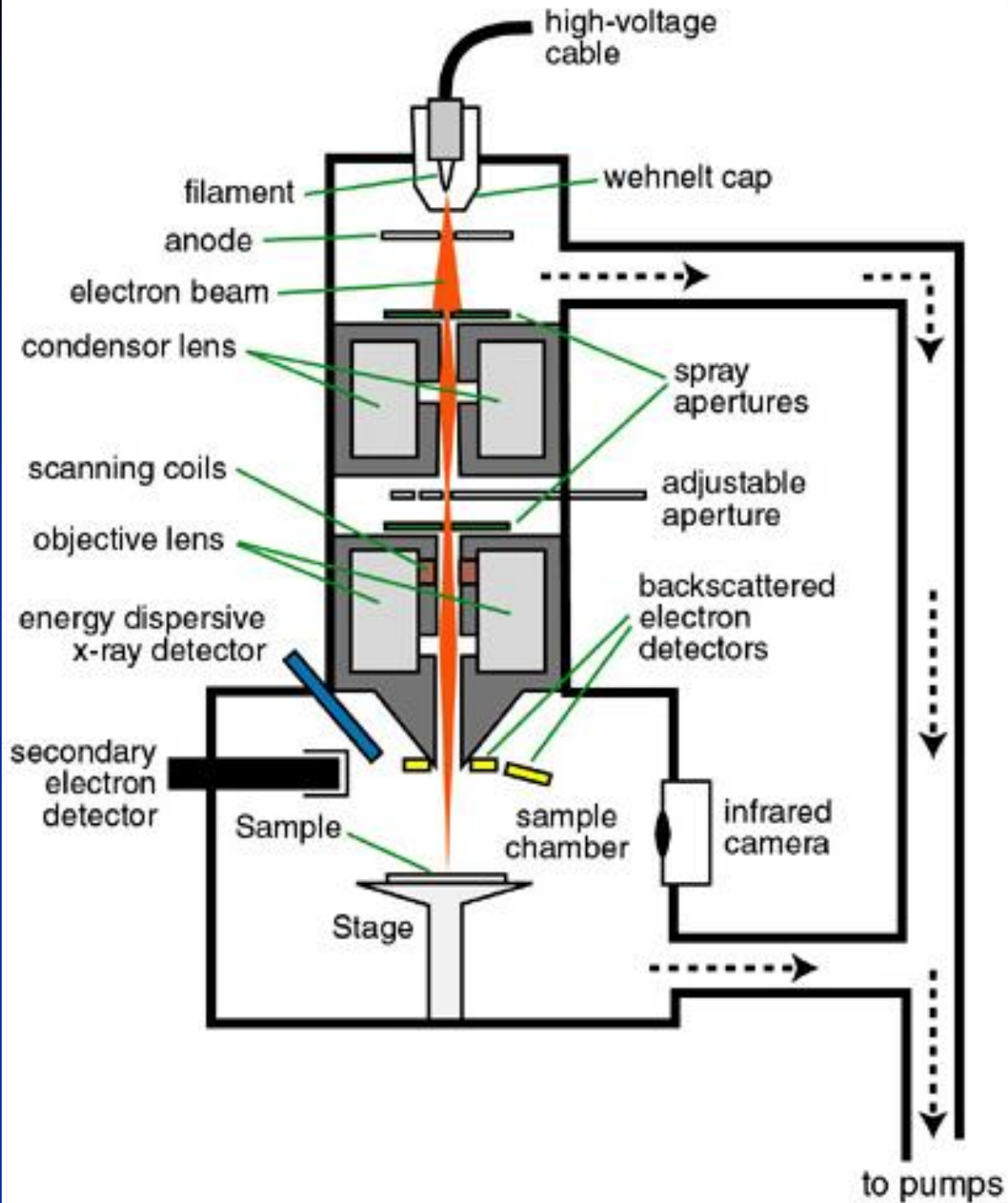
Schemat SEM



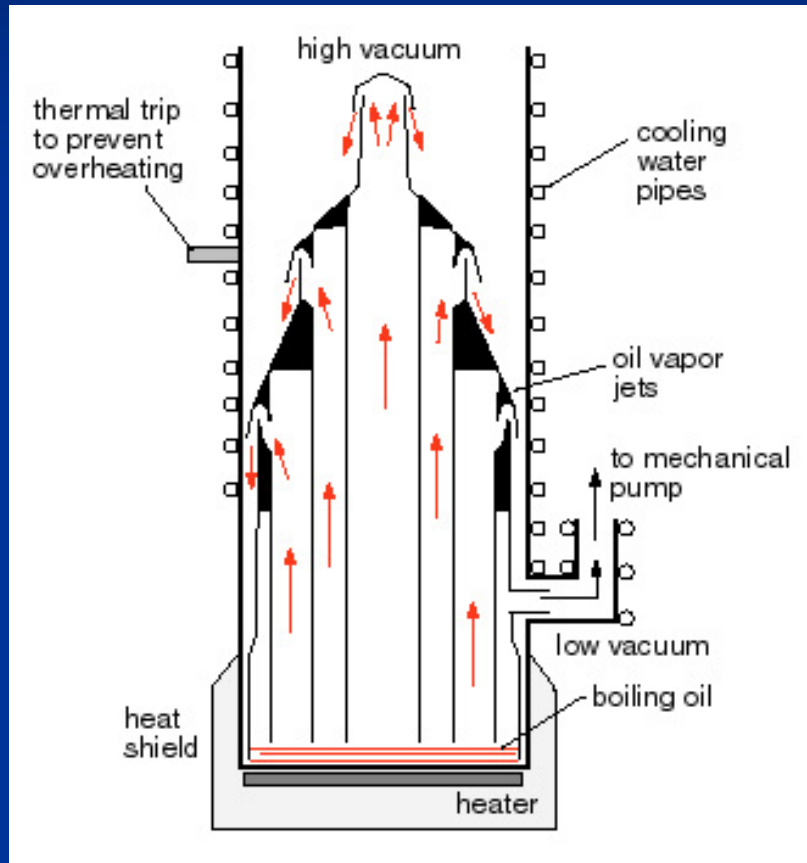
Ostrość obrazu i rozróżnialność szczegółów w SEM zależą od 4 parametrów:



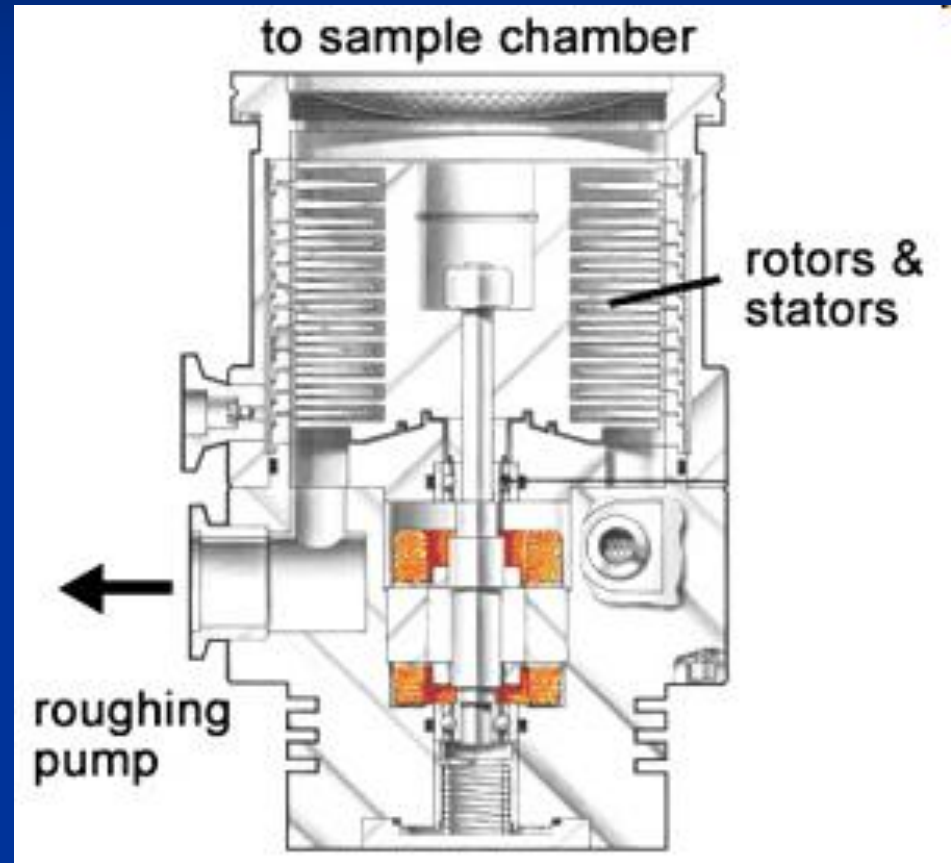
1. d_p - średnica wiązki elektronowej
od tego parametru zależy zdolność rozdzielcza mikroskopu
2. i_p - prąd wiązki elektronowej
od tego parametru zależy stosunek sygnału do szumów w mikroskopie
3. α_p - kąt zbieżności wiązki elektronowej (kąt aperturowy)
od tego parametru zależy głębina ostrości mikroskopu
4. V_0 - napięcie przyspieszające wiązkę elektronową
od tego parametru zależy głębokość penetracji elektronów



ODP



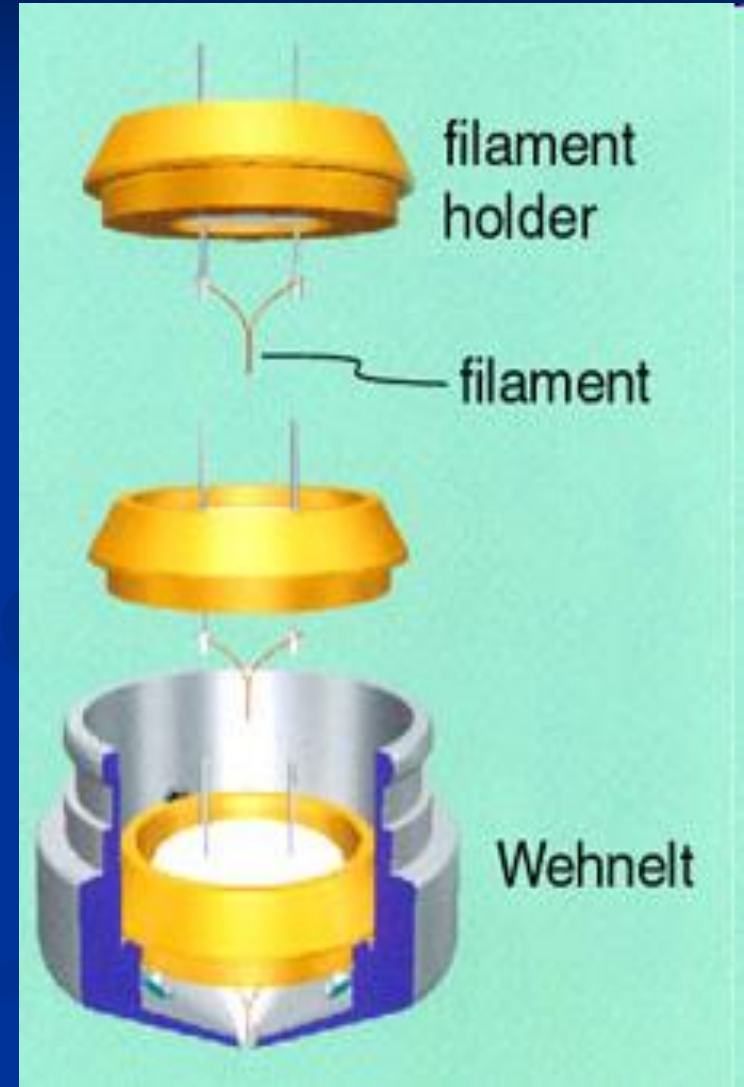
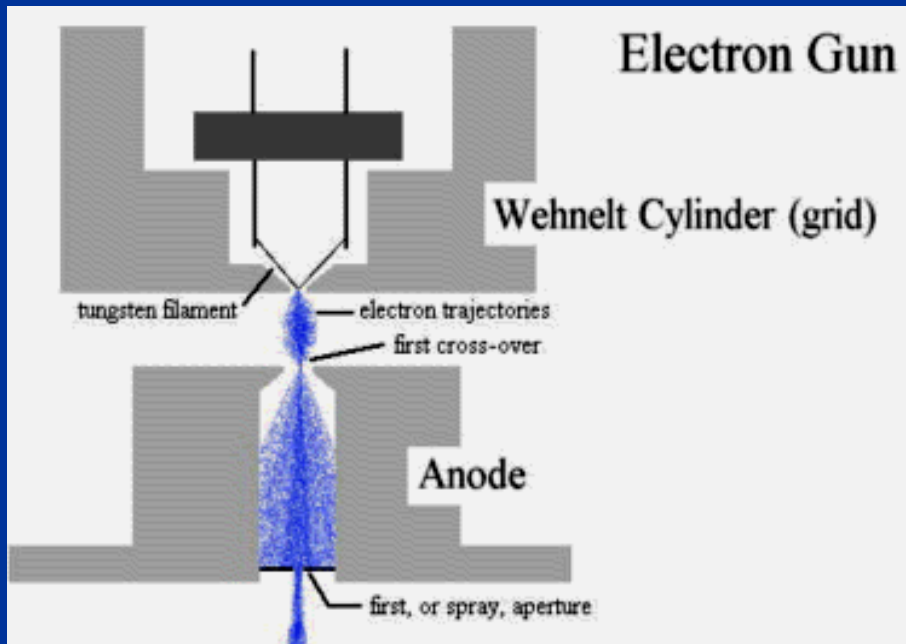
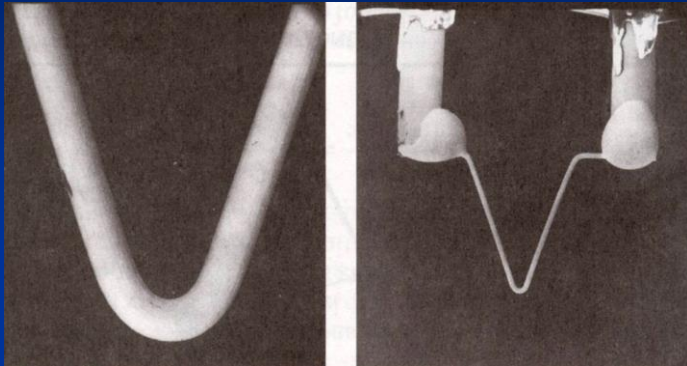
TMP



Źródła elektronów w ME (SEM i TEM)

- Źródło wolframowe z termoemisją
- Źródło LaB_6 z termoemisją
- Źródła FEG (Field Emission Gun)
 - Cold Field Emission
 - Thermal Field Emission (Schottky Field Emission)

Źródło wolframowe z termoemisją



Cylinder Wehnelta – prosta soczewka elektrostatyczna pierwsza soczewka w mikroskopie elektronowym (!)

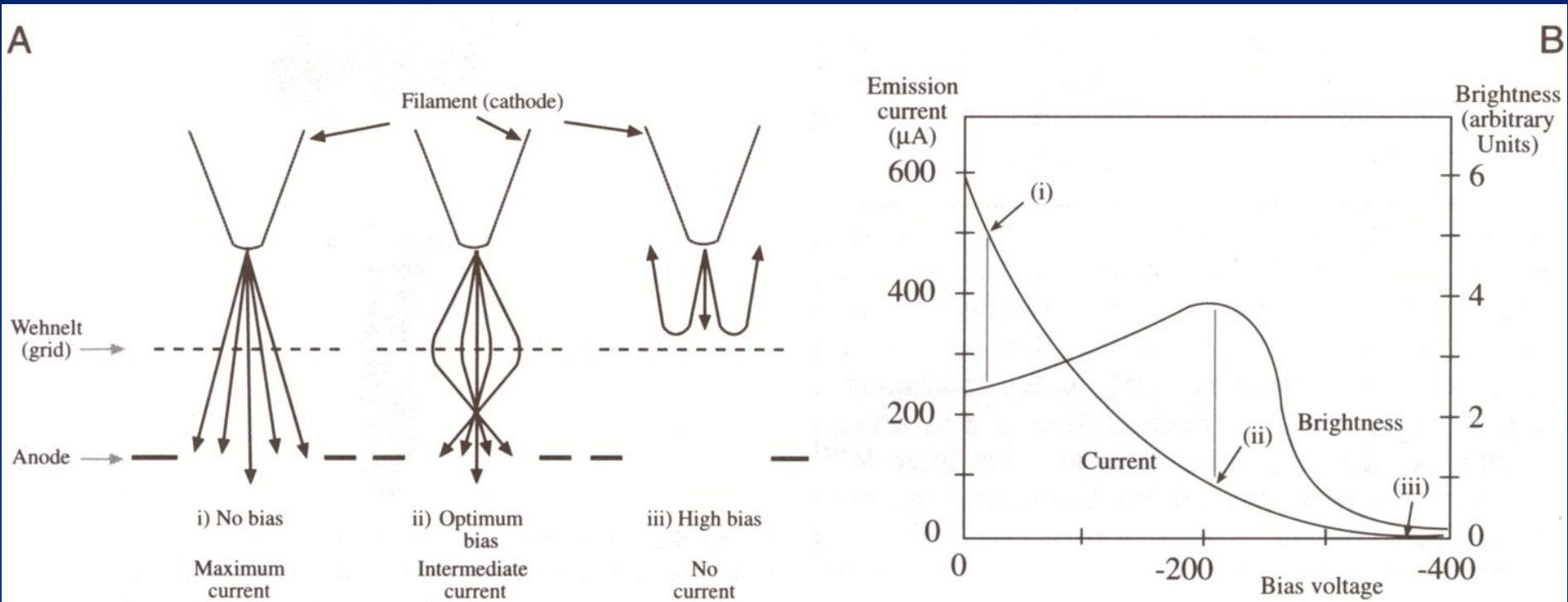
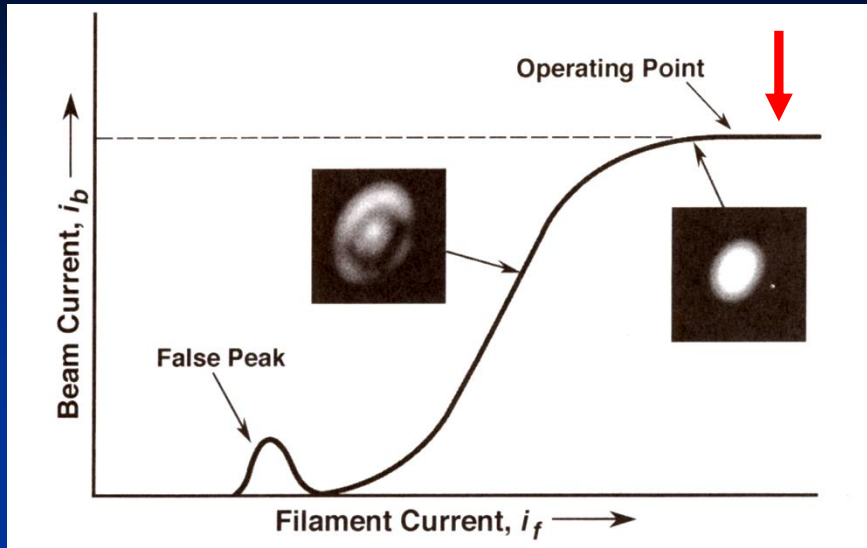


Figure 5.4. (A) The effect of increasing Wehnelt bias (i–iii) on the distribution of electrons coming through the anode. (B) The relationship between the bias and the emission current/gun brightness. Maximum brightness is achieved at an intermediate Wehnelt bias, and an intermediate emission current [condition (ii) in A].

emission current – prąd wiązki w „cross-overze”
„brightness” !!!

plateau



β (jasność) - liczba elektronów skierowana na określoną powierzchnię w jednostce czasu

$$\beta = \frac{i_p}{\left(\frac{\Pi d_g^2}{4}\right) \Pi \alpha^2} = \frac{4i_p}{\Pi^2 d_g \alpha^2}$$

β – jasność (brightness)

i_p – prąd wiązki elektronowej

d_g – Gaussowska średnica wiązki elektronowej

α – kąt zbieżności wiązki elektronowej

$$\beta = 2 \times 10^5 T V \exp\left(-\frac{\Phi}{kT}\right) \left[\frac{\text{A}}{\text{m}^2 \text{srkV}}\right]$$

T – temp [K],

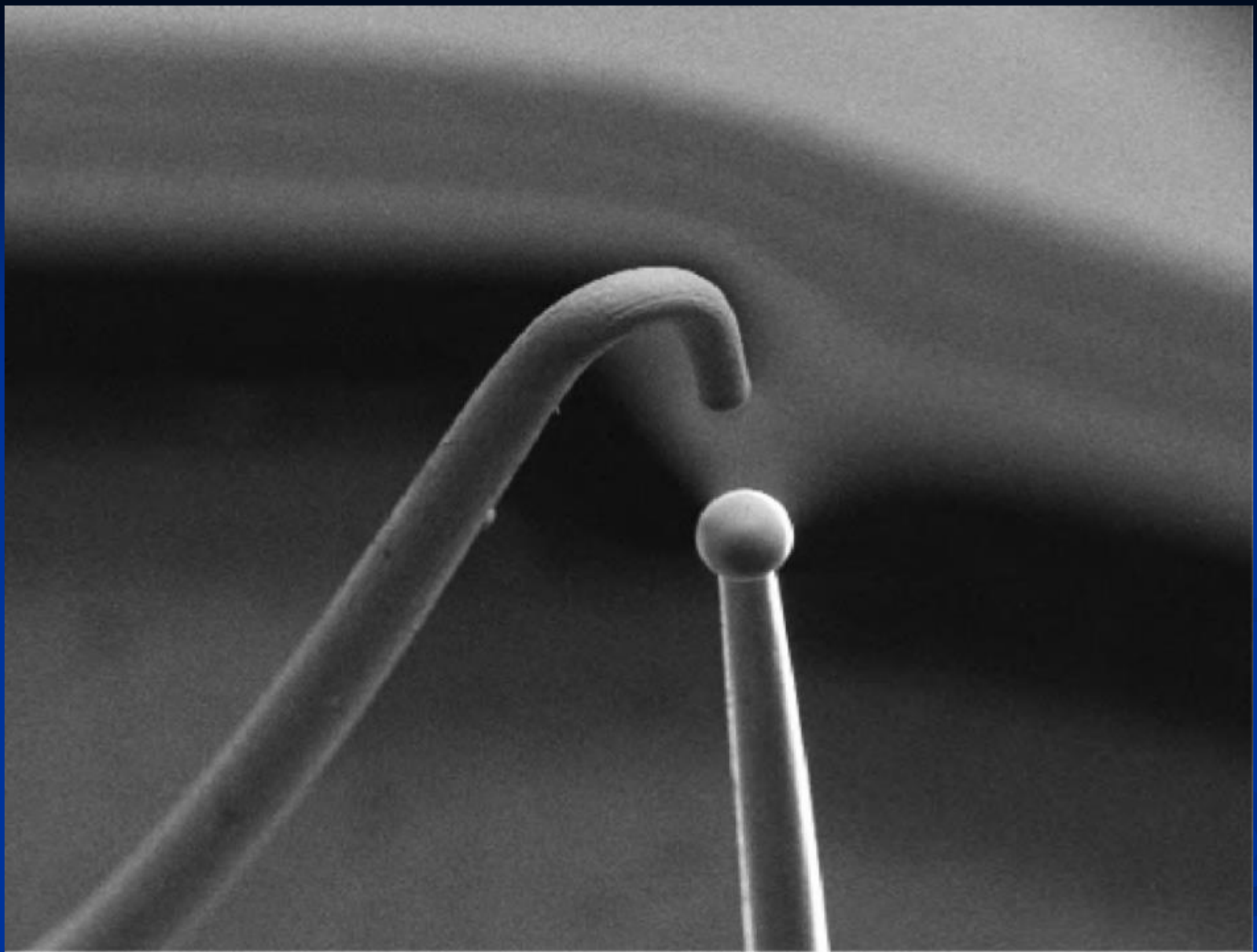
V – napięcie przyspieszające elektrony

Φ – praca wyjścia materiału katody [eV]

k – stała Boltzmann $1.380649 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$

$\beta \uparrow T \uparrow$ (nie możemy bezkarnie grzać włókna, bo ulegnie przepaleniu)

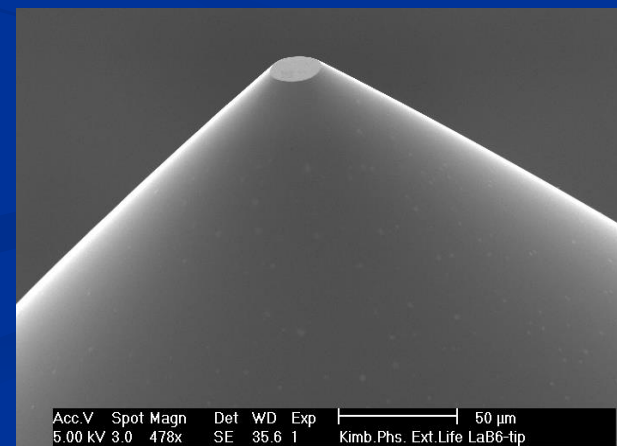
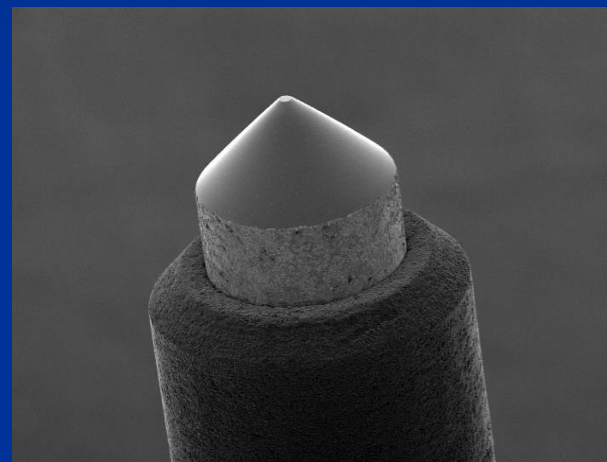
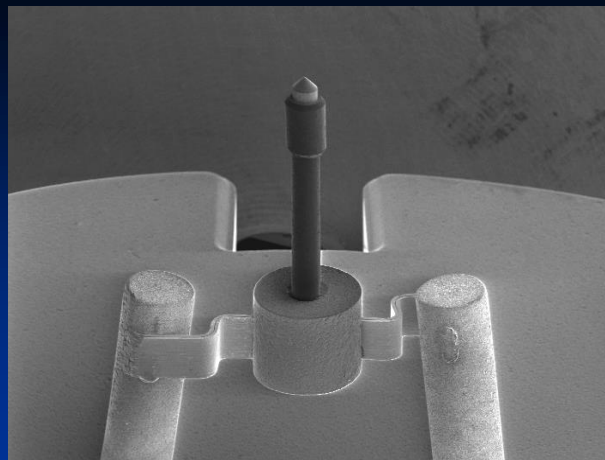
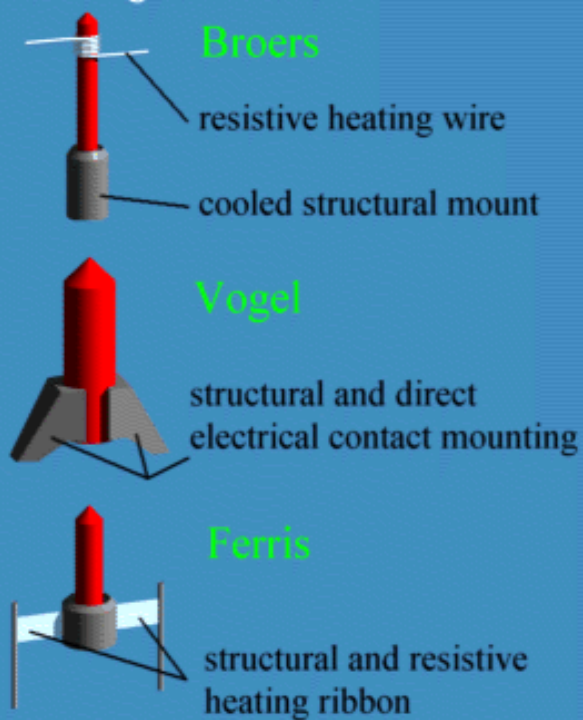
$\beta \uparrow \Phi \downarrow !!!$



Co się dzieje jak pracujemy za długo na plateau

Źródło LaB₆ z termoemisją

LaB₆ cathodes



Dla LaB₆ praca wyjścia elektronu $\phi = 2,4 \text{ eV}$

$$\beta_{\text{LaB}_6} \approx 10 \beta_{\text{W}}$$

średnica cross-over $d_0 = 10 \mu\text{m}$

Źródła FEG (Field Emission Gun)

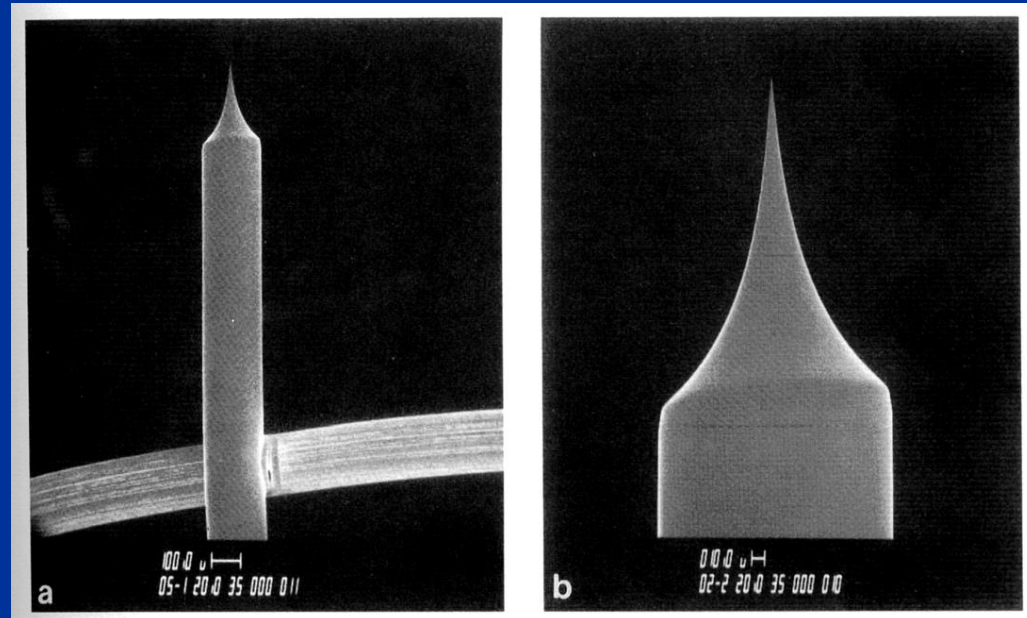
- CFE (Cold Field Emission)
- TFE (Thermal Field Emission)

CFE (Cold Field Emission)

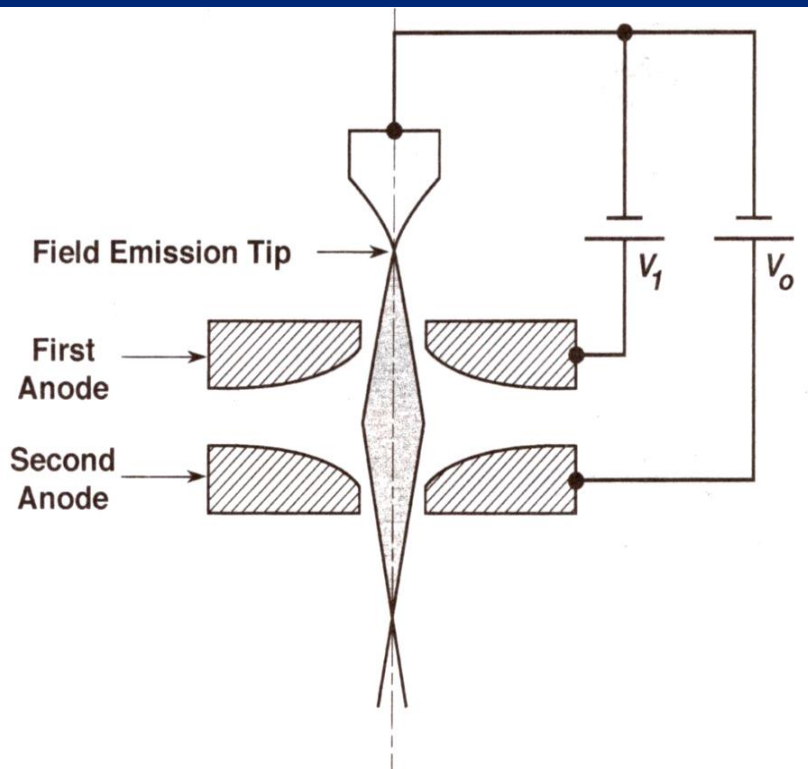
średnica ostrza 100 nm – ujemny potencjał na katodzie – pole elektryczne koncentruje się na ostrzu. Przy wartości **10 V/nm** wielkość bariery potencjału ulega obniżeniu – pojawia się tzw. efekt tunelowania.

Materiał katody – **wolfram** – bo wytrzymuje naprężenia mechaniczne pojawiające się na końcu ostrza pod wpływem pola elektrycznego

Efekt tunelowania – w temp. 297 K (!)



CFE (Cold Field Emission) cd.



V_1 – napięcie pomiędzy pierwszą anodą a ostrzem (3-5 kV – emisja 10 μ A) (**ekstraktor**)

V_0 – napięcie pomiędzy drugą anodą a ostrzem (od kilkuset V do 30 kV w SEM albo 100 kV lub więcej w TEM) (**emiter**)

Powierzchnia ostrza – atomowo czysta! (każdy obcy atom obniża pracę wyjścia elektronu!)

- przy próżni 10^{-5} Pa – 1 monowarstwa molekuł gazu osadza się na ostrzu co 1 sec.
- przy próżni 10^{-10} Pa – 1 monowarstwa molekuł gazu osadza się na ostrzu co 7 h

Dlatego do pracy CFE wymagana jest ultrawysoka próżnia: 10^{-8} - 10^{-9} Pa

CFE (Cold Field Emission) cd.

Na początku pracy CFE rozgrzanie ostrza do temp. 2500 K celem usunięcia molekuł gazu. Wtedy obserwuje się największą emisję prądu elektronów.

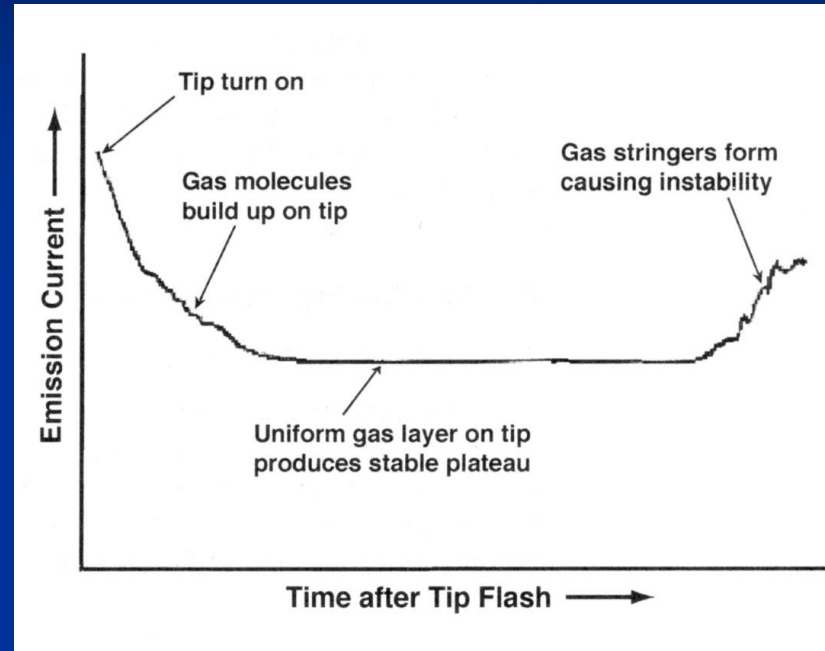
Z czasem emisja maleje, bo narasta warstwa molekuł gazu (po 10-15 min.).

Po osadzeniu monowarstwy gazu praca źródła stabilizuje się na okres kilku godzin.

Po tym czasie warstwa molekuł gazu jest tak gruba, że pojawia się niestabilność pracy CFE.

Wymagane jest nowe nagrzanie ostrza do temp. 2500 K.

Itd., itd.....



Zalety CFE:

1. średnica cross-over $d_0 = 2-3 \text{ nm}$
2. wiązka monoenergetyczna (rozmycie 0.3 eV)

Wada CFE:

niestabilność pracy w czasie (złe rozwiązanie dla mikroanalizy rtg.)

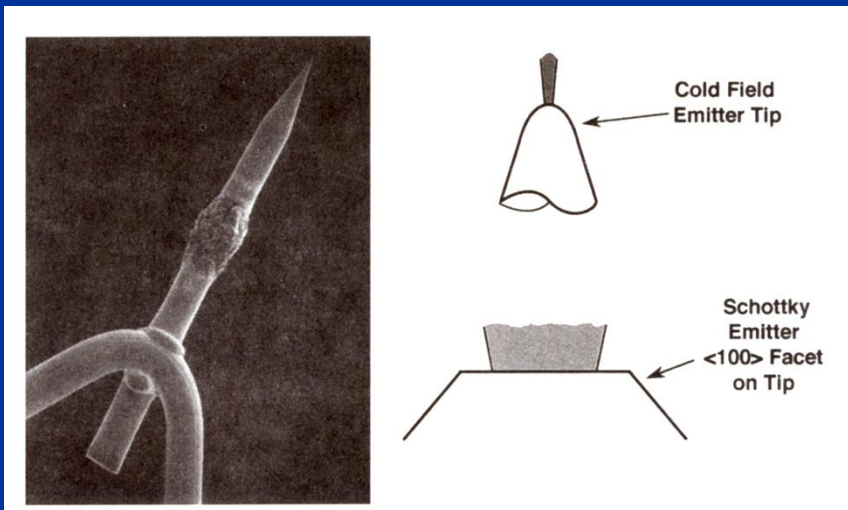
SFE (Schottky Field Emission)

TFE (Thermal Field Emission) – pracuje na takiej samej zasadzie jak CFE, ale ostrze jest podgrzewane do 1800 K – powierzchnia ostrza czysta, brak obcych atomów, może pracować w gorszej próżni.

SFE (Schottky Field Emission) – znaczące obniżenie pracy wyjścia ϕ poprzez zwilżanie powierzchni ostrza ciekłym dwutlenkiem cyrkonu.

Dla ZrO_2 praca wyjścia $\phi = 2.6 \text{ eV} \rightarrow$ maksymalna β wśród wszystkich źródeł

Rezerwuar ZrO_2 ma skończoną objętość – ograniczony czas pracy SFE do 12-15 miesięcy



Zalety SFE:

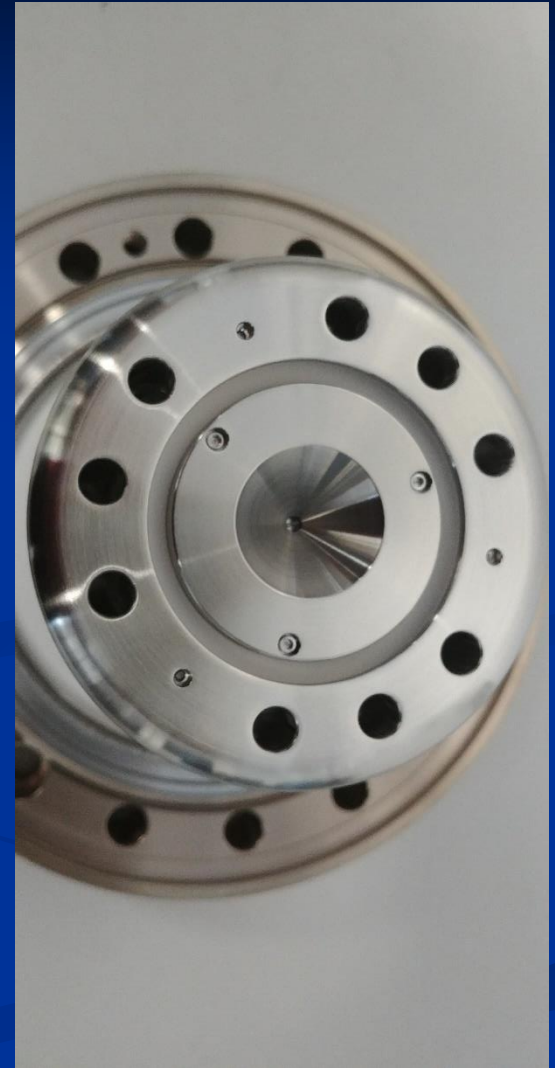
1. najwyższa jasność źródła β
2. najlepsza stabilność

Wada SFE:

średnica cross-over $d_0 = 20-30 \text{ nm}$
(ale przecież jest cały system demagnifikujący średnicę d_0)

FEG z termoemisją Schottky'ego

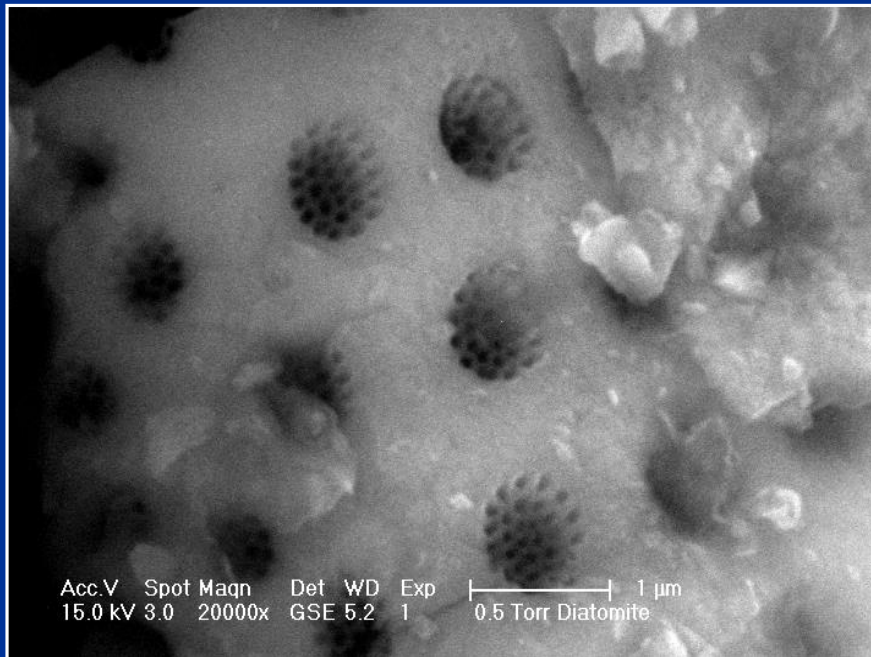
SFE (Schottky Field Emission)



Electron Source Performance Comparison

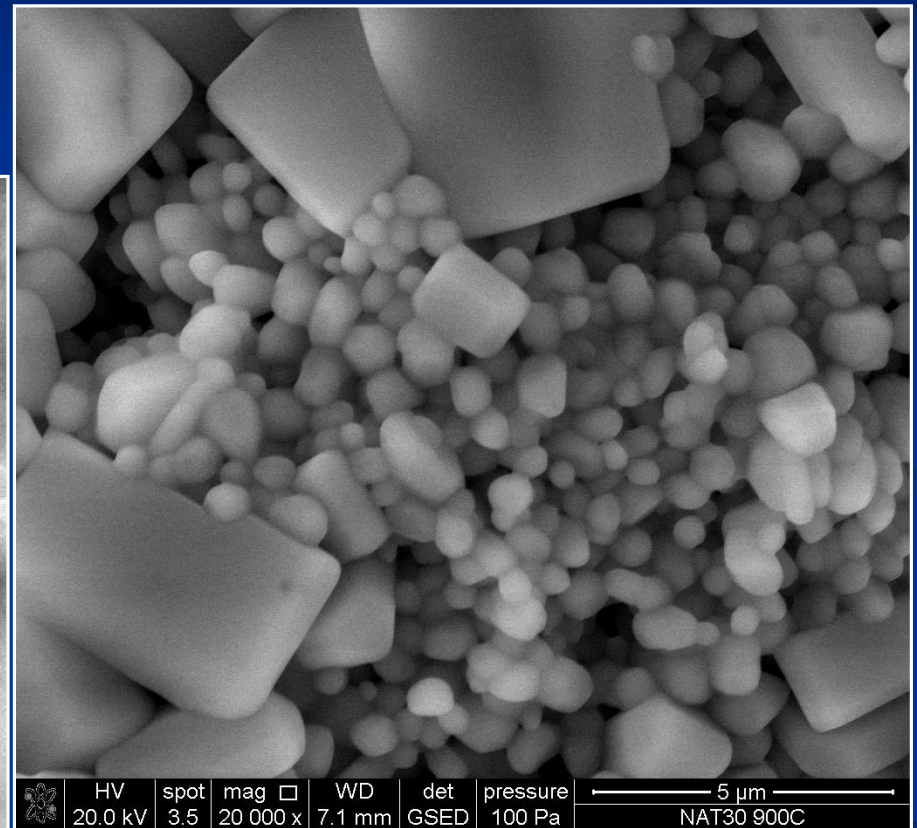
Emitter type	thermionic	thermionic	cold FE	Schottky FE
Cathode material	W	LaB ₆	W (310)	ZrO/W (100)
Operating temperature [K]	2,800	1,900	300	1,800
Cathode radius [nm]	60,000	10,000	≤ 100	≤ 1,000
Effective source radius [nm]	15,000	5,000	2.5 (a)	15 (a)
Emission current density [A/cm ²]	3	30	17,000	5,300
Total emission current [μA]	200	80	5	200
Normalized brightness [A/cm ² .sr.kV]	1 . 10 ⁴	1 . 10 ⁵	2 . 10 ⁷	1 . 10 ⁷
Maximum probe current [nA]	1000	1000	0.2	> 20
Energy spread at the cathode [eV]	0.59	0.40	0.26	0.31
Energy spread at the gun exit [eV]	1.5 - 2.5	1.3 - 2.5	0.3 - 0.7	0.35 - 0.7
Beam noise [%]	1	1	5 - 10	1
Emission current drift [%/h]	0.1	0.2	5	< 0,5
Operating vacuum [hPa]	≤ 1 . 10 ⁻⁵	≤ 1 . 10 ⁻⁶	≤ 1 . 10 ⁻¹⁰	≤ 1 . 10 ⁻⁸
Cathode life [h]	200	1000	2000	2000
Cathode regeneration	not required	not required	every 6 to 8 h	not required
Sensitivity to external influence	minimal	minimal	high	low

Diatomit

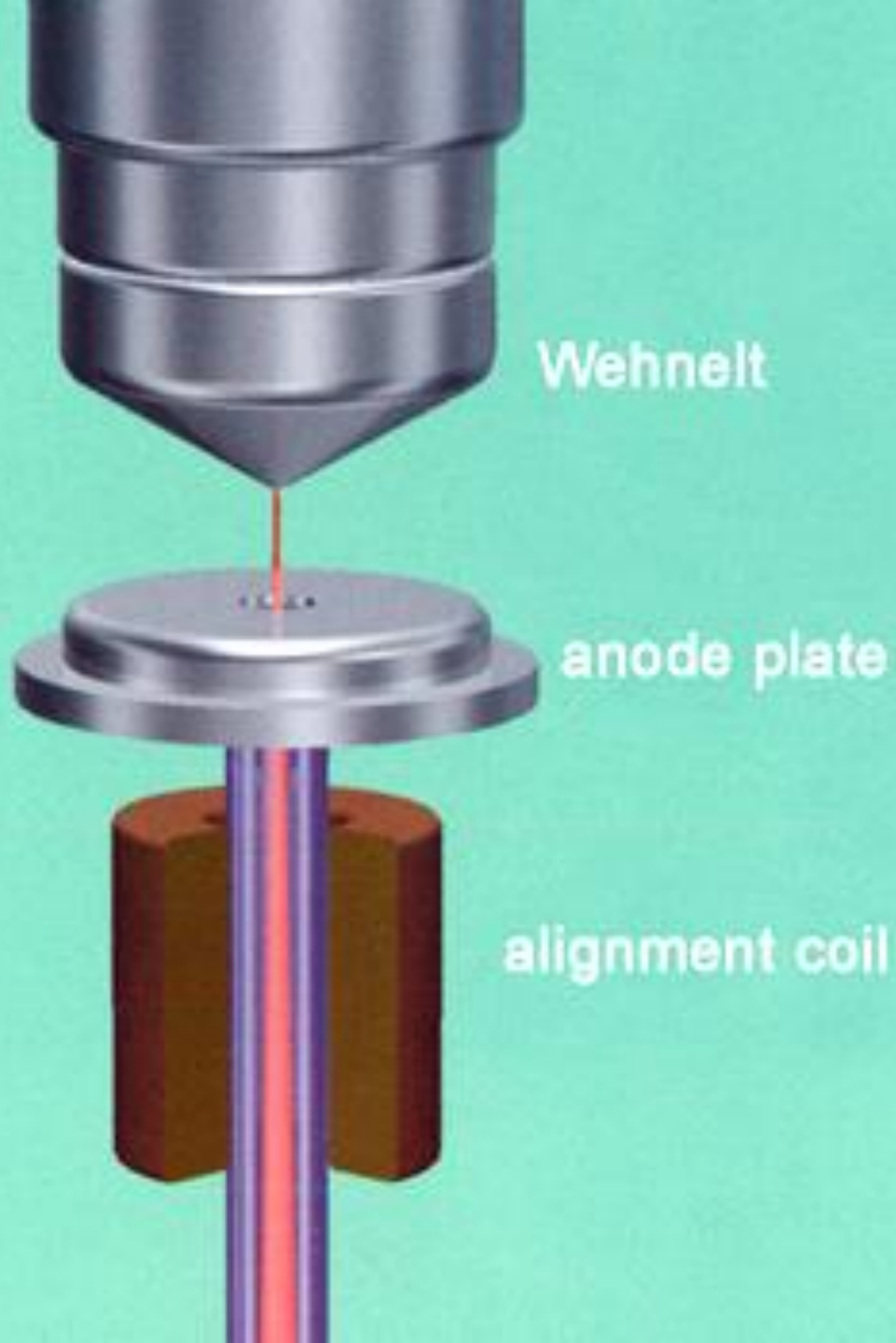


Źródło wolframowe z termoemisją

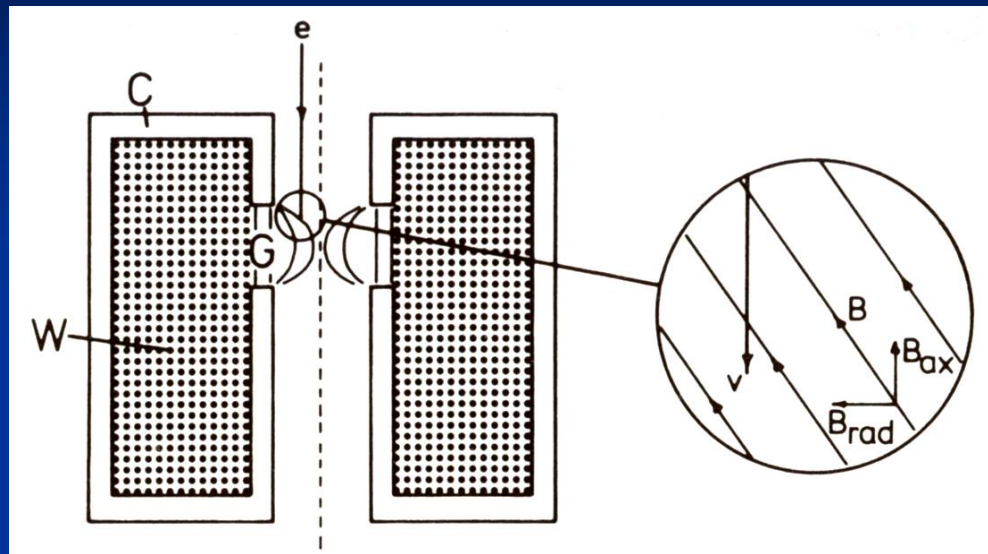
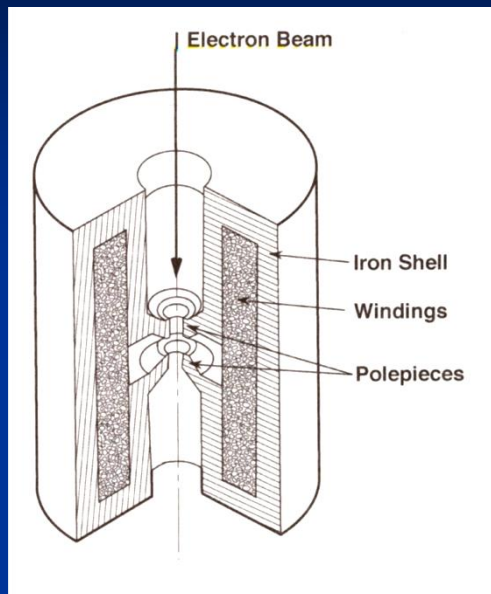
Kompozyt HAp/bioszkło



SFE (Schottky Field Emission)



Soczewki magnetyczne



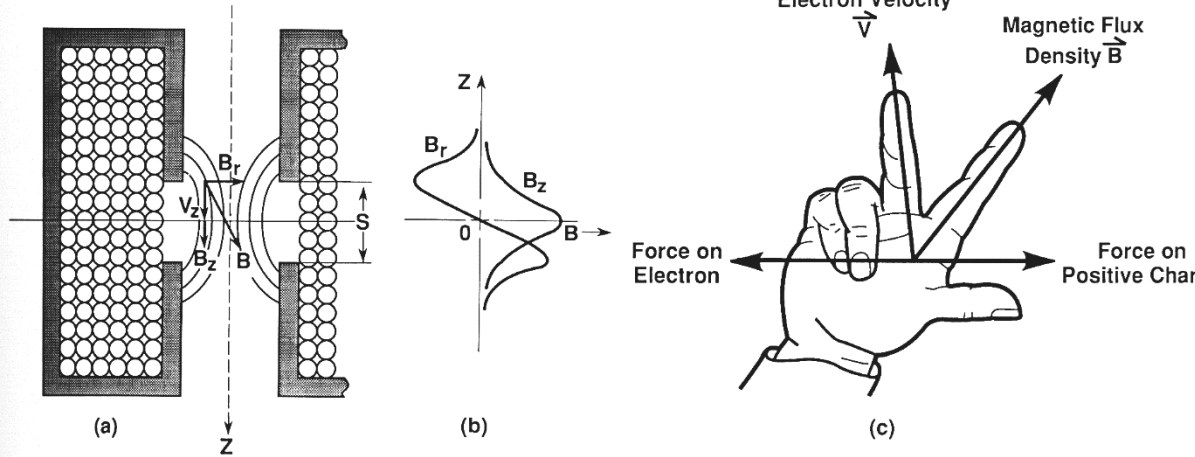
Na elektron poruszający się w prędkością „ v ” w polu magnetycznym działa siła: $\mathbf{F} = e \mathbf{v} \times \mathbf{B}$

wektorowo $\mathbf{F} = e(\vec{B} \wedge \vec{v})$

B – natężenie pola magnetycznego

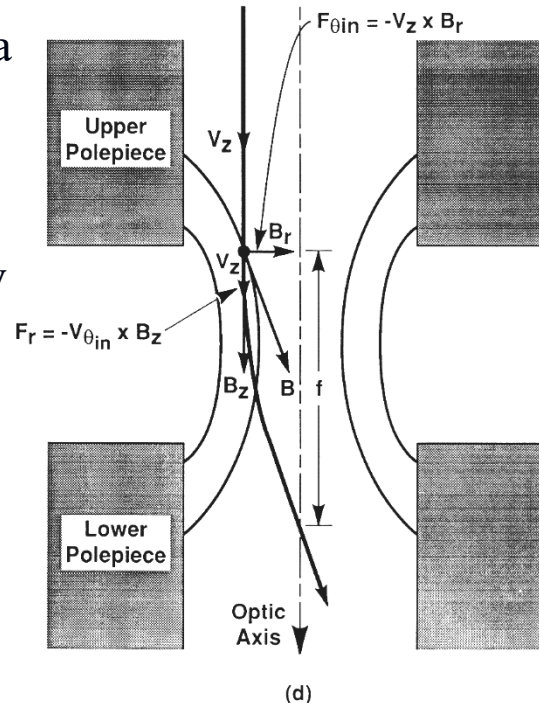
Pole B ma dwie składowe: B_{ax} \parallel do osi elektronooptycznej

B_{rad} \perp do osi elektronooptycznej



Początkowo $B_{z=ax}$ nie działa na elektron, natomiast $B_{r=rad}$ działa z rosnącą siłą $F_{r=rad}$ - elektron zaczyna poruszać się po spirali wzdłuż osi Z . Wtedy na e^- zaczyna działać siła $F_{z=ax}$ o składowej pola $B_{z=ax}$. Promień spirali staje się coraz mniejszy.

Figure 2.15. Schematic of an axially symmetric electromagnetic lens (adapted from Hall, 1966). (a) Magnetic flux density components B_r and B_z inside the lens. (b) Plot of the magnetic flux density components B_r and B_z along the optic axis. (c) Illustration of the right-hand rule. (d) Enlarged schematic of polepiece area of (a), showing the forces on an electron that cause it to be focused.



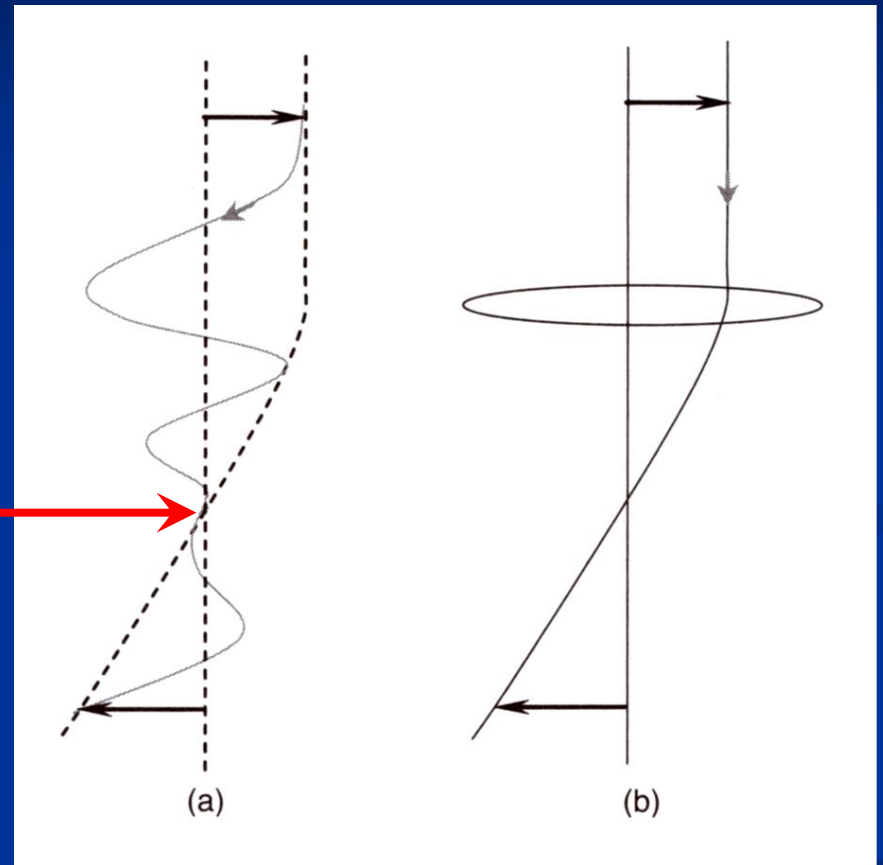
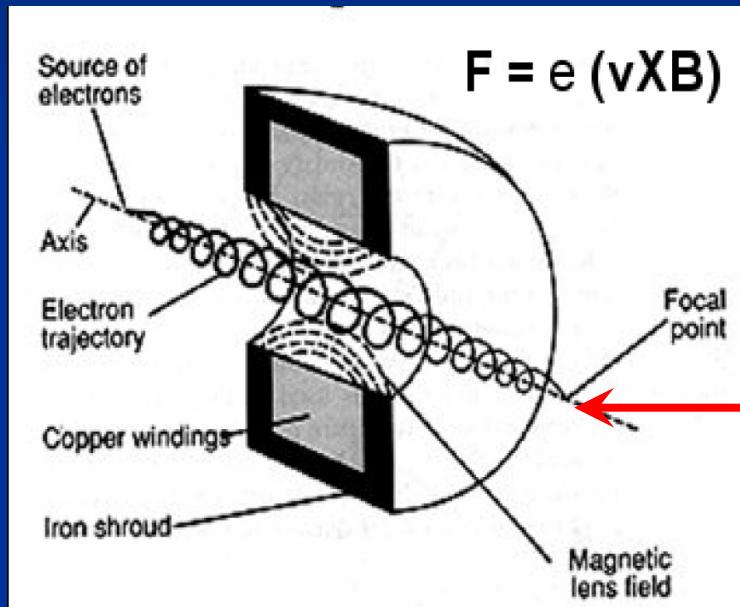
Wynik oddziaływania pola magnetycznego:

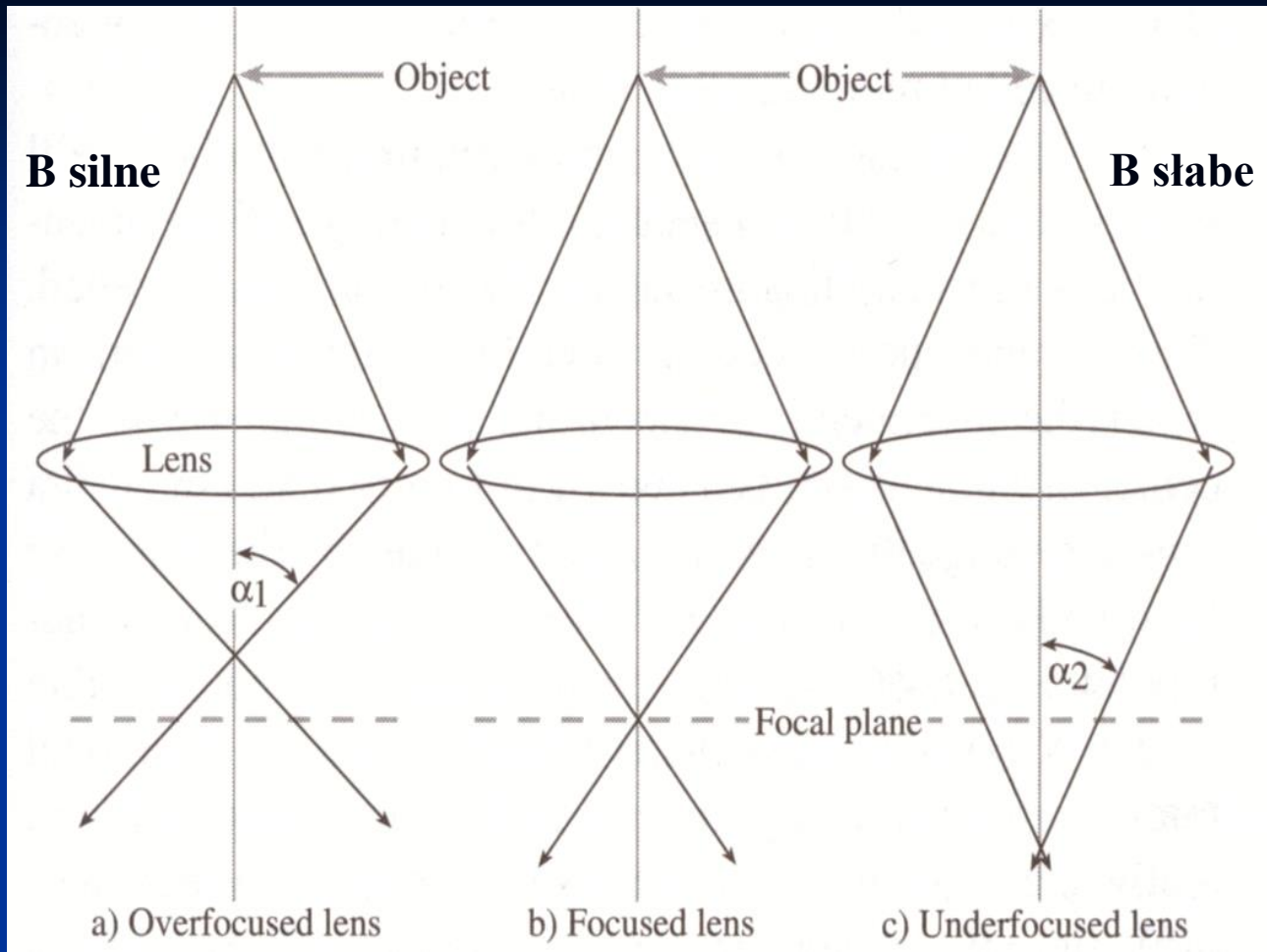
Równoległa wiązka elektronowa w obszarze

oddziaływania soczewki

magnetycznej zostaje zogniskowana w jednym punkcie!

Nie ma całkowitej liczby skrętów spirali – obraz jest przesunięty!

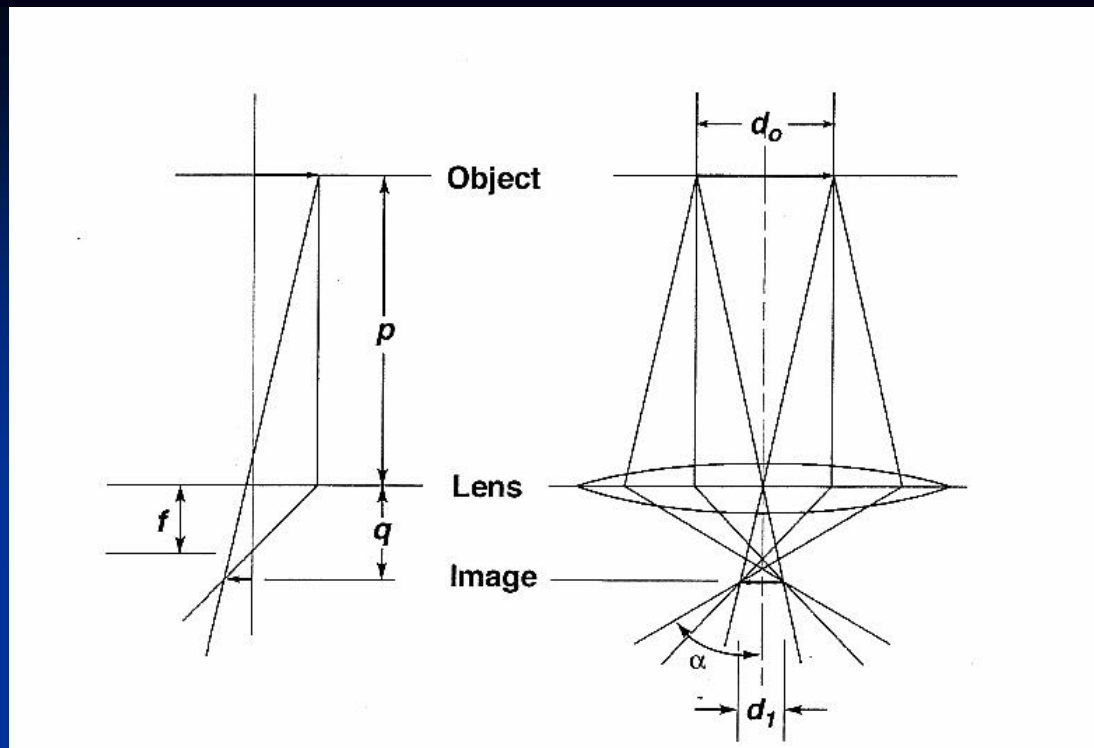




Jeżeli rośnie energia elektronów – stosujemy silniejsze pola magnetyczne B

Jeżeli stosujemy silniejsze pole magnetyczne B – promień spirali silniej maleje

Zmieniając napięcie przyspieszające elektrony zmieniamy układ soczewek w mikroskopie elektronowym !!!



Pomniejszenie „cross-overa” d_o przez soczewkę kondensorową do wartości d_1
(obraz pomniejszony obrócony)

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{q}$$

$$\text{Magnification} = M = \frac{q}{p}$$

$$\text{Demagnification} = m = \frac{p}{q}$$

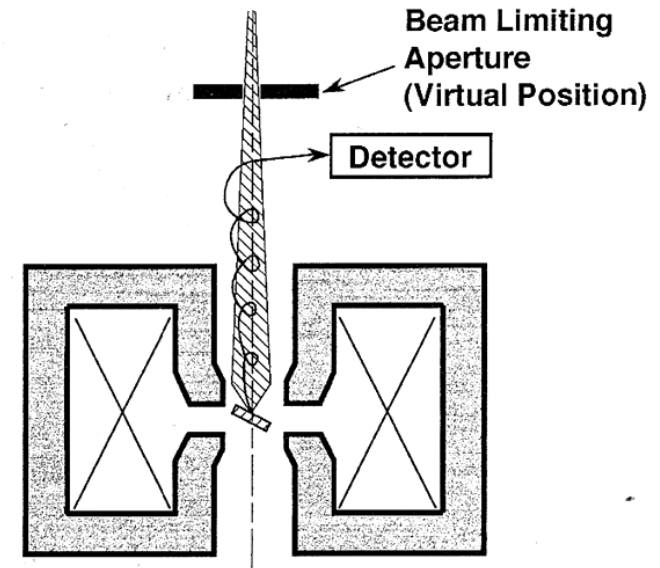
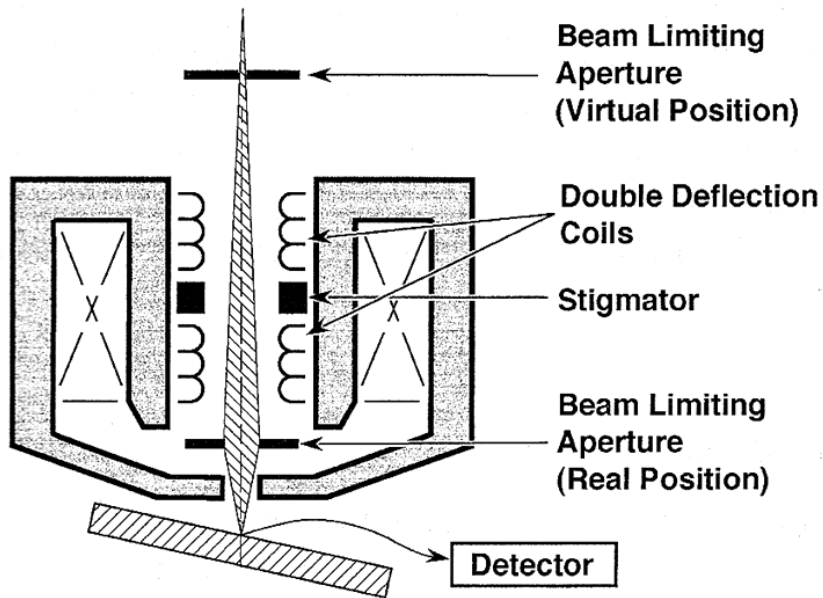
p – odległość obiekt („cross over”)-środek soczewki
 q – środek soczewki-obraz

Dla tego przypadku pomniejszenie $m = 3.14$

„Cross over” dla hair pin $W = 50 \mu\text{m}$

$$d_1 = d_o/m = 50/3.14 = 14.7 \mu\text{m}$$

Przy użyciu 2 lub 3 soczewek pomniejszających można uzyskać wartość $0.01 \mu\text{m} = 10 \text{ nm}$ (ostateczne końcowe pomniejszenie „cross – overa”)



Klasyczna soczewka „pin-hole lens” („conical lens”)

całe pole magnetyczne jest wewnątrz soczewki

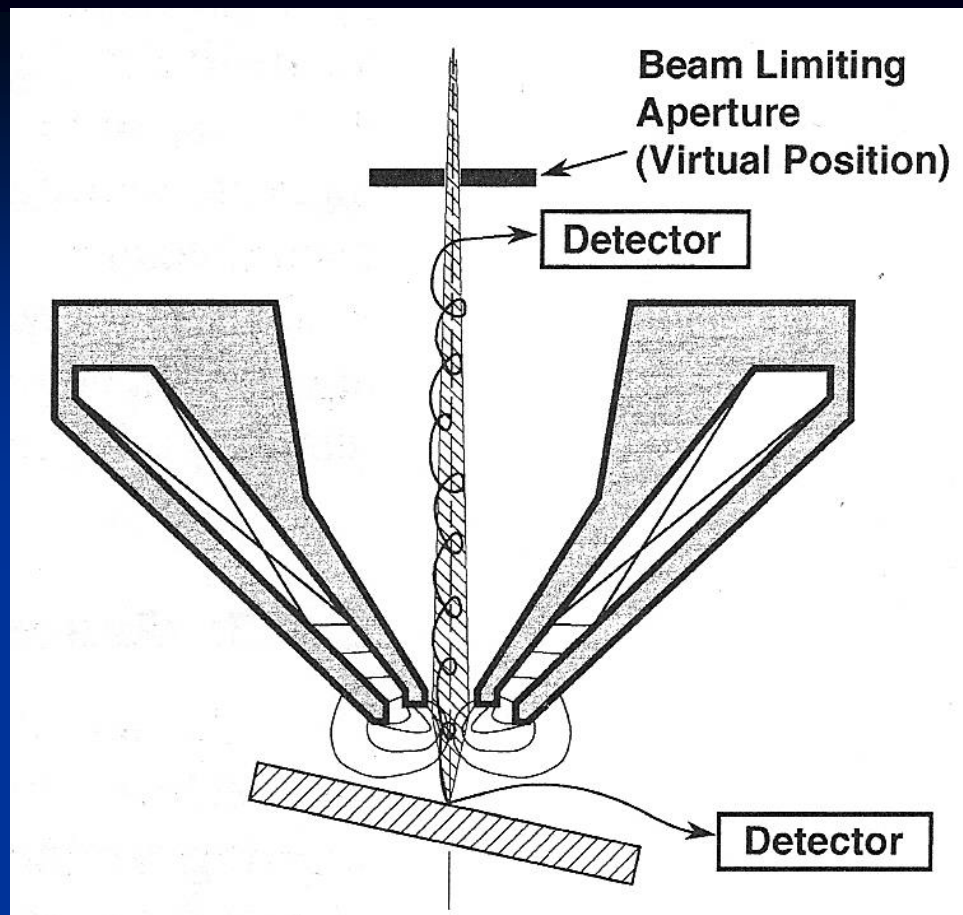
Ponieważ aberracja sferyczna rośnie z WD, próbka musi być umieszczona blisko nabiegunnika celem zminimalizowania aberracji sferycznej.

Wymiar próbki jest limitowany tylko wymiarami komory WD – max 40 mm, duża głębia ostrości.

Soczewka „immersion lens”

Próbka umieszczona jest wewnątrz soczewki; próbka musi być bardzo mała < 5mm !!!

Najmniejsza aberracja sferyczna, najmniejsza średnica wiązki elektronowej, najlepsza zdolność rozdzielcza – detektor TTL (through-the-lens detector).



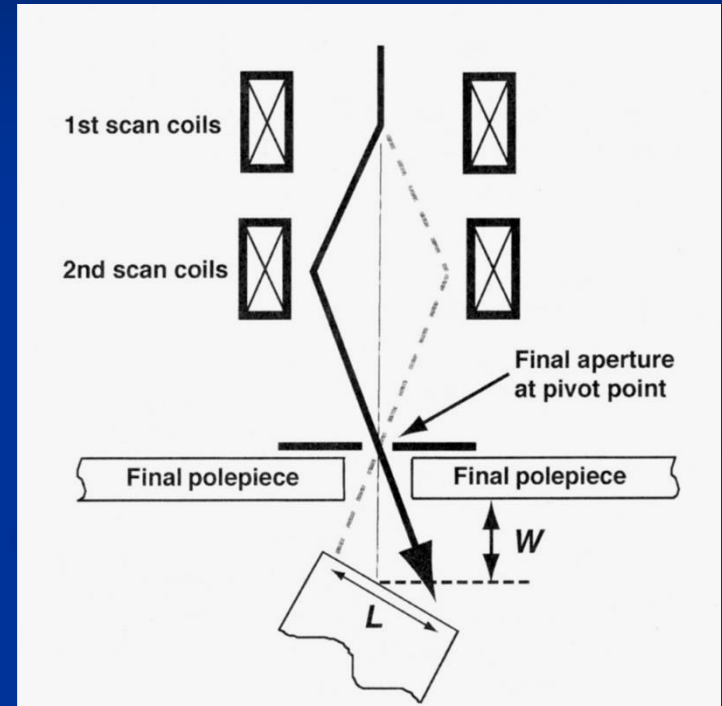
Soczewka „snorkel” or „single pole”

Silne pole magnetyczne skierowane jest bezpośrednio z nabiegownika soczewki obiektywowej na próbkę.

Ta soczewka zawiera najlepsze cechy soczewki „pin-hole” i „immersion”.

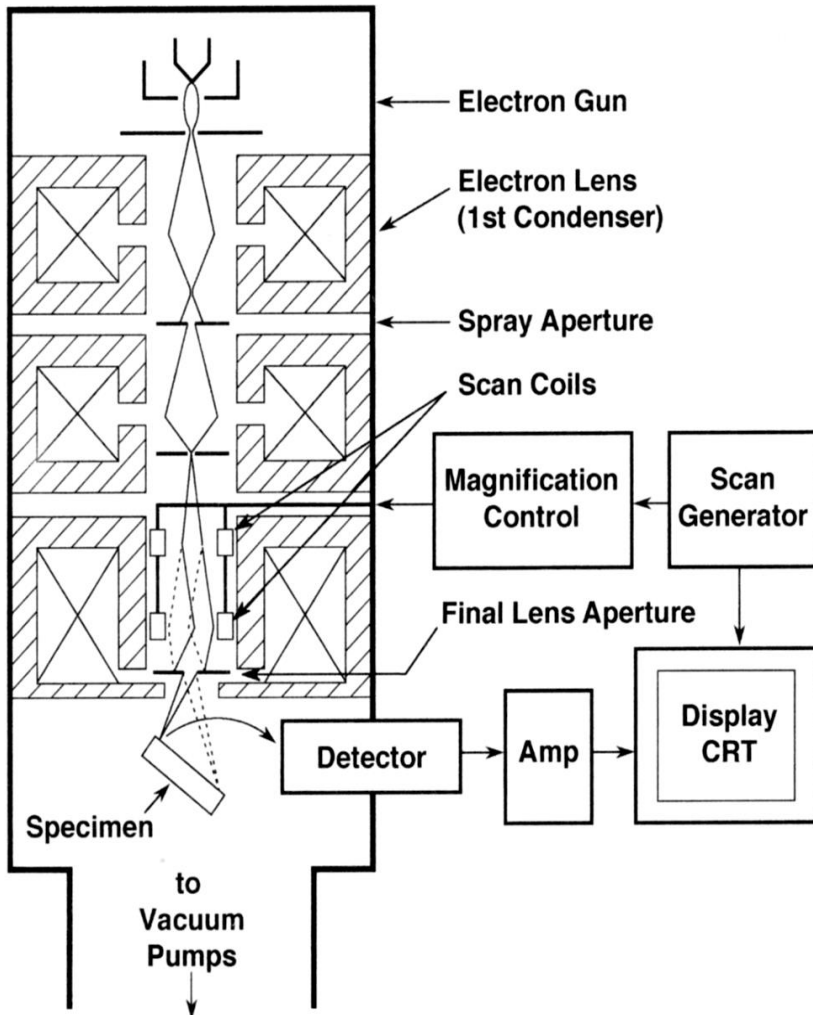
Minimalna aberracja sferyczna, duże próbki, można stosować równocześnie detektory TTL i ET

Cewki skanujące



$W = WD$ – Working Distance

WD odległość między obserwowaną powierzchnią a nabiegunkiem soczewki obiektywowej

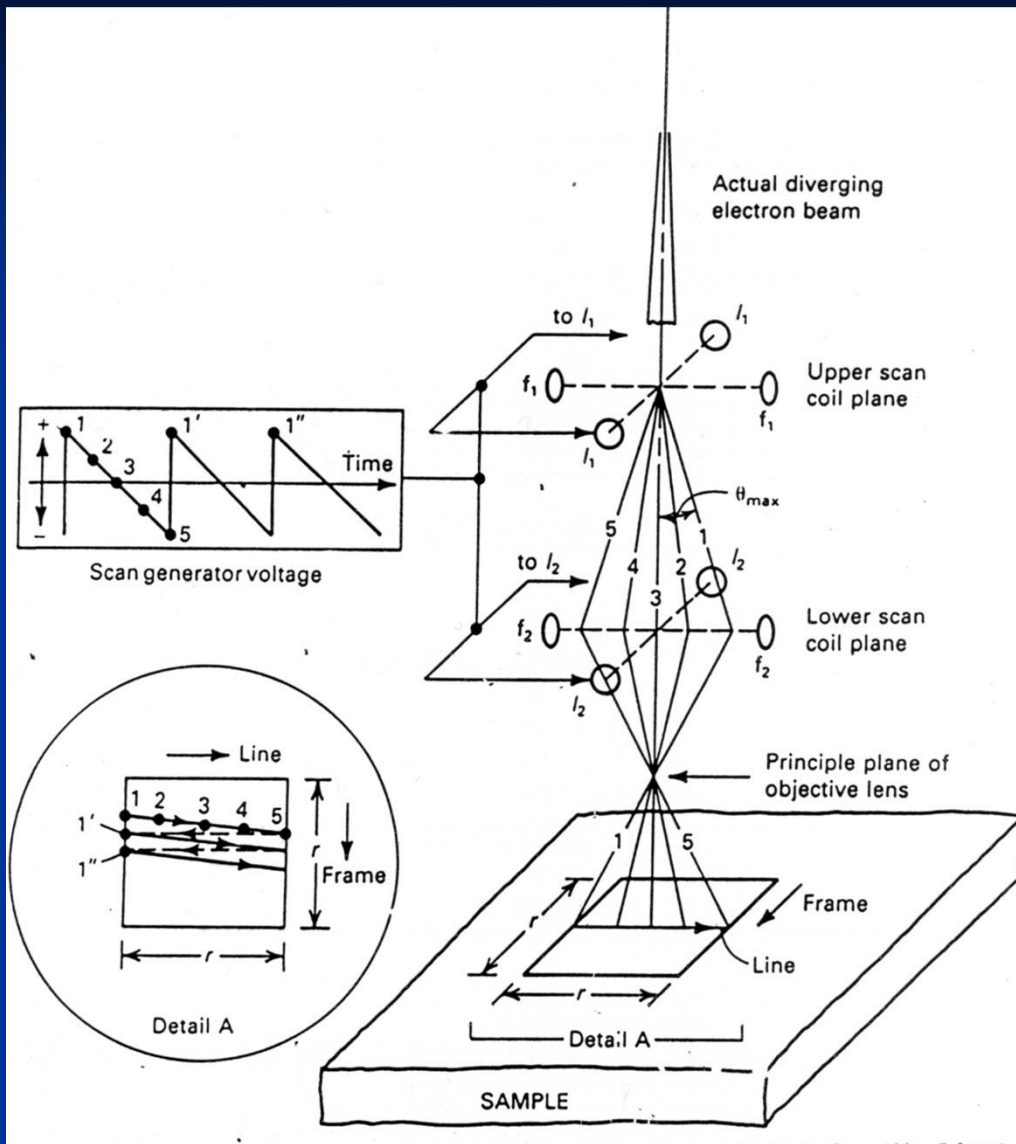


Cewki skanujące

Table 4.1. Area Sampled as a Function of Magnification

Magnification ^a	Area on sample
10×	$(1 \text{ cm})^2 = 100 \text{ mm}^2$
100×	$(1 \text{ mm})^2 = 1 \text{ mm}^2$
1,000×	$(100 \text{ }\mu\text{m})^2 = 0.01 \text{ mm}^2$
10,000×	$(10 \text{ }\mu\text{m})^2 = 10^{-4} \text{ mm}^2$
100,000×	$(1 \text{ }\mu\text{m})^2 = 10^{-6} \text{ mm}^2$
1,000,000×	$(100 \text{ nm})^2 = 10^{-8} \text{ mm}^2$

^a Assumes magnification is relative to a CRT screen that measures 10 cm × 10 cm.



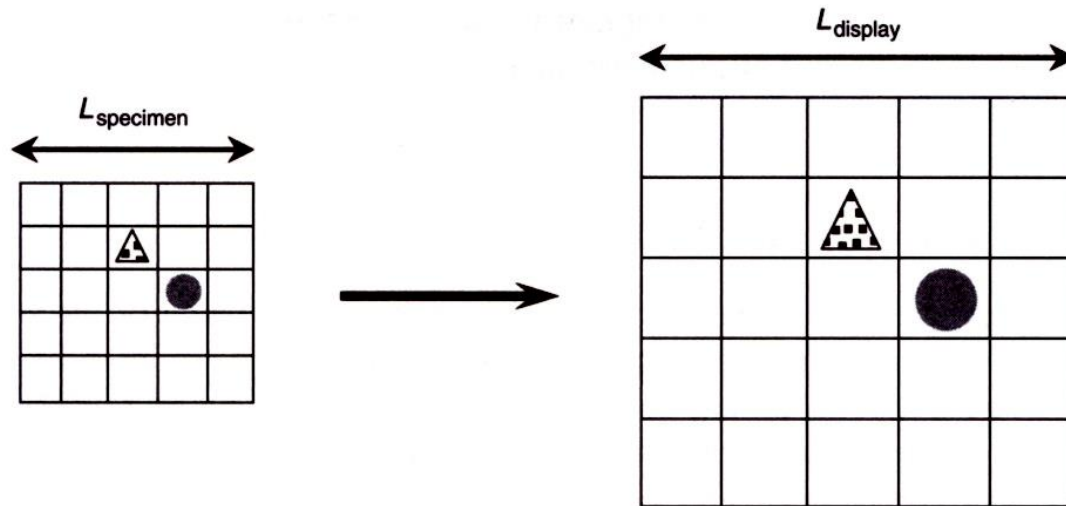
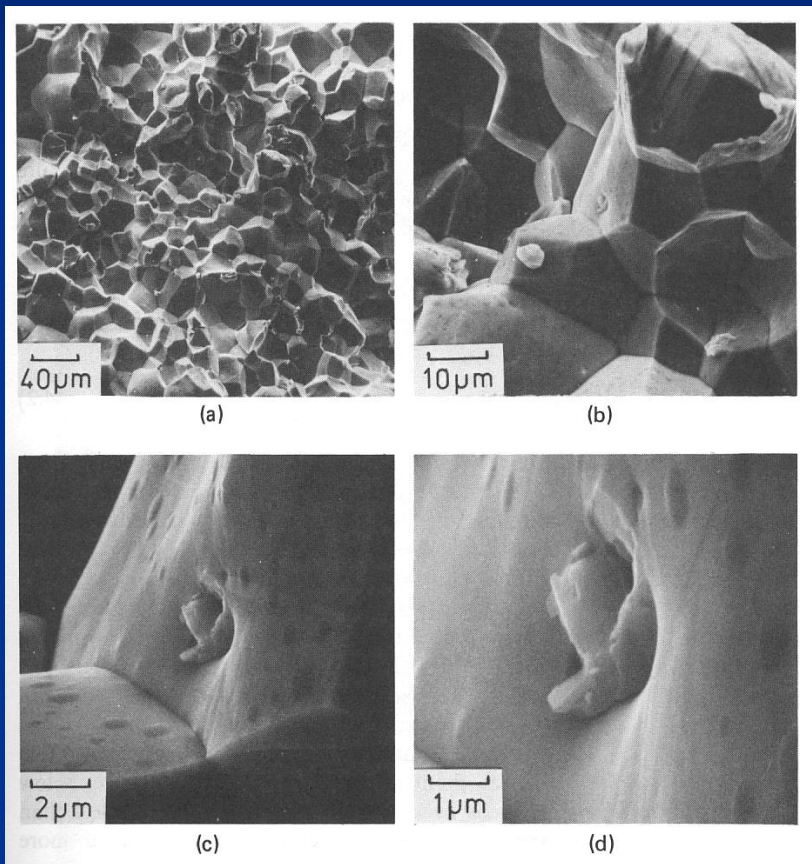


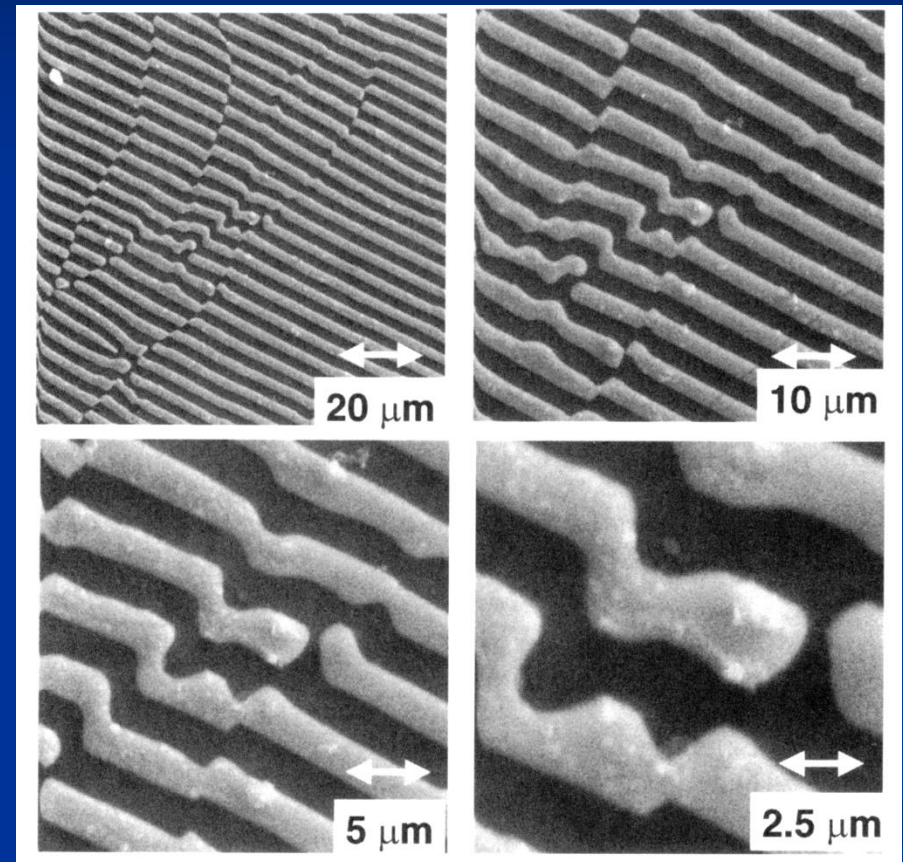
Figure 2.29 The information from the scanned specimen is transferred point by point to a display. Magnification is defined as the ratio of the two line scans and therefore, on its own, magnification is not an absolute measure of specimen feature sizes

$$\mathbf{M} = \mathbf{L}_{\text{Display}} / \mathbf{L}_{\text{Specimen}}$$

Przykłady zmian powiększeń w SEM



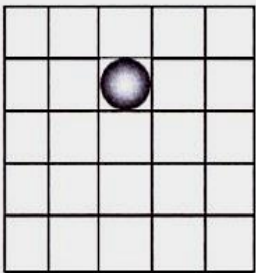
Przełom kruchy stali, widoczny MnS,
WD = constans, $E_0 = 20 \text{ keV}$



Eutektyka AlCu,
WD = constans, $E_0 = 20 \text{ keV}$

Wpływ prądu wiązki elektronicznej na jakość obrazu

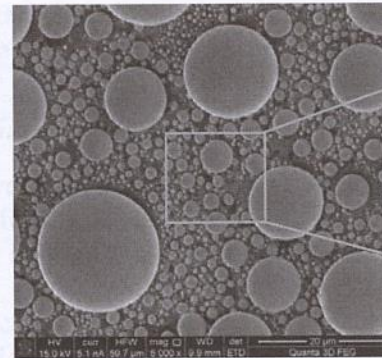
✓ Low magnification,
large beam diameter



X High magnification,
large beam diameter

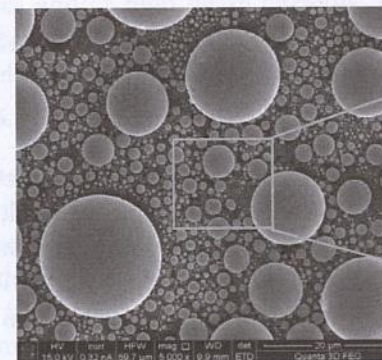


✓ High magnification,
small beam diameter



(a)

5.1 nA



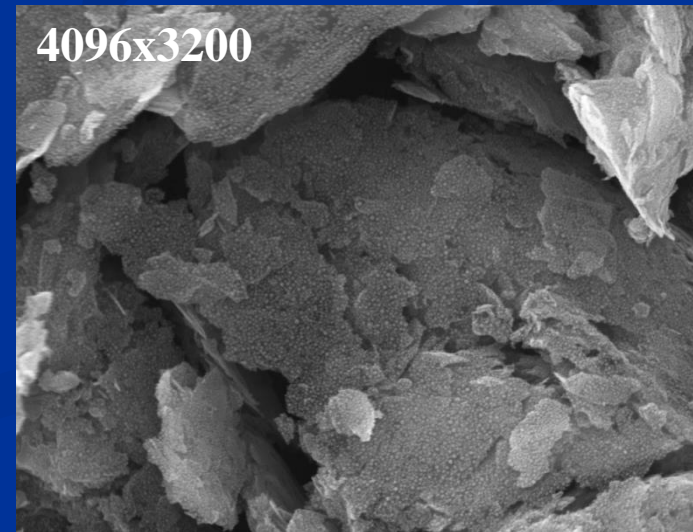
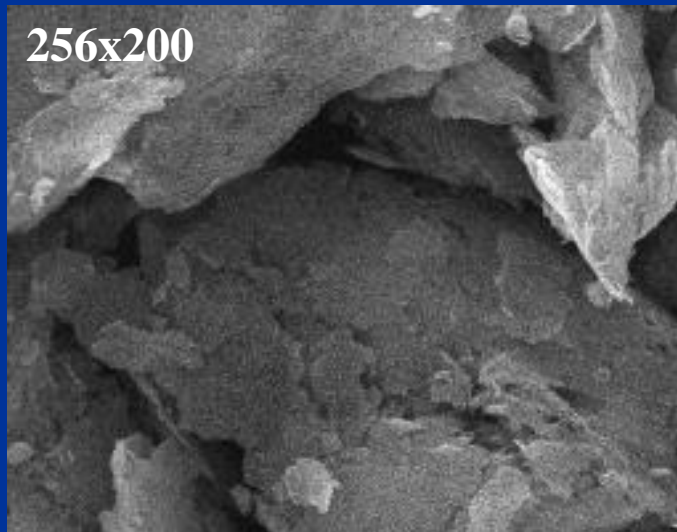
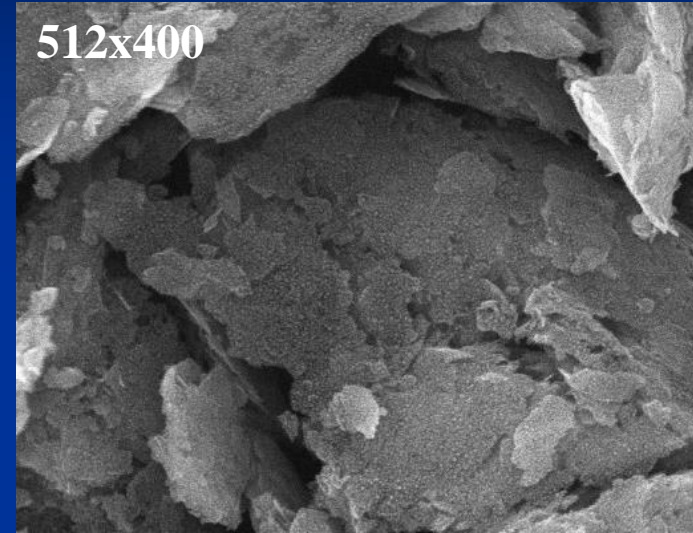
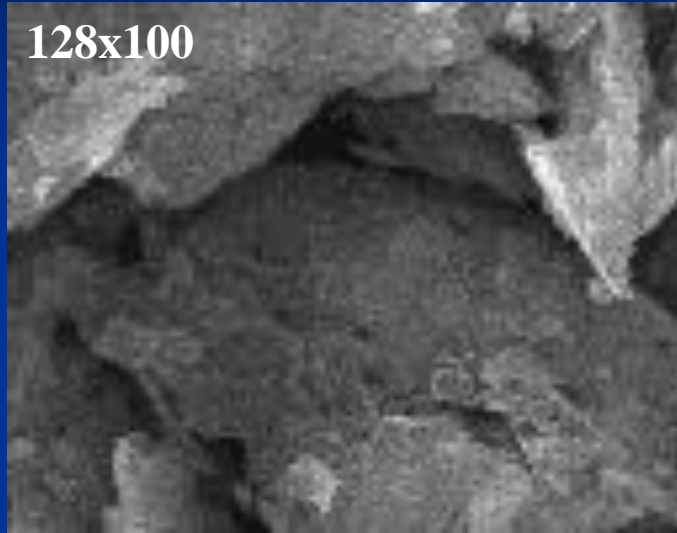
(b)

0.32 nA

Im większy prąd wiązki elektronicznej - tym większa średnica zogniskowanej wiązki elektronicznej, a zatem gorsza zdolność rozdzielcza !!!

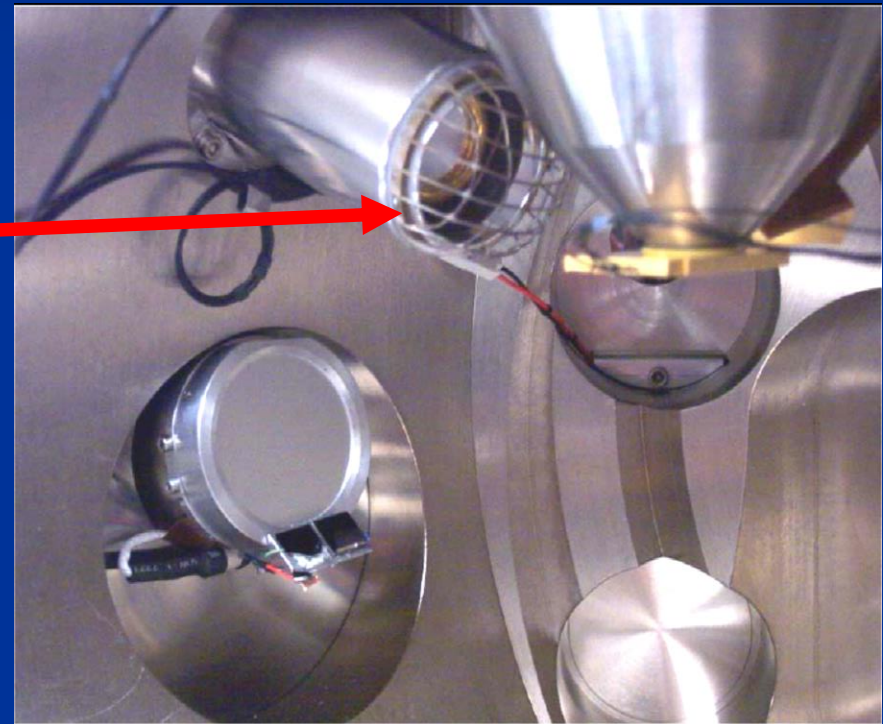
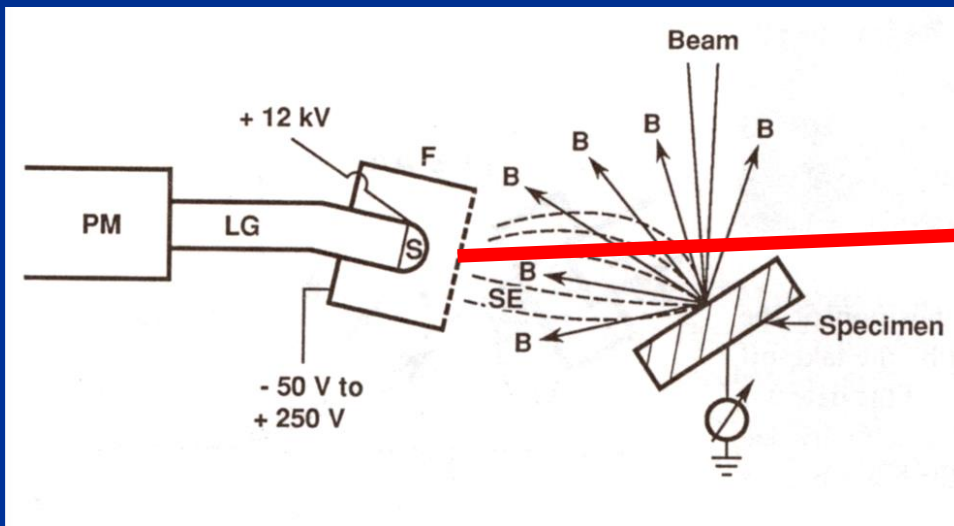
Wpływ cyfrowej rozdzielczości na jakość obrazu

FEI E-SEM - Standard Image Definition 702x484; Image High Definition 1404x968



Detektory elektronów

Detektor elektronów wtórnych Everharta-Thornleya



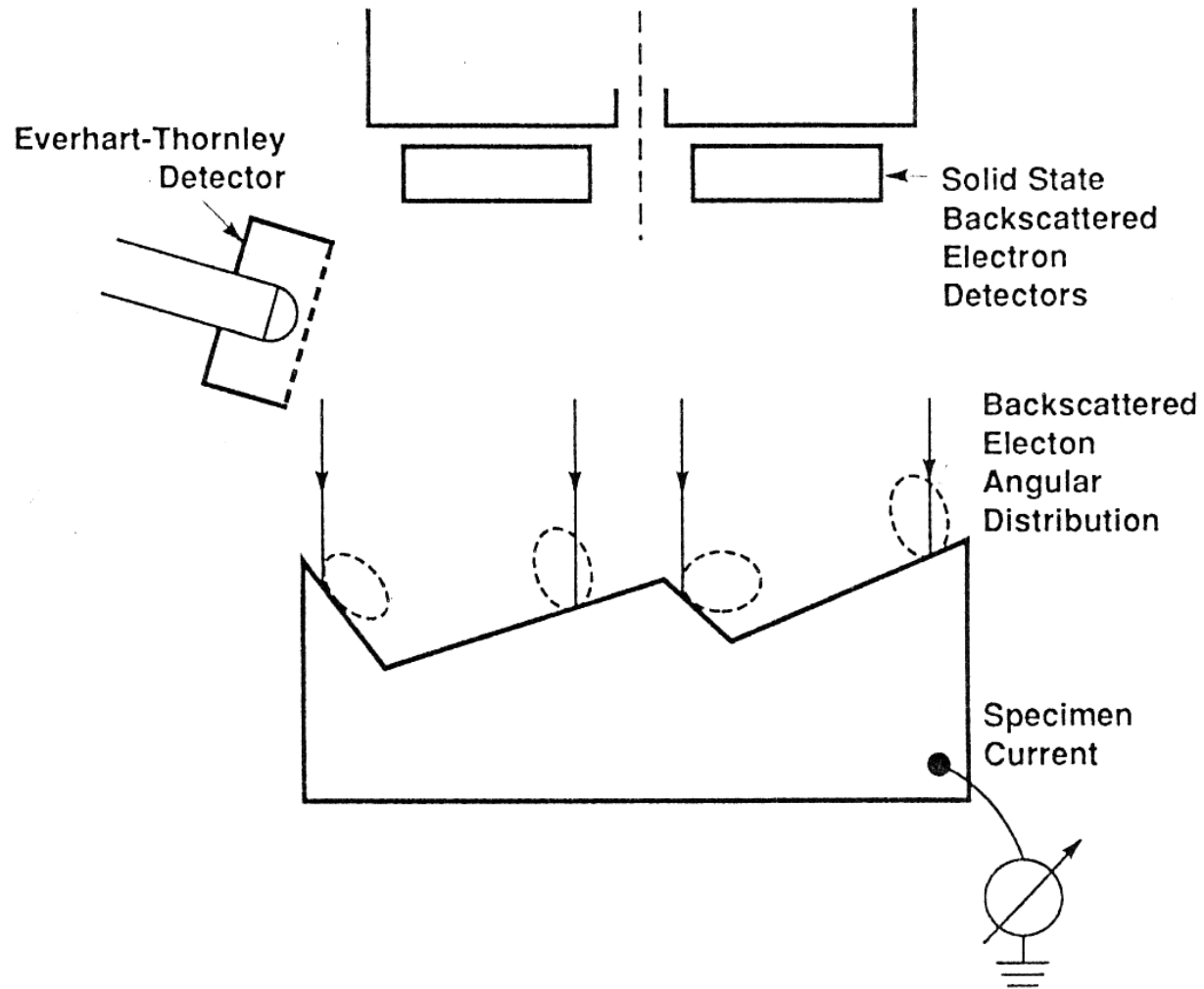
F – klatka Faradaya (-50V do + 250V)

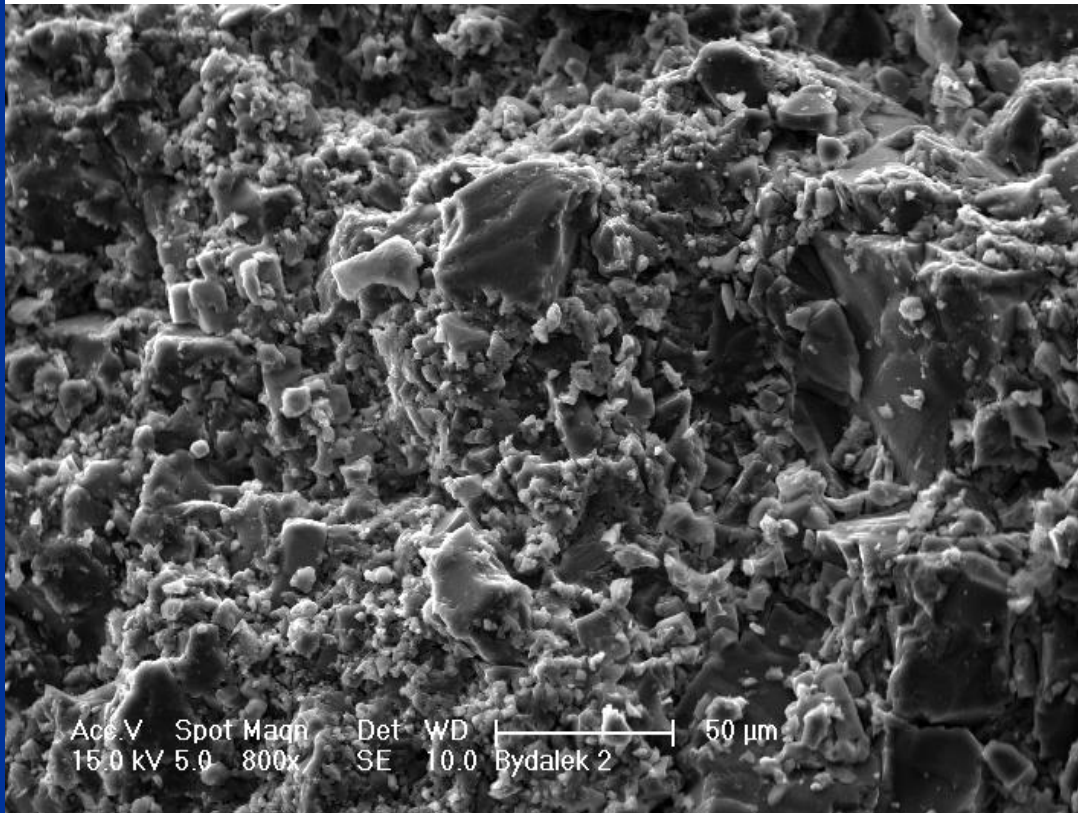
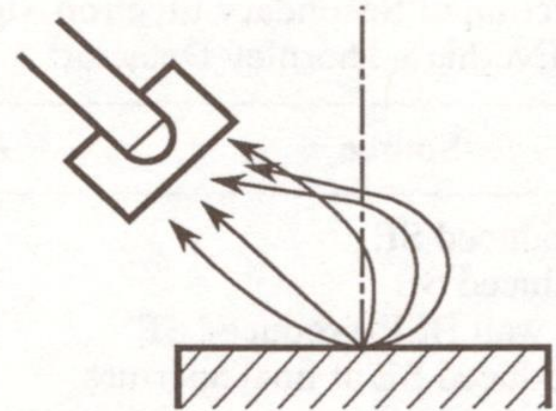
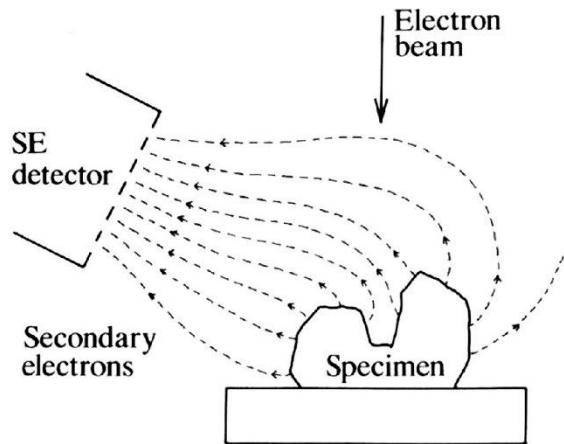
S – scyntylator na potencjale dodatnim (+12kV)

LG – światłowód

PM – fotopowielacz

Część BSE zostanie zawsze zarejestrowana przez detektor E-T

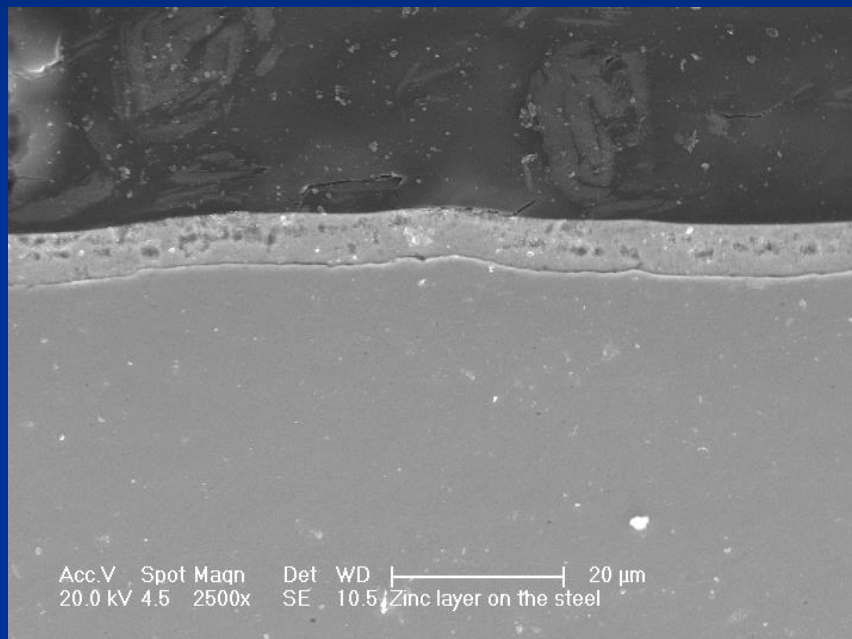




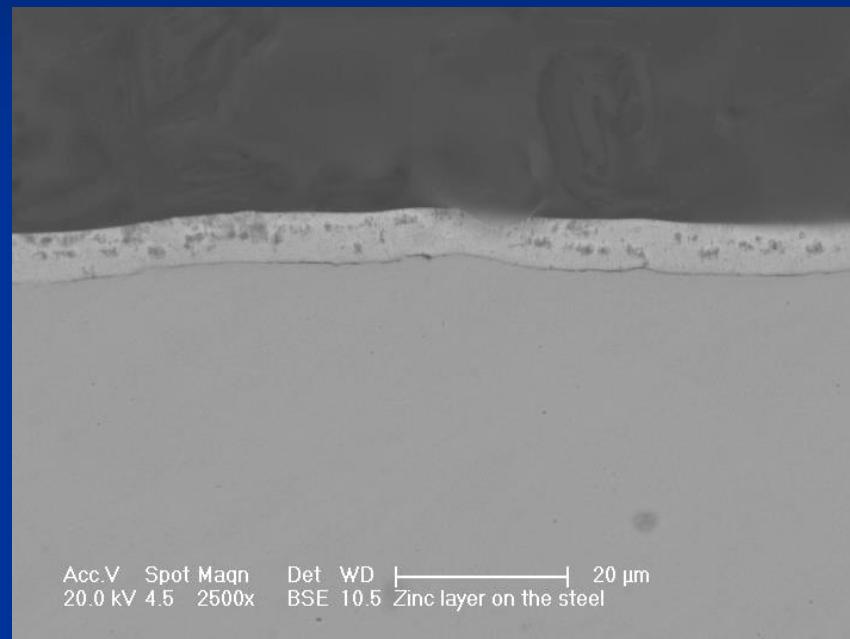
**Odchylenie trajektorii SE
przez dodatni potencjał
siatki Faradaya**

**Płaskie powierzchnie – brak
kontrastu**

**Obrazy SE są w takim
przypadku nieprzydatne**



**Obraz SE – widoczny udział
elektronów BSE**



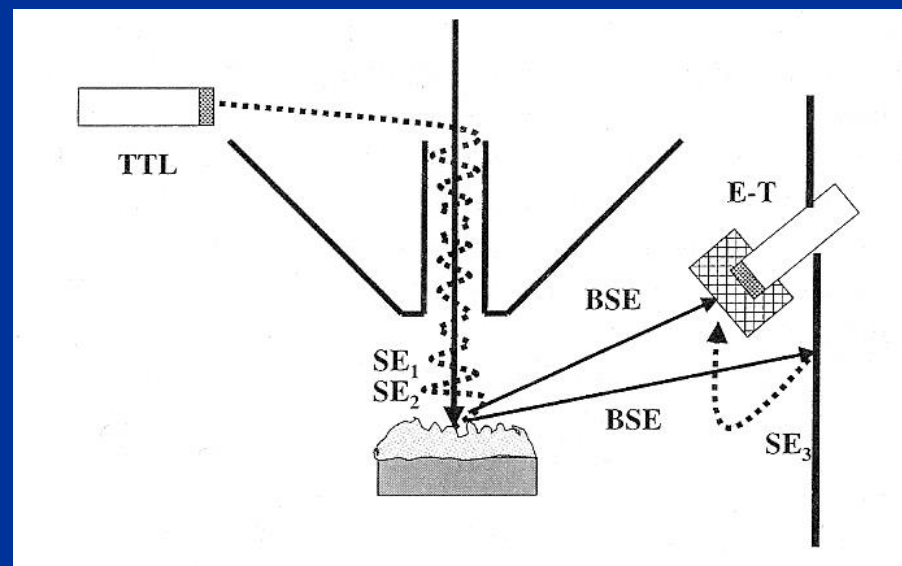
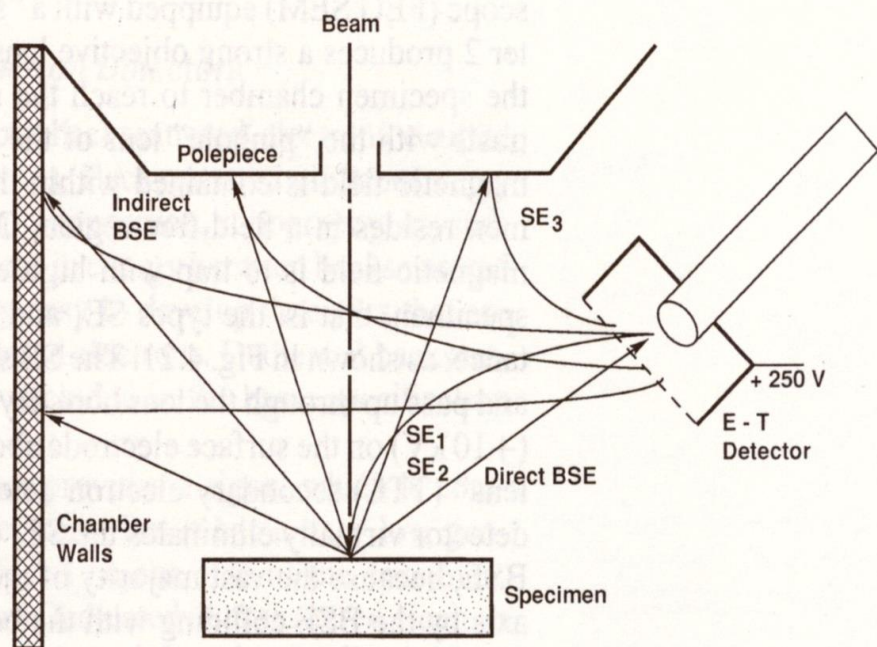
Obraz BSE

**przekrój poprzeczny blachy ocynkowanej (z naniesioną powłoką Zn)
w górnej części mikrofotografii - żywica przewodząca**

Table 4.4. Collection of Secondary Electron Signals from a Gold Specimen with the Everhart-Thornley Detector^a

Signal	Source	Percentage of total
SE ₁	Beam-produced SE	9
SE ₂	BSE-produced SE	28
SE ₃	Chamber wall BSE-produced SE	61
SE ₄	Beam-produced SE at final aperture	2

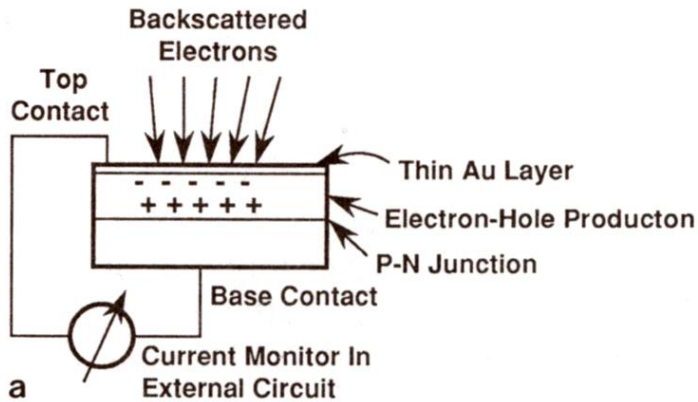
^a From Peters (1984).



Through-the-lens detector

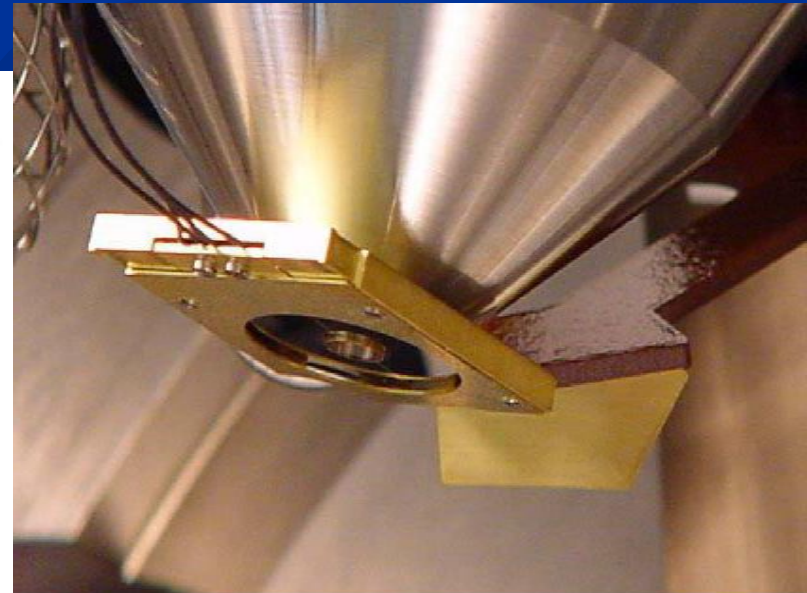
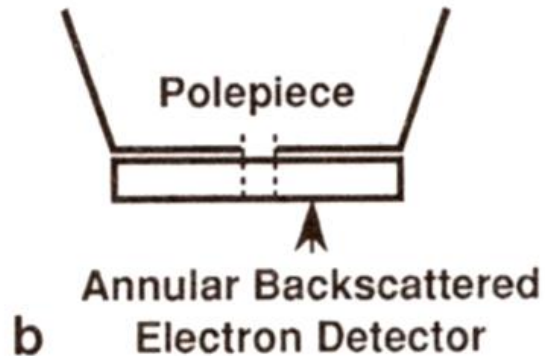
Detektory elektronów

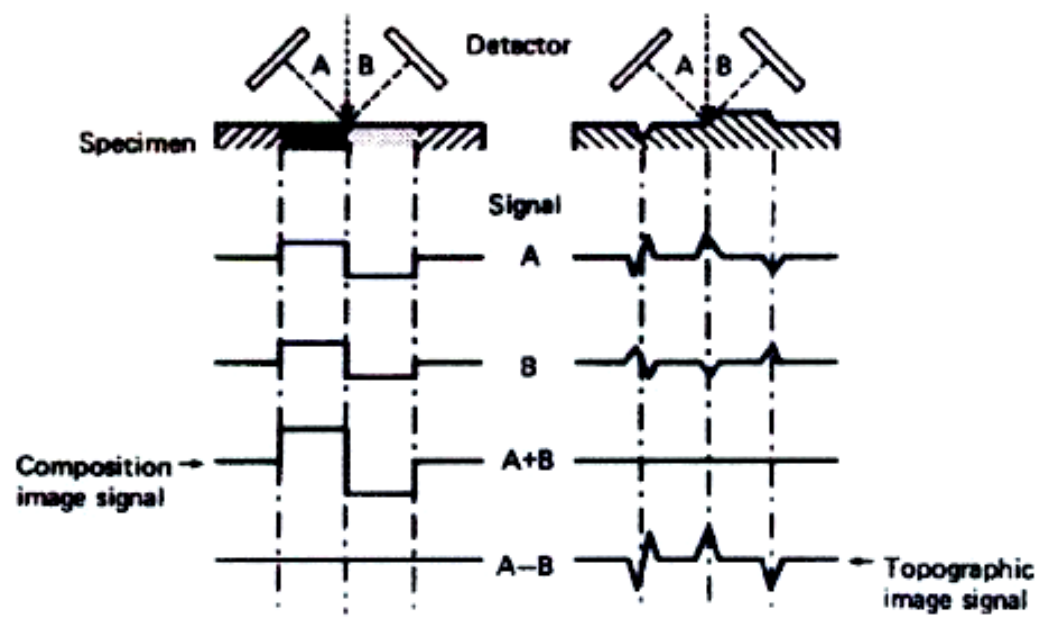
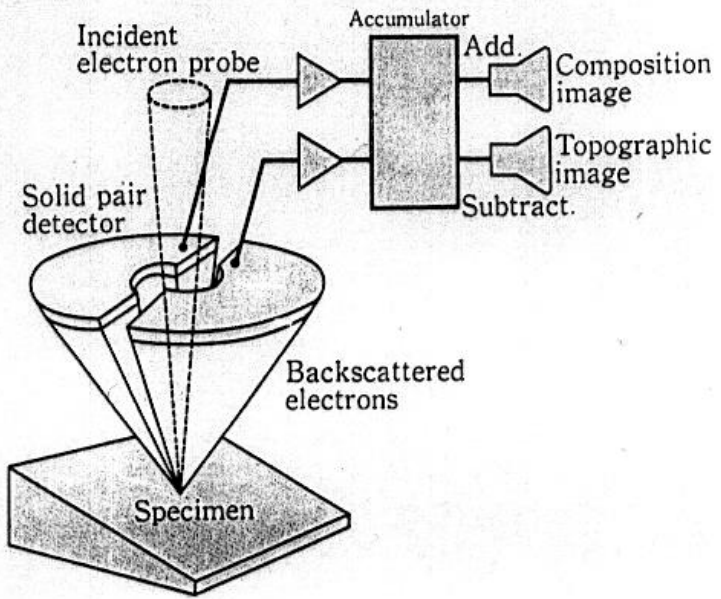
Detektor elektronów wstecznie rozproszonych BSE



Energia tworzenia pary „elektron-dziura” w Si = 3.6 eV

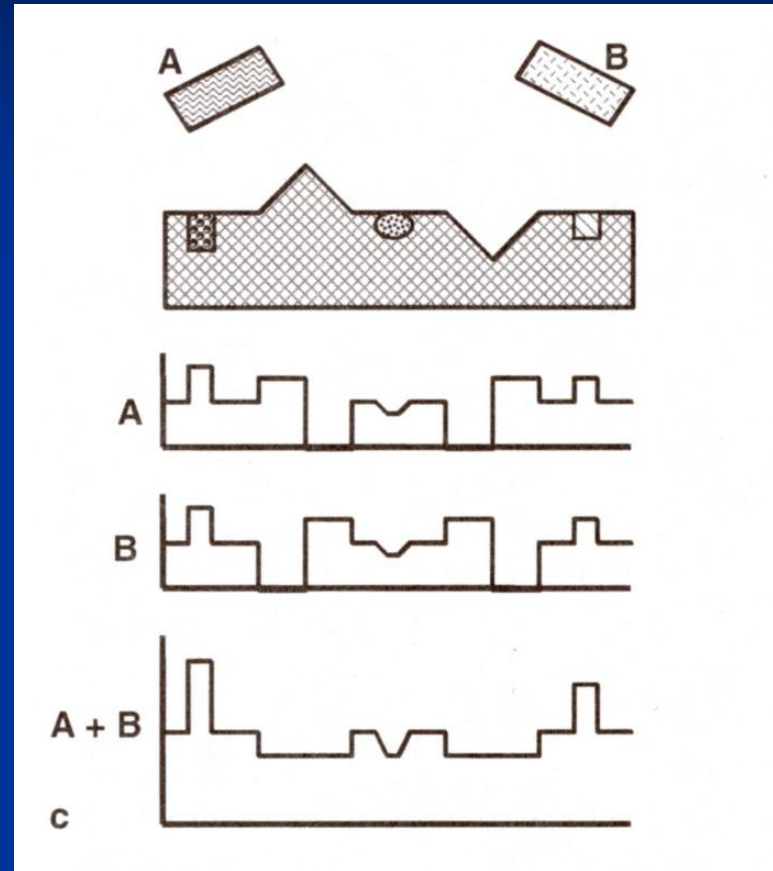
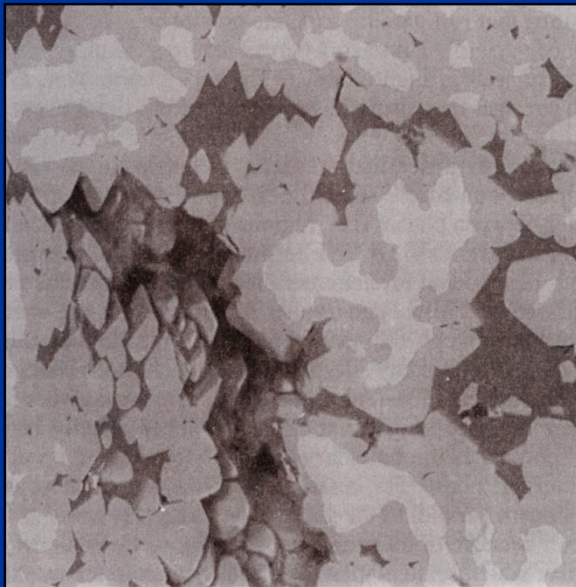
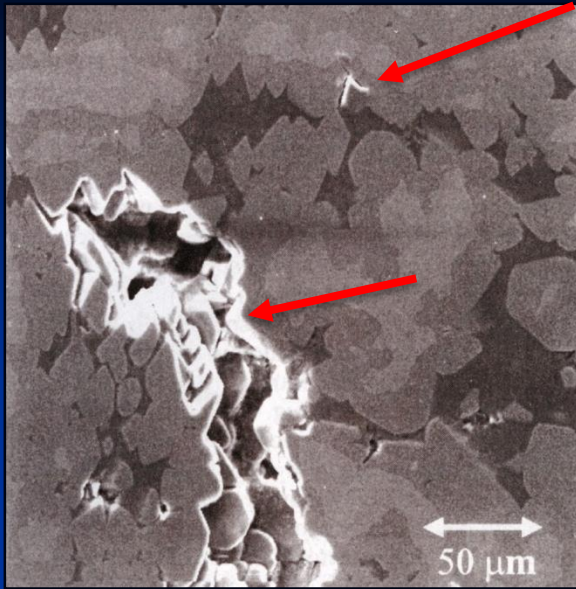
Dla elektronu o energii 10 keV ~ 2630 par



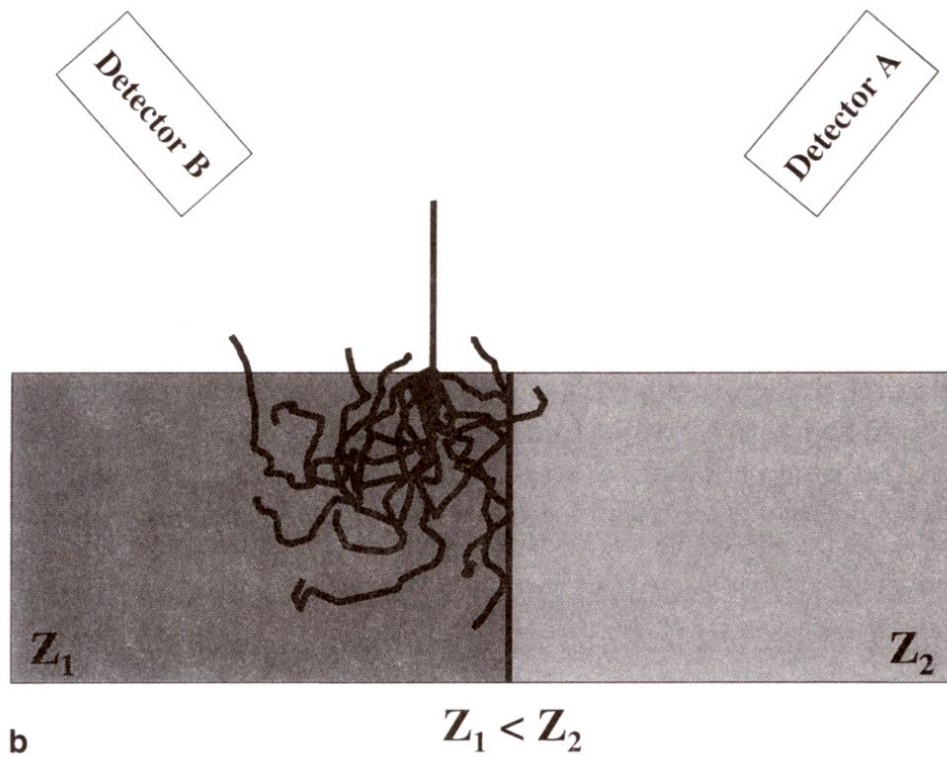
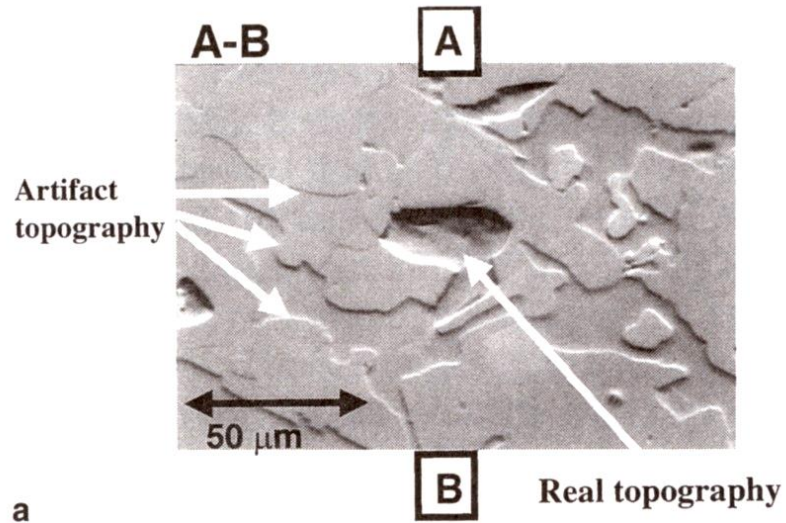


STOP Al-Ni

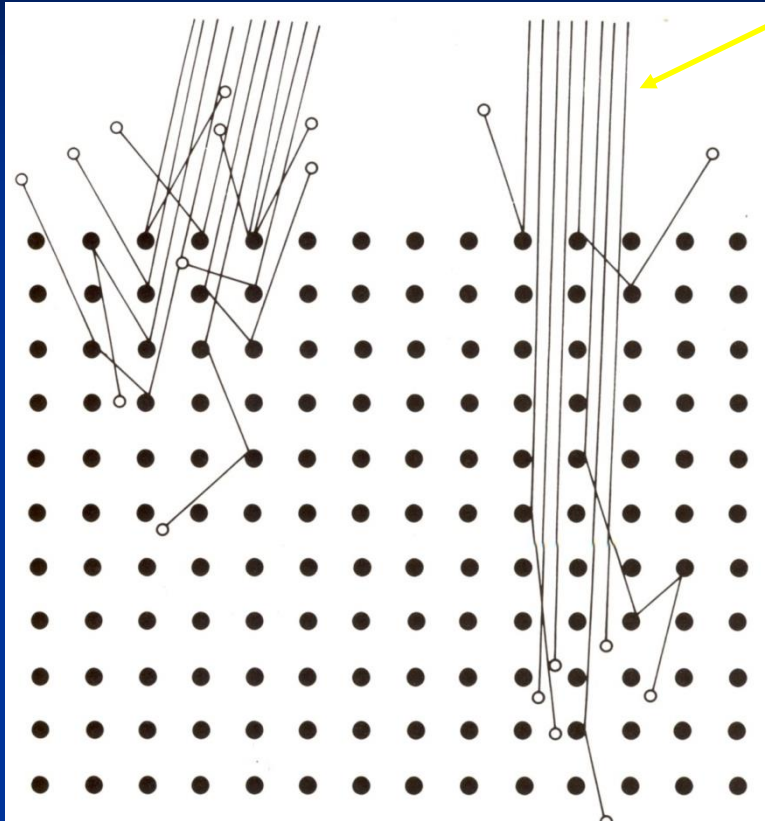
Sygnal BSE zarejestrowany przez ETD
(potencjał ujemny na siatce)



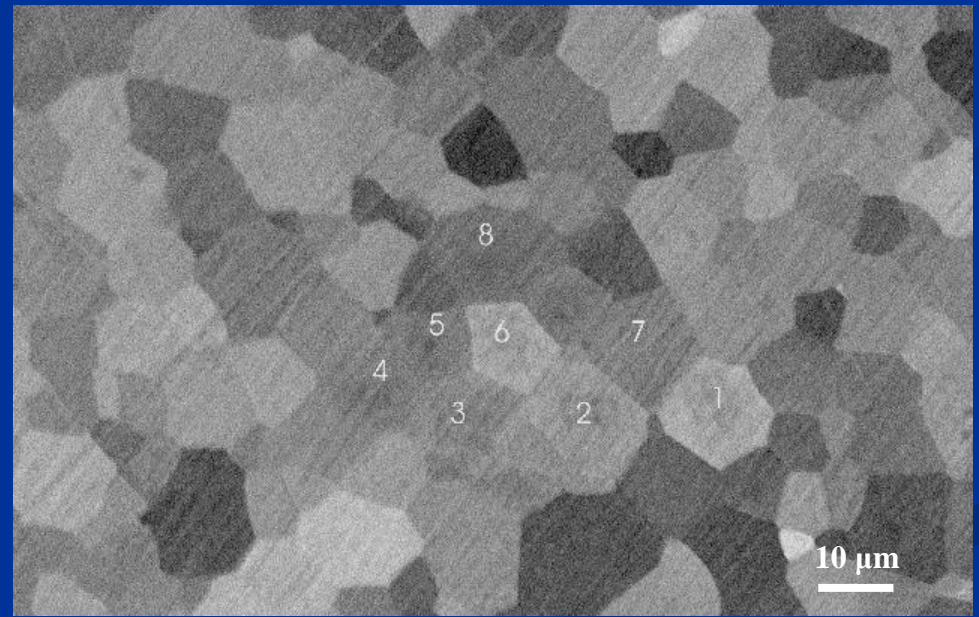
BSE Compo



Electron channelling contrast

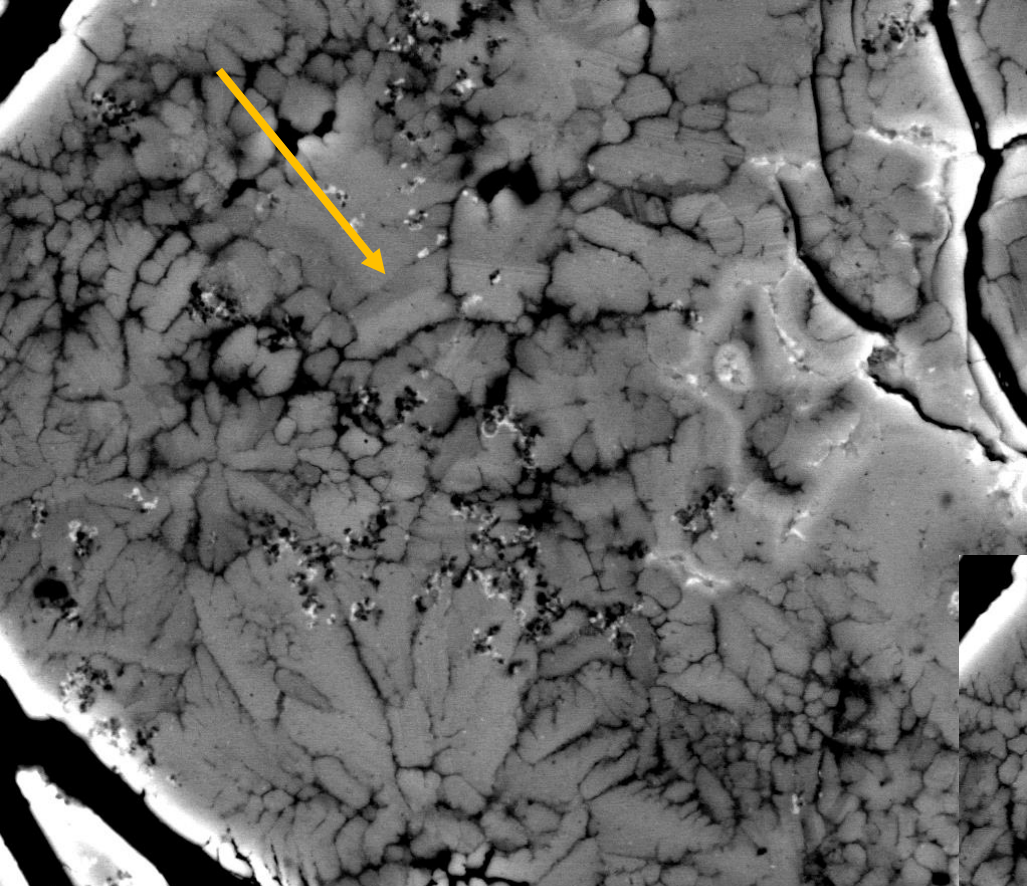


Wiązka \parallel do
płaszczyzny
sieciowej




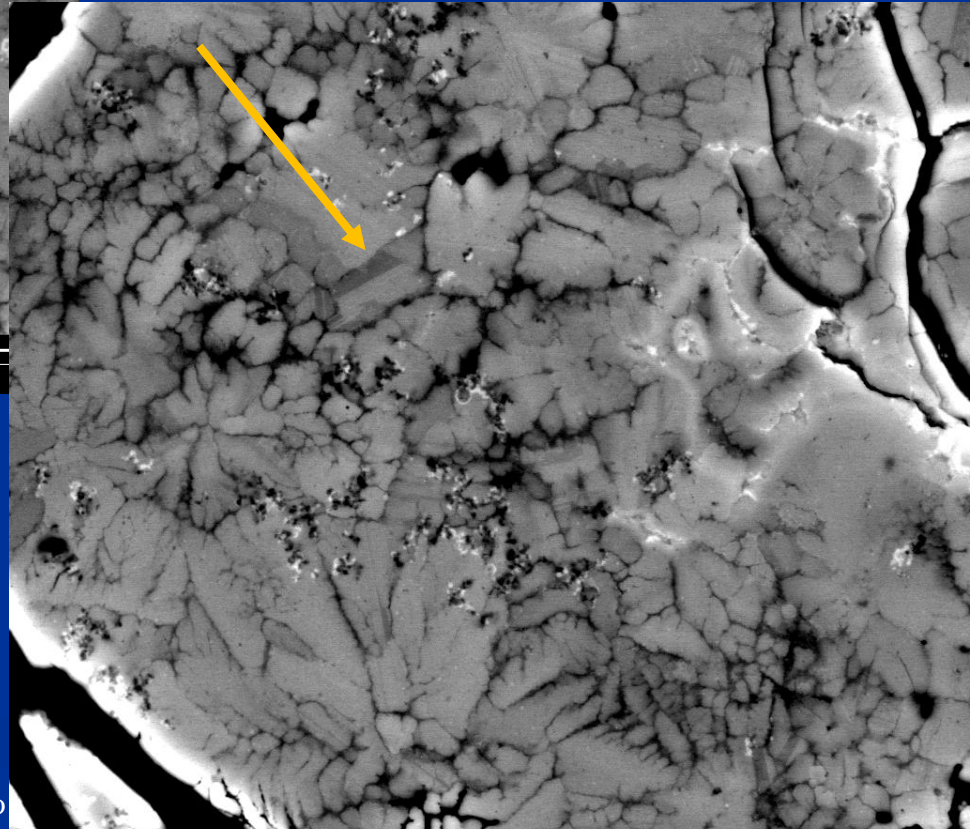
Dla materiałów amorficznych
 η zależy tylko od Z !

Dla materiałów krystalicznych
 η zależy również od kąta padania
wiązki elektronowej



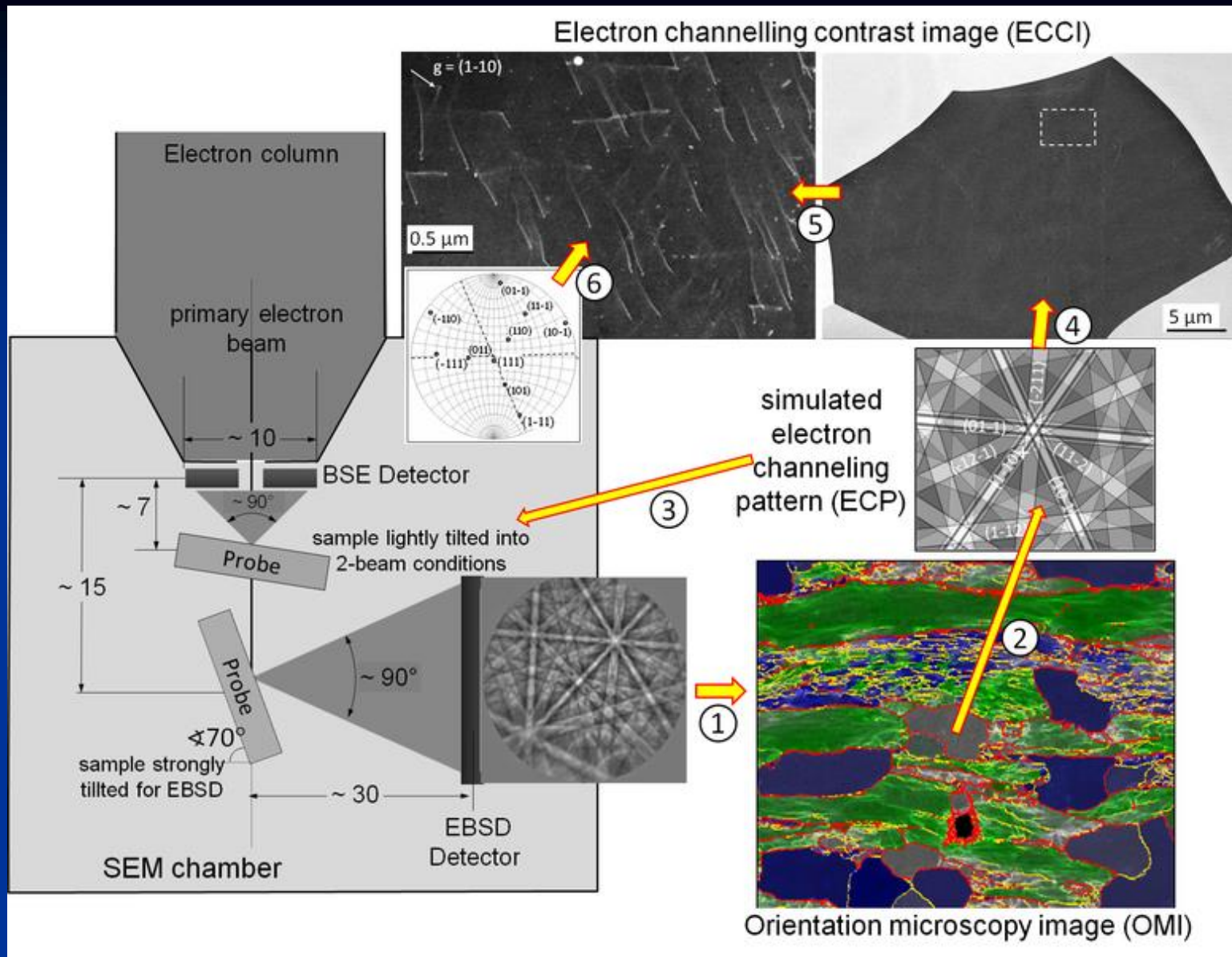
Tilt 0°

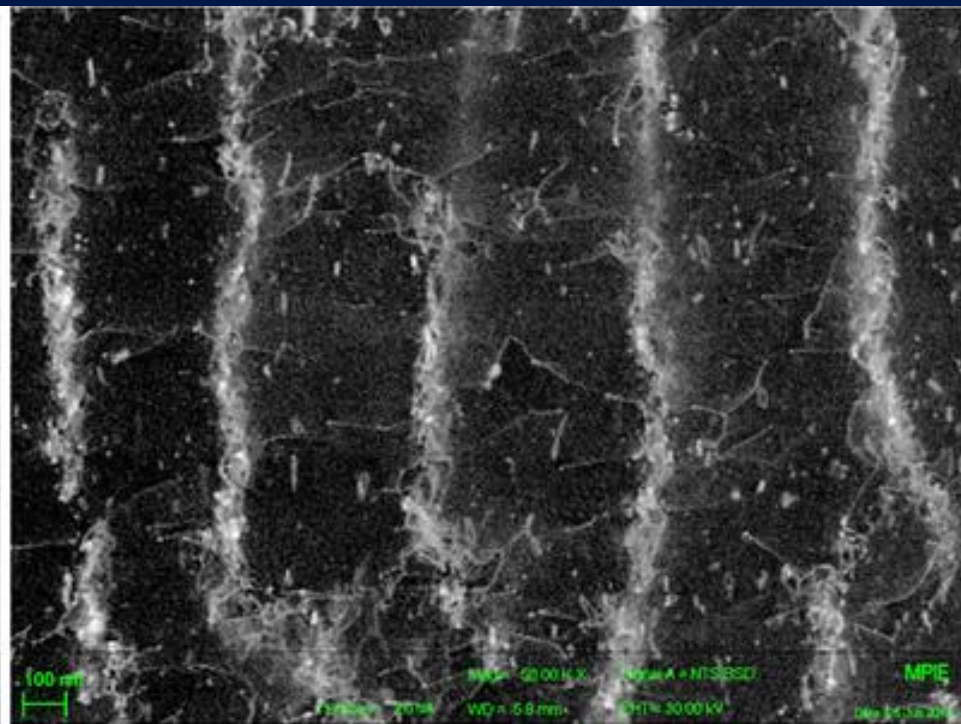
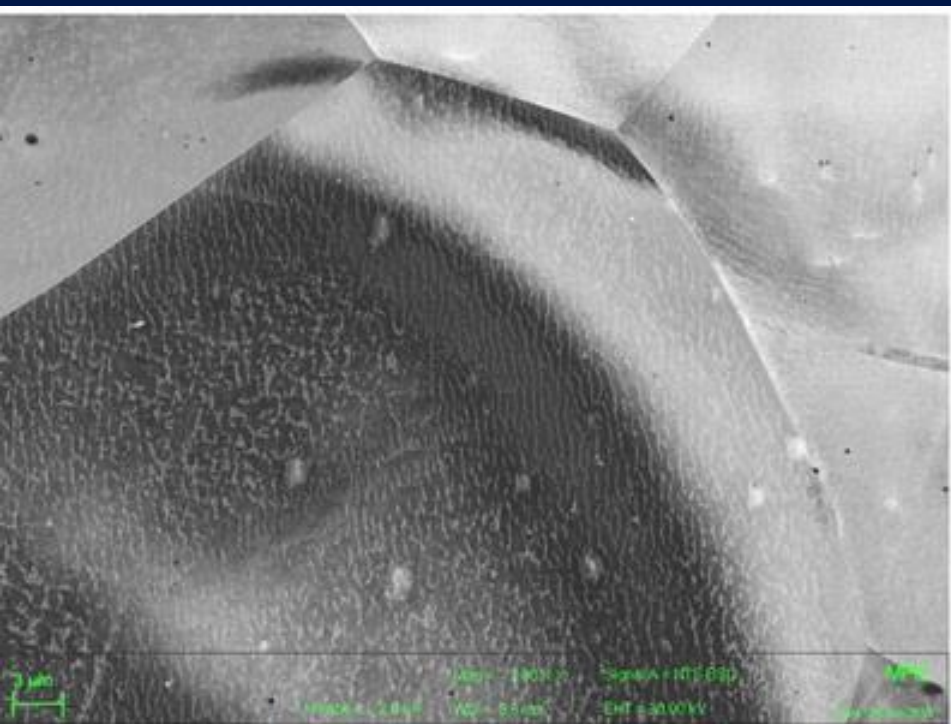
	HV	curr	WD	mag	□	det	HFW	5 μm	
	20.00 kV	11.3 nA	3.5 mm	15 000 x		BSED	19.9 μm	SS Zr	



Tilt 5°

	HV	curr	WD	mag	□	det	HFW	5 μm	
	20.00 kV	11.3 nA	3.5 mm	15 000 x		BSED	19.9 μm	SS Zr tilt 2 degree	





Individual dislocations and dense dislocation walls in a Fe 3% Si alloy, fatigued by 180 cycles of cyclic loading of 0.5 % of strain.

© Max-Planck-Institut für Eisenforschung
<https://www.mpie.de/3079126/ECCI>