

## Podstawowe właściwości elektronu

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

# Podstawowe właściwości elektronu cd.

$\lambda$  - 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 kinetyczną elektronu równą:  $eV$ .

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

W przypadku elektronów pęd

wyliczamy z zasady zachowania energii:

*Energia potencjalna elektronu musi być równa energii kinetycznej.*

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  $\lambda$  a napięciem przyspieszającym elektrony w mikroskopie  $V$ :

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

Ważne stwierdzenie:

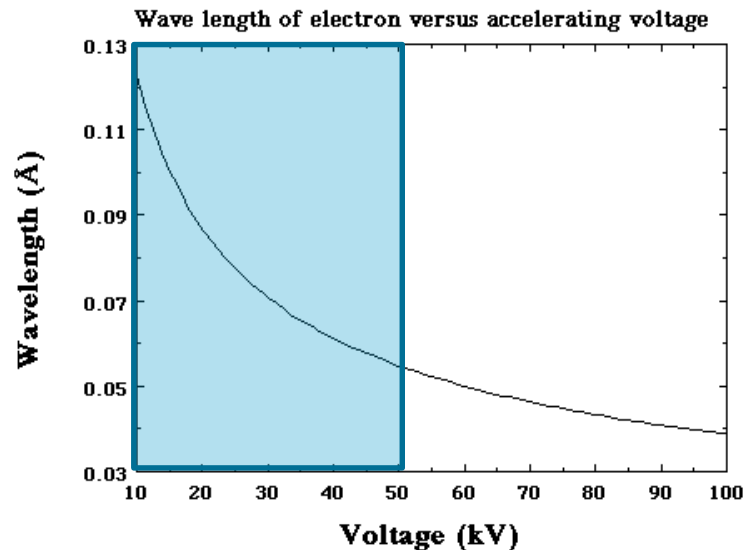
*Poprzez zwiększanie napięcia przyspieszającego elektrony w mikroskopie zmniejszamy  $\lambda$  - długość fali elektronowej!!!*

Nie można pominać efektów relatywistycznych w mikroskopie elektronowym powyżej energii elektronów 100 keV, gdy prędkość elektronu jako cząstki jest większa niż połowa 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 elektronowej od napięcia przyspieszającego elektrony

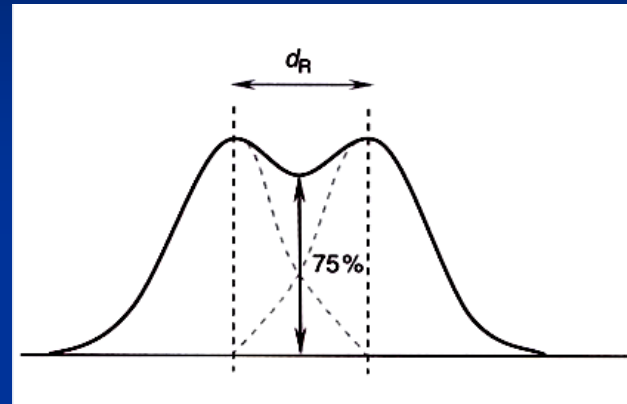
Napięcie przyspieszające V (kV)	Relatywistyczna długość fali $\lambda$ , nm
20	0.00859
<b>30</b>	<b>0.00698</b>
40	0.00602
50	0.00536
60	0.00487
70	0.00448
80	0.00418
90	0.00392
<b>100</b>	<b>0.00370</b>
200	0.00251
300	0.00197
400	0.00164
500	0.00142
600	0.00126
700	0.00113
800	0.00103
900	0.00094
1000	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**

$\lambda$  – długość fali promieniowania elektromagnetycznego (światło widzialne)

$\mu$  – współczynnik załamania światła

$\alpha$  – kąt padania promienia świetlnego (tzw. kąt aperturowy, *divergence angle*)

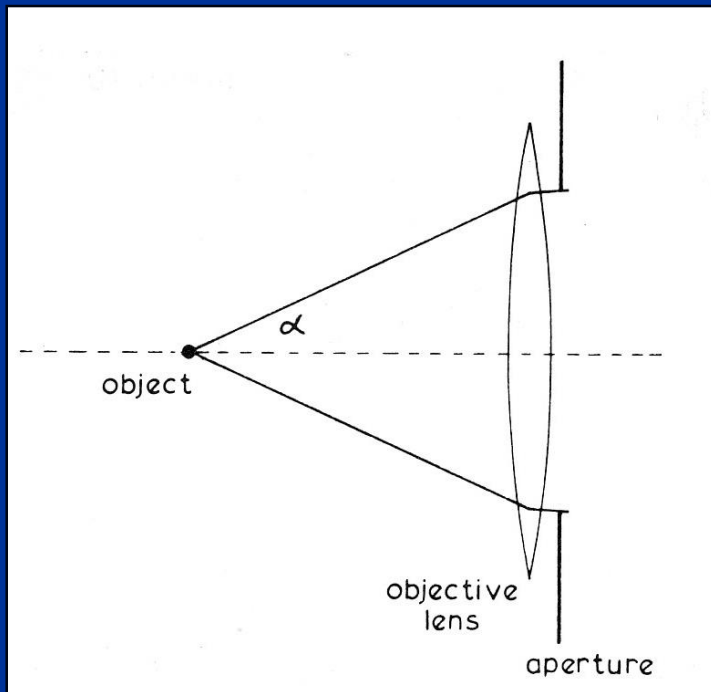
Aby uzyskać jak najmniejsze  $r$  należy: zmniejszać  $\lambda$ , zwiększać  $\mu$  i  $\alpha$  !

## Dla mikroskopu optycznego:

$\lambda$  – zmniejszamy do **400 nm** (światło zielone) a nawet do **200 nm** (bliski ultrafiolet)

$\mu$  – 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  $\mu\text{m}$** ) 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 !!!

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

$$\mu \geq 1$$

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

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

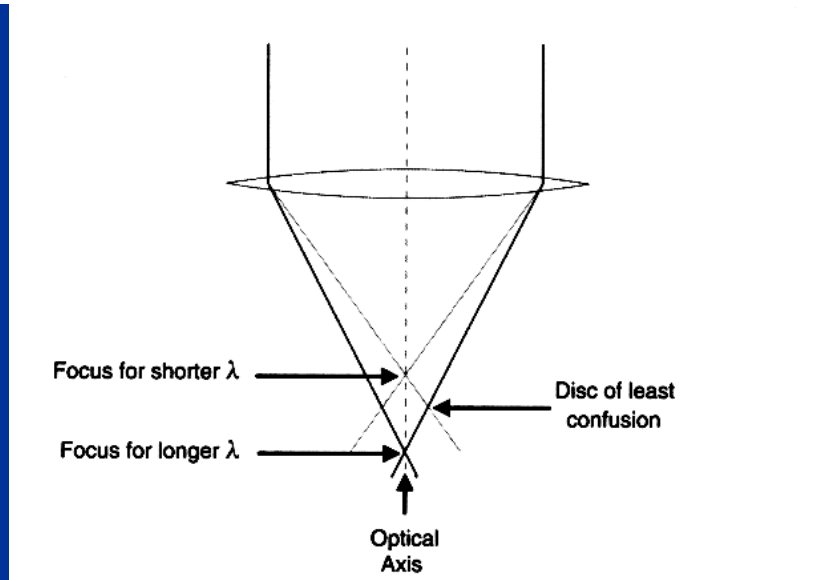
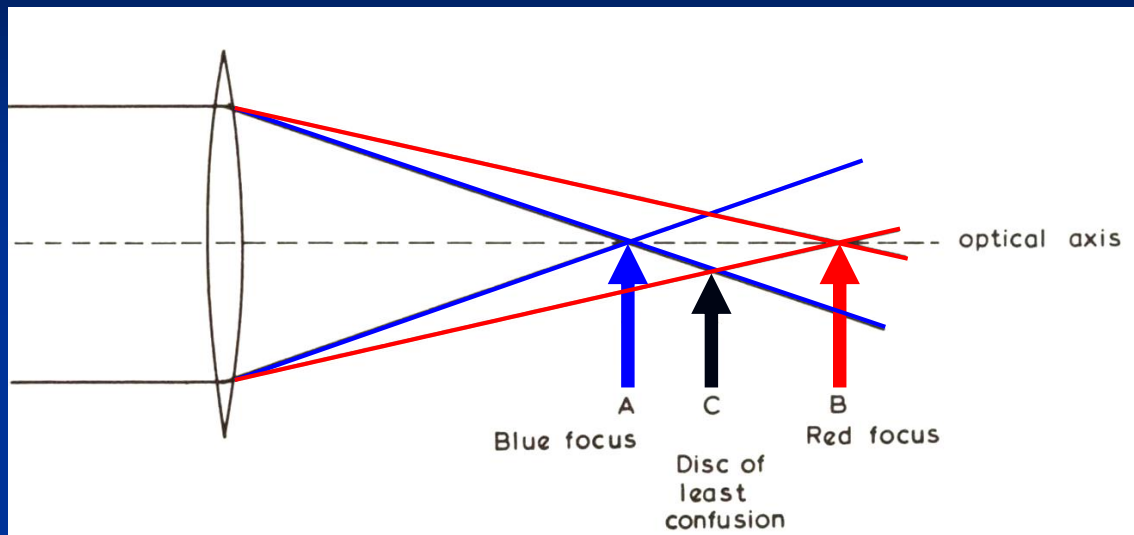
$$\mu = 1 \text{ (próżnia)}$$

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

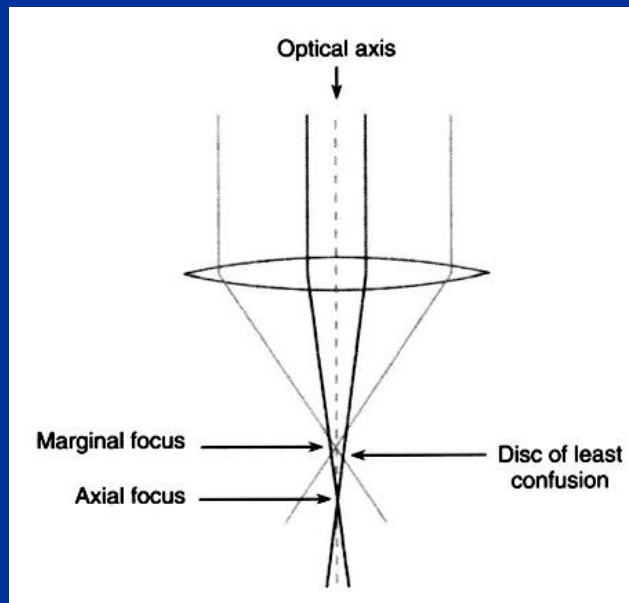
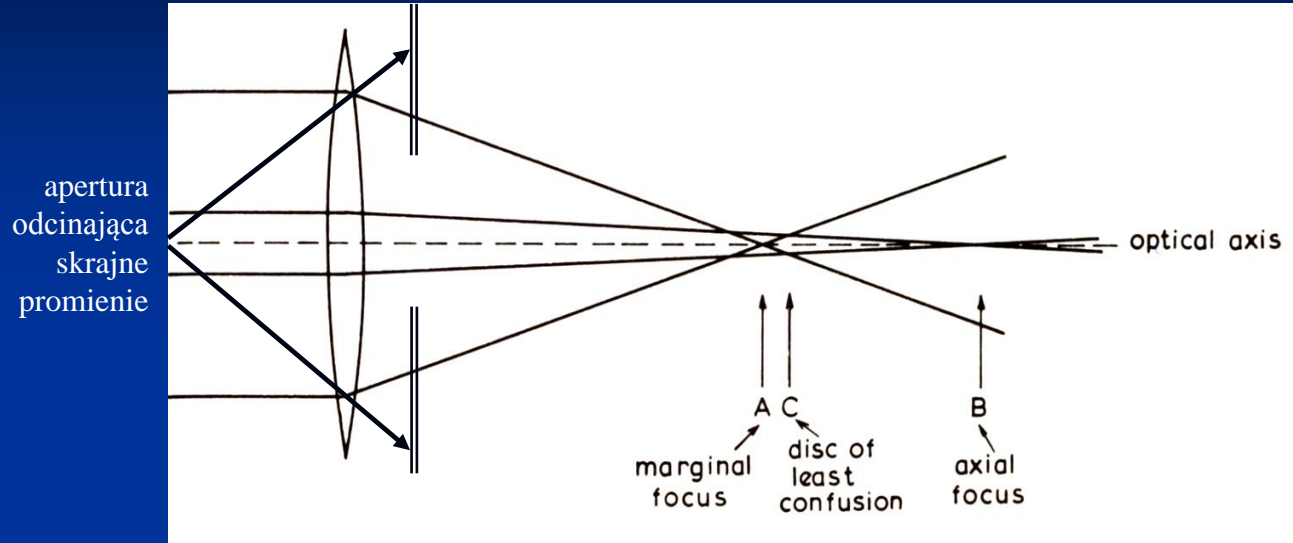
## Aberracja chromatyczna



rozmyte ognisko

# Wady soczewek

## Aberracja sferyczna



rozmyte ognisko

# Mikroskopia elektronowa

aberracja chromatyczna: łatwo usuwalna,

aberracja sferyczna: **trudno usuwalna!!!**

rozwiązanie: wiązka elektronów blisko osi  
elektronooptycznej

(stosowanie apertur o małej średnicy)

$$\mathbf{r}_2 = \mathbf{c}_s \alpha^3$$

$C_s$  – współczynnik aberracji sferycznej

$$\mathbf{r}_{\text{optimum}} = \sqrt{\mathbf{r}_1^2 + \mathbf{r}_2^2}$$

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

Hawkes (1972)

$$\alpha_{\text{optimum}} = 0.77\lambda^{1/4}c_s^{-1/4}$$

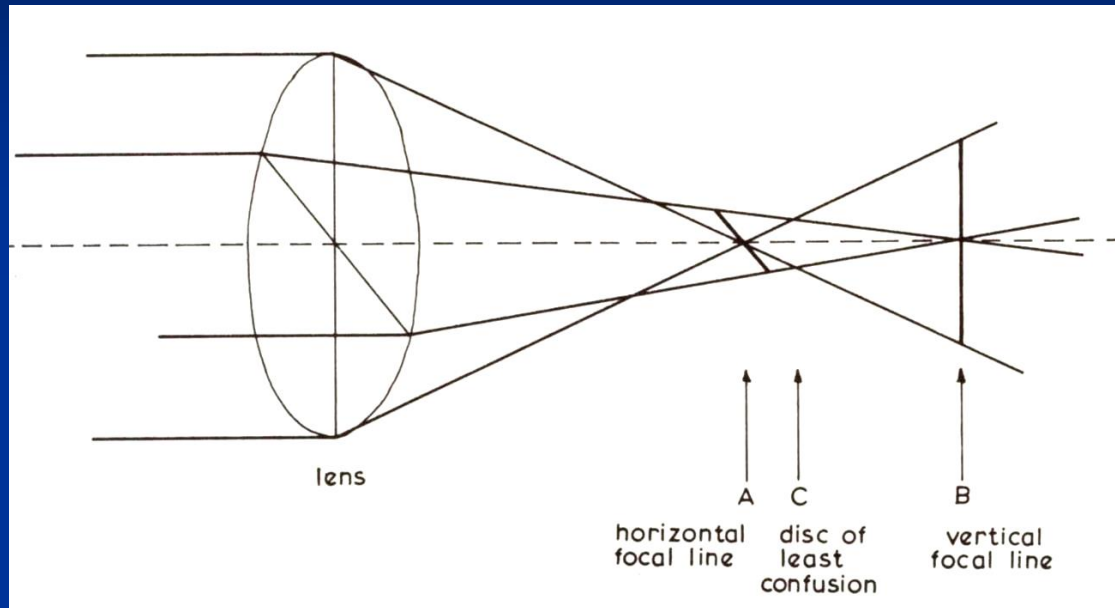
Dla energii 100 keV ( $\lambda=0.0037$  nm) i  $c_s=3$  mm  $\rightarrow \alpha_{\text{opt}} = \sim 15$  mrad =  $0.86^\circ$

$$r_{\text{optimum}} = 0.91\lambda^{3/4}c_s^{1/4}$$

**Zdolność rozdzielcza TEM (HREM)**  
**punktowa 0.12 nm = 1.2 Å**

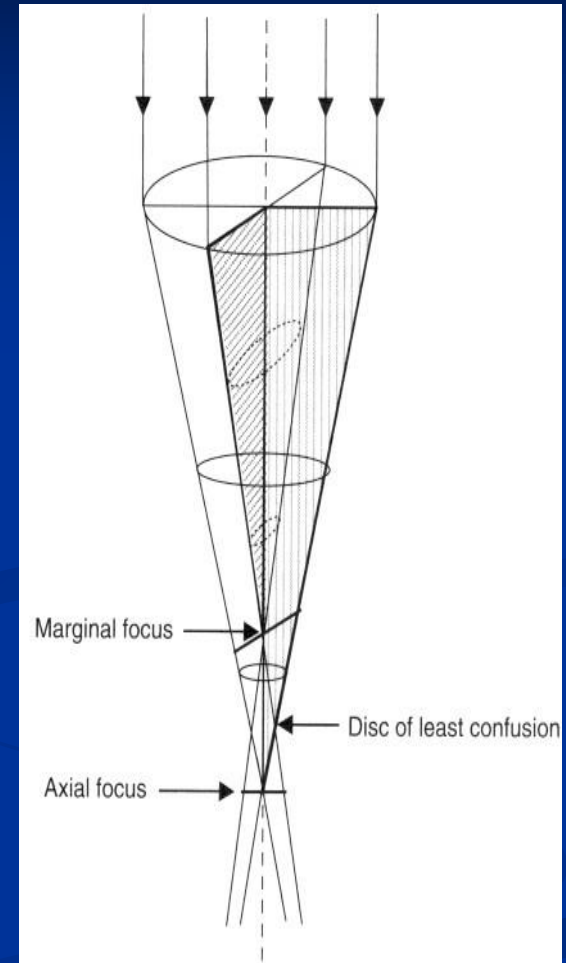
# Wady soczewek

## Astygmatyzm



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

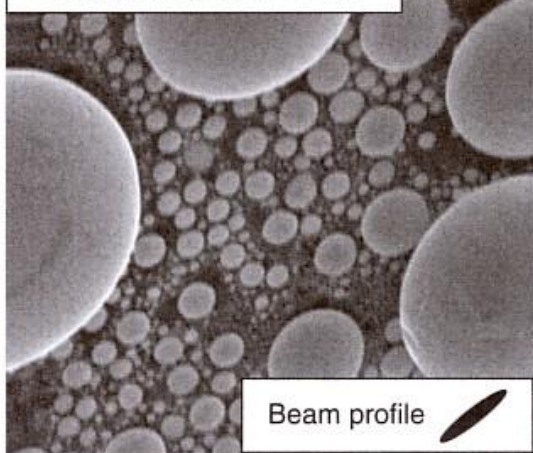
**(w tym przypadku soczewka załamuje  
promienie silniej w osi pionowej)**



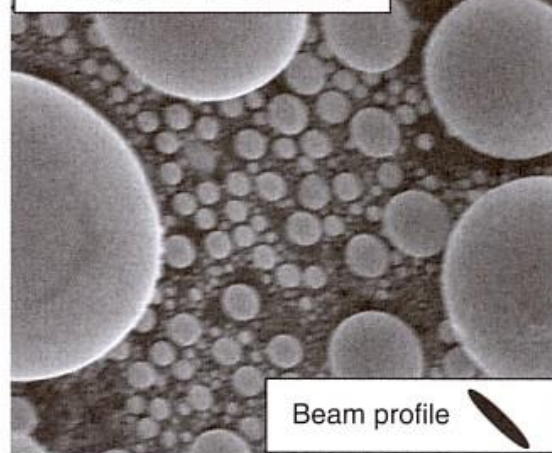
rozmyte ognisko



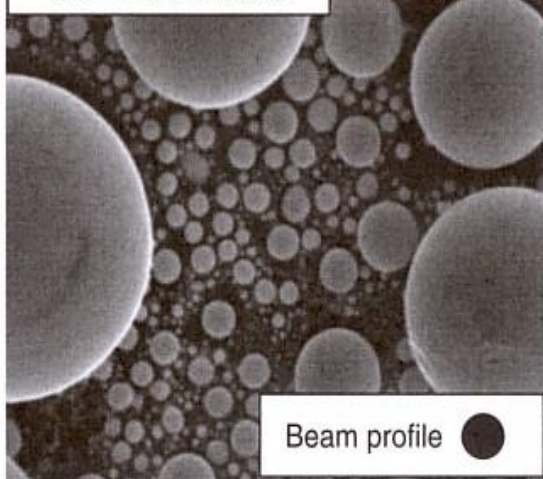
Astigmatic (under focus)



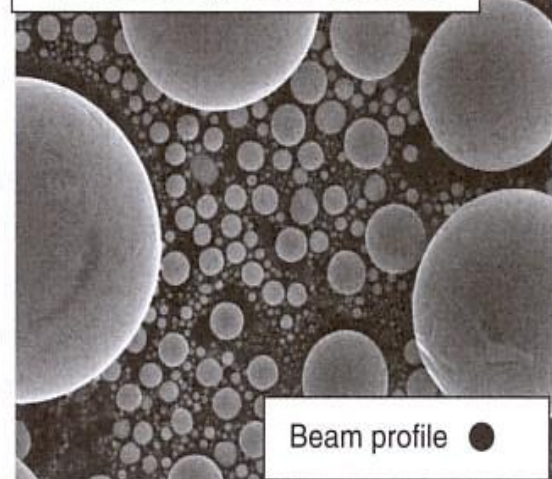
Astigmatic (over focus)



In focus, astigmatic



In focus, astigmatism corrected

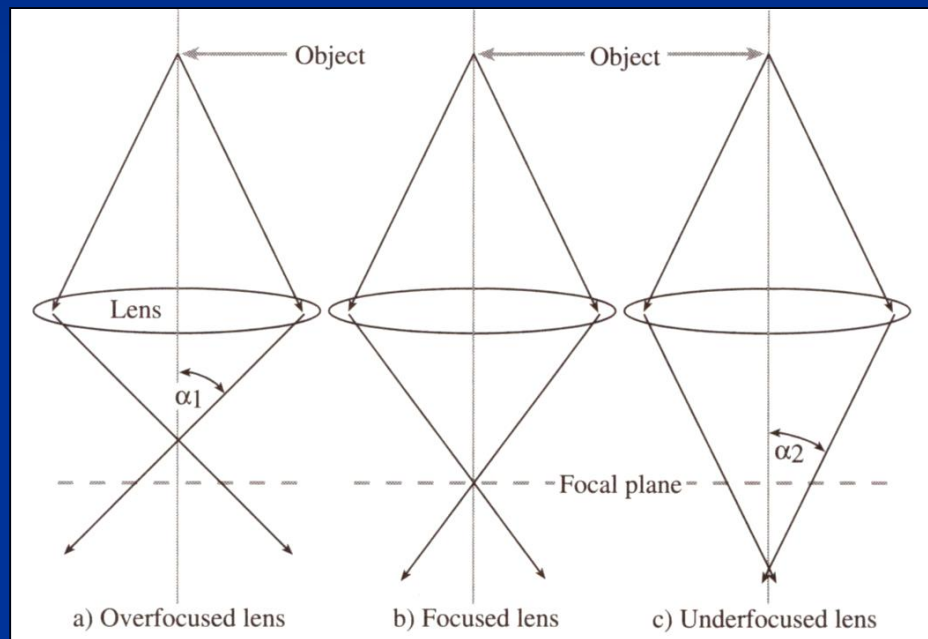


# Głębina ostrości

Kiedy obraz jest ostry?

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

Jeżeli znacznie przesuniemy obiekt powyżej lub poniżej płaszczyzny ogniskowej – obserwowany obraz staje się nieostry



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

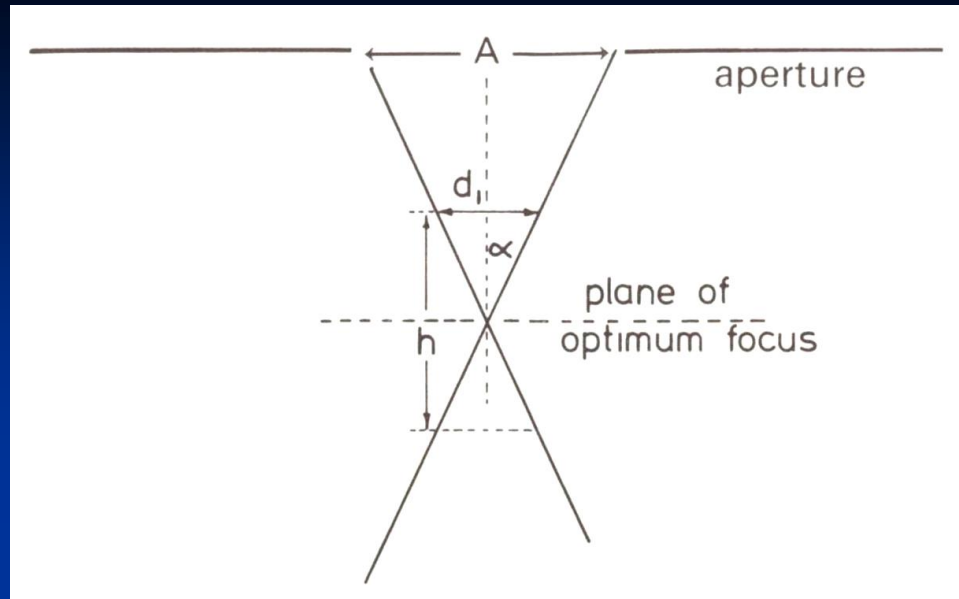
**głębina ostrości**

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

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

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

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



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

**Dla mikroskopii optycznej:**

**α = 45° zdolność rozdzielcza równa jest głębi ostrości**

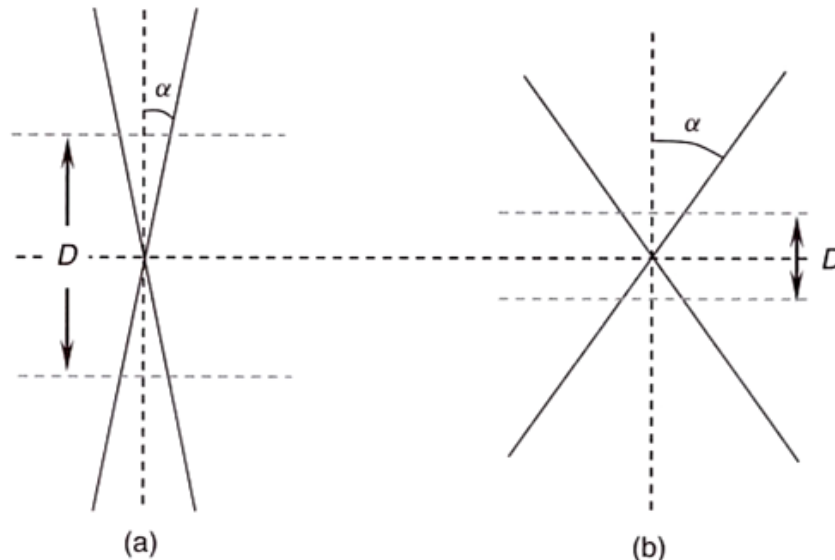
**dla α = 5° d = 5 μm, h = 40 μm**

# Mikroskopia elektronowa

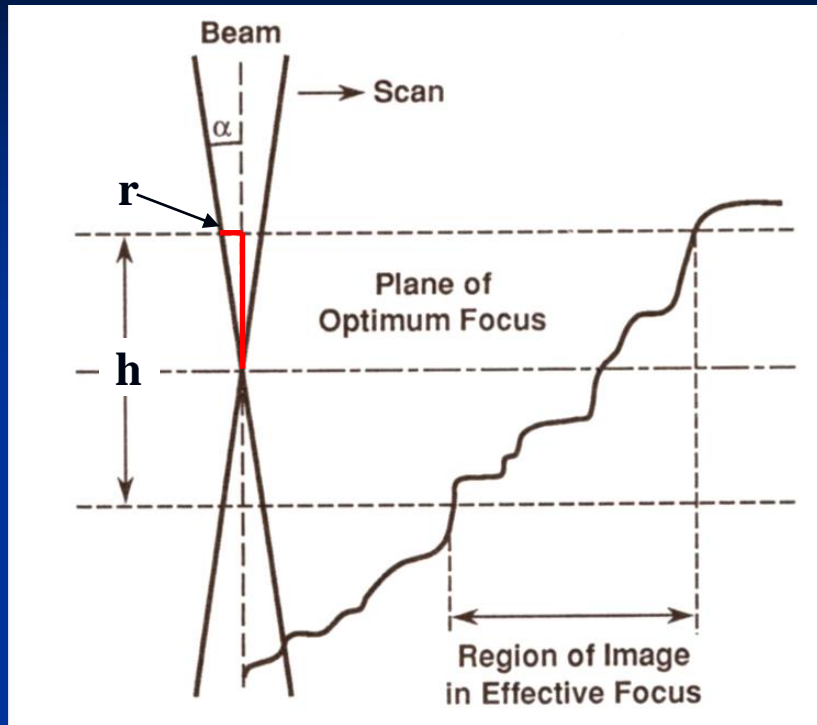
$$h = \frac{0.61\lambda}{\alpha^2}$$

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 w stosunku 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 oglądać preparaty pod bardzo dużym powiększeniem (rozwiązanie niepraktyczne))
- zmniejszyć kąt aperturowy  $\alpha$  !!!  
Jak?
- Przez zastosowanie apertur o różnej średnicy!!!

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

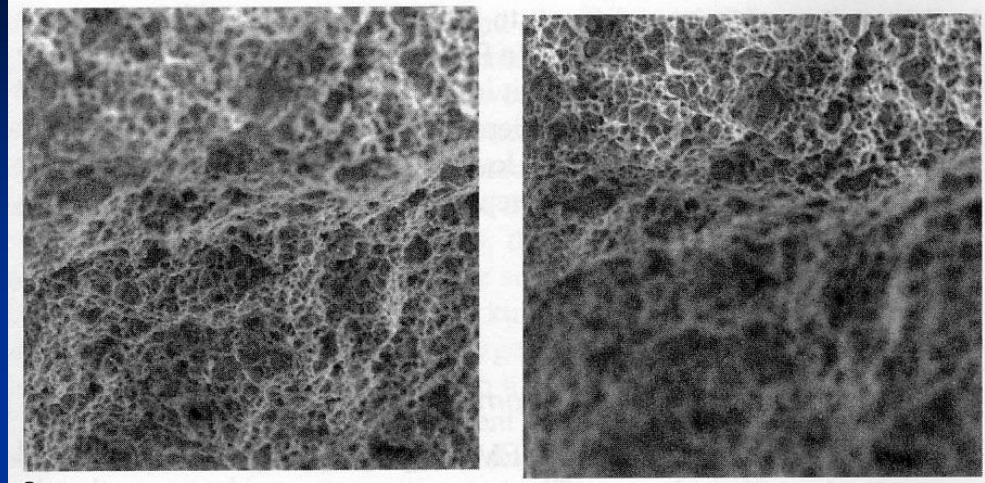
Magnification	100- $\mu\text{m}$ aperture $0.29^\circ$ ( $\alpha = 5 \times 10^{-3}$ rad)	200- $\mu\text{m}$ aperture $0.57^\circ$ ( $\alpha = 10^{-2}$ rad)	600- $\mu\text{m}$ aperture $1.72^\circ$ ( $\alpha = 3 \times 10^{-2}$ rad)
10 $\times$	4 mm	2 mm	670 $\mu\text{m}$
50 $\times$	800 $\mu\text{m}$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

Głębina ostrości „h” rośnie, gdy:

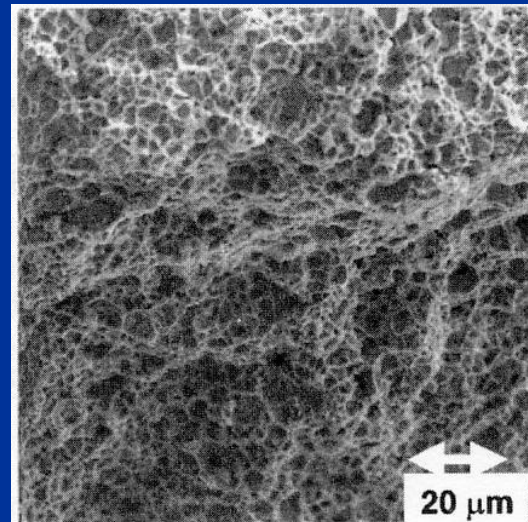
- zmniejszamy kąt aperturowy (stosujemy mniejszą średnicę apertury)
- zmniejszamy powiększenie



# Głębia ostrości

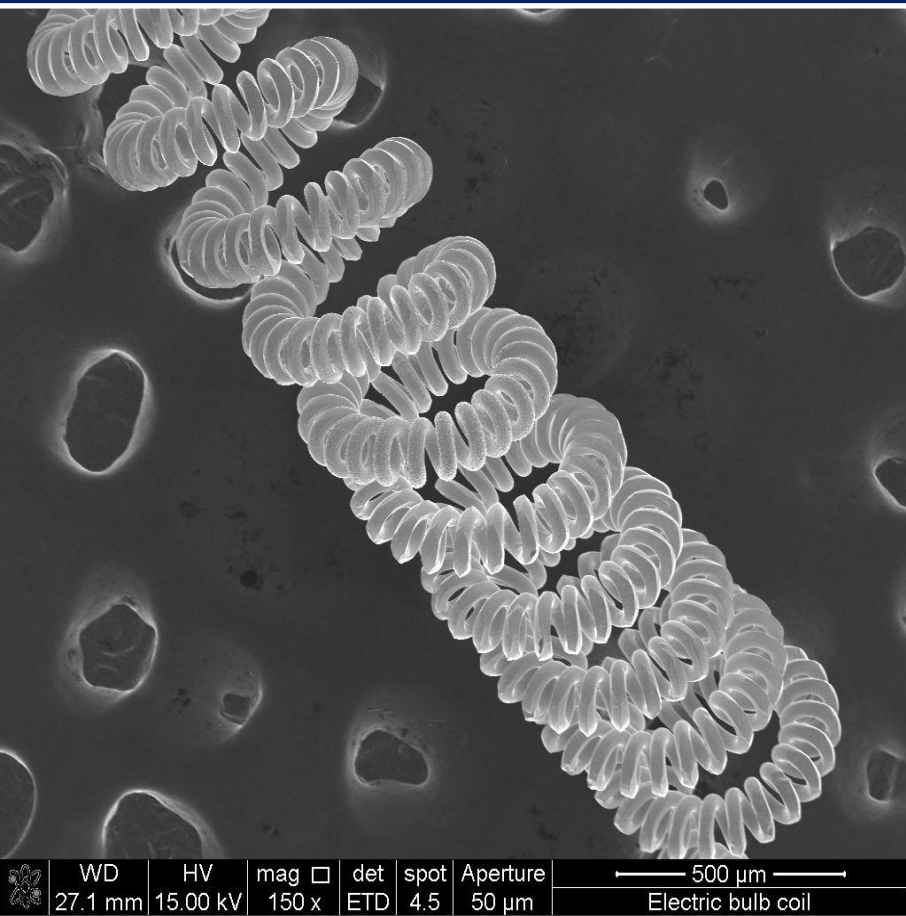


Ognisko w dolnej części    Ognisko w górnej części  
*Apertura 130  $\mu\text{m}$*

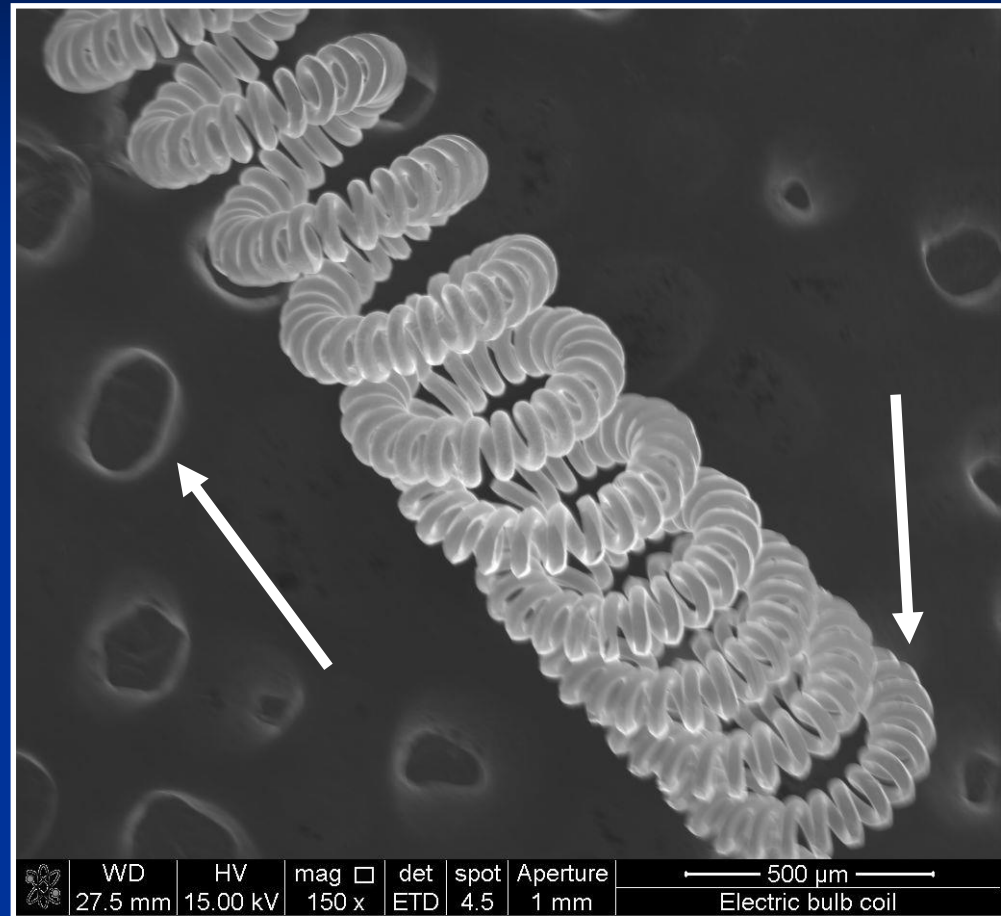


Duża głębia ostrości  
*Apertura 70  $\mu\text{m}$*

# Głębia ostrości



Średnica apertury 50 µm

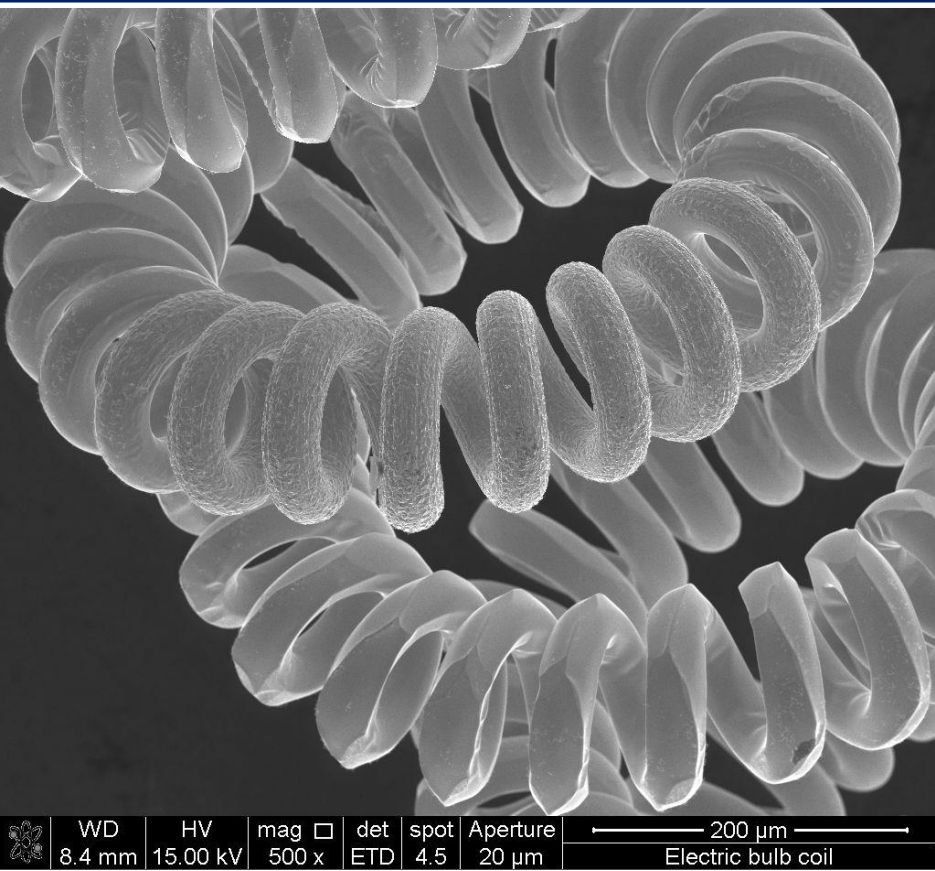


Średnica apertury 1000 µm

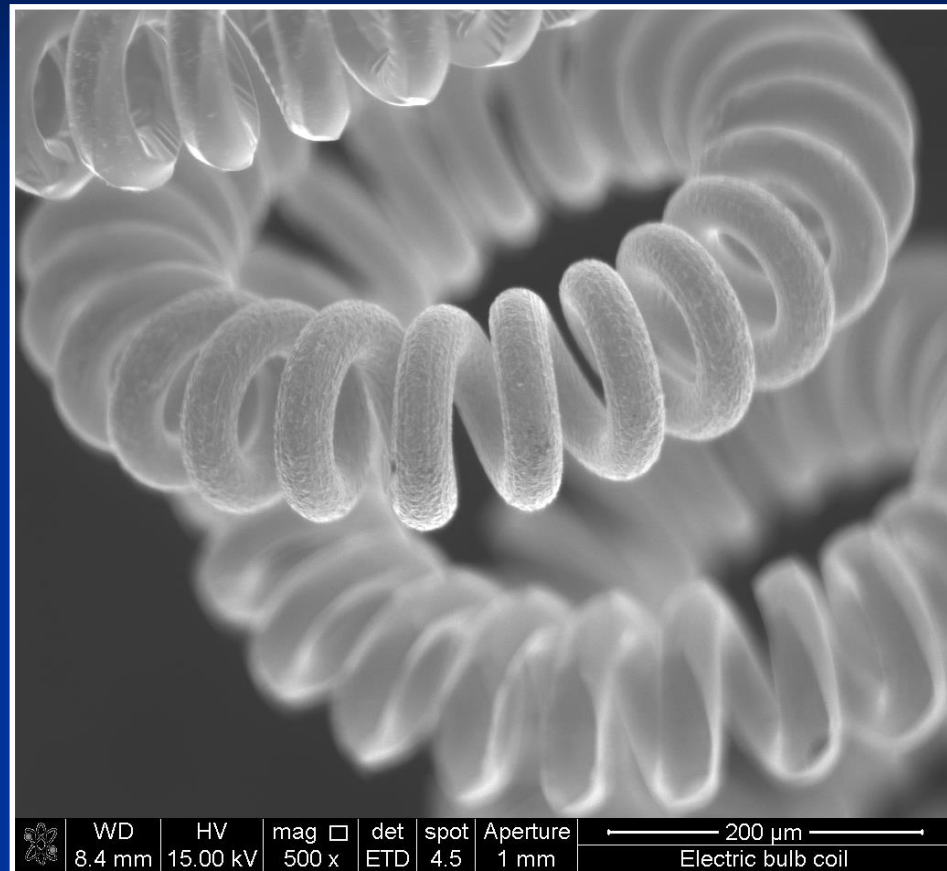
WD ca 27 mm



# Głębia ostrości



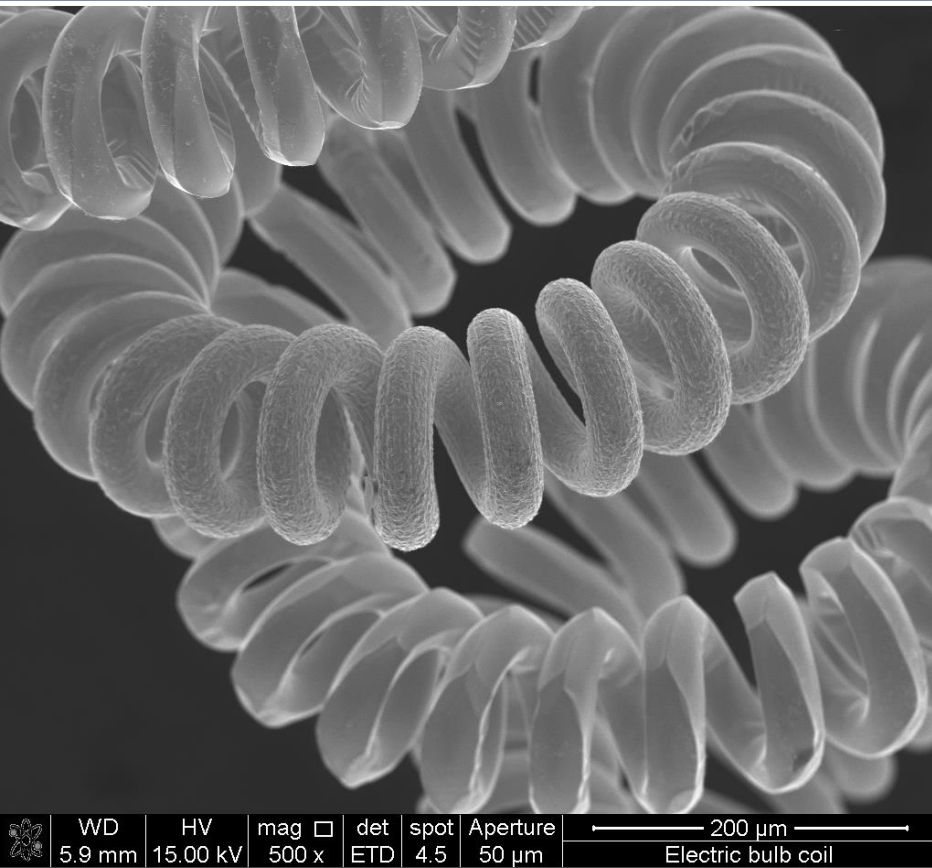
Średnica apertury 20 µm



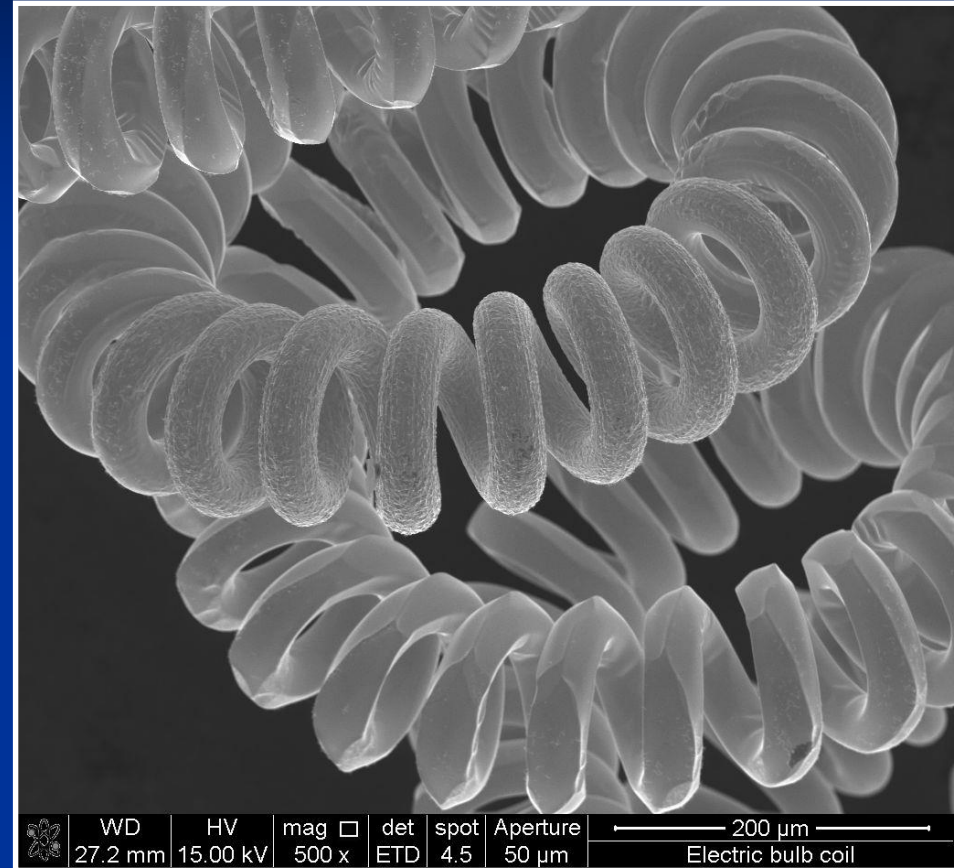
Średnica apertury 1000 µm

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 = 3mm

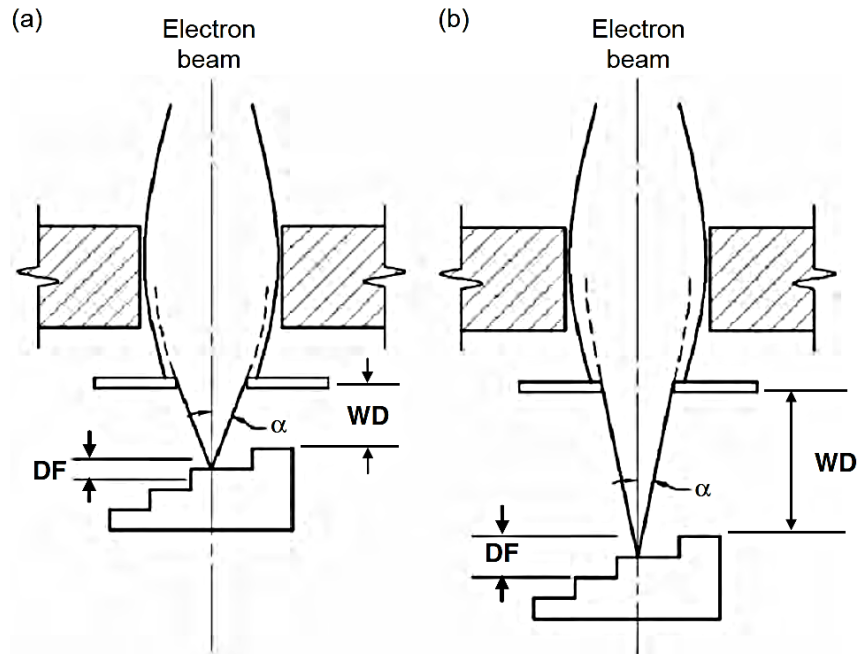


FIGURE 1.19. Beam diagram showing enhancement of depth of field (DF) by increasing working distance (WD). (a) Short working distance and (b) long working distance.

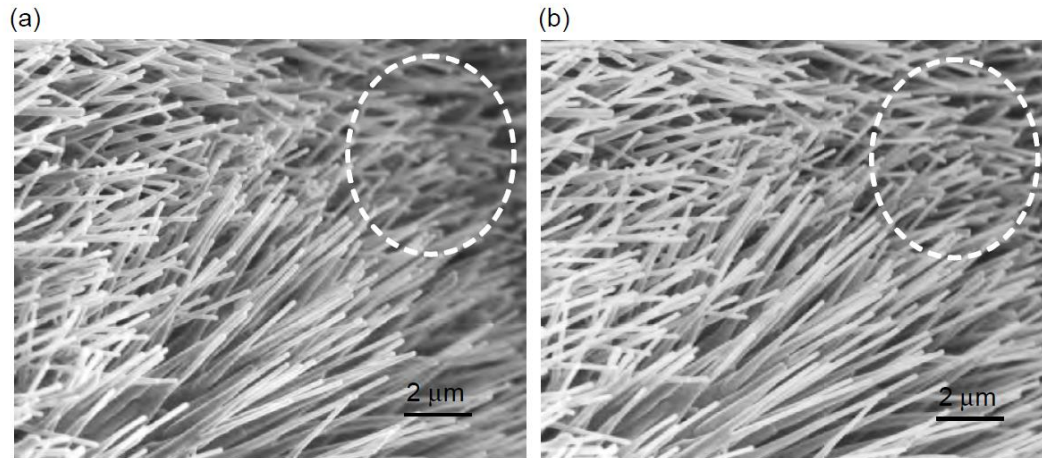
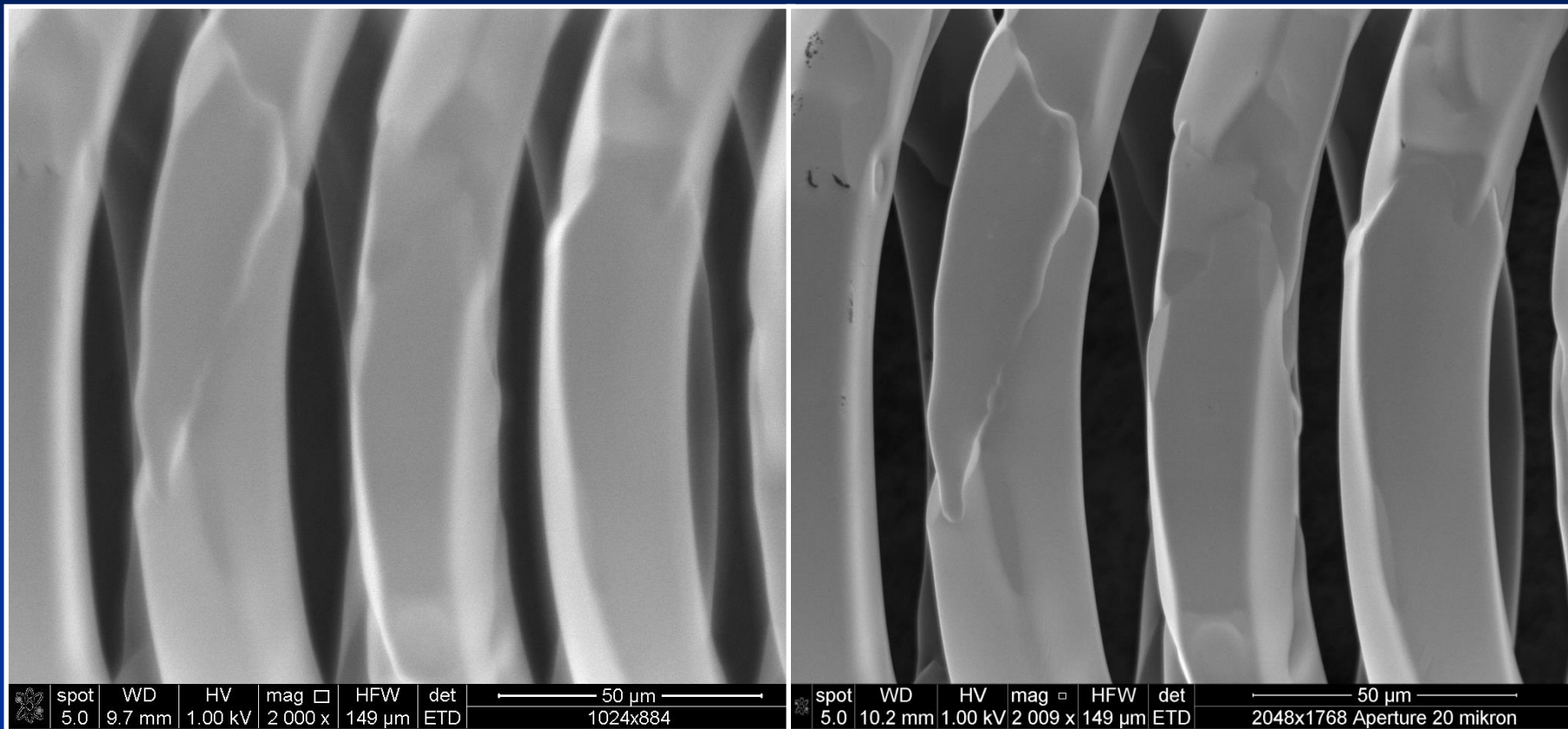


FIGURE 1.20. Well aligned Co-doped ZnO nanowires array fabricated by chemical vapor deposition, showing the enhancement of depth of field by increasing the working distance from (a) 3 mm to (b) 12 mm, which is emphasized by circles.

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**

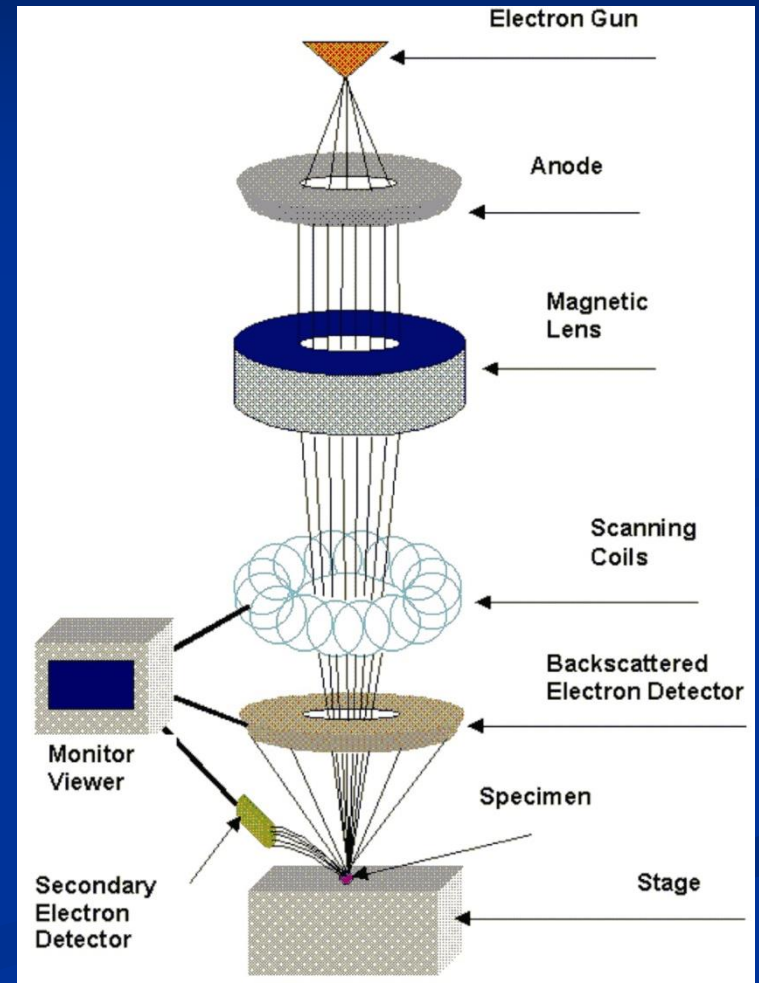
**Średnica apertury 20 µm**

# XL SERIES

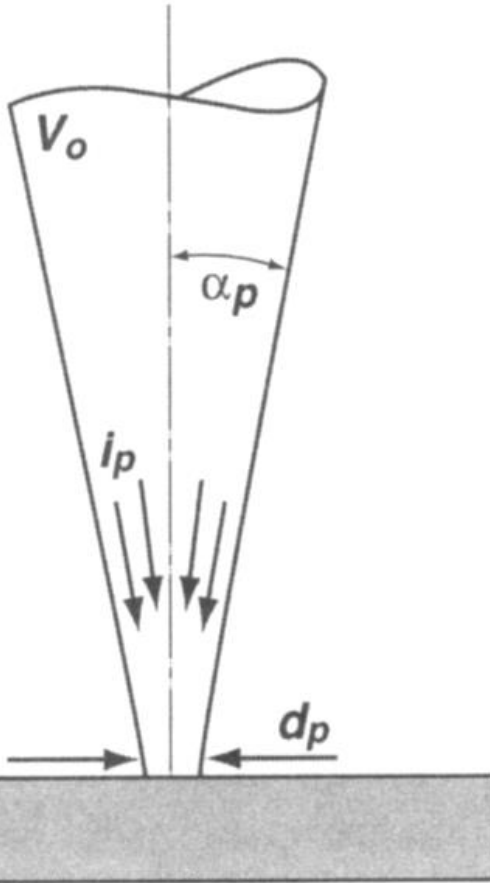
Scanning Electron Microscopes



# Schematic SEM

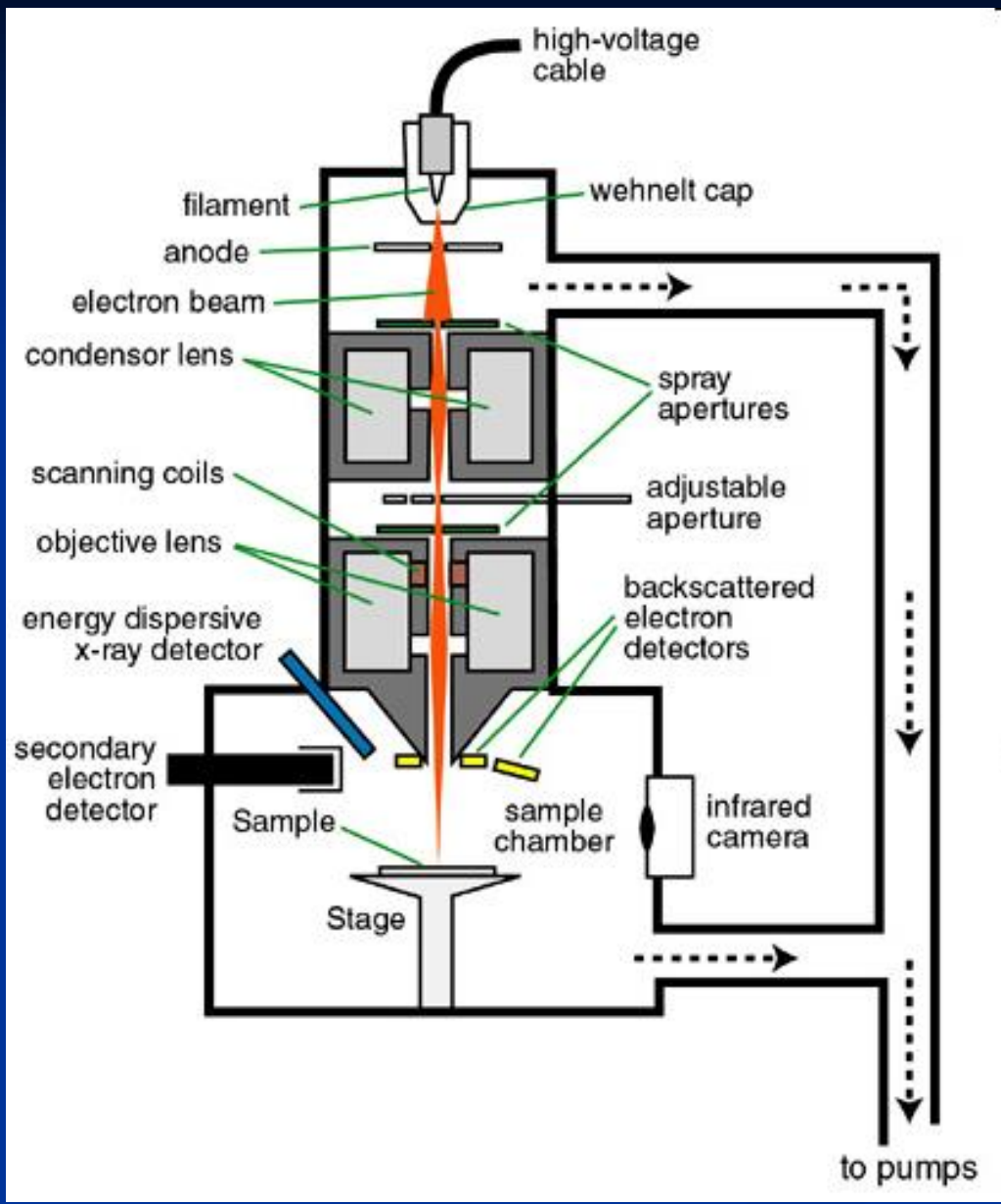


## Ostrość obrazu i rozróżnialność szczegółów w SEM zależą od 4 parametrów:

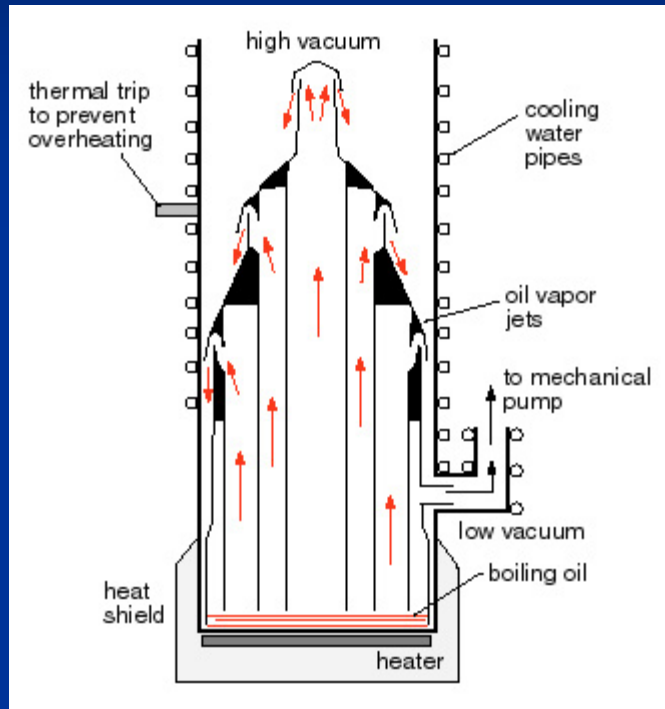


1.  $d_0$  - średnica wiązki elektronowej  
*od tego parametru zależy zdolność rozdzielcza mikroskopu*
2.  $i_p$  - prąd wiązki elektronowej  
*od tego parametru zależy stosunek sygnału do szumów w mikroskopie*
3.  $\alpha_p$  - kąt zbieżności wiązki elektronowej (kąt aperturowy)  
*od tego parametru zależy głębina ostrości mikroskopu*
4.  $V_0$  - napięcie przyspieszające wiązkę elektronową  
*od tego parametru zależy głębokość penetracji elektronów*

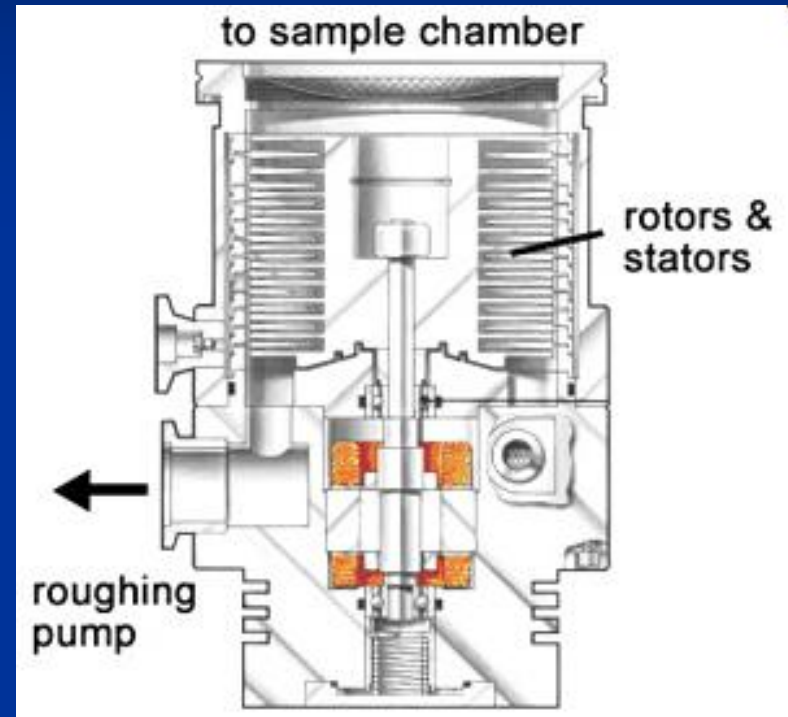




# ODP



# TMP

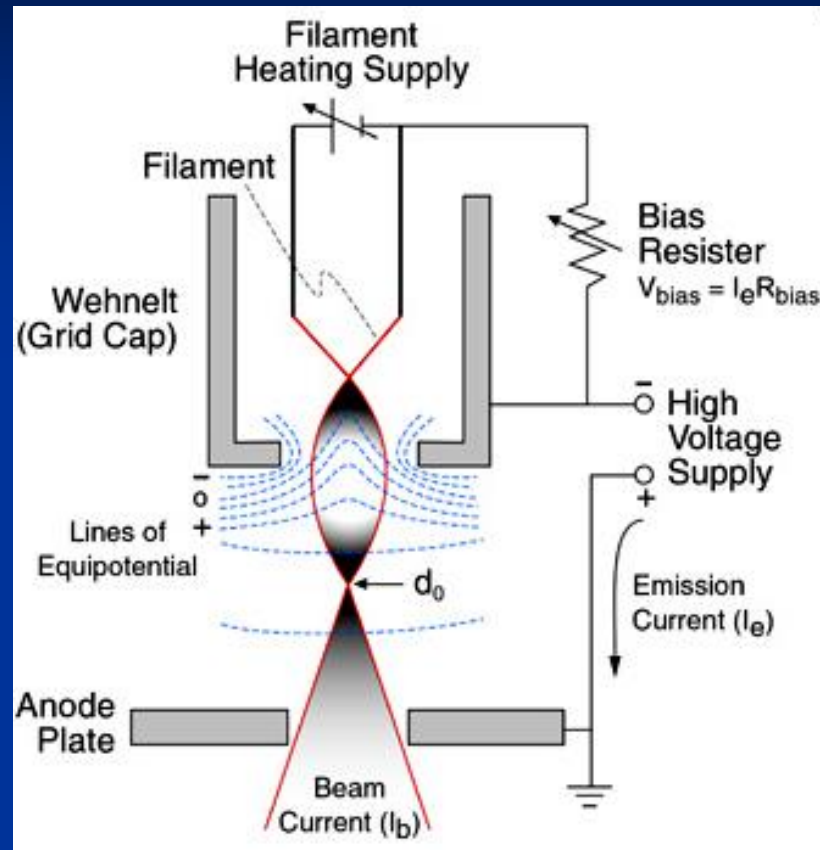




# Źródła elektronów w ME (SEM i TEM)

- Źródło wolframowe z termoemisją
- Źródło  $\text{LaB}_6$  z termoemisją
- Źródła FEG (Field Emission Gun)
  - Cold Field Emission
  - Thermal Field Emission (Schottky Field Emission)

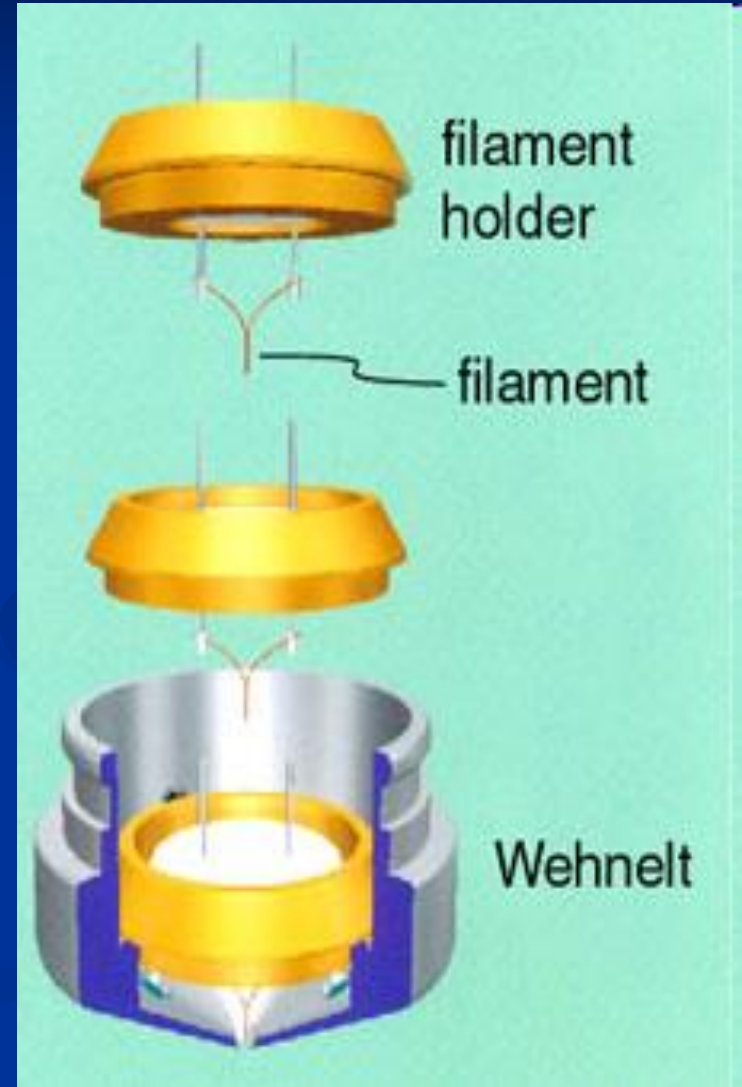
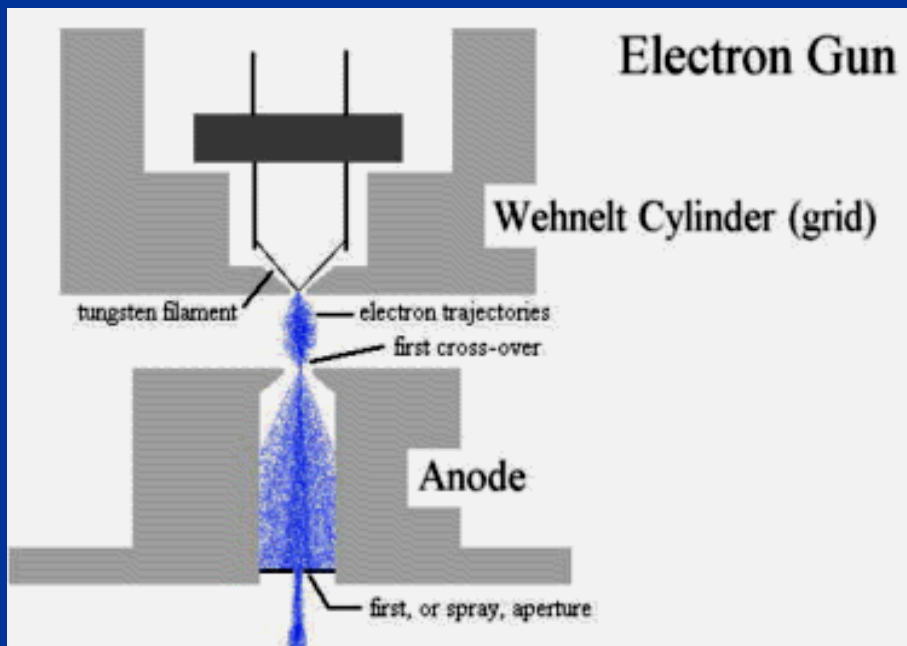
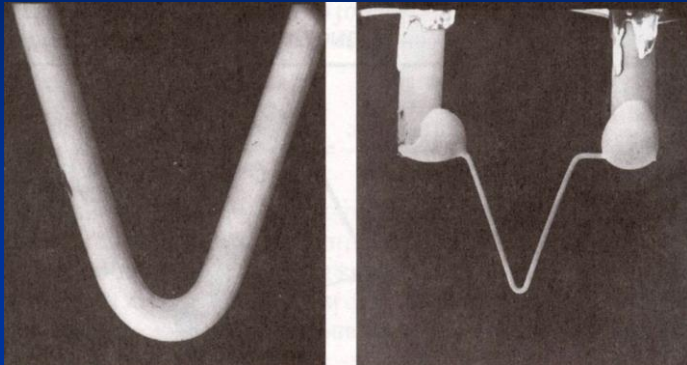
# Źródło wolframowe z termoemisją



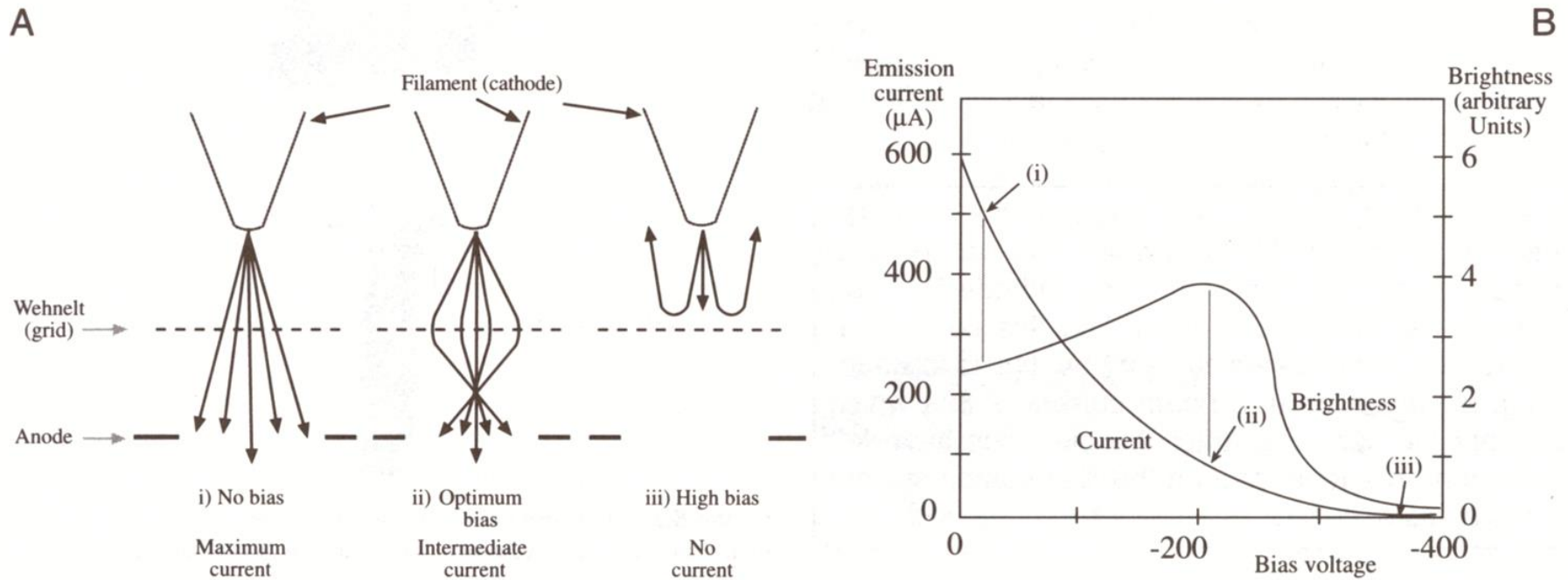
**W** - temp. topnienia 3653 K, praca wyjścia elektronu  $\phi = 4.5 \text{ eV}$ ,  
 **$d_0 = 50 \mu\text{m}$  (cross-over)**

**W** - dla temperatur 2700K-2800K – emisja prom. elektromagnetycznego w zakresie światła widzialnego oraz (przy odpowiedniej różnicy potencjału) termoemisja elektronów

# Źródło wolframowe z termoemisją



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

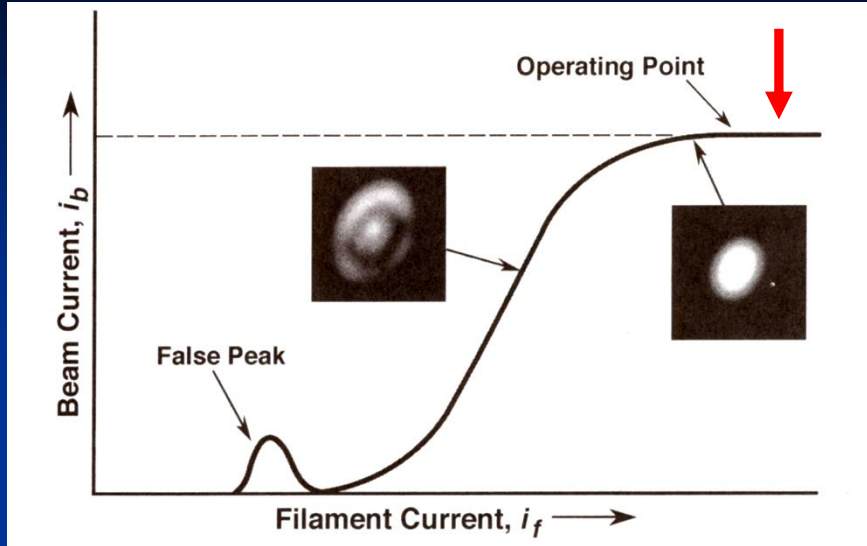


**Figure 5.4.** (A) The effect of increasing Wehnelt bias (i–iii) on the distribution of electrons coming through the anode. (B) The relationship between the bias and the emission current/gun brightness. Maximum brightness is achieved at an intermediate Wehnelt bias, and an intermediate emission current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

emission current – prąd wiązki w „cross-overze”

„brightness” !!!

plateau



$\beta$  (jasność) - liczba elektronów skierowana na określoną powierzchnię w jednostce czasu

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

$\beta$  – jasność (brightness)

$i$  – prąd wiązki elektronowej

$d$  – średnica wiązki elektronowej

$\alpha$  – kąt zbieżności wiązki elektronowej

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

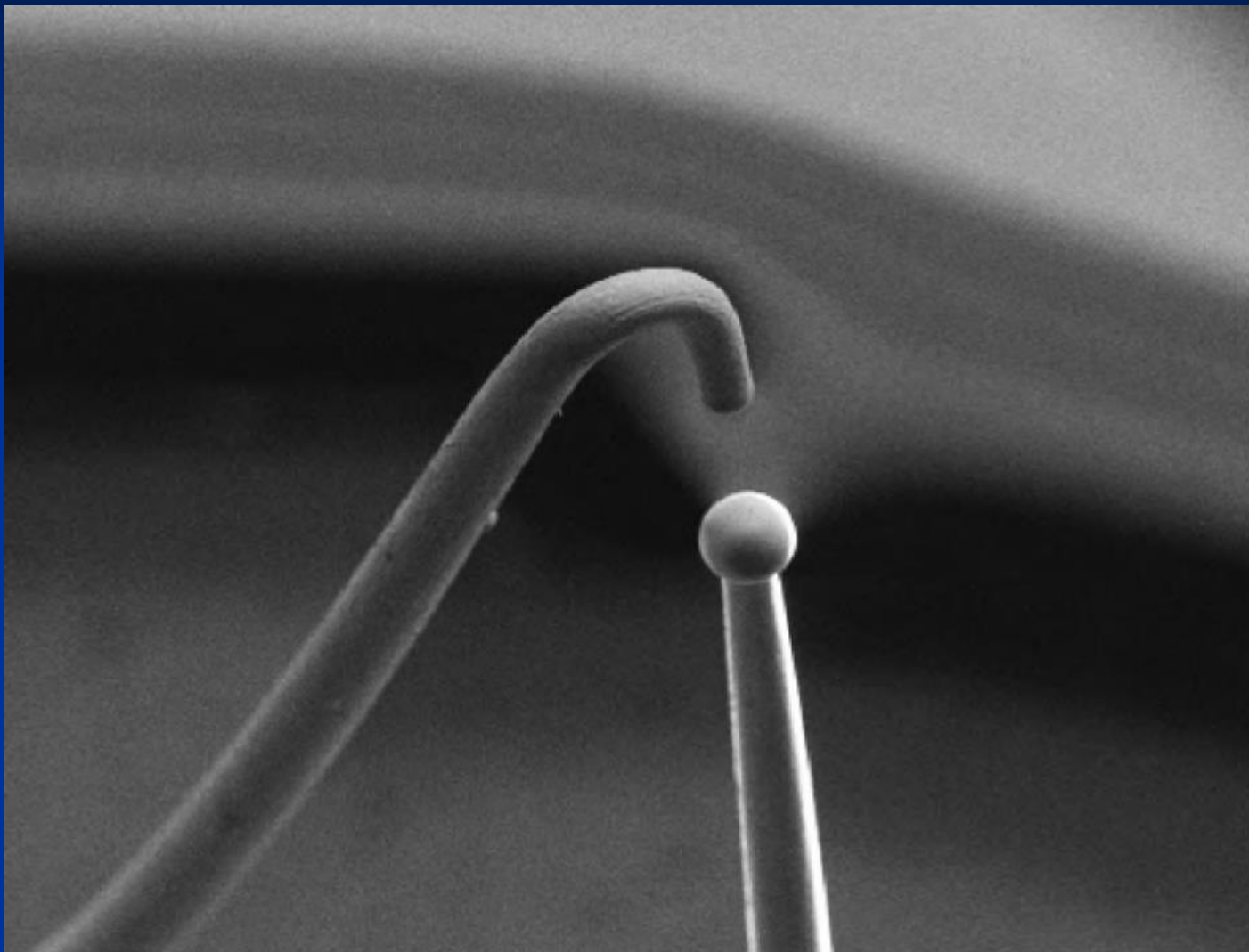
$T$  – temp [K],

$V$  – napięcie przyspieszające elektrony

$\Phi$  – praca wyjścia materiału katody [eV]

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

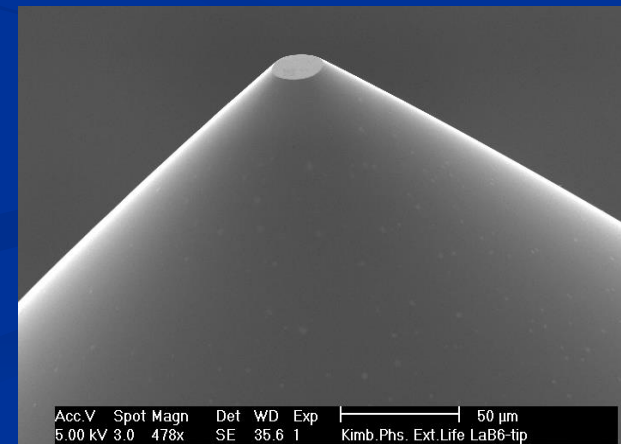
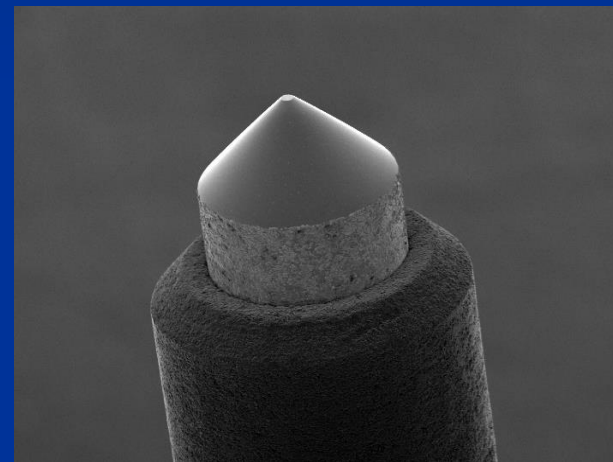
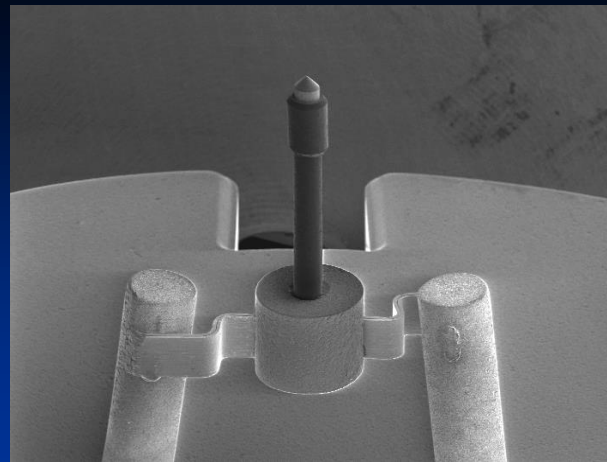
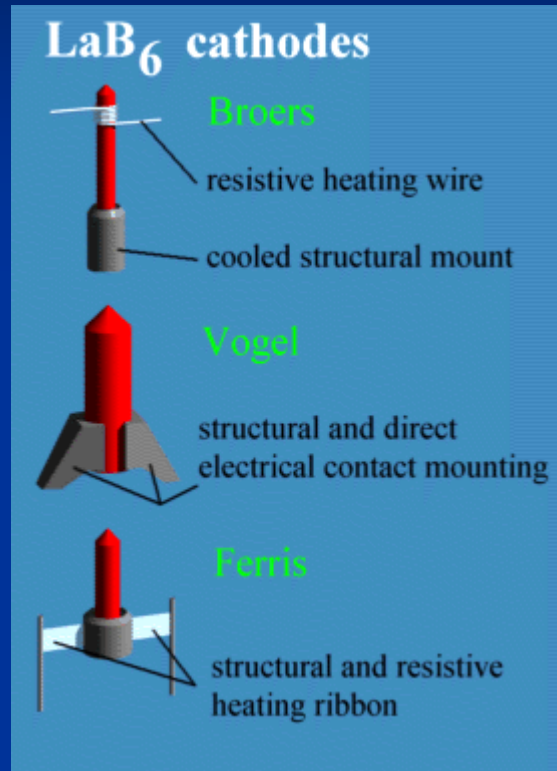
$\beta \uparrow \Phi \downarrow !!!$



Co się dzieje jak pracujemy za długo na plateau



# Źródło LaB<sub>6</sub> z termoemisją



Dla LaB<sub>6</sub> 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)

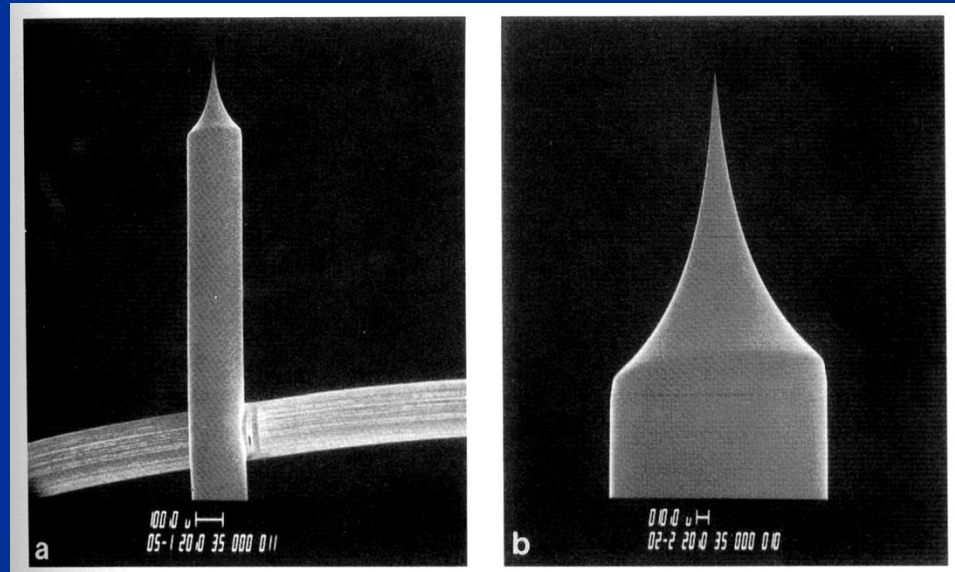
- CFE (Cold Field Emission)
- TFE (Thermal Field Emission)

## CFE (Cold Field Emission)

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

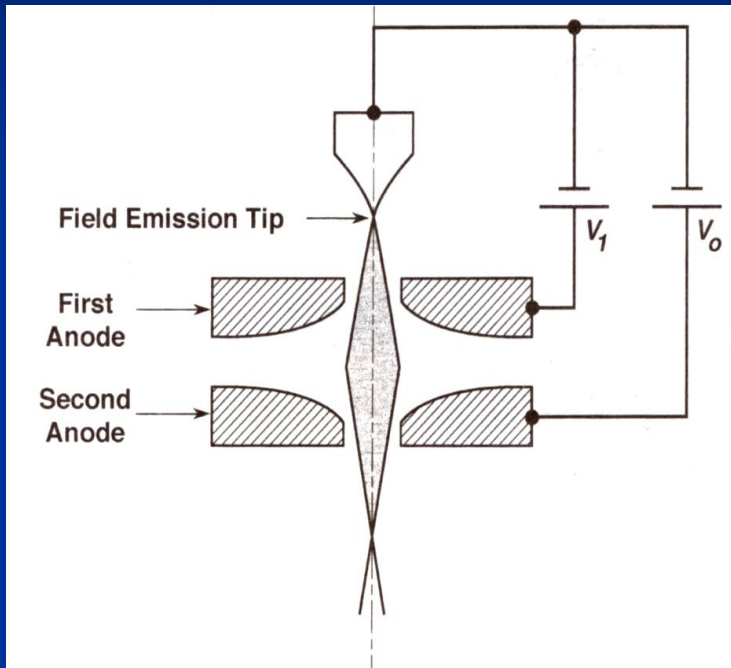
Materiał katody – **wolfram** – bo wytrzymuje naprężenia mechaniczne pojawiające się na końcu ostrza pod wpływem pola elektrycznego

**Efekt tunelowania** – w temp. 297 K (!)





## CFE (Cold Field Emission) cd.



$V_1$  – napięcie pomiędzy pierwszą anodą a ostrzem (3-5 kV – emisja 10  $\mu$ A) (ekstraktor)

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

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

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

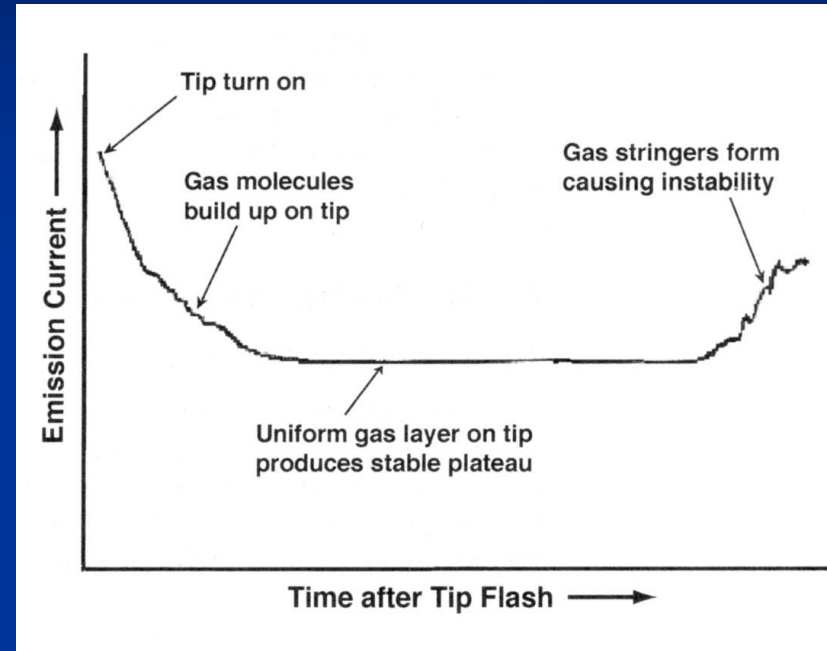
Z czasem emisja maleje, bo narasta warstwa molekuł gazu (po 10-15 min.).

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.)

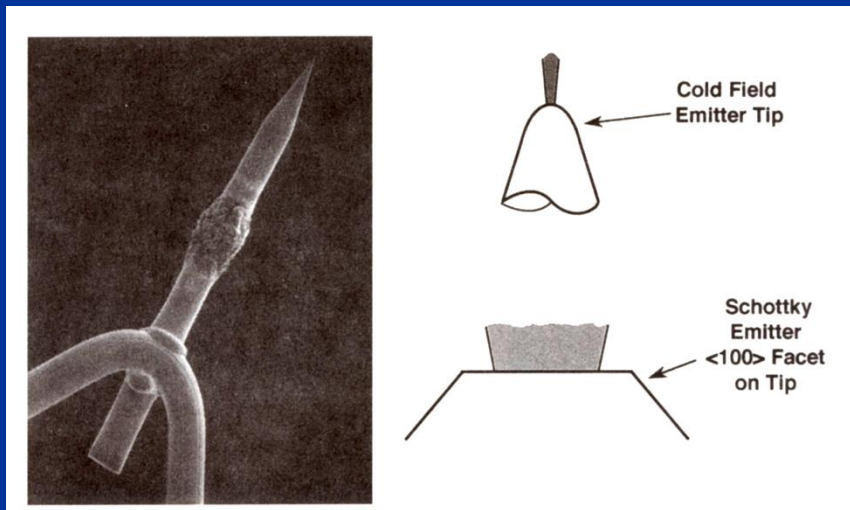
# SFE (Schottky Field Emission)

**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  $\phi$  poprzez zwilżanie powierzchni ostrza ciekłym dwutlenkiem cyrkonu.

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

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



## Zalety SFE:

1. najwyższa jasność źródła  $\beta$
2. najlepsza stabilność

## Wada SFE:

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

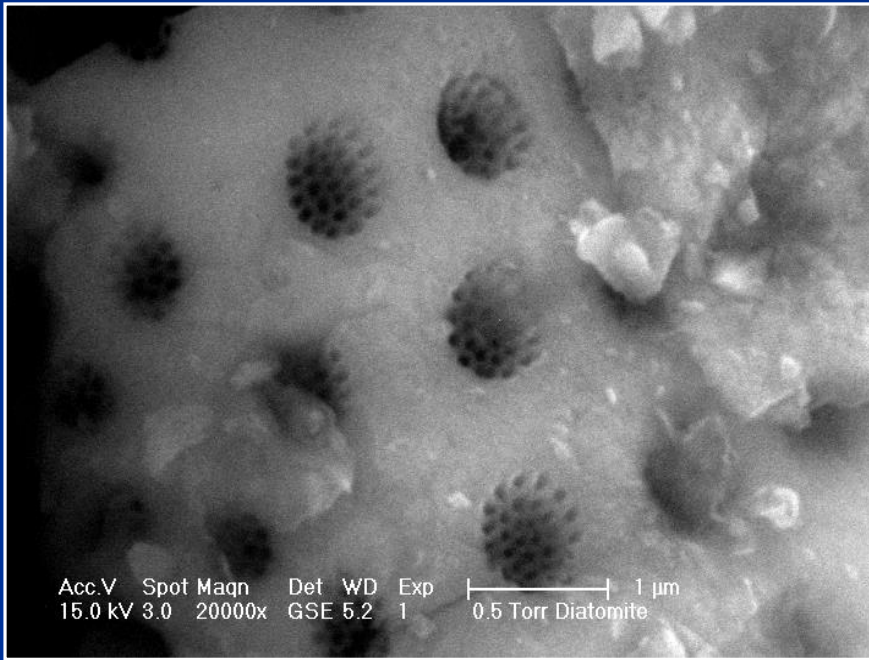
FEG z termoemisją Schottky'ego



## Electron Source Performance Comparison

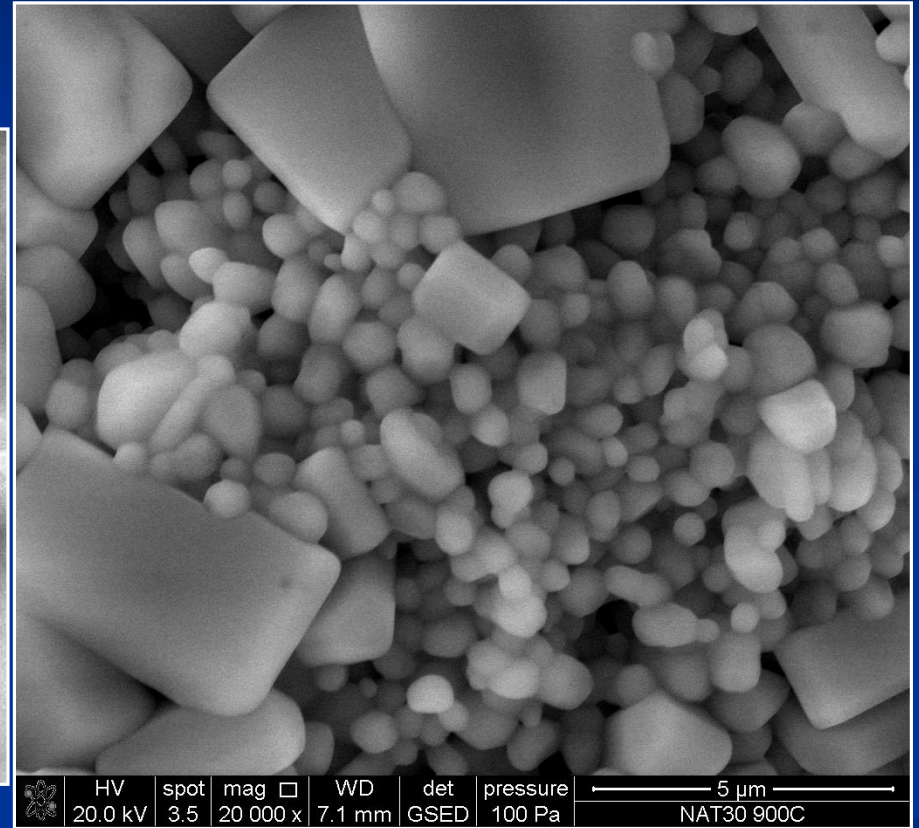
Emitter type	thermionic	thermionic	cold FE	Schottky FE
Cathode material	W	LaB <sub>6</sub>	W (310)	ZrO/W (100)
Operating temperature [K]	2,800	1,900	300	1,800
Cathode radius [nm]	60,000	10,000	≤ 100	≤ 1,000
Effective source radius [nm]	15,000	5,000	2.5 (a)	15 (a)
Emission current density [A/cm <sup>2</sup> ]	3	30	17,000	5,300
Total emission current [μA]	200	80	5	200
Normalized brightness [A/cm <sup>2</sup> .sr.kV]	1 . 10 <sup>4</sup>	1 . 10 <sup>5</sup>	2 . 10 <sup>7</sup>	1 . 10 <sup>7</sup>
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 <sup>-5</sup>	≤ 1 . 10 <sup>-6</sup>	≤ 1 . 10 <sup>-10</sup>	≤ 1 . 10 <sup>-8</sup>
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*



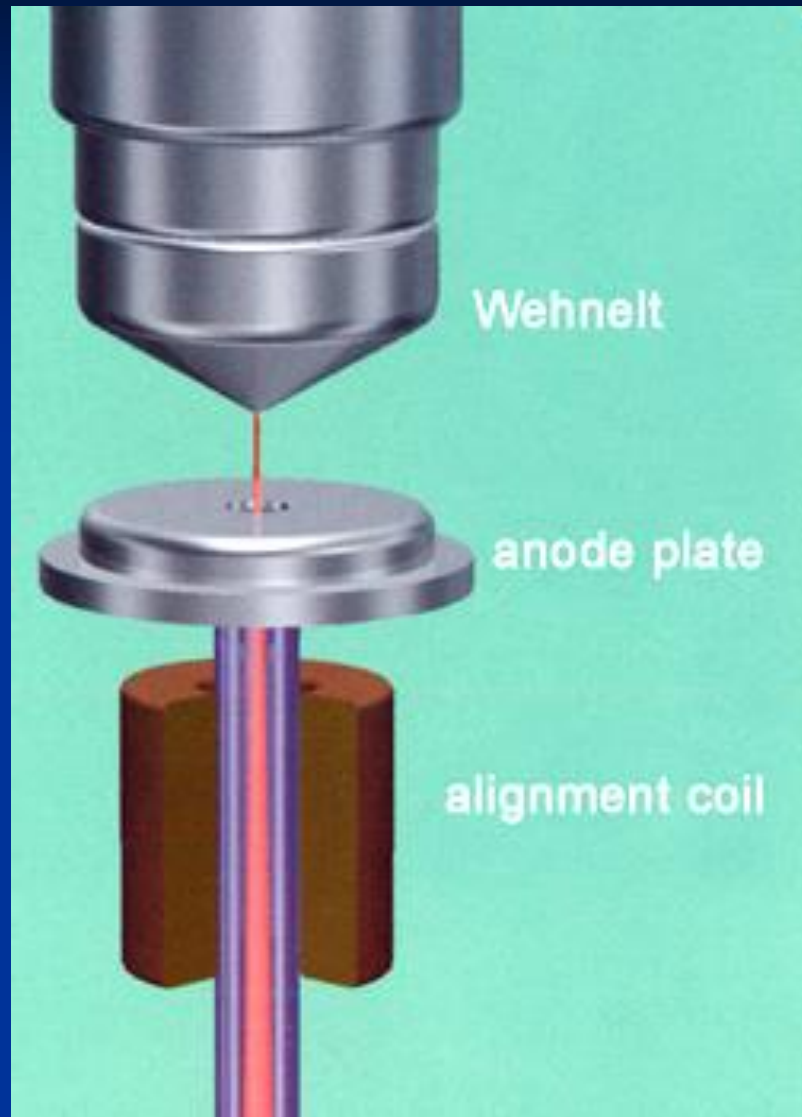
**Źródło wolframowe z termoemisją**

## *Kompozyt HAp/bioszkle*



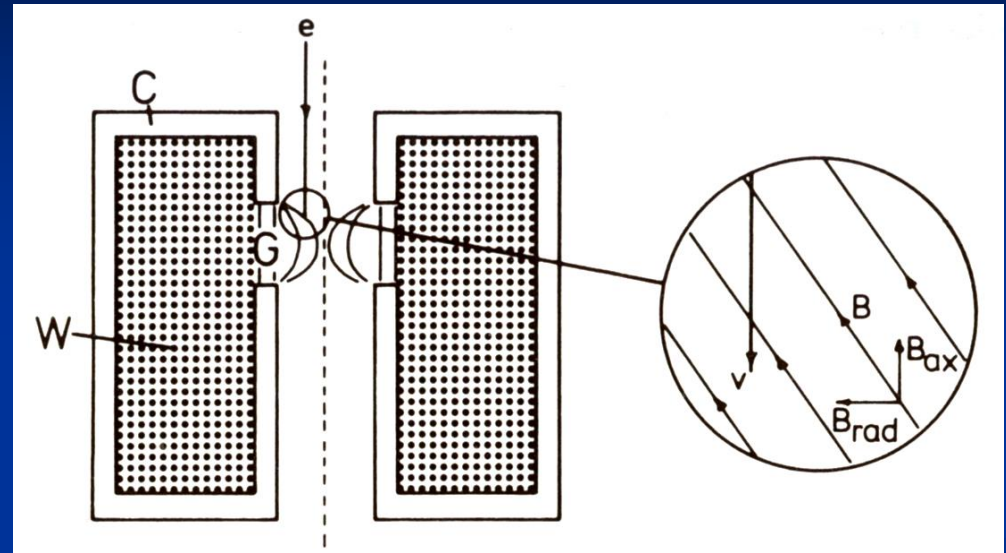
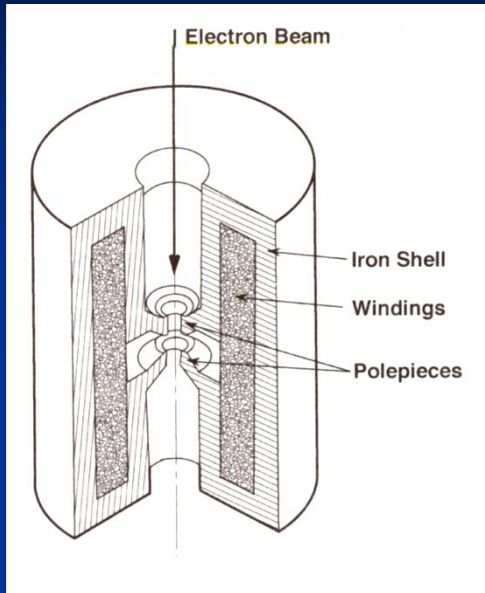
**SFE (Schottky Field Emission)**







# Soczewki magnetyczne



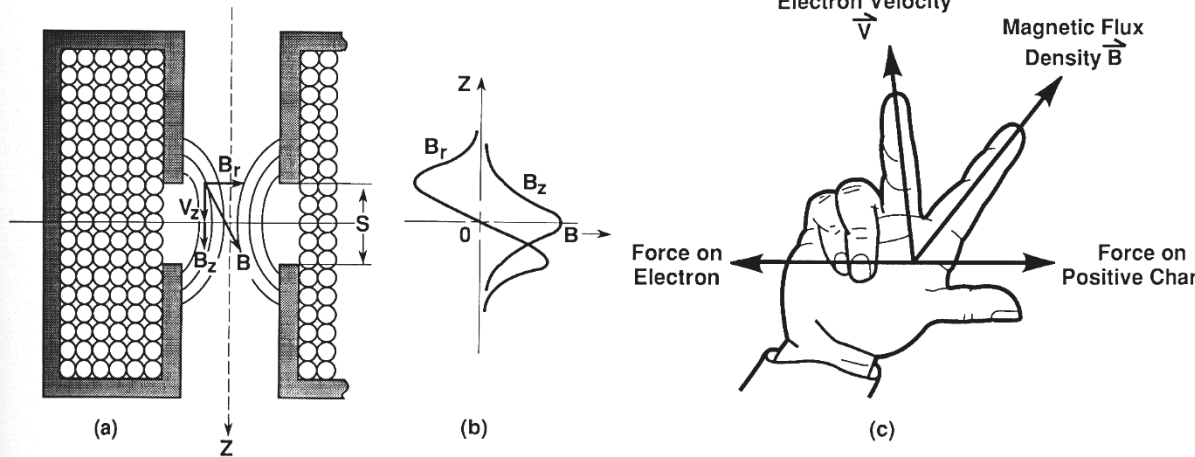
Na elektron poruszający się w prędkością „ $v$ ” w polu magnetycznym działa siła:  $\mathbf{F} = e\mathbf{v} \times \mathbf{B}$

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

$B$  – natężenie pola magnetycznego

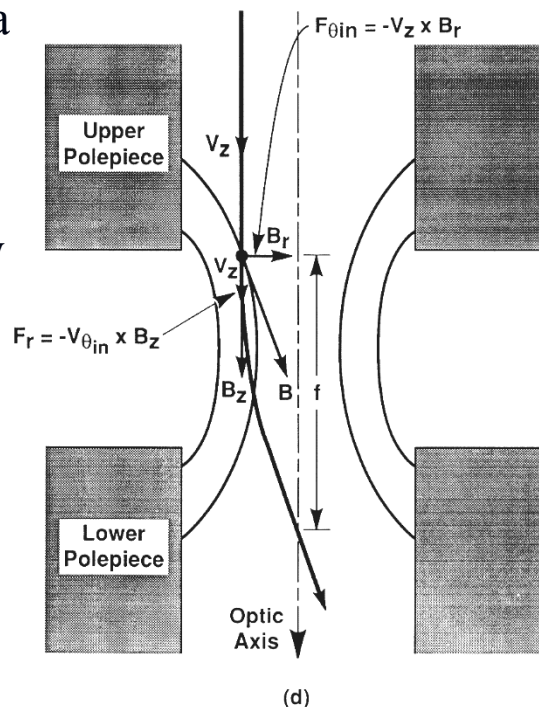
Pole  $B$  ma dwie składowe:  $B_{ax}$   $\parallel$  do osi elektronooptycznej

$B_{rad}$   $\perp$  do osi elektronooptycznej

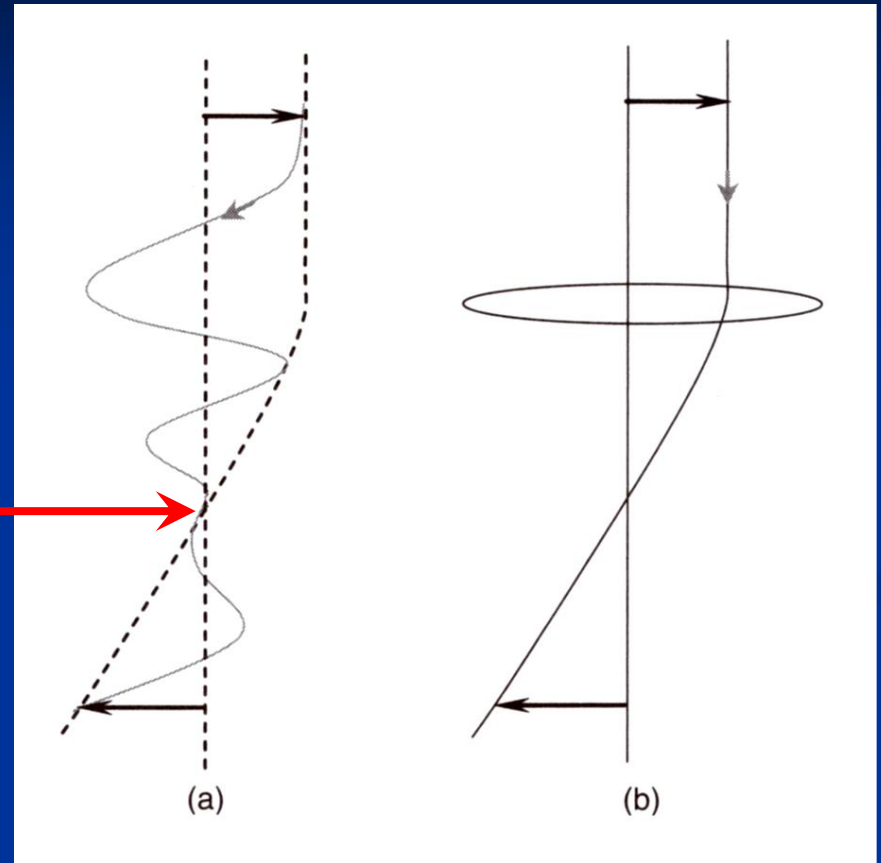
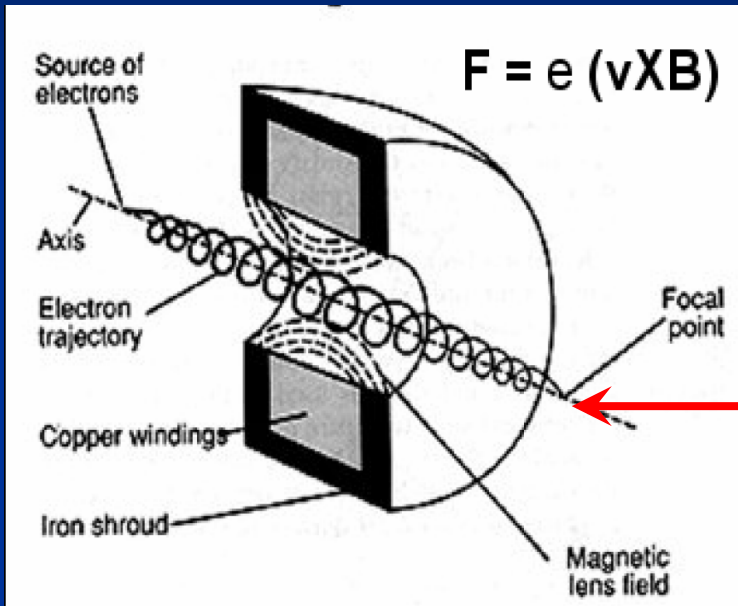


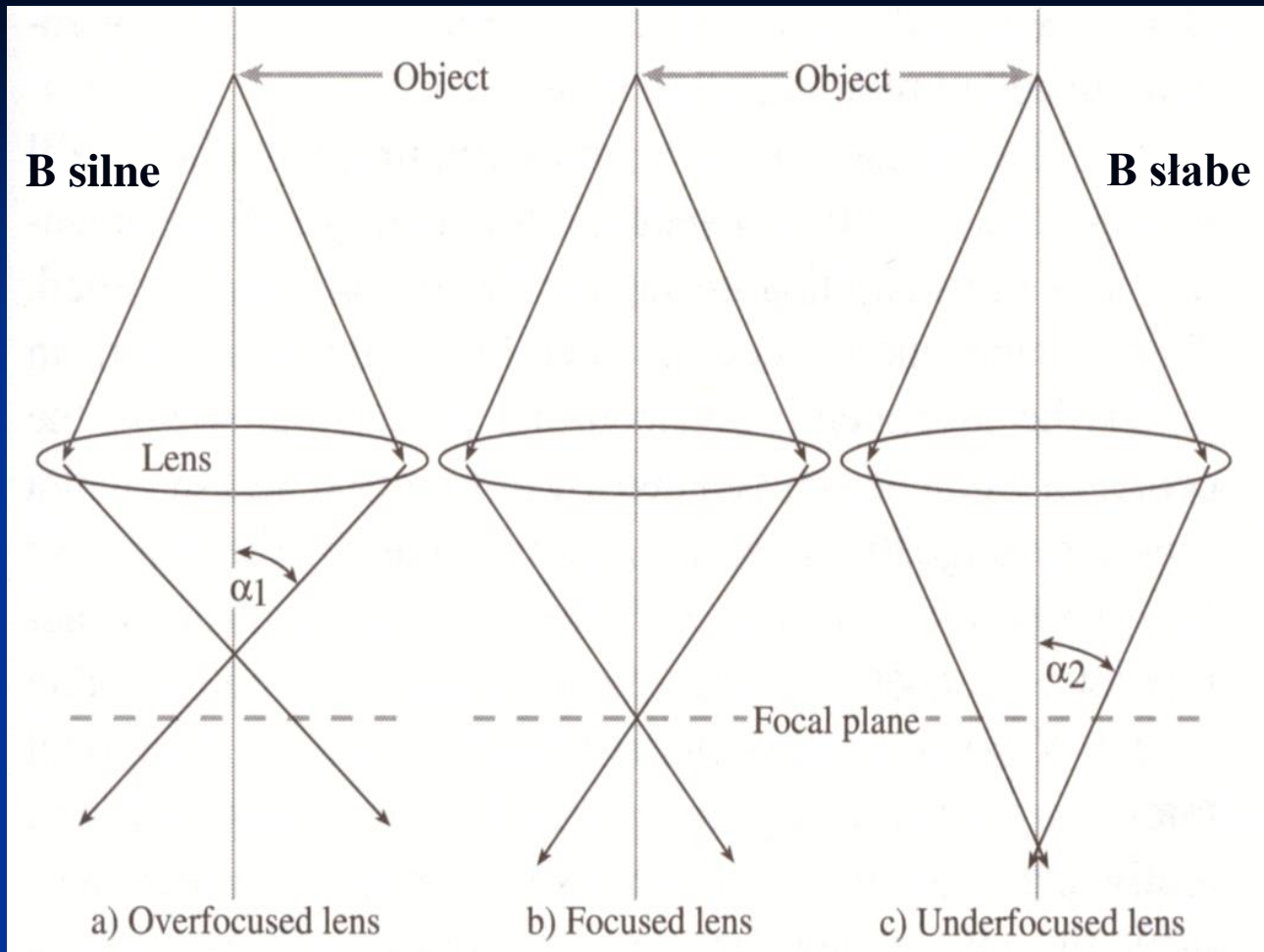
Początkowo  $B_{z=ax}$  nie działa na elektron, natomiast  $B_{r=rad}$  działa z rosnącą siłą  $F_{r=rad}$  - elektron zaczyna poruszać się po spirali wzdłuż osi  $Z$ . Wtedy na  $e^-$  zaczyna działać siła  $F_{z=ax}$  o składowej pola  $B_{z=ax}$ . Promień spirali staje się coraz mniejszy.

**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 skupiona w jednym punkcie! Nie ma całkowitej liczby skrętów spirali – obraz jest przesunięty**

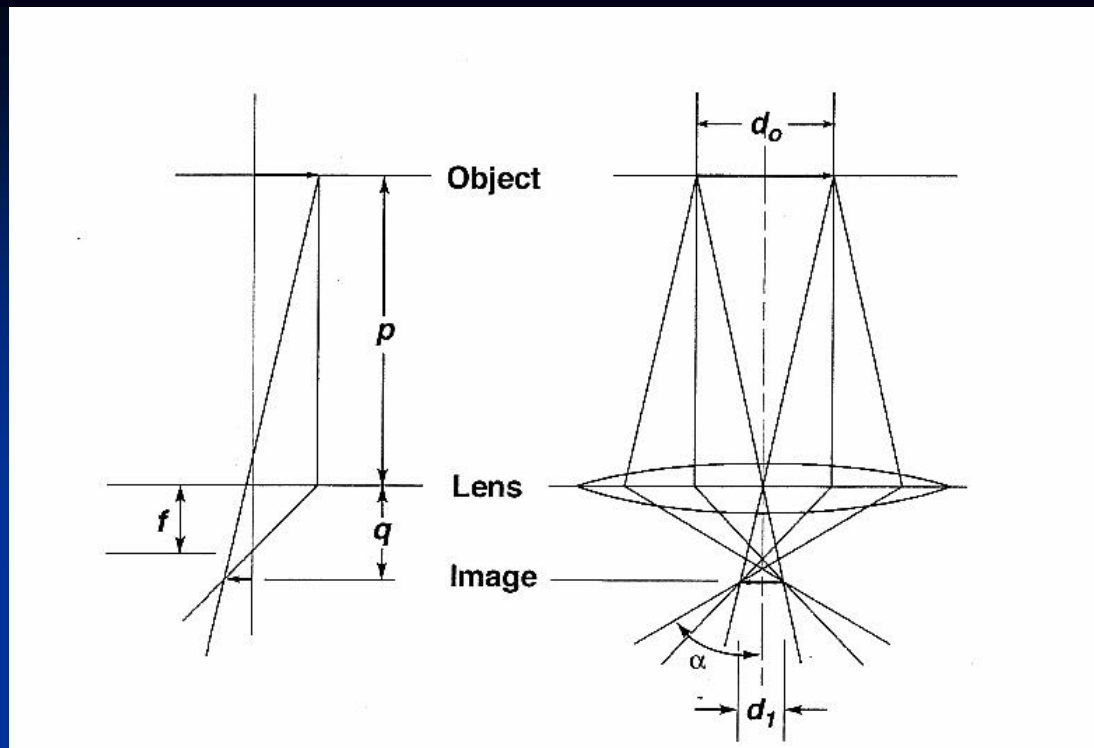




Jeżeli rośnie energia elektronów – musimy stosować silniejsze pola magnetyczne B

Jeżeli stosujemy silniejsze pole magnetyczne B – promień spirali silniej maleje

**Zmieniając napięcie przyspieszające elektrony –  
zmieniamy układ soczewek w ME !!!**



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

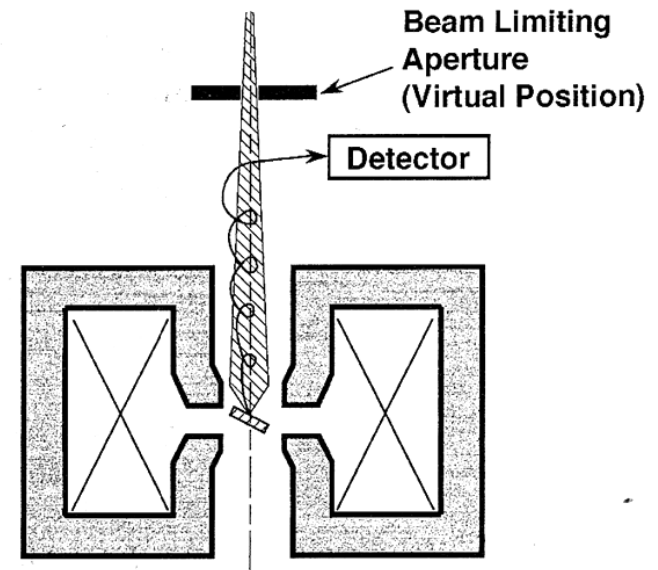
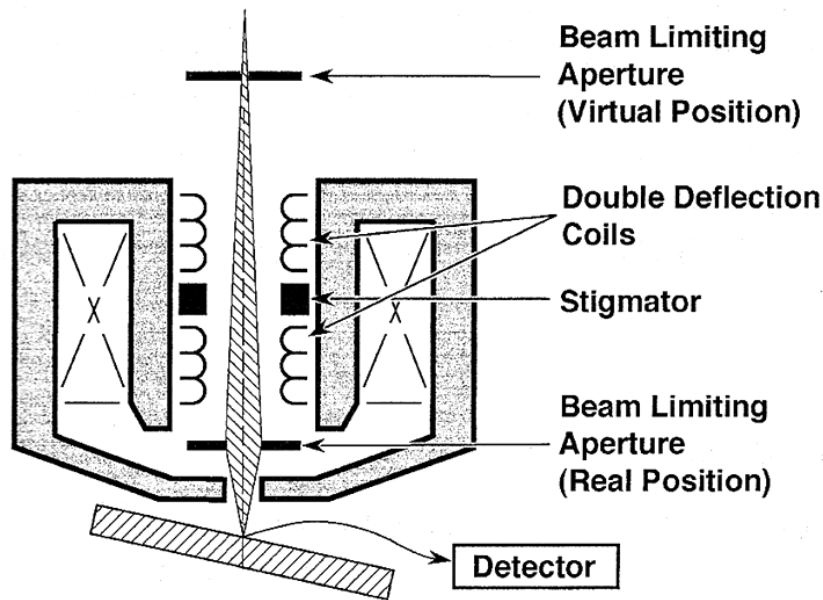
Dla tego przypadku pomniejszenie  $m = 3.14$

„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 nabiegownika celem zminimalizowania aberracji sferycznej.**

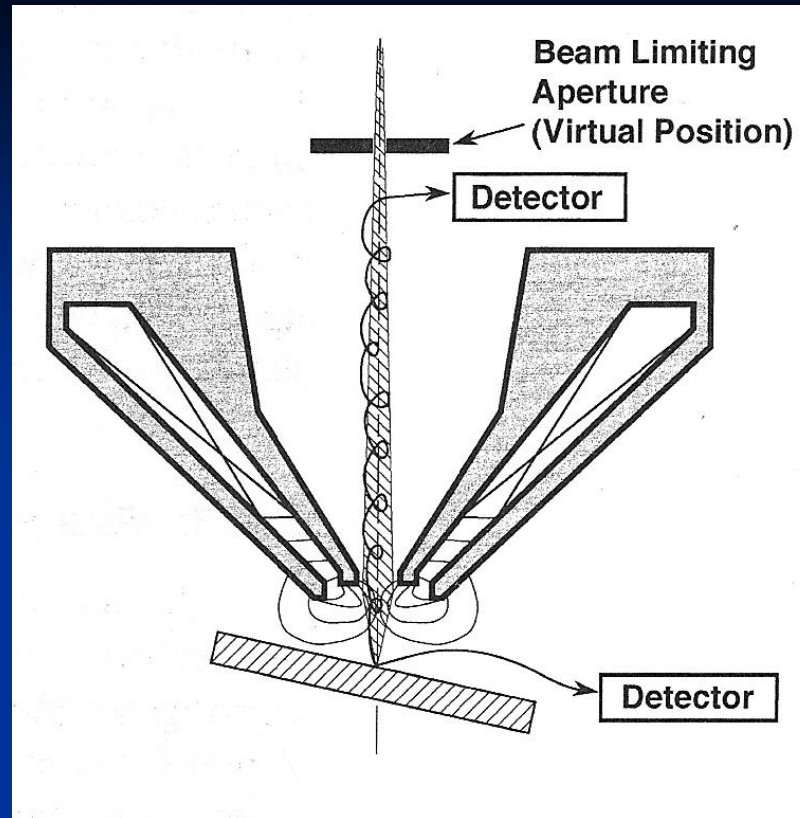
**Wymiar próbki jest limitowany tylko wymiarami komory WD – max 40 mm duża głębia ostrości.**

**Soczewka „immersion lens”**

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

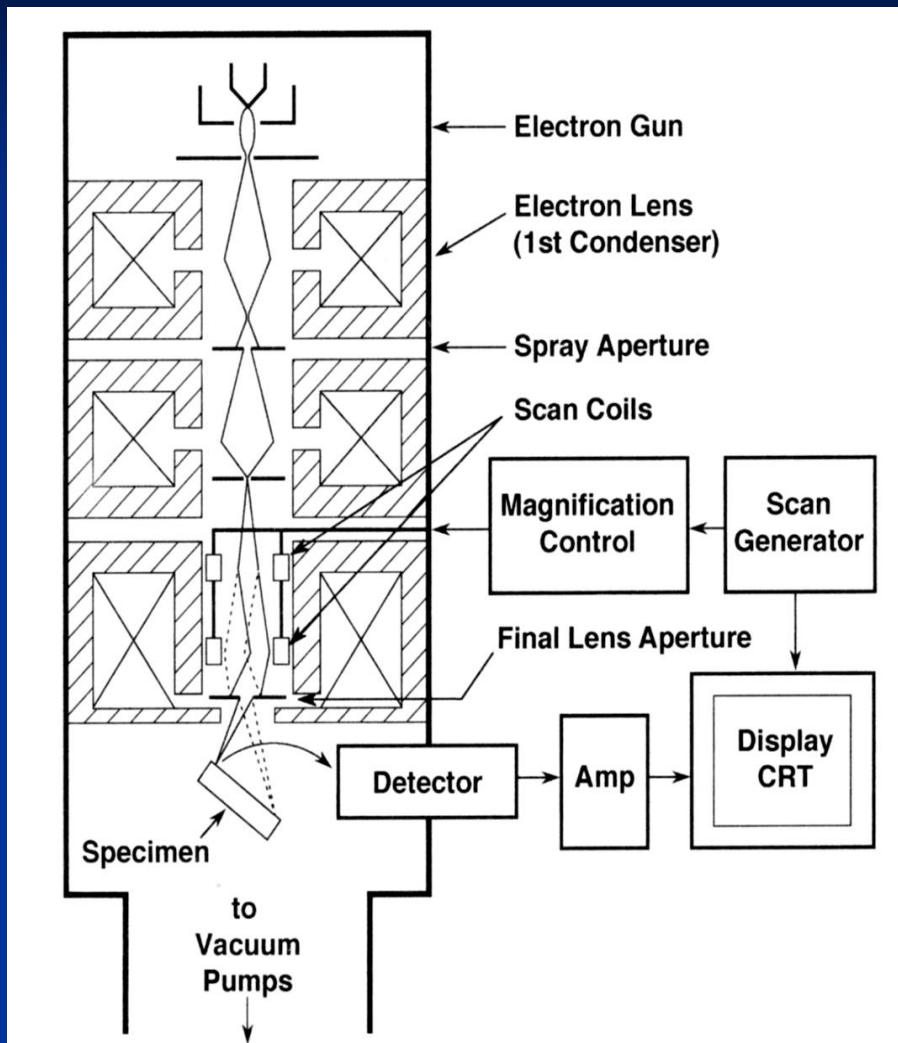
**Najmniejsza aberracja sferyczna, najmniejsza średnica wiązki elektronicznej, najlepsza zdolność rozdzielcza – detektor TTL (through-the-lens detector).**



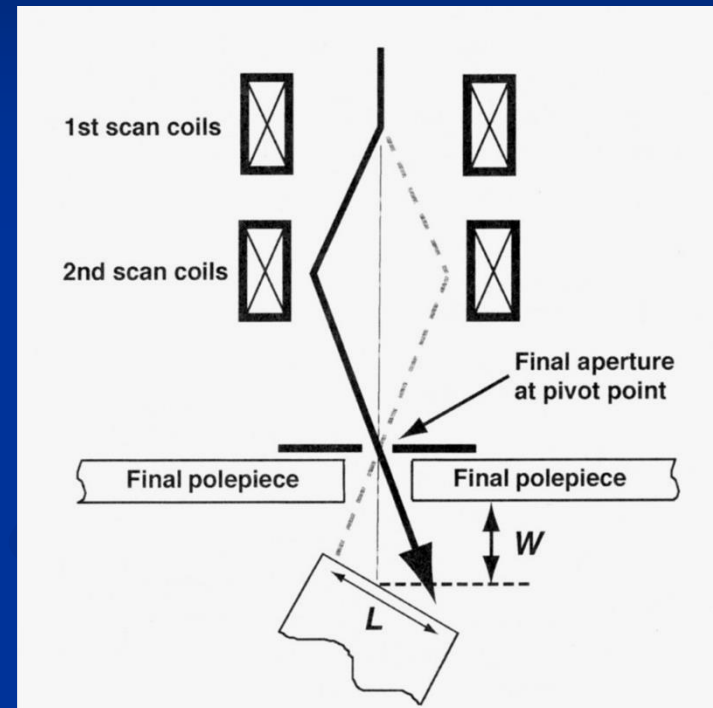


## Soczewka „snorkel” or „single pole”

Silne pole magnetyczne skierowane jest bezpośrednio z nabiegownika na próbkę. Ta soczewka zawiera najlepsze cechy soczewki „pin-hole” i „immersion”. Minimalna aberracja sferyczna, duże próbki, można stosować równocześnie detektory TTL i ET



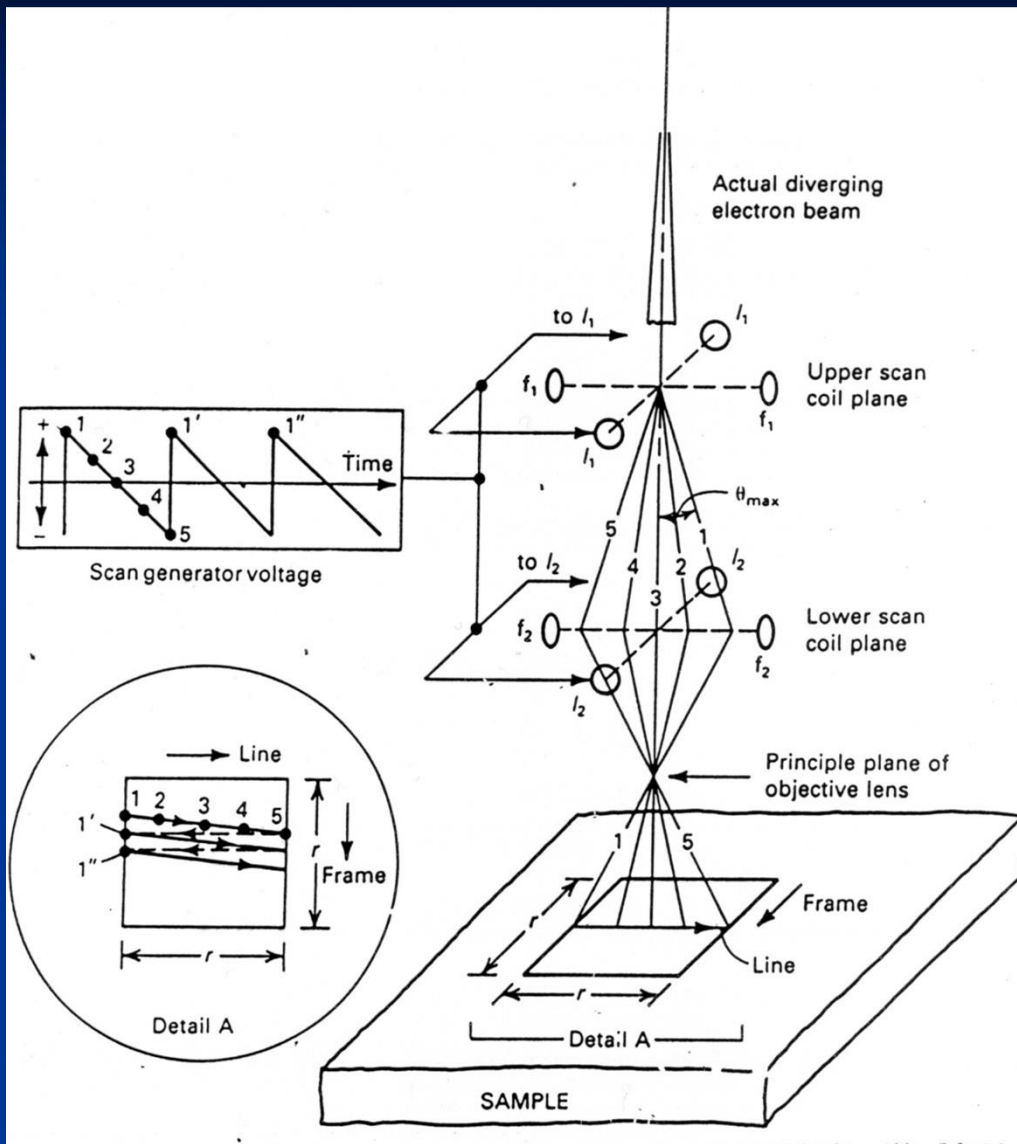
# Cewki skanujące



$W = WD$  – Working Distance

To odległość między obserwowaną powierzchnią a nabiegunnikiem soczewki obiektywowej

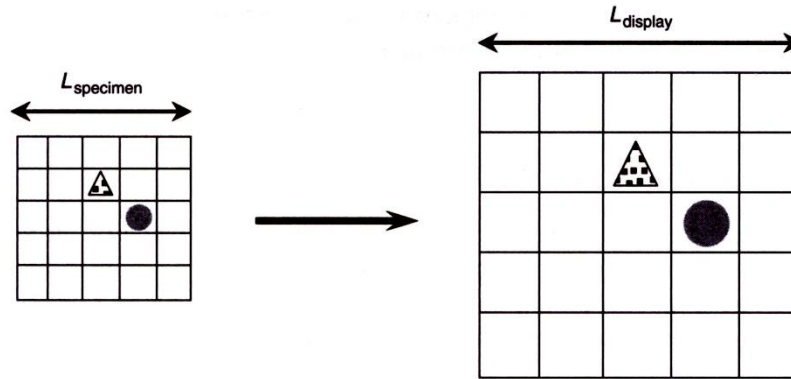
# Cewki skanujące cd.



**Table 4.1.** Area Sampled as a Function of Magnification

Magnification <sup>a</sup>	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×	$(100 \text{ nm})^2 = 10^{-8} \text{ mm}^2$

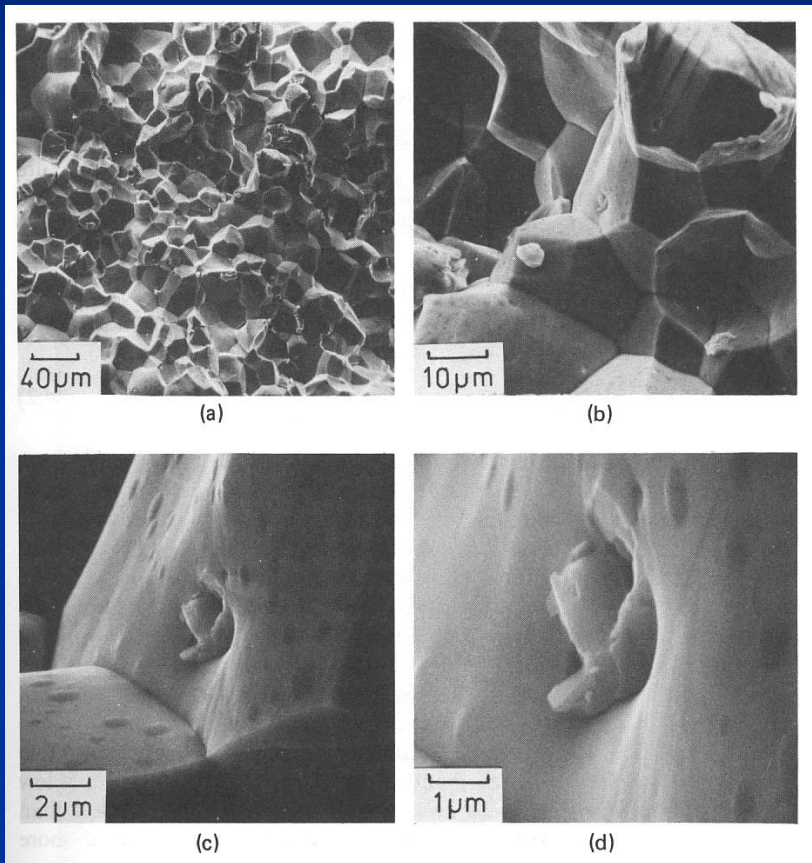
<sup>a</sup> Assumes magnification is relative to a CRT screen that measures 10 cm × 10 cm.



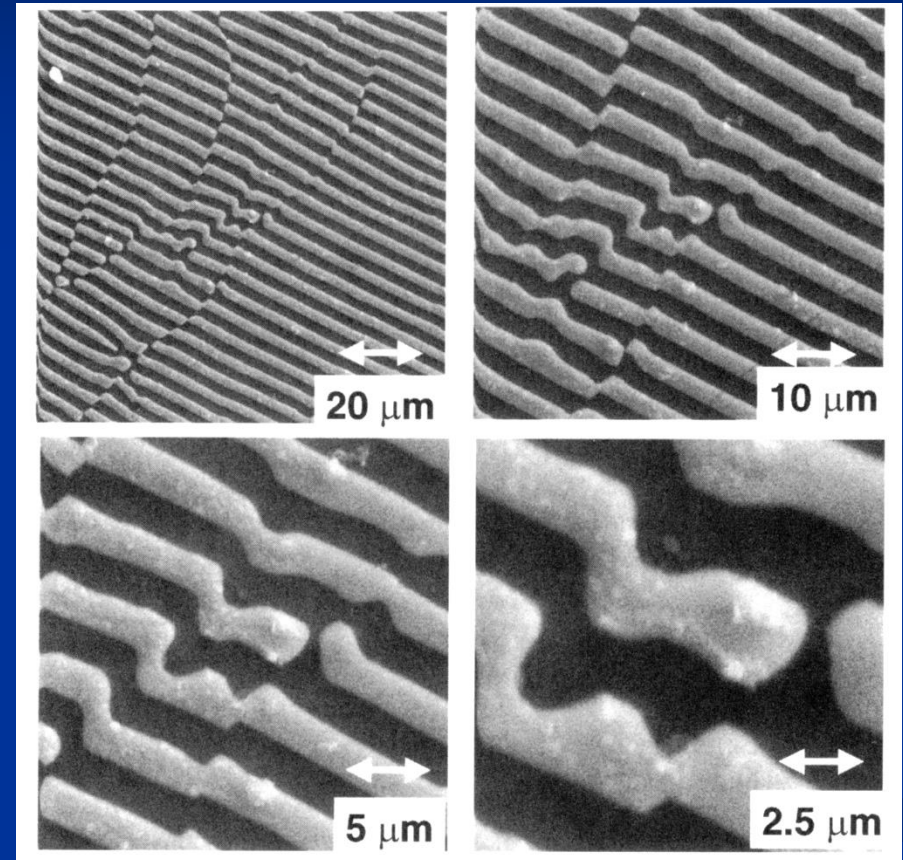
**Figure 2.29** The information from the scanned specimen is transferred point by point to a display. Magnification is defined as the ratio of the two line scans and therefore, on its own, magnification is not an absolute measure of specimen feature sizes

$$M = L_{\text{Display}} / L_{\text{Specimen}}$$

# Przykłady zmian powiększeń w SEM



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

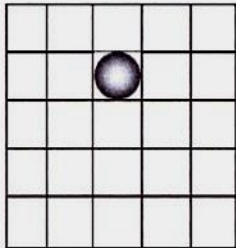


Eutektyka AlCu,  
WD = constans,  $E_0 = 20 \text{ keV}$



# Wpływ prądu wiązki elektronowej na jakość obrazu

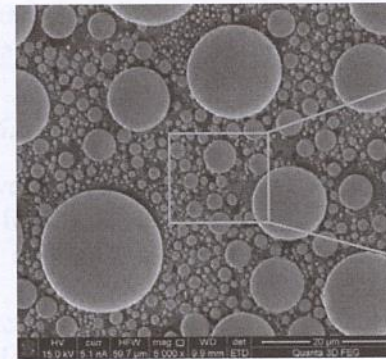
✓ Low magnification,  
large beam diameter



X High magnification,  
large beam diameter

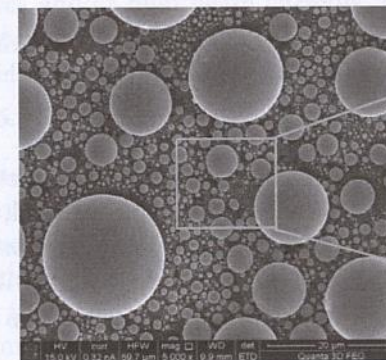


✓ High magnification,  
small beam diameter



(a)

**5.1 nA**



(b)

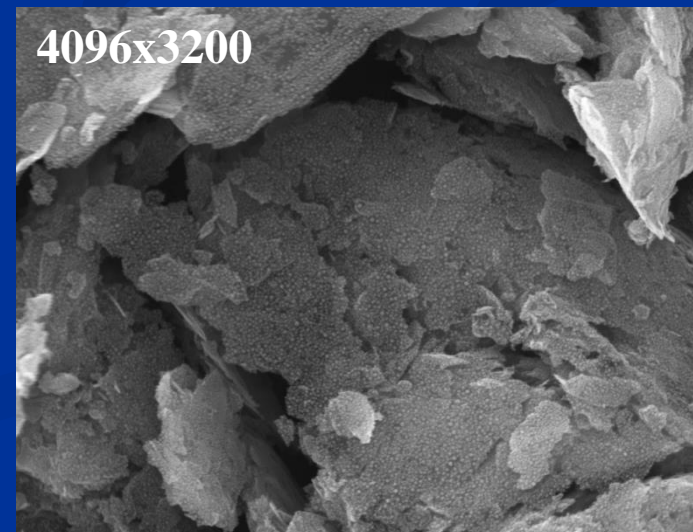
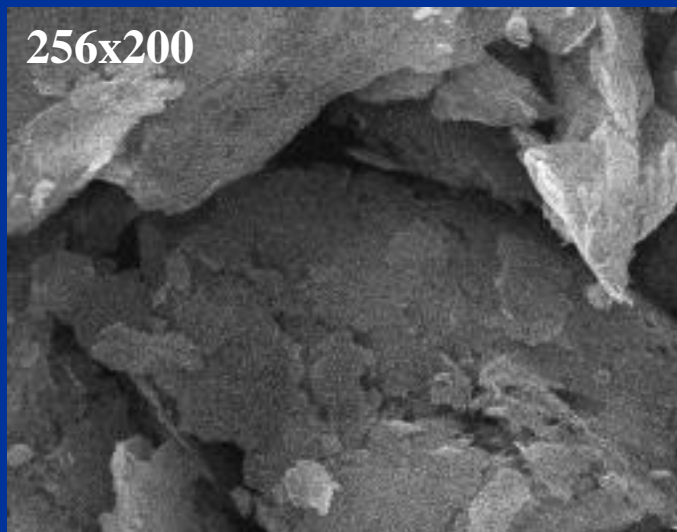
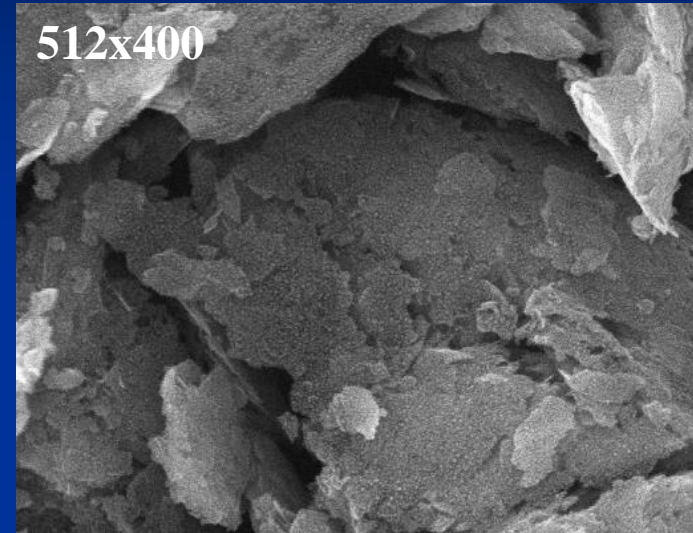
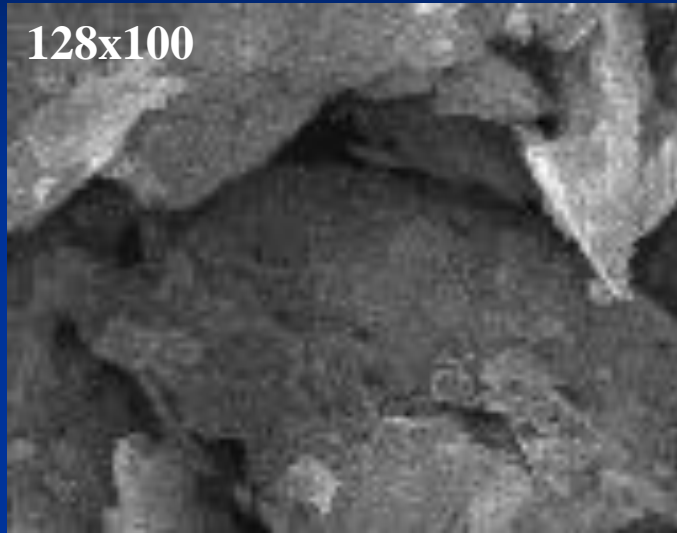
**0.32 nA**

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



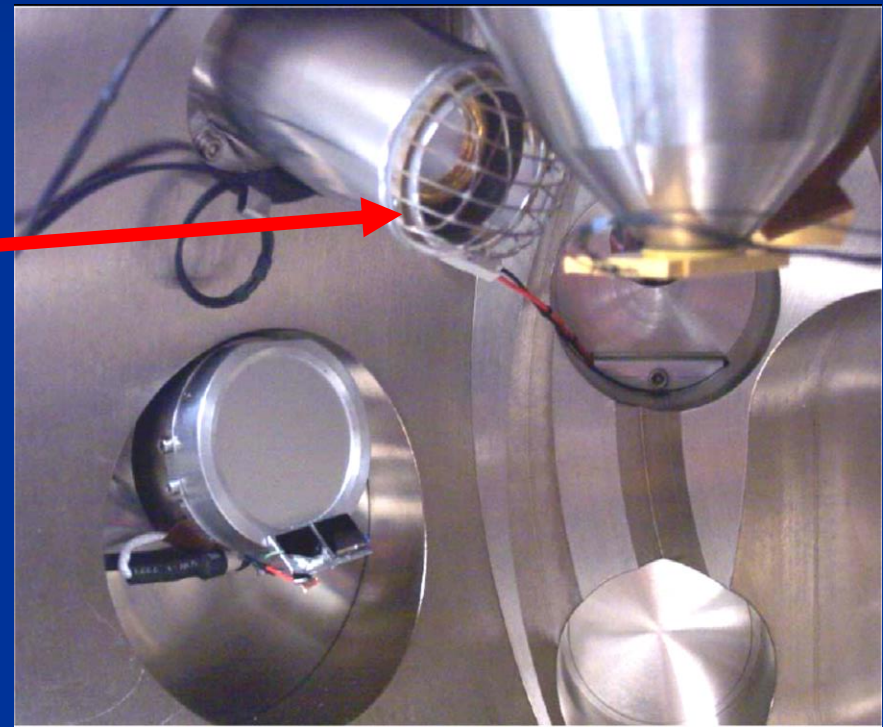
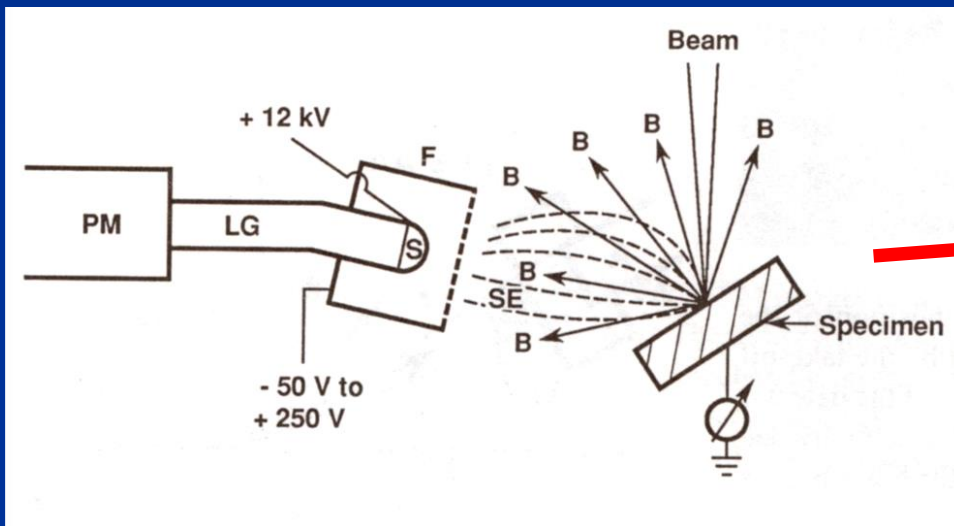
# Wpływ cyfrowej rozdzielczości na jakość obrazu

FEI ESEM - Standard Image Definition 702x484; Image High Definition 1404x968



# Detektory elektronów

## Detektor Everharta-Thornleya



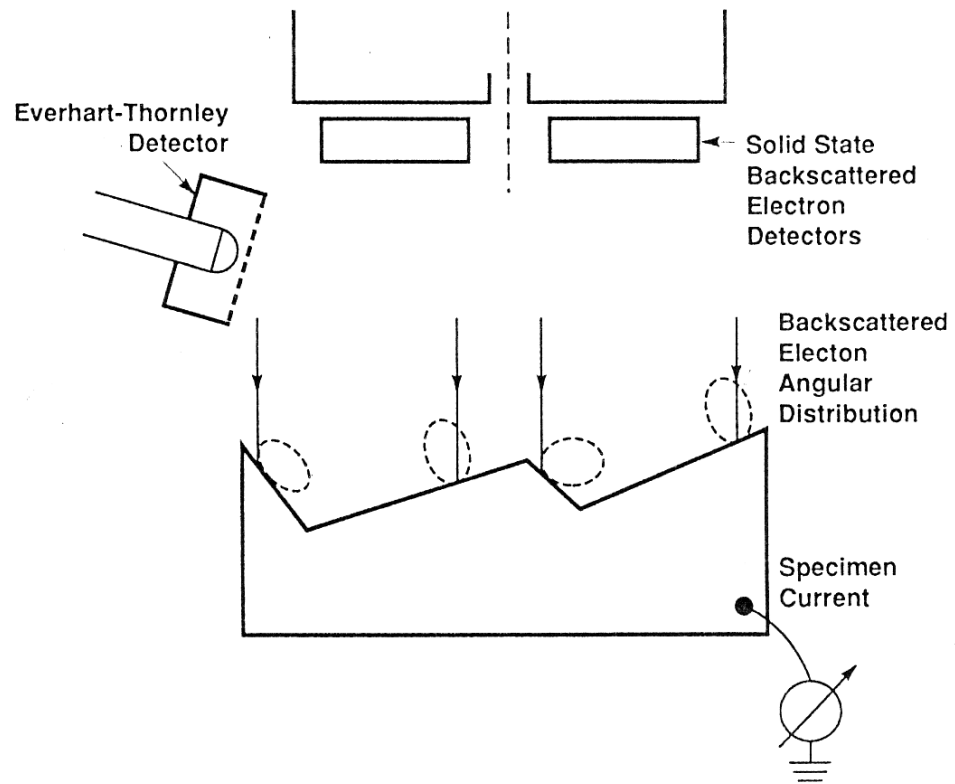
F – klatka Faradaya (-50V do + 250V)

S – scyntylator na potencjale dodatnim (+12kV)

LG – światłowód

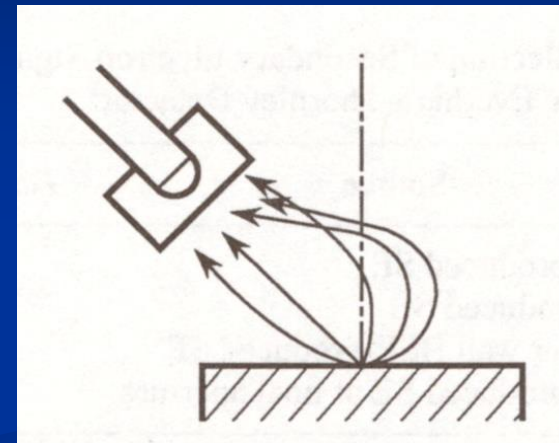
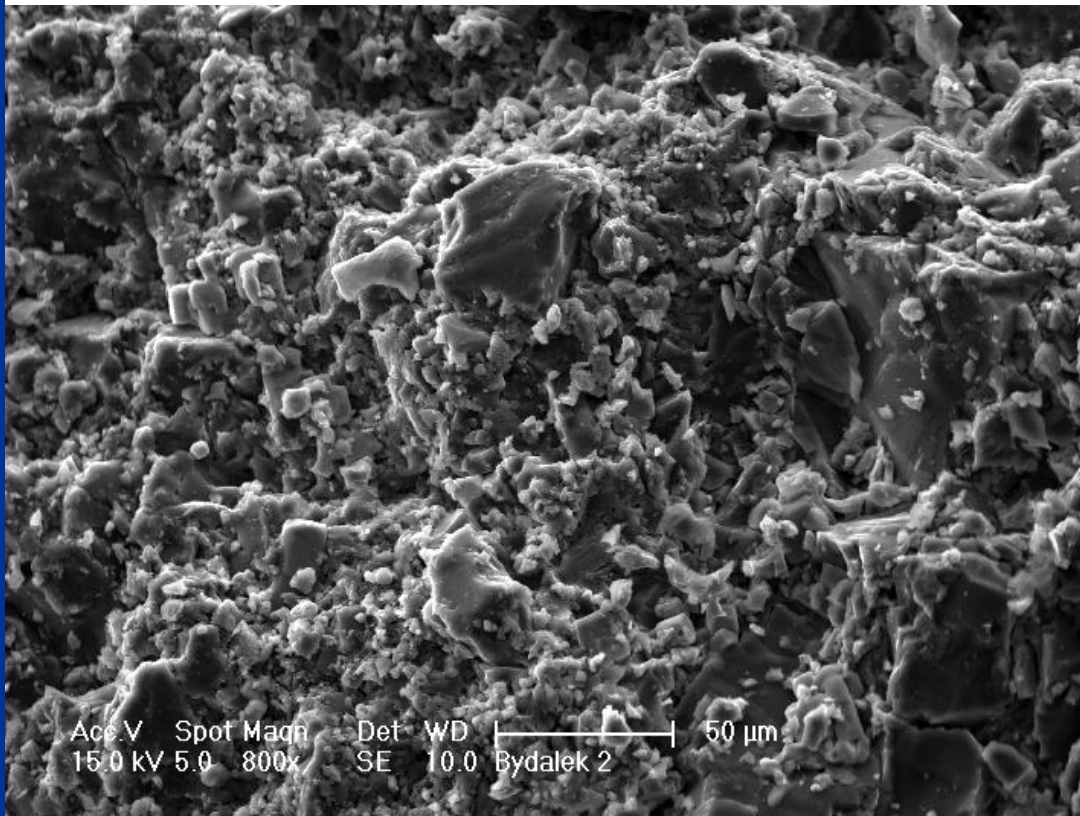
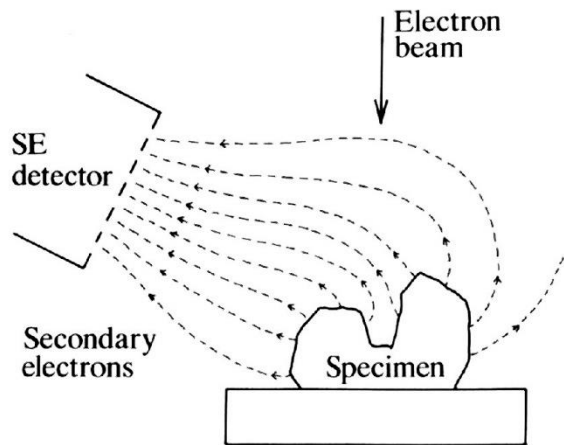
PM – fotopowielacz

**Część BSE zawsze zostanie zarejestrowana przez detektor E-T**



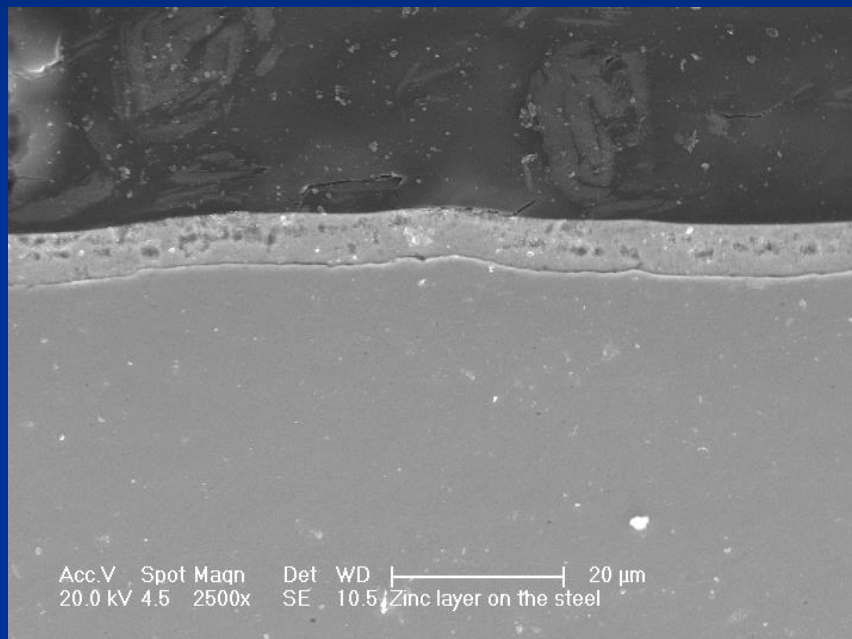
**Figure 4.36.** Typical arrangement of detectors in a SEM chamber relative to a rough surface with random facets.



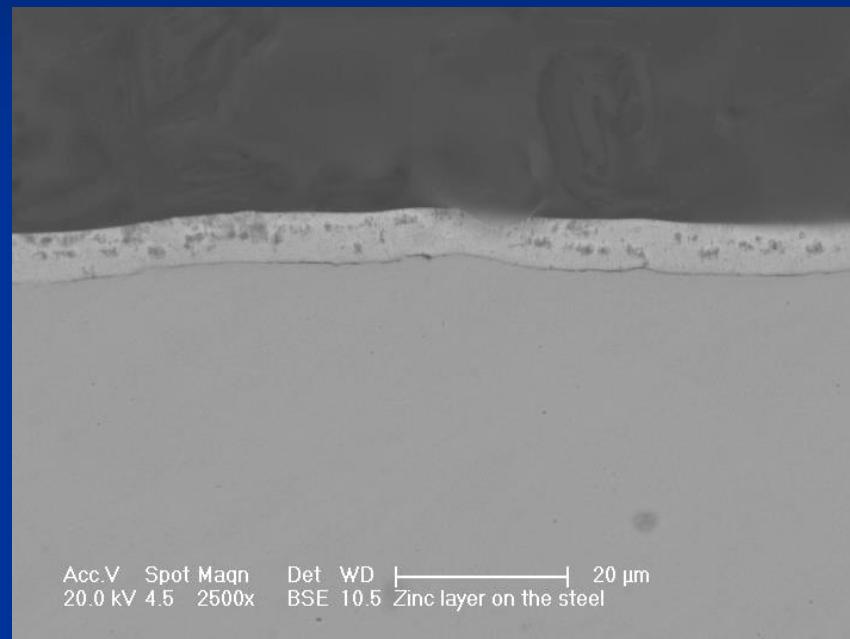


**Odchylenie trajektorii  
SE przez dodatni  
potencjał siatki  
Faradaya**

**Płaskie powierzchnie –  
brak kontrastu; obrazy  
SE są nieprzydatne**



**Obraz SE – widoczny udział  
elektronów BSE**



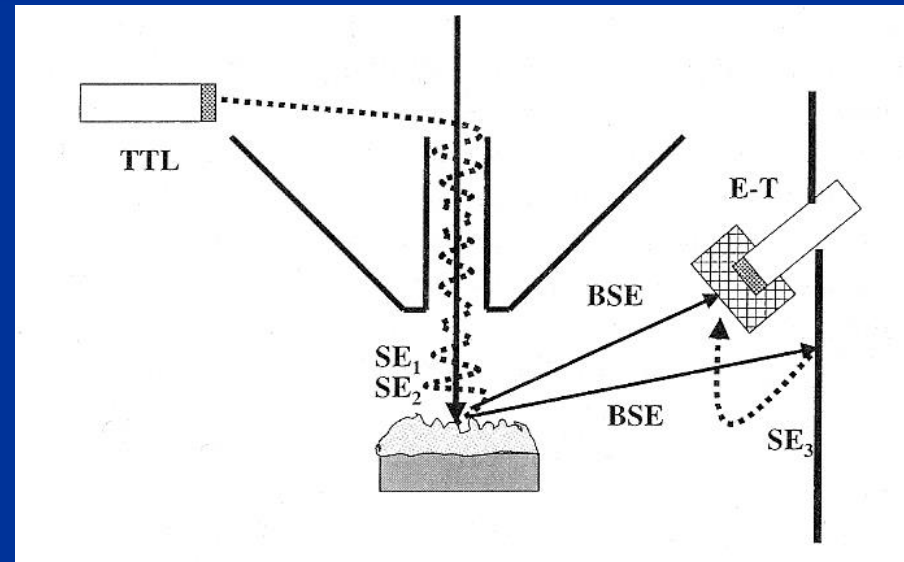
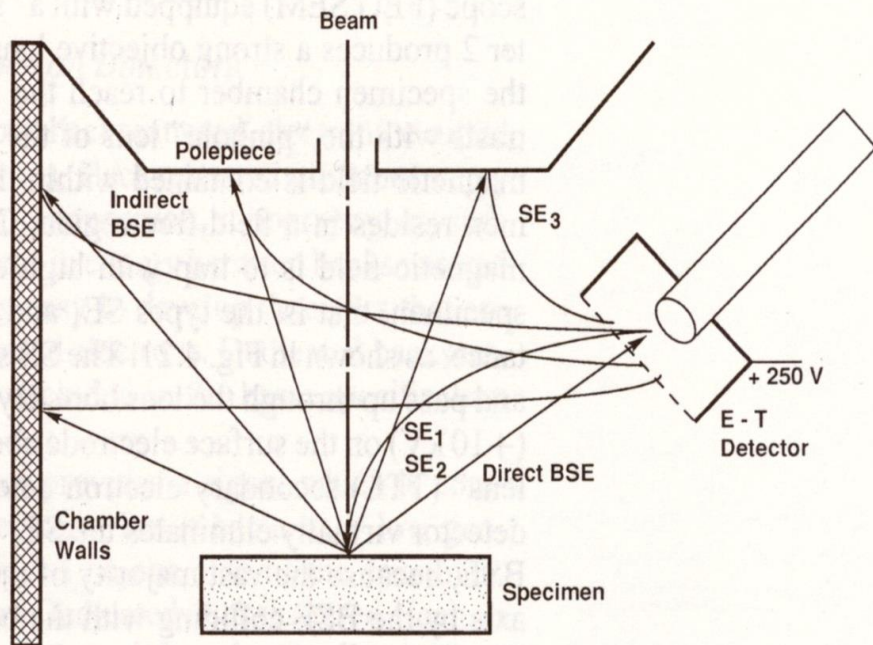
**Obraz BSE**

**przekrój poprzeczny blachy stalowej (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<sup>a</sup>

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

<sup>a</sup> From Peters (1984).



**Through-the-lens detector**

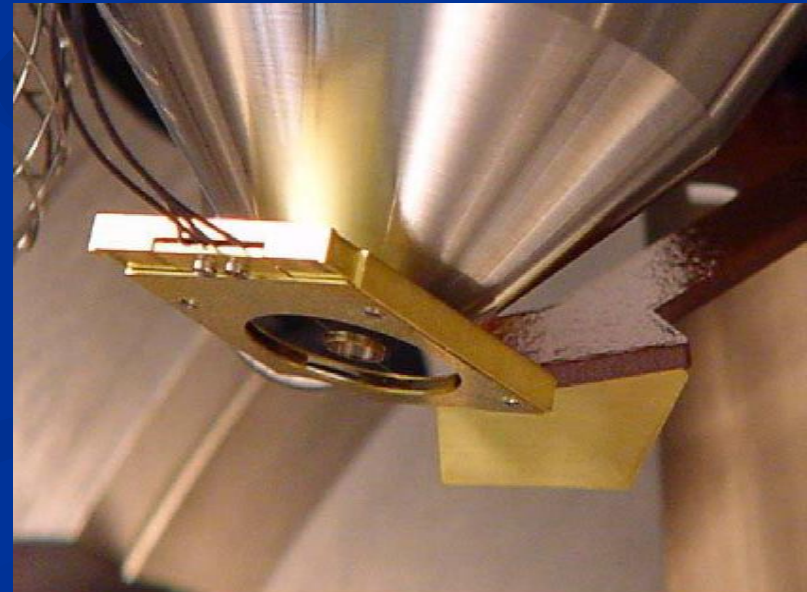
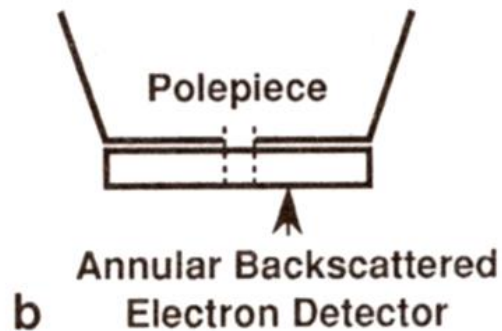
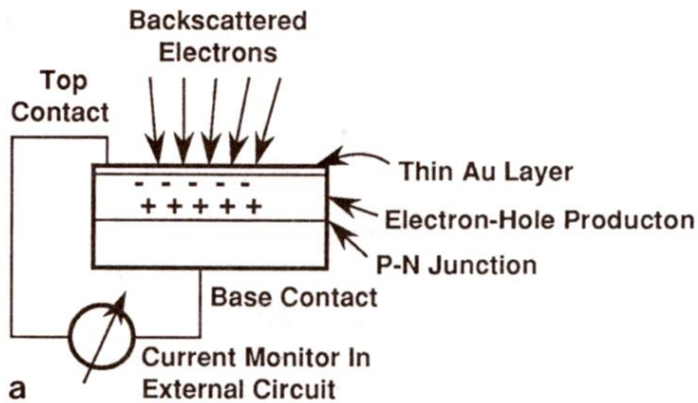


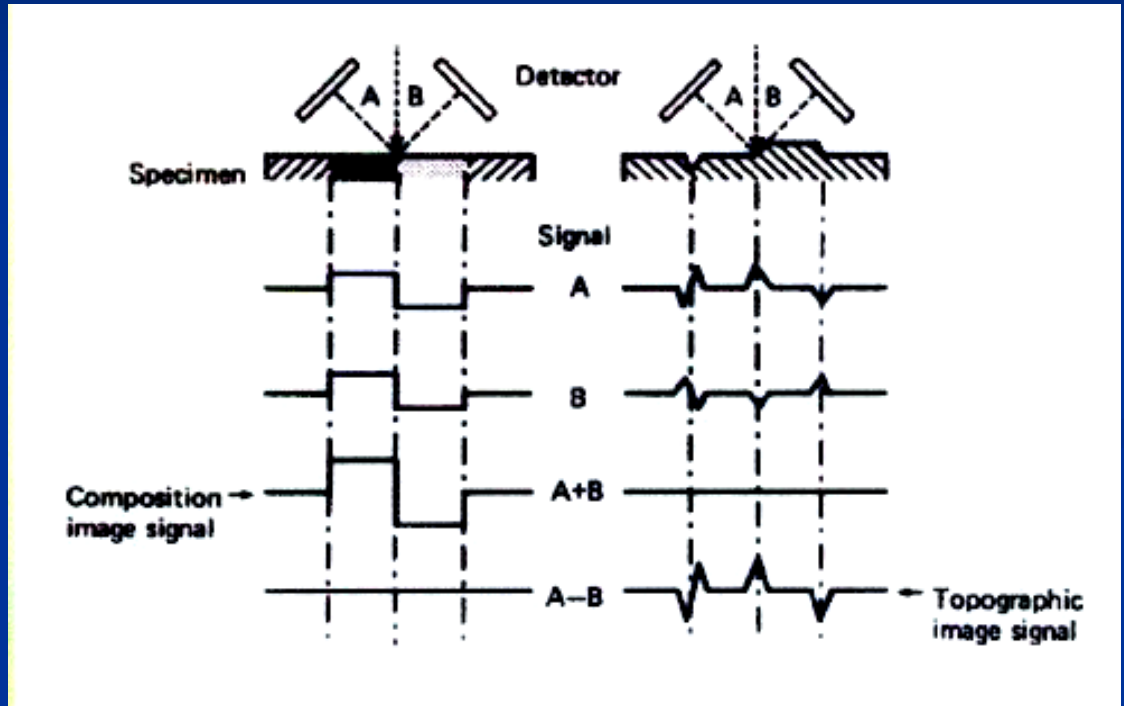
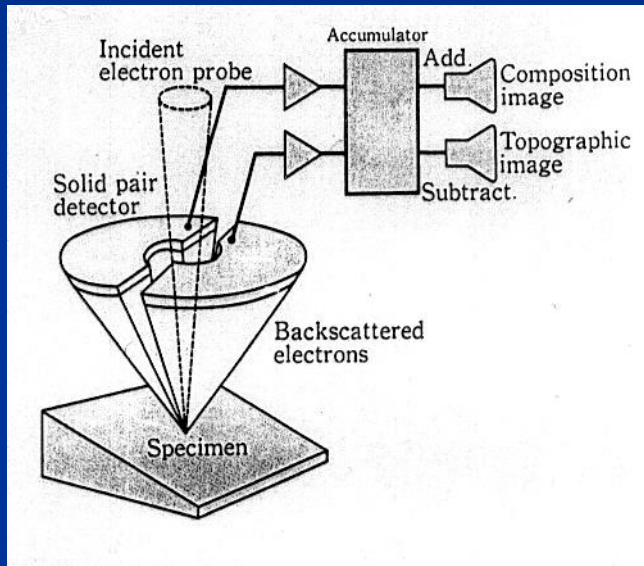
# Detektory elektronów

## Detektor BSE

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

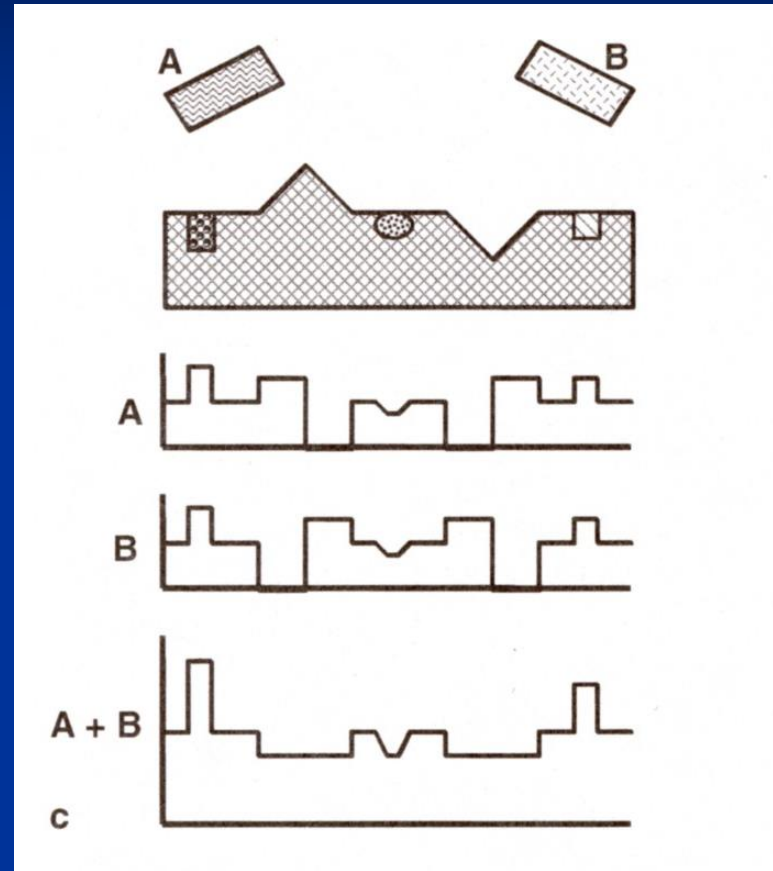
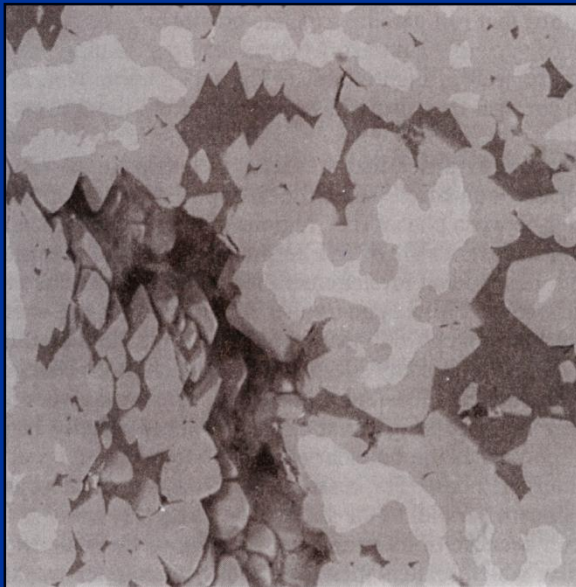
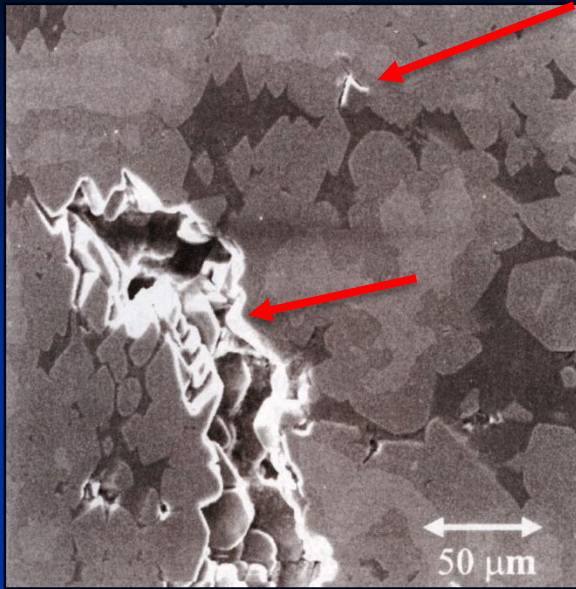
Dla elektronu o energii 10 keV ~ 2630 par



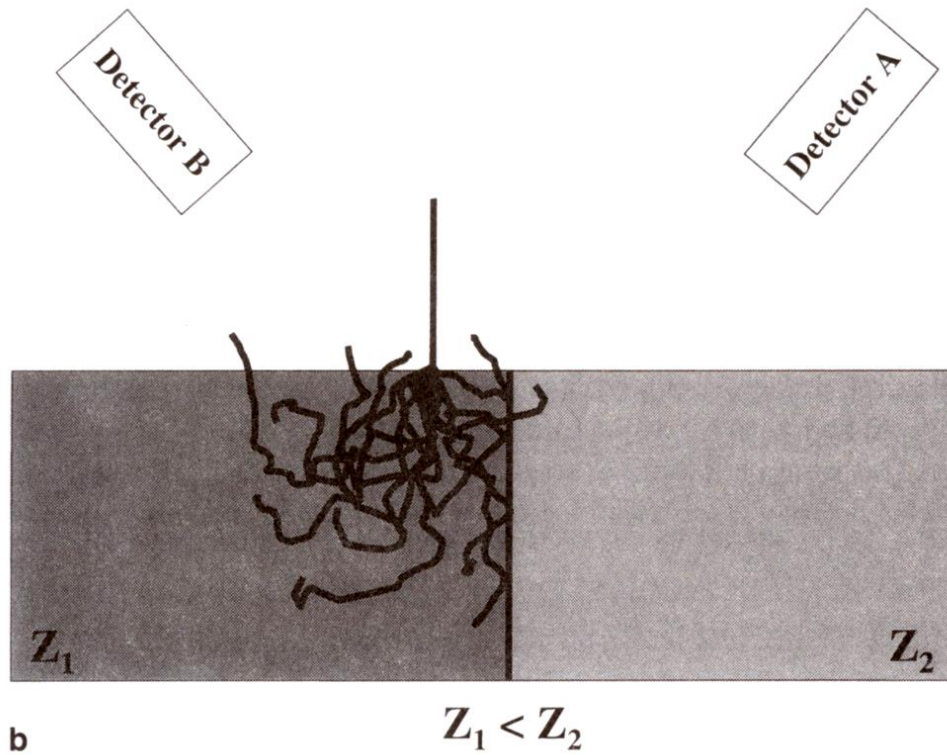
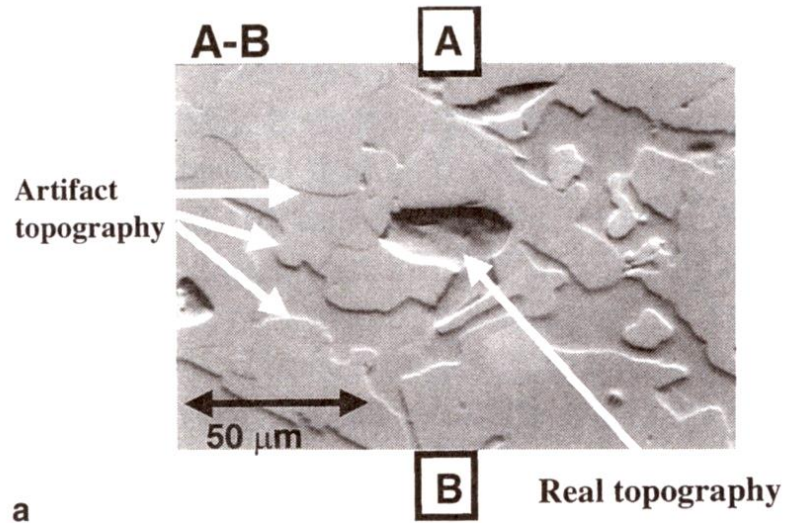


# STOP Al-Ni

Sygnal BSE zarejestrowany przez ETD  
(potencjał ujemny na siatce)

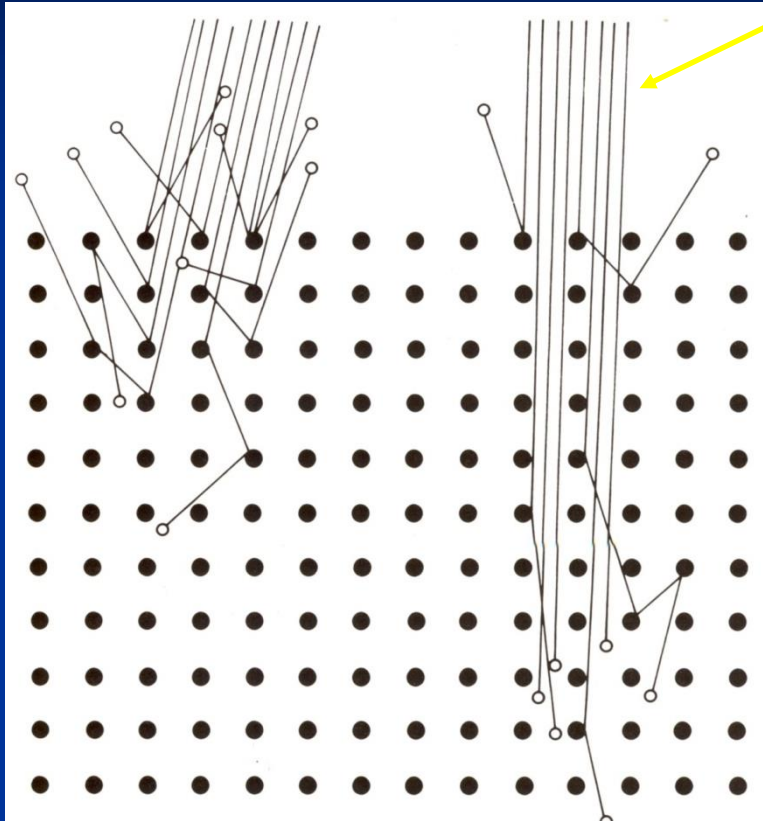


BSE Compo

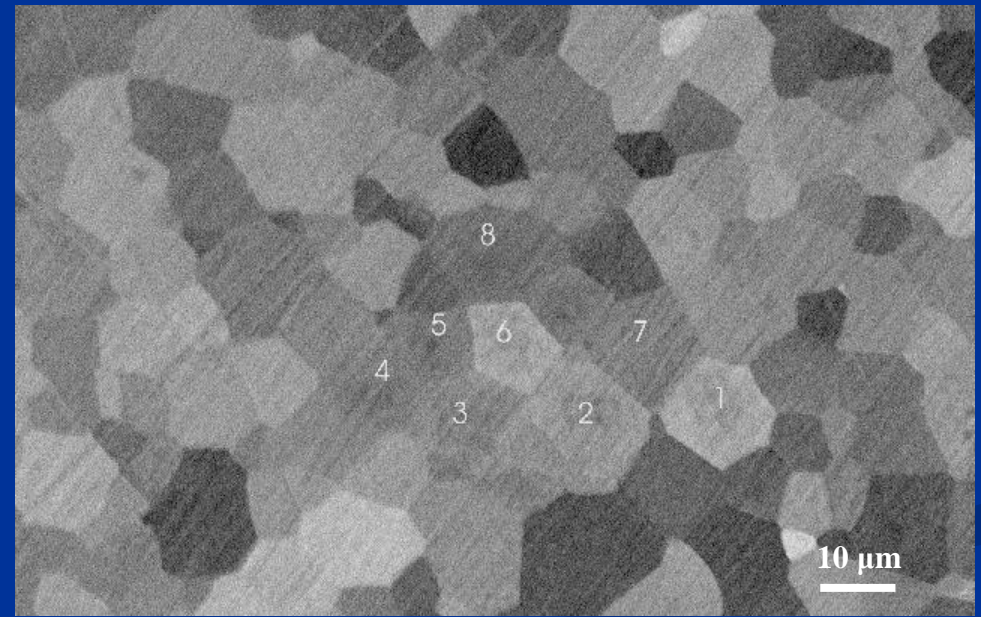




# Channeling contrast



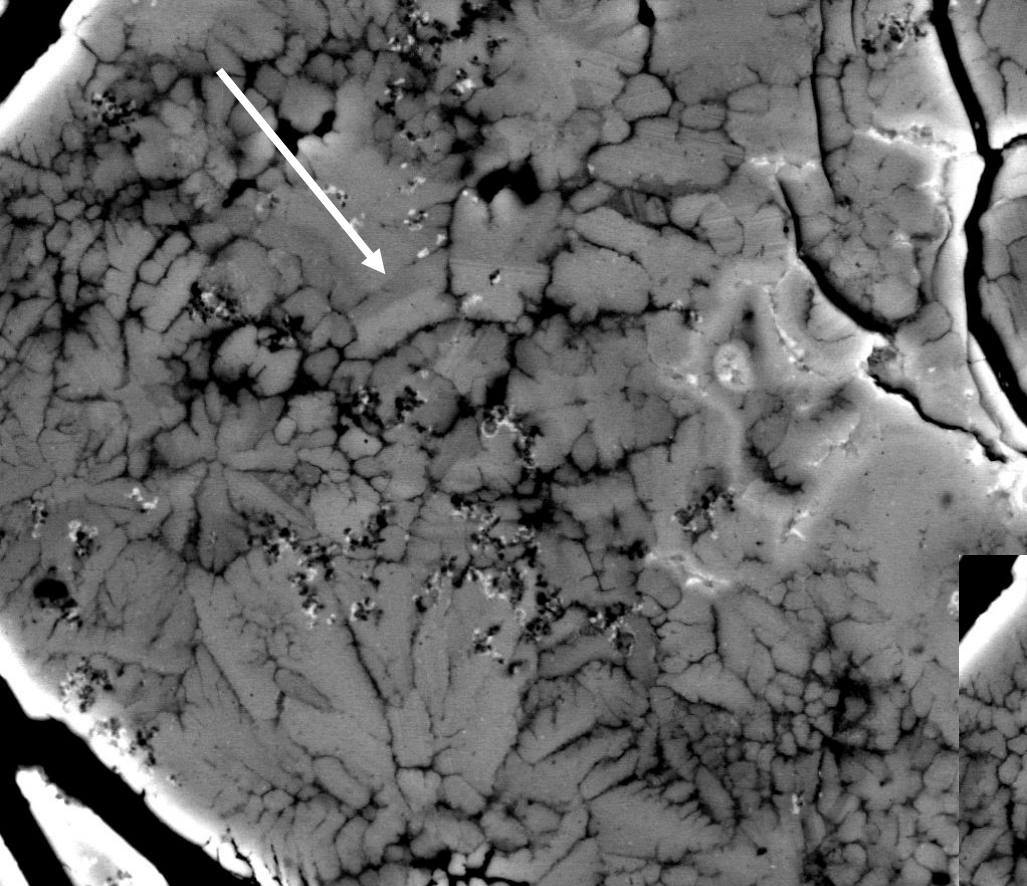
Wiązka  $\parallel$  do płaszczyzny sieciowej




Dla materiałów amorficznych  
 $\eta$  zależy tylko od  $Z$

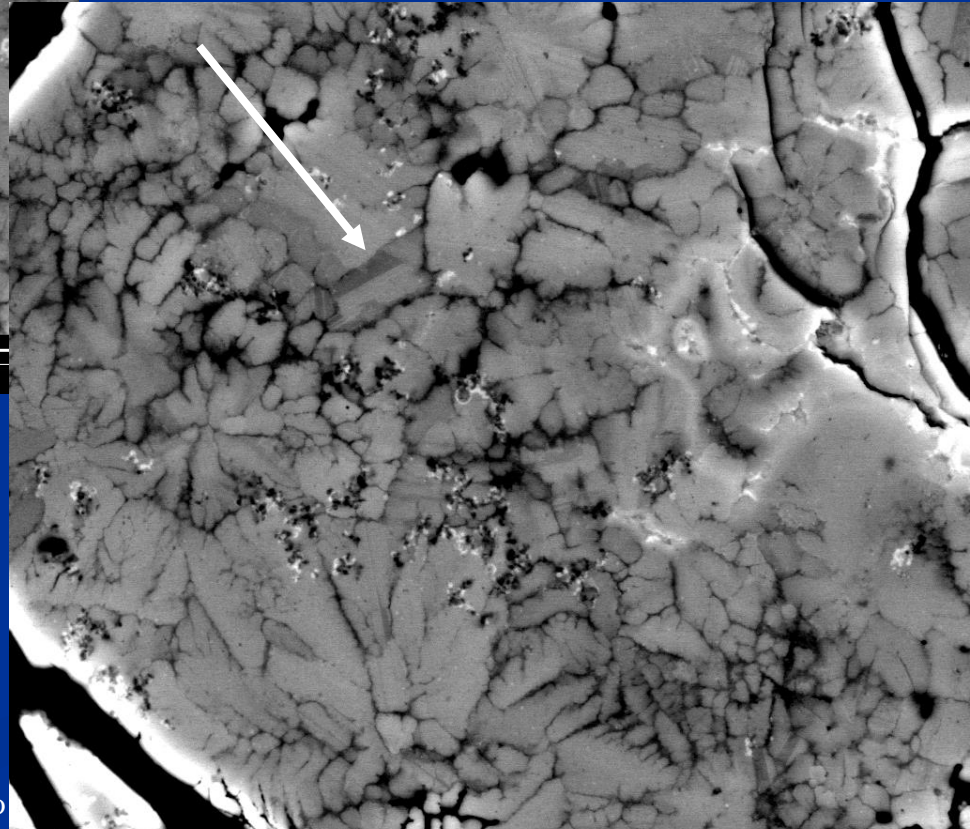
Dla materiałów krystalicznych  
 $\eta$  zależy również od kąta padania  
wiązki elektronowej





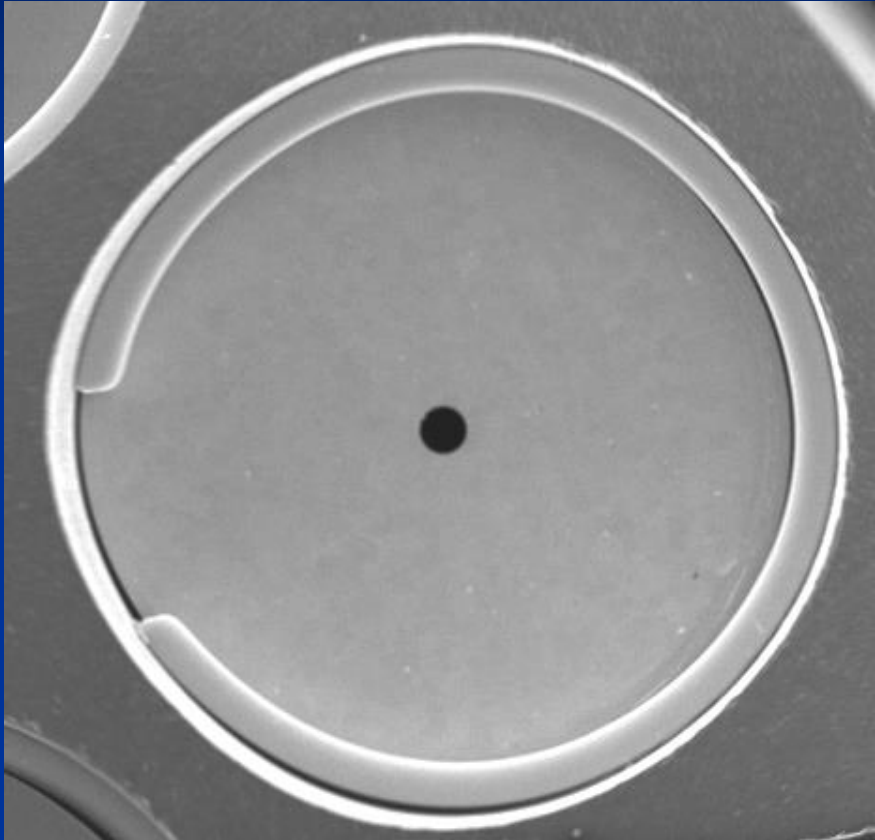
Tilt 0°

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

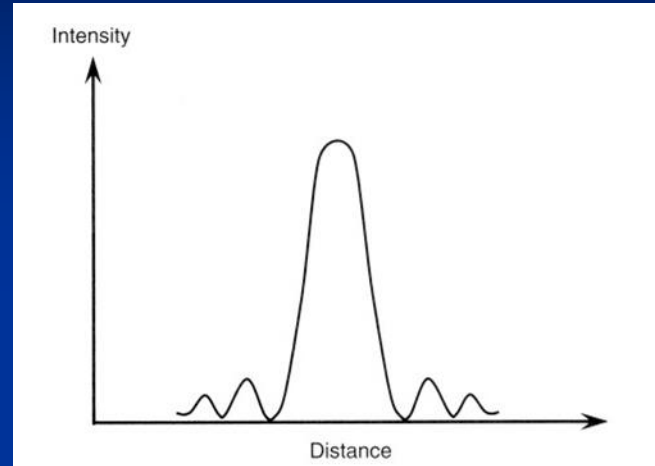


Tilt 5°

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



Apertura soczewki obiektywowej 200  $\mu\text{m}$



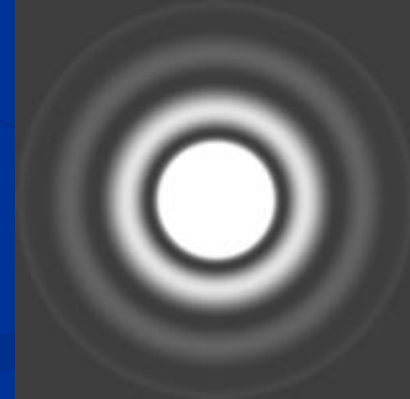
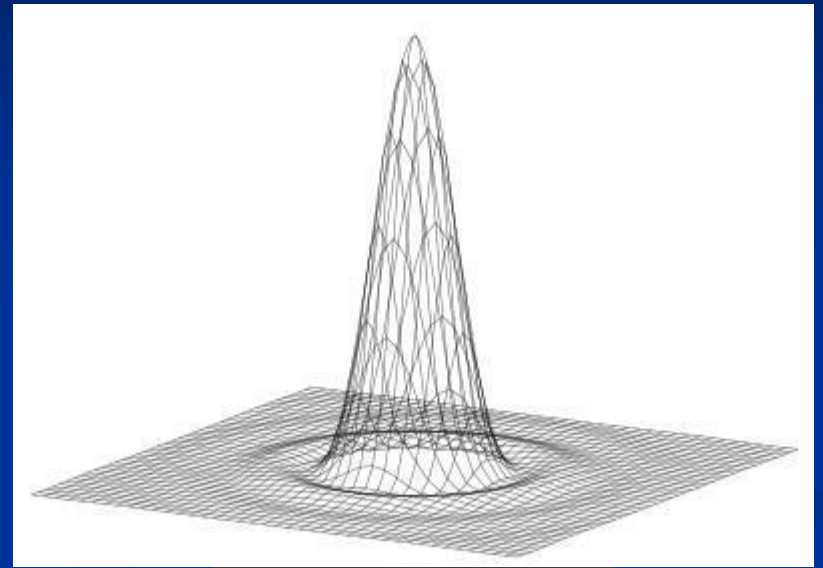
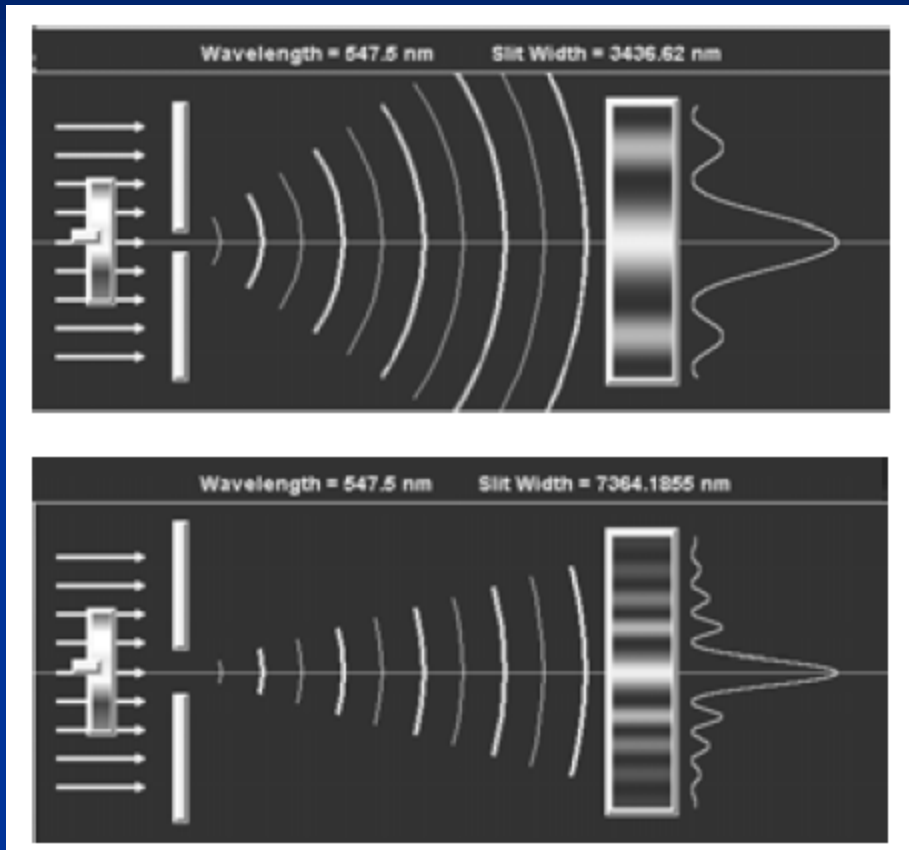
Dyfrakcja na aperturze

Airy rings

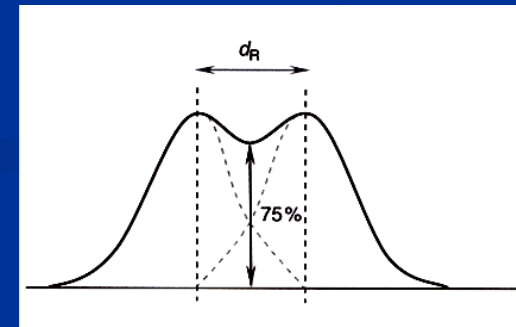
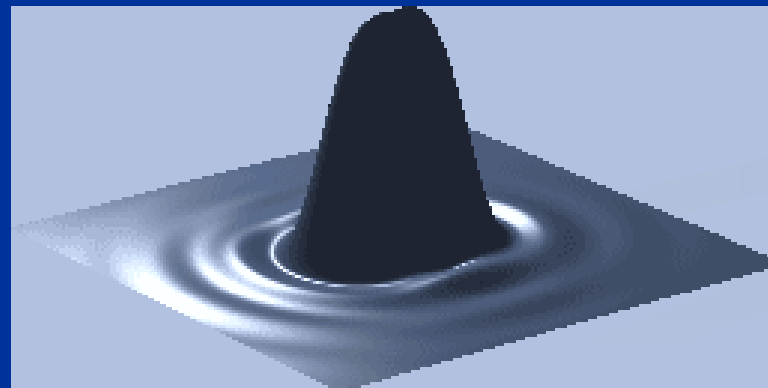
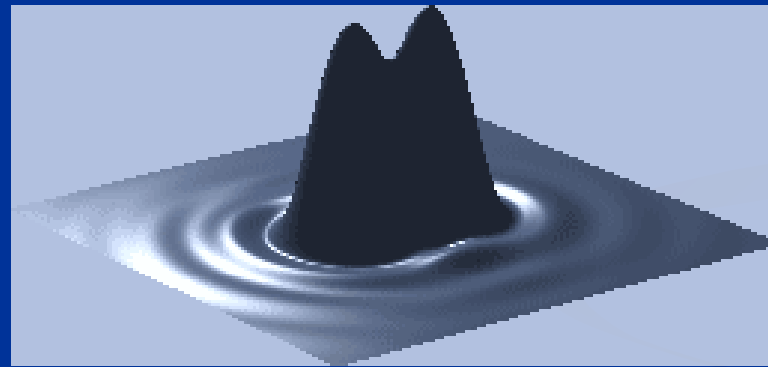
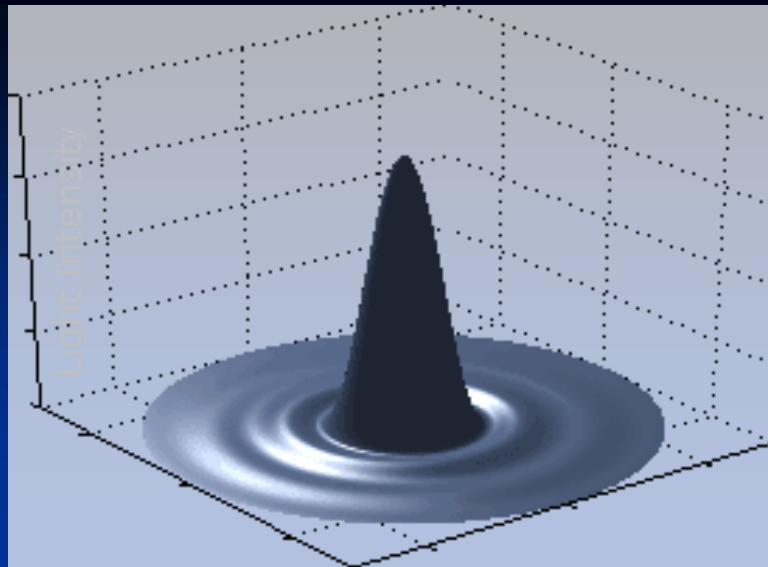
Im  $\alpha$  (kąt aperturowy) rośnie  
tym efekt dyfrakcyjny maleje,  
ale z kolei aberracja sferyczna  
rośnie

TEM - D.Williams str. 31-34

# Im $\alpha$ rośnie tym efekt dyfrakcyjny maleje



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



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