

Elektronová Mikroskopie SEM

Martin Haničinec

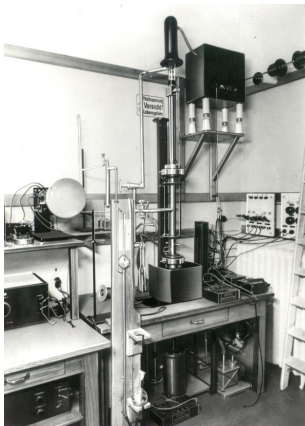
26. listopadu 2012

Historie elektronové mikroskopie

- ▶ První TEM
- ▶ Ernst Ruska (1931)
- ▶ Nobelova cena za fyziku 1986



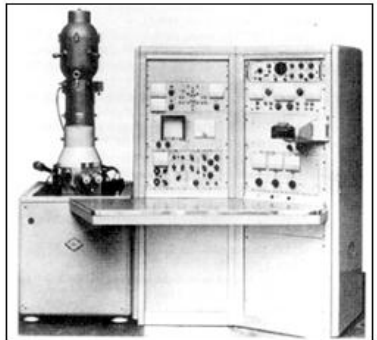
Historie elektronové mikroskopie



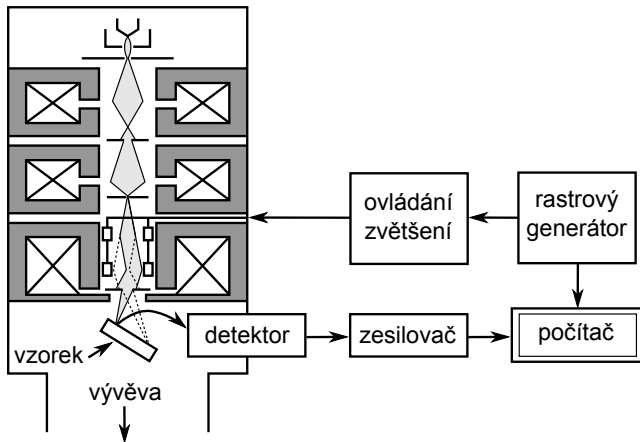
- ▶ První SEM
- ▶ Manfred von Ardenne (1937)

Historie elektronové mikroskopie

- ▶ První komerční SEM
- ▶ Cambridge Scientific Instrument Company
- ▶ 1965



Průřez elektronovým tubusem



Elektronová tryska - typy emitorů

1. Wolfram - Termoemise
2. LaB6 - Termoemise
3. Wolfram - Schottkyho emise

Elektronová tryska - typy emitorů

1. Wolfram - Termoemise
 - ▶ Nejnižší rozlišení
2. LaB6 - Termoemise
3. Wolfram - Schottkyho emise

Elektronová tryska - typy emitorů

1. Wolfram - Termoemise
 - ▶ Nejnižší rozlišení
 - ▶ Nenáročné na vakuum
2. LaB6 - Termoemise
3. Wolfram - Schottkyho emise

Elektronová tryska - typy emitorů

1. Wolfram - Termoemise
 - ▶ Nejnižší rozlišení
 - ▶ Nenáročné na vakuum
2. LaB6 - Termoemise
 - ▶ Vyšší rozlišení
3. Wolfram - Schottkyho emise

Elektronová tryska - typy emitorů

1. Wolfram - Termoemise
 - ▶ Nejnižší rozlišení
 - ▶ Nenáročné na vakuum
2. LaB6 - Termoemise
 - ▶ Vyšší rozlišení
 - ▶ Potřeba čerpat prostor katody iontovou vývěvou
3. Wolfram - Schottkyho emise

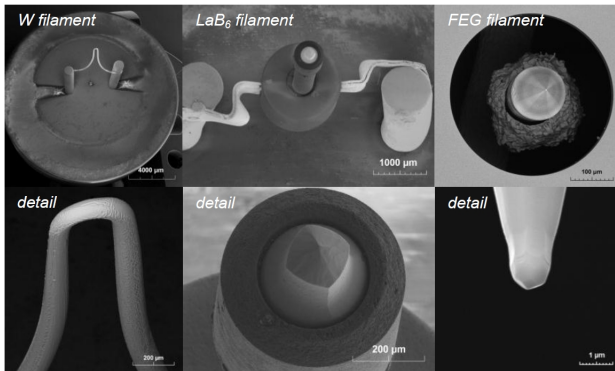
Elektronová tryska - typy emitorů

1. Wolfram - Termoemise
 - ▶ Nejnižší rozlišení
 - ▶ Nenáročné na vakuum
2. LaB6 - Termoemise
 - ▶ Vyšší rozlišení
 - ▶ Potřeba čerpat prostor katody iontovou vývěvou
3. Wolfram - Schottkyho emise
 - ▶ Nejvyšší rozlišení

Elektronová tryska - typy emitorů

1. Wolfram - Termoemise
 - ▶ Nejnižší rozlišení
 - ▶ Nenáročné na vakuum
2. LaB6 - Termoemise
 - ▶ Vyšší rozlišení
 - ▶ Potřeba čerpat prostor katody iontovou vývěvou
3. Wolfram - Schottkyho emise
 - ▶ Nejvyšší rozlišení
 - ▶ Potřeba čerpat prostor katody a tubusu 2 iontovými vývěvami

Elektronová tryska - typy emitorů



Schottkyho emise

- ▶ Ohmický ohřev velmi ostrého hrotu
- ▶ Typicky wolfram

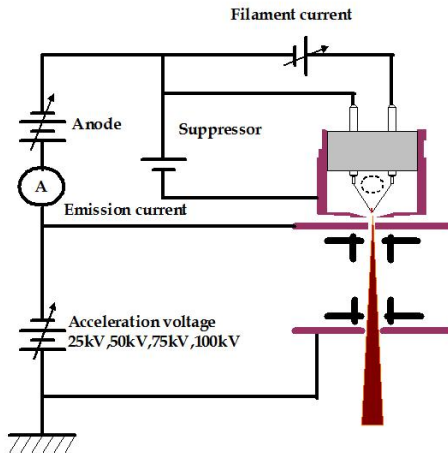
Schottkyho emise

- ▶ Ohmický ohřev velmi ostrého hrotu
- ▶ Typicky wolfram
- ▶ Na povrchu hrotu vrstva ZrO
- ▶ Vysoká intenzita elektrického pole u povrchu hrotu

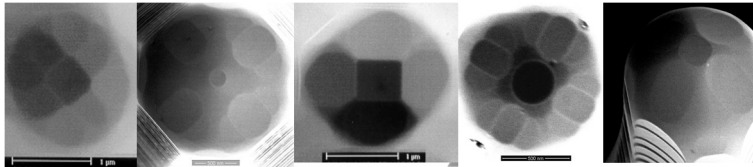
Schottkyho emise

- ▶ Ohmický ohřev velmi ostrého hrotu
- ▶ Typicky wolfram
- ▶ Na povrchu hrotu vrstva ZrO
- ▶ Vysoká intenzita elektrického pole u povrchu hrotu
- ▶ Snížení výstupní práce elektronů z materiálu katody

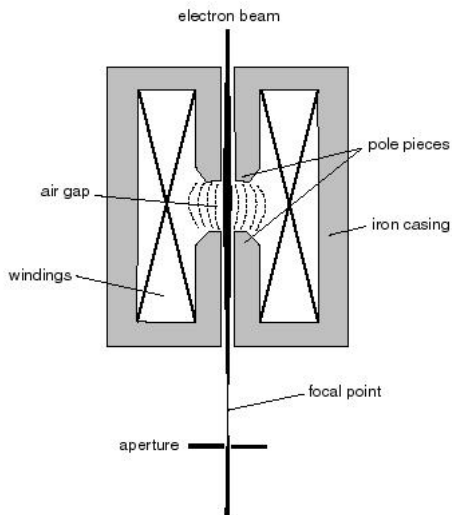
Schottkyho emititor



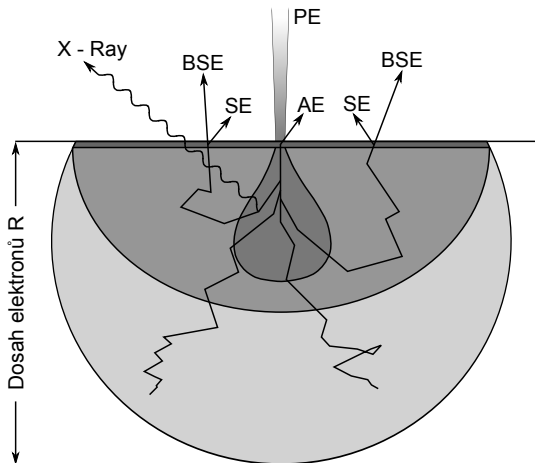
Schottkyho emititor



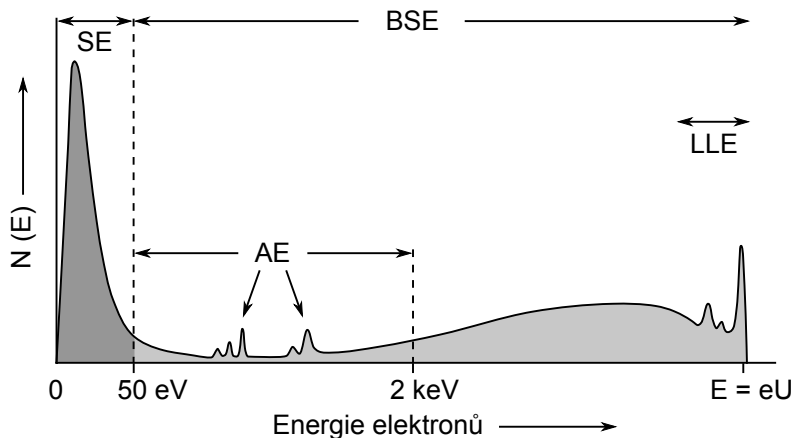
Elektromagnetická čočka



Interakce elektronů se vzorkem

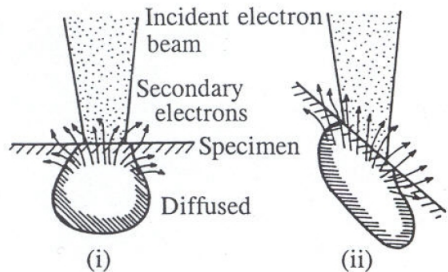


Signální elektrony - energiové spektrum

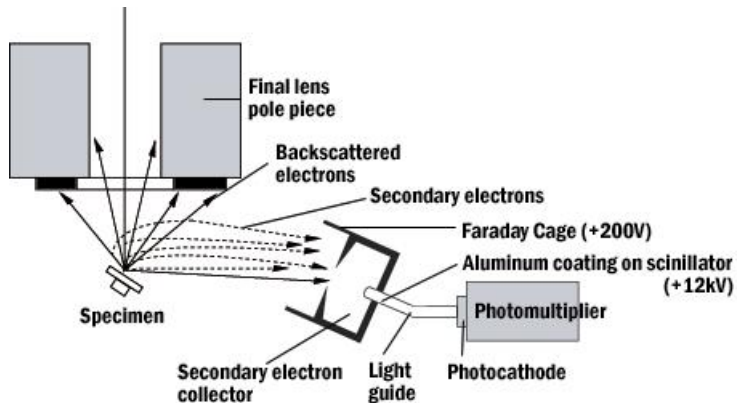


Sekundární elektrony

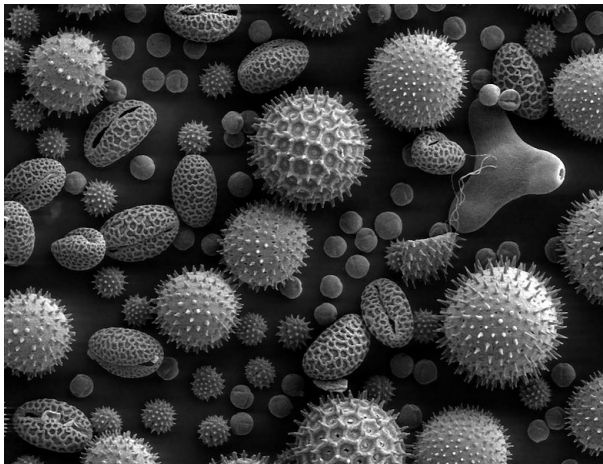
- ▶ Nesou topografický kontrast
- ▶ Intuitivní iterpretace
- ▶ $\delta(\theta) = \frac{\delta_0}{\cos\theta}$
- ▶ $E < 50$ eV



Sekundární elektrony - Everhard-Thornely detektor

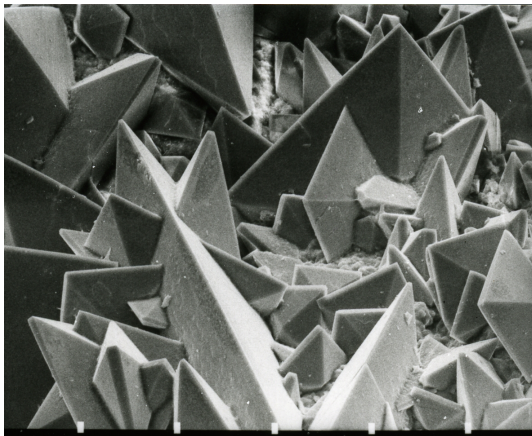


Topografický kontrast - Obrázky



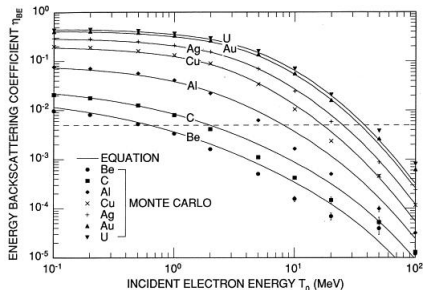
Obrázek: Zrnka pylu v signálu sekundárních elektronů.

Topografický kontrast - Obrázky



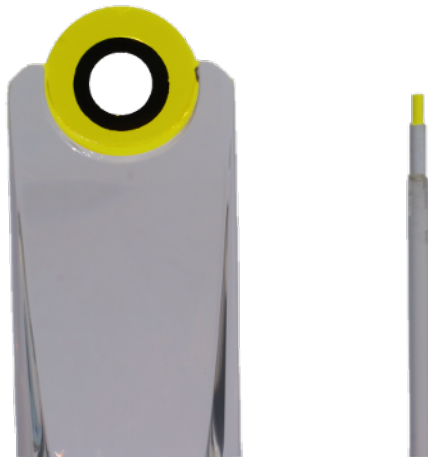
Obrázek: Povrch ledvinového kamene v signálu sekundárních elektronů.

Zpětně odražené elektrony

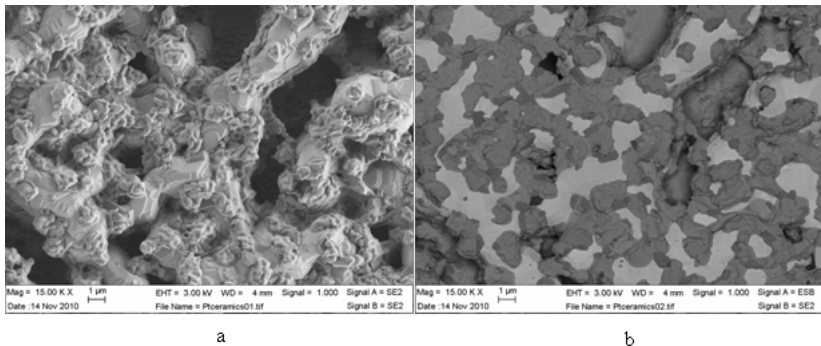


- ▶ Nesou materiálový kontrast
- ▶ Čím vyšší Z, tím vyšší výtěžek
- ▶ $E > 50$ eV
- ▶ Také kanálovací kontrast

BSE detektor



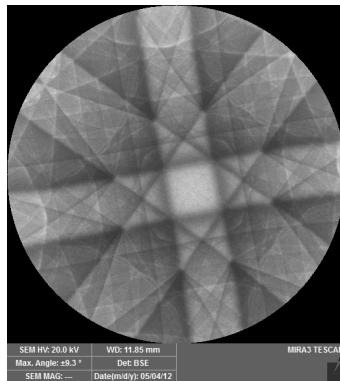
Materiálový kontrast - Obrázky



Obrázek: Srovnání topografického a materiálového kontrastu.

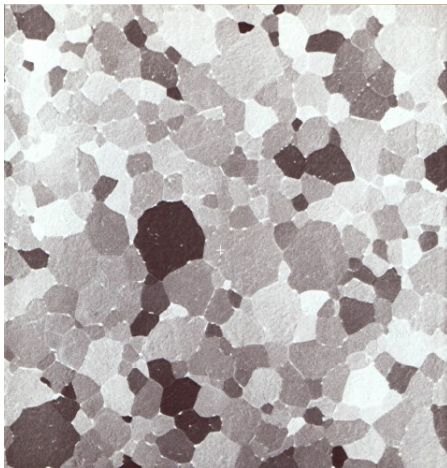
Kanálovací kontrast (BSE)

- ▶ Naklánění svazkem v incidenčním bodu
- ▶ BSE signál na dvojici úhlů
- ▶ Výtěžek závisí na úhlu svazku a krystalografické roviny



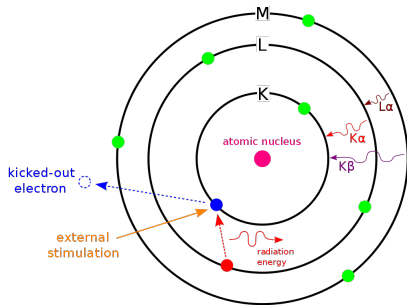
Obrázek: Kanálovací kontrast na c-Si.

Kanálovací kontrast - Obrázky



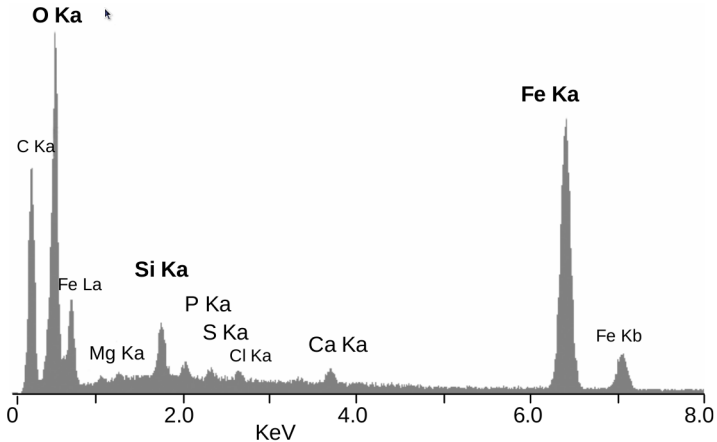
Obrázek: Kanálovací kontrast - různá orientace krystalových zrn (Al+Cu).

X-Ray mikroanalýza



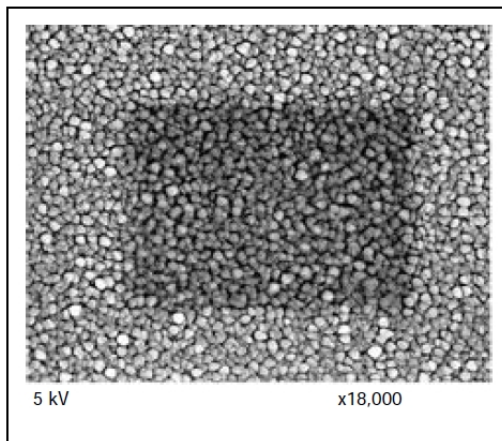
- ▶ Vyražení elektronu z atomu terče
- ▶ Charakteristické rentgenové záření
- ▶ Prvková analýza
- ▶ Poměrně velký informační objem
- ▶ Detektory EDX a WDX

EDX spektrum



Obrázek: Typický příklad zaznamenaného EDX spektra.

Kontaminace



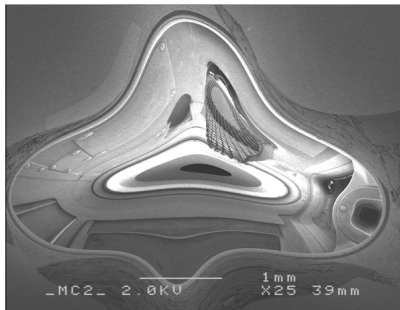
Obrázek: Kontaminace vzorku.

Kontaminace

- ▶ Kontaminace je organická vrstva deponovaná pod elektronovým svazkem
- ▶ Kontaminaci se dá předcházet
 - ▶ Maximální čistota práce uvnitř vakuové komory
 - ▶ Plazmové dekontaminátory
- ▶ Pro vyšší urychlovací napětí kontaminace průhledná

Nabíjení vzorku

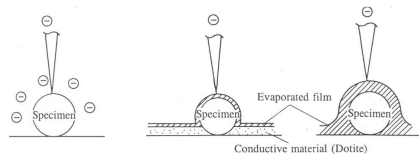
- ▶ Nevodivé vzorky se v elektronovém mikroskopu zpravidla nabíjí



Obrázek: Pozorování nabité kovové mikrotečky svazkem na 2keV.

Nabíjení vzorku - řešení

- ▶ Pokovení vzorku
- ▶ Ztráta jemné topografické informace
- ▶ Nepohodlné

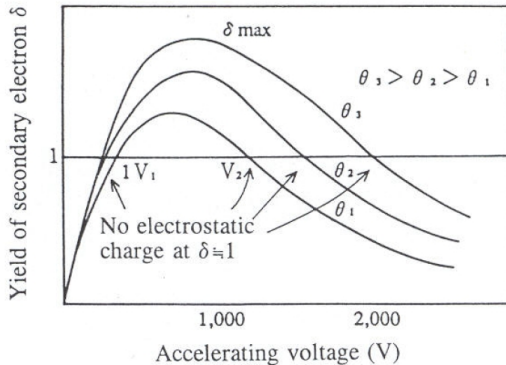


Nabíjení vzorku - řešení

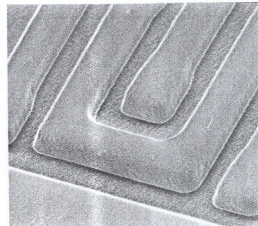
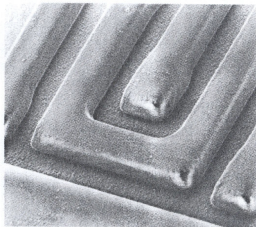
- ▶ Práce v nízkém vakuu
- ▶ Ionizovaný plyn odvádí náboj ze vzorku
- ▶ Potřeba přívodu čistého dusíku nebo vodních par
- ▶ Potřeba speciálního detektoru SE
- ▶ Nižší rozlišení kvůli "skirt efektu"
- ▶ Časově a psychicky náročnější

Nabíjení vzorku - řešení

- ▶ Vyladění urychlovacího napětí
- ▶ Na nízkých HV přestává být nabíjení vzorku problém



Nabíjení vzorku - řešení



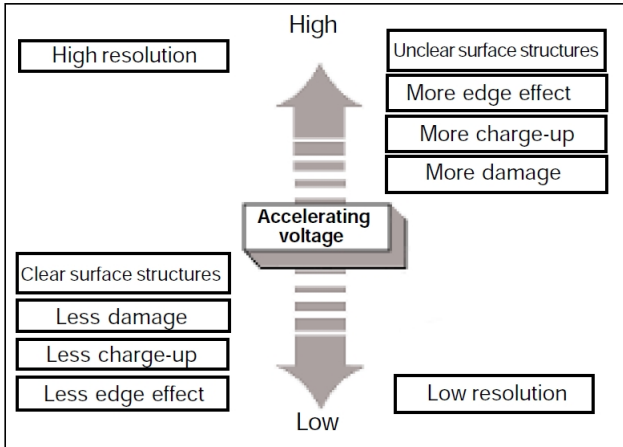
Specimen: Photoresist on an IC pattern
Electrostatic charge is eliminated at an appropriate accelerating voltage.

Obrázek: Nabíjení fotorezistu je eliminováno zvolením správného urychlovacího napětí.

Typické proměnné při práci se SEM

- ▶ Urychlovací napětí (HV - high voltage)
- ▶ Pracovní vzdálenost (WD - working distance)
- ▶ Proud svazkem (BI - beam intensity)

Efekt změny HV



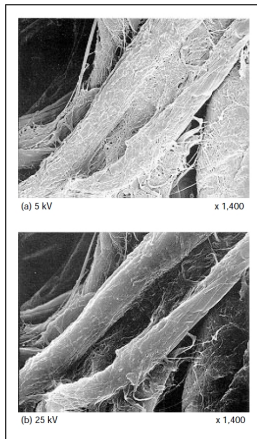
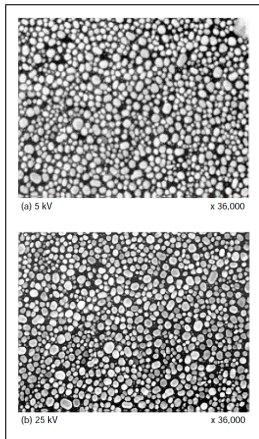
Efekt změny HV

Proč je na vyšším HV vyšší rozlišení?

Chromatická vada:

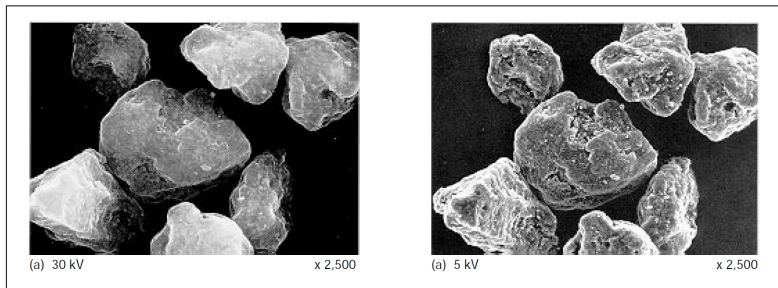
$$d_c = C_c \alpha \left(\frac{\Delta E}{E_0} \right)$$

Efekt změny HV



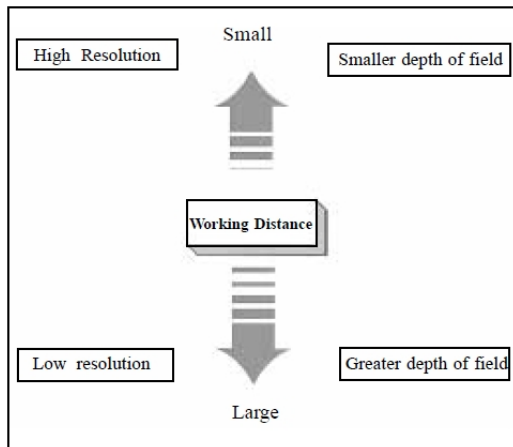
Obrázek: Efekt změny HV na dvou vzorcích (zlato na uhlíku a papír).

Efekt změny HV

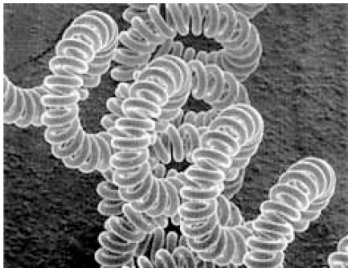


Obrázek: Efekt změny HV na obrázcích toneru.

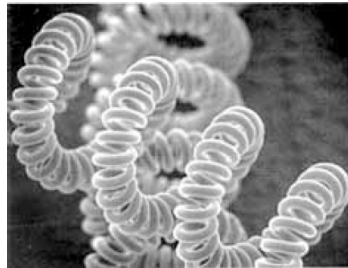
Efekt změny WD



Efekt změny WD

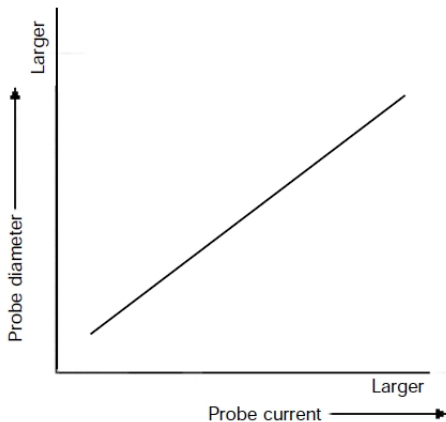


Obrázek: Malá WD, malá apertura, vysoká hloubka ostrosti.

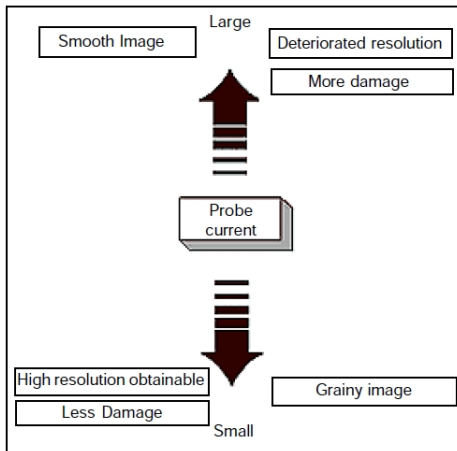


Obrázek: Velká WD, velká apertura, nízká hloubka ostrosti.

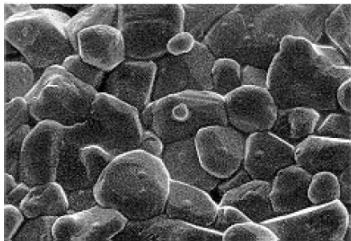
Efekt změny BI



Efekt změny BI

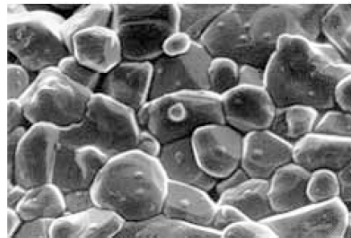


Efekt změny BI



(c) 10 pA

Obrázek: Proud svazkem 10 pA.



(a) 1 nA

Obrázek: Proud svazkem 1 nA.

DĚKUJI ZA POZORNOST

