



# Difrakce elektronů v krystalech, zobrazení atomů



T. Sýkora<sup>1</sup>, M. Lanč<sup>2</sup>, J. Krist<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Gymnázium Českolipská, Českolipská 373, 190 00 Praha 9  
tomas.sykora@email.cz

<sup>2</sup> Gymnázium Otokara Březiny a SOŠ Telč, Hradecká 235, 588 56 Telč  
aris.haf@centrum.cz

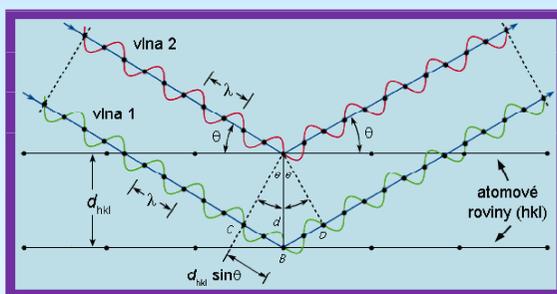
<sup>3</sup> Mendelovo gymnázium Opava, Komenského 5, 746 01 Opava 1  
SO2@seznam.cz

## Difrakcí elektronů v transmisním elektronovém mikroskopu jsme určovali typy krystalových mřížek.

### HISTORIE

- 1895 – W. C. Roentgen – objev RTG záření
- 1905 – A. Einstein - fotoelektrický jev elektromagnetické záření se v některých případech chová jako částice – fotony
- 1912 – M. von Laue – 1. RTG difrakční experiment
- 1914 - W. H. Bragg - W. L. Bragg - zákon difrakce
- 1924 – L. de Broglie – vlnový charakter částic
- 1927 - C. J. Davisson – L.H. Germer - ověření de Broglieho hypotézy
- 1927 – H. Busch – magnetická čočka
- 1930 – E. Ruska - elektronový mikroskop

### BRAGGŮV ZÁKON DIFRAKCE

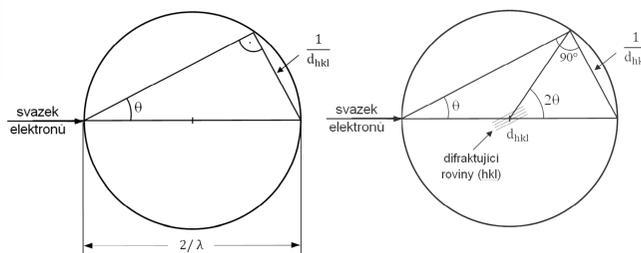


Krystalové roviny o vzdálenosti  $d_{hkl}$  difraktují dopadající záření o vlnové délce  $\lambda$  pod úhlem  $\theta$ ,  $n$  značí řád interference (reflexe).

Matematicky:  $2d_{hkl} \sin \theta = n\lambda$

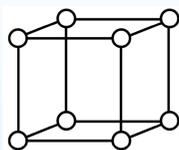
Po úpravě:  $\sin \theta = \frac{1}{2} \frac{d_{hkl}}{\lambda}$

Geometrické znázornění:



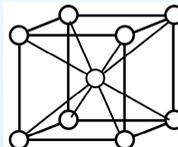
Vzhledem k velmi malé vlnové délce elektronů urychlených napětím 200 kV ( $\lambda = 2,508 \times 10^{-12}$  m) jsou Braggovy úhly v TEM velmi malé ( $\sim 0,5^\circ$ ), úhly  $\theta$  na obrázcích jsou pro názornost významně zvětšeny.

### KUBICKÉ KRYSALOVÉ MŘÍŽKY

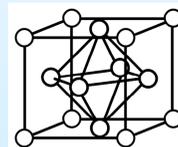


kubická mřížka prostá (primitivní)  
anglicky *simple cubic - sc*  
Po, TiCl<sub>3</sub> ...

kubická mřížka prostorově centrovaná  
anglicky *body centered cubic - bcc*  
 $\alpha$ -Fe, Mo, .....

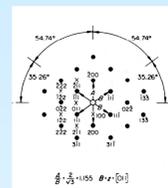


kubická mřížka plošně centrovaná  
anglicky *face centered cubic - fcc*  
 $\gamma$ -Fe Al, Cu, Au, Ni, Ag ...



### INDEXOVÁNÍ DIFRAKTOGRAMŮ MONOKRYSTALU Au

Měření úhlů mezi reflexemi, vzdáleností difrakčních stop a porovnávání se standardními difraktogramy pro různé náklony kubické plošně centrované mřížky.



### INDEXOVÁNÍ KROUŽKOVÝCH DIFRAKTOGRAMŮ POLYKRYSALŮ S VELMI MALÝMI ZRNY ( $\sim 10$ nm)

#### URČOVÁNÍ TYPU KRYSALOVÉ MŘÍŽKY

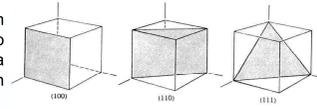
Měření průměru a posloupnosti kroužků, indexování pomocí vztahu pro mezivzrostlou vzdálenost  $d_{hkl}$  v kubické mřížce

$$d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}}$$

Kde  $a$  je velikost elementární buňky krystalové mřížky a  $h, k, l$  jsou Millerovy indexy krystalových rovin.

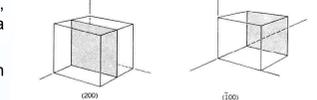
#### Millerovy indexy krystalových rovin

Pokud rovina prochází počátkem souřadného systému, posuneme ji mimo něj a určíme délky úseků, které rovina vytíná na osách definovaných základními vektory mřížky.



Je-li rovina rovnoběžná s některou z os, je příslušný úsek na této ose roven  $\infty$  a převrácená hodnota  $1/\infty = 0$ .

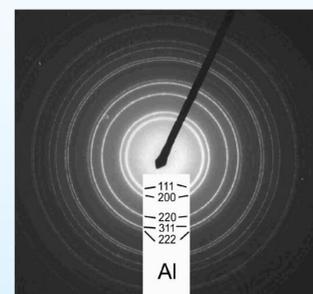
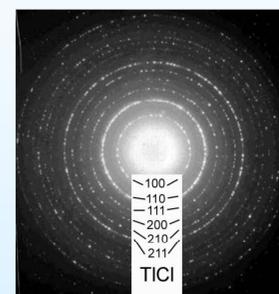
Příklady některých nízkoindexových rovin v kubické mřížce jsou na obrázku.



#### Indexované kroužkové difraktogramy

primitivní mřížka TiCl<sub>3</sub>

plošně centrovaná mřížka Al



V difraktogramu jsou všechny reflexe

V difraktogramu chybí tzv. **zakázané reflexe**, pro které platí, že jejich indexy  $h, k, l$  jsou kombinace lichých a sudých čísel

### TRANSMISNÍ ELEKTRONOVÁ MIKROSKOPIE

Transmisní (prozařovací) elektronová mikroskopie (TEM) umožňuje zobrazit mikrostrukturu uvnitř materiálu v měřítku od několika mikronů až po atomové rozlišení, pomocí elektronové difrakce určit symetrii krystalové mřížky a pokud je mikroskop vybaven příslušnými spektrometry, provést navíc lokální analýzu chemického složení.

#### TEM JEOL 2000FX

( $U = 200$  kV,  $\lambda = 2,508 \times 10^{-12}$  m)

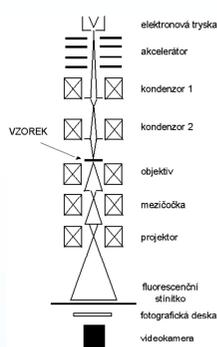
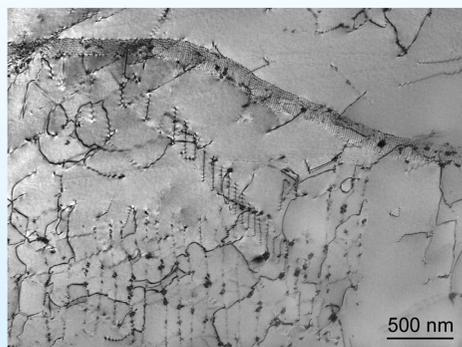


schéma tubusu mikroskopu



Dislokace a precipitáty ve slitině Fe-28Al-5Cr (at.%)

**Závěr:** Měli jsme možnost prohlédnout si 200 kV transmisní elektronový mikroskop, který katedra materiálů FJFI ČVUT využívá na MFF UK. Kromě různých krystalů vhodných pro demonstraci difrakce elektronů jsme na mikroskopu pozorovali i vlastní vzorky nanočástic Ag. Fotodokumentace z tohoto pozorování bohužel nebyla ihned k dispozici (vyvolávání negativů mokrou cestou), a proto jsme ji nemohli v tomto příspěvku využít. Seznámili jsme se se základními typy kubických krystalových mřížek, indexováním krystalových rovin, Braggovým zákonem difrakce a použitím TEM pro zobrazování krystalových poruch a atomové struktury materiálů.

**Reference:** [1] KARLÍK, M., Pohled na atomy: vysokorozlišovací elektronová mikroskopie, *Rozhledy matematicko-fyzikální* 72 (č. 4), 1995, 215-222.  
[2] KARLÍK, M., Transmisní elektronová mikroskopie: pohled do nitra materiálů, *Čs.čas.fyz.* 55, 2005, 457-464.

#### Poděkování

Rádi bychom poděkovali všem organizátorům Fyzikálního týdne na FJFI ČVUT v Praze. Zvláštní dík patří doc. RNDr. Miroslavu CIESLAROVI, CSc., který obsluhoval TEM, Ing. Ondřeji ŠIMKOVI, Dr.-Ing. Petru HAUŠILDŮVI a doc. Dr. RNDr. Miroslavu KARLÍKOVI za pomoc se zpracováním výsledků měření a grafickou úpravou posteru.